

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0330

# 列车碰撞被动安全性与司乘人员 冲击生物损伤研究进展\*

敬霖, 刘凯, 王成全

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 尽管铁路客运列车具有系列的主动安全保障措施, 但列车服役中的意外碰撞事故仍不能完全避免, 并且一旦发生, 将造成严重的人员伤亡和巨大的经济损失。随着列车运行速度的不断提高, 列车碰撞安全与冲击防护问题愈发受到关注和重视, 并已开展了大量的探索和研究。本文中综述了列车碰撞被动安全性与司乘人员冲击生物损伤的若干研究进展。首先, 统计和梳理了近些年的列车碰撞事故, 分析了典型列车碰撞事故中存活人员的生物损伤分布情况; 其次, 介绍了列车碰撞被动安全性的研究方法, 总结了列车碰撞后的响应姿态与脱轨机理; 然后, 从车辆耐撞性设计与评价标准、基于多级能量耗散的吸能结构设计、基于碰撞能量管理的列车结构耐撞性设计三个方面, 详细阐述了列车碰撞被动安全性的研究进展; 最后, 关注了司乘人员在列车碰撞过程中的冲击生物损伤, 总结了相关减轻司机和乘客生物损伤的防护措施。

**关键词:** 列车碰撞; 被动安全; 碰撞能量管理; 耐撞性设计; 冲击生物损伤

中图分类号: O389; U270.1 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Recent advances in the collision passive safety of trains and impact biological damage of drivers and passengers

JING Lin, LIU Kai, WANG Chengquan

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** Despite a series of active safety precautions have been adopted by railway passenger trains, train collision accident cannot be completely eliminated in service, resulting in serious casualties and huge economic losses once it happened. With the continuous increase of train speed, the train collision safety and relevant impact protections have been paid more attention, and numerous related explorations have been carried out by domestic and foreign scholars. This paper reviews recent advances in the passive safety of train collisions and impact biological damage of drivers and passengers. First, the train collision accidents at home and abroad in recent years are summarized, and the biological damage distributions of survivals in a certain train collision accident are analyzed. Secondly, the main research approaches of collision passive safety of trains are illustrated, including numerical simulation, experimental investigation, and theoretical analysis, while the response attitudes and derailment mechanisms during the train collision process are outlined. Thirdly, the research progress of the collision passive safety of trains are elaborated, in terms of the design and evaluation standards of vehicle crashworthiness, energy-absorbing structural design based on multistage energy dissipation, train structural crashworthiness design based on collision energy management. Finally, the impact biological damage of drivers and passengers in train collisions are emphasized, and the related protective measures of reducing the biological damage of drivers and passengers are presented. Through the above overview, some suggestions are put forward for further studies: (1) the applicability of the existing crashworthiness standards for trains

\* 收稿日期: 2021-07-31; 修回日期: 2021-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(12122211)

通信作者: 敬霖(1984—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, [jinglin@swjtu.edu.cn](mailto:jinglin@swjtu.edu.cn)

needs to be further explored under the increased train speed; (2) the theoretical study on train collision is still scarce, and the collision theory of high-speed train should be further developed; (3) how to effectively learn from and refer to the mature experience of the automobile collision still needs systematic and in-depth investigation; and (4) the design and evaluation method of train passive safety based on the impact biological damage of drivers and passengers should be explored.

**Keywords:** train collision; passive safety; collision energy management; crashworthiness design; impact biological damage

铁路客运列车安全性通常分为主动安全性和被动安全性两个部分。列车主动安全是指列车运行中避免发生事故的能力, 主要涉及信号和列车控制系统、地界安全防护、公路平交道口报警和保护系统、制动系统设计及其性能、运营规则和运营人员培训等 6 个方面<sup>[1]</sup>。而列车被动安全是当列车发生碰撞事故时, 通过车辆吸能结构塑性变形来耗散和调控碰撞能量, 减小司乘人员冲击生物损伤, 从而有效减少人员伤亡和财产损失<sup>[2-6]</sup>。列车提速和高速化的迫切需求及其高安全性和可靠性保障需求, 给列车碰撞安全与冲击防护提出了更苛刻的要求。

列车被动安全性研究可以追溯到 20 世纪 80 年代, 欧美国家相关研究机构对机车车辆的碰撞安全开展了大量的研究工作<sup>[7]</sup>。1988 年, 伦敦克拉珀姆枢纽站列车碰撞事故后, 英国铁路公司(BR)率先成立了列车被动安全性研究机构, 基于试验和理论提出了耐撞性轨道车辆的设计方法与要求, 即: 司机室前端在约 1 m 有效行程上需吸收总能量约 1 MJ, 平均压溃载荷需达到 3 MN(动车组)或 4 MN(机车)<sup>[8]</sup>。自 20 世纪 90 年代开始, 欧盟(EU)开始主导轨道车辆的被动安全性研究。在 TrainCol(1991 年)、SafeTrain(1997 年)、SafeTram(2001 年)、SafeInteriors(2006 年)等多个项目的资助下, 法国国营铁路公司、德国铁路公司、法国阿尔斯通、德国西门子等多个铁路研究机构联合攻关, 在耐撞性设计工具开发、列车被动安全技术、城轨电车被动安全技术、列车内饰被动安全性技术等方面进行了系统的研究, 形成了欧洲标准“铁路应用-铁路车辆车体的耐撞性要求”(EN15227: 2008)<sup>[9]</sup>。20 世纪 90 年代, 美国联邦铁路局(FRA)开始评估服役车辆的耐撞性能, 并探索车体结构的耐撞性优化措施。自 1999 年开始, 美国 Volpe 国家交通系统中心在科罗拉多开展了一系列的实车碰撞试验, 包括单辆车-刚性墙、车辆-车辆、列车-列车、平交道口碰撞等多种碰撞场景, 并从 2003 年开始相继开展了基于碰撞能量管理(CEM)设计优化后的单车辆、车辆-车辆和列车-列车碰撞试验<sup>[10-14]</sup>。日本作为世界上最早发展高速铁路的国家(1964 年), 早期并没有开展较系统的列车耐撞性研究, 直到 1994 年, 才开始对 E217 系列电动车组头车进行优化设计, 将头车端部结构分为前端“易变形区域”和后端“生存区域”, 实现有效保护乘员的目的<sup>[15]</sup>。

我国在列车碰撞被动安全性方面的研究起步较晚, 早期的研究主要集中在列车碰撞仿真模拟及部件级碰撞试验方面。中南大学<sup>[16]</sup>搭建了列车部件级碰撞试验平台, 开展了多个承载结构的试验研究, 提出了车体结构沿纵向变刚度布置的耐碰撞车体设计方法。中国铁科院<sup>[17-18]</sup>对铁路客车碰撞后的爬车、脱轨等行为进行了分析, 基于车内乘员损伤情况设计了新型耐撞性车体结构。北京交通大学<sup>[19-21]</sup>基于车体速度、加速度、变形、能量变化趋势等分析了地铁车辆的耐撞性, 评估了站姿乘员和坐姿乘员在二次碰撞中的损伤情况, 建立了假人响应物理参数与损伤等级的对应关系。同济大学<sup>[22]</sup>提出了高速客车轻量化车体结构耐撞性设计的优化策略, 并采用模块化技术进行了耐撞击车辆结构模块化划分与设计。西南交通大学<sup>[23-25]</sup>对列车吸能部件、车体耐撞性及司乘人员损伤情况开展了研究, 设计了组合双层壳结构、翻转圆管和刀具切削等吸能装置。中国科学技术大学<sup>[26]</sup>对高速列车端部吸能结构开展了耐撞性分析与设计, 并基于一维应力波理论建立了考虑车厢中弹性波传播影响的列车分布式吸能系统简化理论模型。近些年, 中车集团各车辆厂相继开展了实车碰撞试验。青岛四方机车车辆股份有限公司于 2017 年建成了可覆盖元部件-整车的轨道车辆碰撞试验台, 并在 2019 年开展了 76 km/h 速度的高速列车车辆级碰撞试验。长春轨道客车股份有限公司于 2021 年完成了两列 8 编组高速动车组碰撞试验, 这是世界首次在实际工况场景下进行的整车被动安全碰撞试验。

上述在列车碰撞被动安全性设计、分析与评估方面的研究, 为提升高速列车被动安全性能提供了重要的理论和技术支撑。本文中将从列车碰撞事故统计与分析、被动安全性研究方法、碰撞响应姿态及脱

轨机理、列车系统耐撞性设计与评估、司乘人员冲击生物损伤等方面,介绍列车碰撞被动安全性的若干研究进展,旨在为后续相关研究提供参考。

## 1 列车碰撞事故统计与分析

安全是铁路领域永恒的话题。由于铁路运输是个庞大复杂的系统工程,实际运营过程中涉及复杂的环境、管理和控制等因素,而任何人为或自然环境因素都可能导致车毁人亡的灾难性列车碰撞事故。铁路系统中尽管采取了大量安全保障措施,但重大铁路列车碰撞事故在世界各地仍时有发生,如图 1 所示<sup>[27-32]</sup>。一旦发生碰撞事故,列车运行过程中携带的巨大能量将作用于头车和各车厢,极易导致车辆发生爬车、倾覆、脱轨、掉线等失稳行为,同时车身将发生穿透、挤压和撕裂破坏等现象,继而造成重大人员伤亡和财产损失。表 1 中给出了近些年发生的典型列车碰撞事故案例。可以看出,即使是法国、德国、美国、日本等铁路发达国家,列车碰撞事故也是时有发生、难以完全避免,并且列车碰撞事故造成的人员伤亡惨重、经济损失巨大。



图 1 铁路列车碰撞事故(图片来自网络)<sup>[27-32]</sup>

Fig. 1 Collision accidents of railway vehicles (figures from the website)<sup>[27-32]</sup>

以灾难流行病学研究中心(Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, CRED)公布的数据库资料为依据<sup>[33]</sup>,统计了 1900~2019 年间各大洲铁路事故伤亡人数,如图 2 所示。可以看出,在过去 119 年间全球共发生铁路事故 630 余起,死亡约 2.8 万人,受伤超过 5.9 万人。其中亚洲是铁路事故的重灾区,铁路事故数量、死亡人数和受伤人数在各大洲中约占 44.4%、44.2% 和 43.6%,均位列第一。

基于维基百科的中国铁路事故数据<sup>[34]</sup>,图 3(a)中统计了 1950~2020 年间我国铁路事故类型和人员伤亡情况。近半个多世纪以来,我国有约 6000 人在列车碰撞、脱轨、倾覆和爆炸/火灾等铁路事故中死亡或受伤。其中,由列车碰撞造成的死亡人数约占我国铁路事故总死亡人数的三分之一以上,受伤人数占比二分之一以上。一般地,列车碰撞事故中通常存在正面碰撞、侧面碰撞、追尾撞击、平交道口碰撞等类型。我国铁路列车碰撞事故主要以正面碰撞和追尾撞击

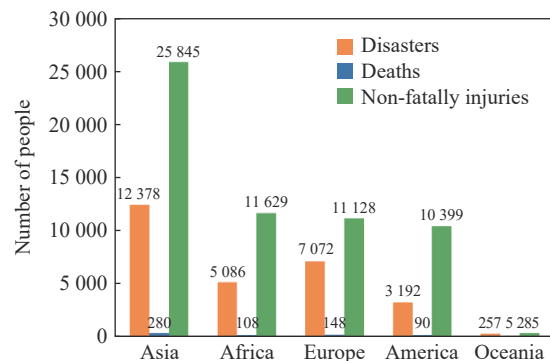


图 2 1900~2019 年间各洲铁路事故伤亡人数<sup>[33]</sup>

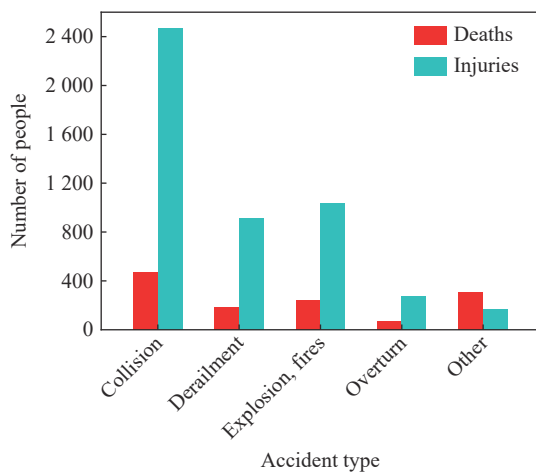
Fig. 2 Statistics of injuries and deaths in global railway accidents from 1900 to 2019<sup>[33]</sup>

为主, 其中追尾碰撞造成的死亡人数和正面碰撞造成的受伤人数在各类型列车碰撞事故中占比最高, 如图 3(b)所示。

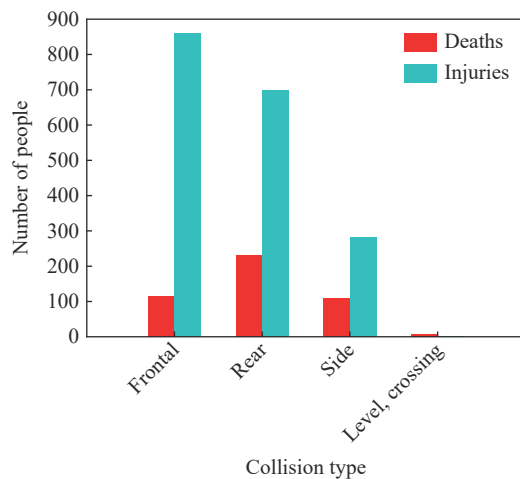
表 1 近些年典型的列车碰撞事故(数据源自网络)

Table 1 Typical train collision accidents in recent years at home and abroad (data from the website)

年份	国家	事发地点	碰撞类型	事故后果
1988	法国	巴黎里昂车站	客车撞击静止列车	56人死亡、57人受伤
1997	中国	京广线湖南境内	客车追尾碰撞	126人死亡、230人受伤, 直接经济损失超过415.53万元
1999	印度	盖萨尔火车站	客车正面碰撞	超过500人死亡、近1000人受伤
2005	巴基斯坦	信德省格特基地区	追尾脱轨后与第3列客车碰撞	150人死亡、约1000人受伤
2005	日本	JR福知山线	客车脱轨后撞击大楼	107人死亡、562人受伤
2007	法国	邻近瑞士边境	客车撞击货车	1人死亡、35人受伤
2008	法国	阿尔卑斯山阿兰日镇	客车撞击校车	7人死亡、25人受伤
2008	美国	洛杉矶	客车撞击货车	25人死亡、135人受伤
2009	中国	京广铁路郴州站	客车侧面碰撞	3人死亡、63人受伤
2011	中国	甬温线浙江境内	客车追尾碰撞	40人死亡、200多人受伤, 直接经济损失超过1.93亿元
2012	德国	法兰克福东部郊区	客车撞击工程车	3人死亡、13人受伤
2013	瑞士	沃州格朗日地区	客车正面碰撞	1人死亡、35人受伤
2013	西班牙	圣地亚哥附近	客车脱轨后撞击护栏	至少77人死亡、143人受伤
2015	瑞士	苏黎世州拉夫兹站	客车追尾碰撞	至少50人受伤
2016	德国	慕尼黑巴特艾布灵镇	客车正面碰撞	11人死亡、80余人受伤
2017	西班牙	马德里附近	客车撞击障碍物	45人受伤
2017	德国	北威州	客车撞击货车	约50人受伤
2018	美国	南卡罗来纳州	客车正面撞击货车	至少2人死亡、百余人受伤
2019	日本	神奈川县	客车撞击卡车	1人死亡、约32人受伤
2021	中国	台湾花莲大清水隧道	客车侧面撞击工程车	49人死亡、近200人受伤
2021	巴基斯坦	信德省戈特基地区	脱轨后撞击客车	至少36人死亡、超过70人受伤



(a) Types of railway accidents and casualties



(b) Types of train collision accident and casualties

图 3 1950~2020 年间我国铁路事故伤亡人数<sup>[34]</sup>

Fig. 3 Statistics of injuries and deaths in railway accidents in China from 1950 to 2020<sup>[34]</sup>

列车碰撞事故中,外力及惯性、离心力引起的钝器伤是导致司乘人员受伤的主要原因。闻浩等<sup>[35]</sup>以我国“7·23”甬温线高速动车组追尾事故为例,统计了列车碰撞事故中存活伤员的损伤特点及受伤部位分布情况,如表 2 所示。可以发现,乘员受伤部位主要以体表软组织挫伤或裂伤为主,约占 46.07%;而实质性损伤部位主要以胸部为主(约占 13.99%),其余损伤部位按占比高低依次是四肢、脊柱、颅脑、腹部等。胸部和脊椎损伤的人数较多可能与此次列车碰撞事故特点(追尾撞击)有关—被撞列车中的乘员大多处于坐姿或站立状态,而撞击列车中的乘员普遍处于坐姿或卧姿状态。此外,还发现撞击伤、挤压伤以及重物坠落砸伤是此次列车碰撞事故中乘员受伤的主要原因,且多发伤发生率较高(占比接近 80%),而死亡伤员中颅脑损伤是致死的主要原因,且多发伤发生率为 100%。

表 2 “7·23”甬温线动车碰撞事故中存活伤员受伤部位分布情况<sup>[35]</sup>

**Table 2 Distribution of injured parts of the survivors in EMU collision accident on Ningbo-Wenzhou railway line<sup>[35]</sup>**

受伤部位	颅脑	颌面	颈	胸	腹	脊柱	骨盆	四肢	体表
人数	16	15	5	41	13	26	7	35	135
占比/%	5.46	5.12	1.71	13.99	4.44	8.87	2.39	11.95	46.07

从以上铁路事故及人员伤亡情况统计可以看出,列车碰撞事故导致的伤亡人数在我国铁路事故类型中占比最高,对人民生命和财产安全的危害最大。随着列车运行速度不断提高和载重的增加,巨大的碰撞能量将会进一步增加列车碰撞所导致的灾难性损失。因此,提升列车碰撞被动安全性能变得越来越重要。

## 2 列车碰撞被动安全性研究方法

与汽车碰撞相比,列车碰撞兼具材料、几何和接触非线性等典型的碰撞动力学非线性特征。但是,由于列车具有多编组、大质量、动力分散、(乘员)无约束等特点,因此列车碰撞又是一个多质点动力学问题,具有多种形式的响应姿态(如脱轨、爬车、侧翻、褶曲和垂直拱起)和复杂的动态失稳行为(纵向、横向和垂向相互影响和耦合)。目前,由于列车系统的复杂性、碰撞工况的多样性以及边界条件的不确定性,列车碰撞理论建模影响因素很多、难度极大,因此数值模拟和试验研究成为研究列车碰撞被动安全性的主要手段<sup>[3-4]</sup>。

### 2.1 数值仿真

目前针对列车碰撞被动安全性的仿真研究,主要有多刚体动力学仿真、有限元模拟以及有限元和多体动力学联合仿真等方法。早期的列车碰撞仿真研究主要采用多体动力学方法<sup>[36]</sup>(见图 4(a)),采用刚体来模拟转向架、车体、车内座椅和假人等,通过不同接触模型定义各刚体之间的相互作用,依据穿透量和接触特性来计算作用力的大小。在列车结构的概念设计中主要关心加速度、变形和能量吸收等结果,刚体模型是适用的。Dias 等<sup>[37]</sup>提出了一种基于多体动力学模型和优化算法相结合的列车耐撞结构设计方法。Zhu 等<sup>[38]</sup>通过确定描述车辆动态刚度的特征参数建立了地铁车辆正面碰撞集总参数模型,该模型为轨道车辆安全设计提供了一种简单有效的概念设计方法,显著提高了计算效率。

尽管多体动力学仿真具有建模简单、计算效率高等优势,但在求解列车碰撞等高频问题时仍具有一定的局限性,比如忽略了动态效应,不能很好地考虑几何、材料和接触非线性的高度耦合,无法直接求解应力/应变状态等。而显式有限元方法在解决上述问题的同时,可实现列车系统和吸能结构的详细建模(见图 4(b)),能够求解车体撞击变形量、动态响应特征、能量耗散及司乘人员冲击生物损伤等<sup>[39]</sup>。Koo 等<sup>[40]</sup>采用有限元方法对韩国高速列车(KHST)耐撞性能进行了深入的研究,结果发现该列车具有良好的抗撞击性能,能够较好地保护乘员。Xue 等<sup>[41-42]</sup>基于有限元分析探究了某型轨道车辆结构特性对列车耐撞性的影响,结果表明车辆结构的刚性部分(如车体支撑)可能会导致车辆截面之间的不协调变形和剪切断裂。然而由于列车结构复杂且尺寸较大,对其进行网格离散后的非线性有限元计算模型规模很大,计算

耗时长且计算资源成本高。因此,周和超等提出采用有限元与多体动力学联合仿真的方法(见图 4(c))进行列车碰撞被动安全性研究<sup>[43]</sup>。这种方法的主要思想是先通过有限元模拟得到列车端部的非线性特性,再将此特性引入多刚体动力学中模拟列车端部结构,而其余部分仍使用刚体模拟。总体来说,数值仿真方法是研究列车碰撞被动安全性的一种有效手段,具有经济、便捷、可操作性强等优点,可弥补试验研究中存在的重复性差、周期长等不足。

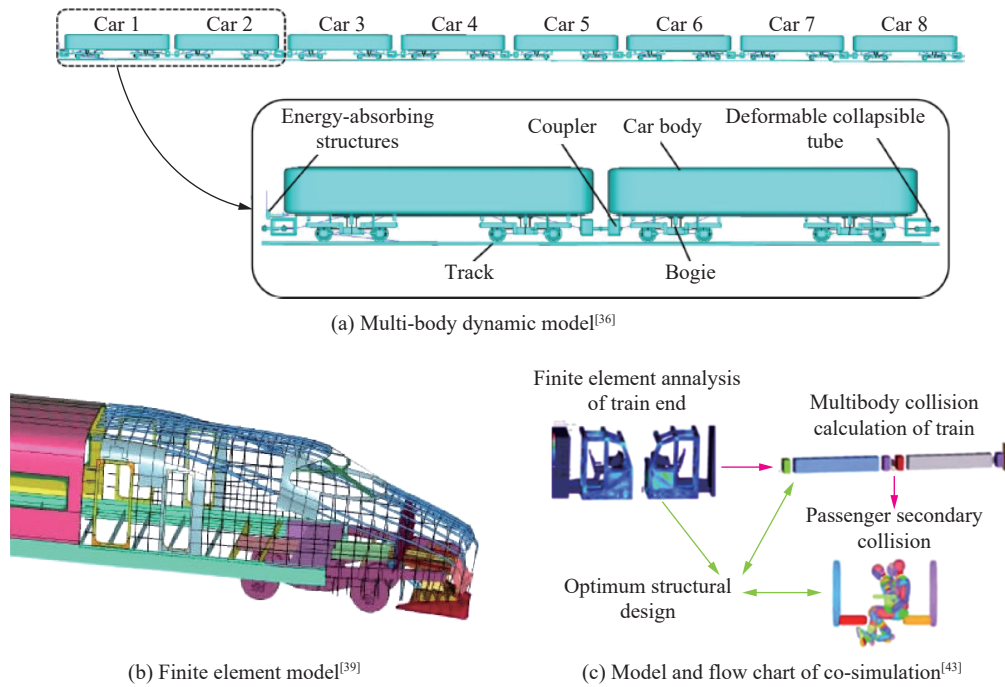


图 4 列车碰撞数值仿真模型

Fig. 4 Numerical simulation models of train collision

## 2.2 试验研究

目前,相关研究机构已相继建立了多个轨道车辆碰撞试验线及试验平台,开展列车碰撞被动安全性试验研究。美国从 1999 年 11 月开始在科罗拉多的交通运输技术中心试验环线(如图 5(a))上开展了多次车辆级碰撞试验,最高试验速度为 75 km/h<sup>[10]</sup>。波兰日米格鲁德试验中心的环形碰撞试验线可开展大部件结构及实车碰撞试验<sup>[44]</sup>,如图 5(b)。此外,波兰华沙的车辆部件级撞击试验台利用坡道方式进行试验车驱动,试验速度可达 40 km/h,如图 5(c)所示<sup>[45]</sup>。英国汽车工业研究协会实验室在长马斯顿建有车辆碰撞的试验平台,此试验线由长马斯顿已有的废弃铁路线改造而成,试验中采用机车推进方式,开展了两种不同工况的碰撞试验,即:两列车以 36 km/h 的相对速度对撞和列车以 36 km/h 的速度撞击 80 t 的货车<sup>[45]</sup>。

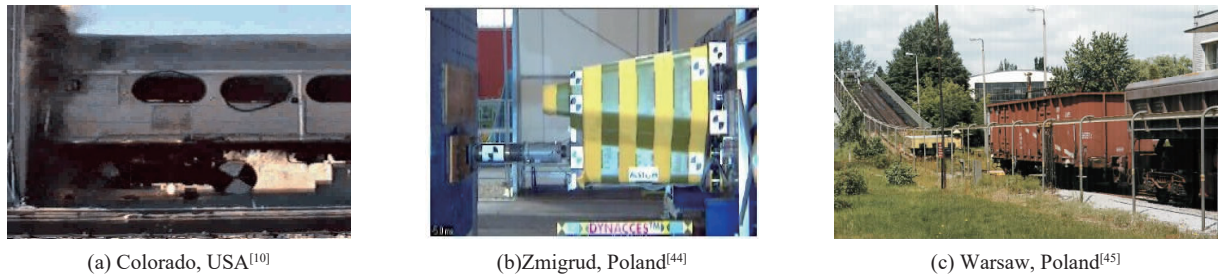


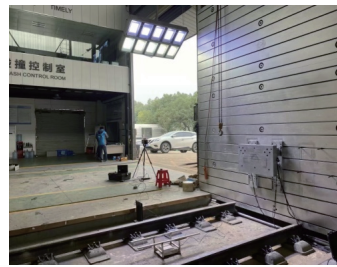
图 5 国外列车碰撞试验线

Fig. 5 Test lines of vehicle collision abroad

中南大学是我国最早开展列车碰撞被动安全性研究的单位之一, 研发了集中央控制、驱动、制动、实车及大吨位台车、刚性墙和数据采集装置于一体的轨道车辆部件实物碰撞试验系统, 可获得列车界面碰撞力、塑性变形、测点位移、速度、加速度和能量吸收等结果, 如图 6(a) 所示。该试验系统具体参数如下: 全长 88 m, 最大碰撞速度 120 km/h, 发射总动能 13 MJ, 最大碰撞质量 150 t, 末端刚性墙可承受 2500 t 碰撞力<sup>[46-47]</sup>。中车青岛四方机车车辆股份有限公司于 2017 年建成了可覆盖元部件-整车的轨道车辆碰撞试验台, 可用于轨道车辆部件、单节车、三编组车的碰撞试验, 最高试验速度可达 150 km/h、最大牵引质量 180 t, 如图 6(b) 所示<sup>[48-49]</sup>。2021 年, 中车长春轨道客车股份有限公司完成了两列 8 辆编组高速动车组碰撞试验, 这是世界首次在实际工况场景下进行的碰撞被动安全试验, 为我国高速列车被动安全前沿技术研究积累了宝贵的数据。



(a) Collision test system for railway vehicle components in Central South University



(b) Collision test rig for railway vehicle in Qingdao Sifang, CRRC (figure from the website)<sup>[49]</sup>

图 6 我国的列车碰撞试验台

Fig. 6 Test beds of railway vehicle collision in China

虽然全尺寸列车模型是碰撞被动安全性试验研究中最可靠的方法, 但由于成本高、安全风险大, 因此研究者探索采用合适的比例模型来开展列车碰撞试验研究。中南大学组建了可模拟最大比例 1 : 7、最高速度 100 km/h、两列 8 编组列车互撞、爬车、跳车等碰撞场景的列车碰撞缩比试验台<sup>[50]</sup>。Lu 等<sup>[51]</sup>在实车碰撞试验台上开展了原型车碰撞试验, 提出了一种适用于高速列车力/刚度等效模型缩放的新方法, 通过对吸能/未变形部件的全比例缩放构建如图 7 所示的头车比例模型, 并通过数值模拟验证了比例模型和原始模型在变形、加速度和能量吸收等碰撞结果方面的一致性。Yu 等<sup>[52]</sup>基于加速度一致性原则提出了列车碰撞的比例相似规律, 指出如果不同比例列车的质量与初始碰撞速度、压溃力和初始长度的相似比满足比例相似规律的要求, 则认为各比例列车的冲击加速度是一致的。然而, 由于列车结构复杂、量纲分析难度较大, 对于碰撞模型相似律的验证, 宜



图 7 列车碰撞 1 : 8 缩比模型<sup>[51]</sup>

Fig. 7 Scaled-model of vehicle collision<sup>[51]</sup>

采用全尺寸模型试验和数值模拟相结合的手段进行分析。此外, 列车碰撞模型比例相似律仅在只发生塑性变形(未出现破坏)的条件下成立, 当列车结构出现失效(裂纹、剪切或撕裂等)时, 会影响比例模型的准确性; 对于由应变率敏感材料构成的、具有非线性载荷-位移特性的结构而言, 其并不一定满足比例缩放规律<sup>[53]</sup>。

明显地, 试验研究可以直接获得列车碰撞的特征响应参数以及列车碰撞后可能出现的各种响应姿态, 是最有效、最具说服力的研究手段。但是, 一方面, 列车碰撞试验破坏性大、重复性差、危险性高, 另一方面, 列车碰撞试验通常需要国家或行业层面的统筹规划、通力合作、协同攻关, 成本极高且试验周期长, 因此目前列车碰撞试验研究大多是针对部件级吸能结构, 列车级的实车碰撞试验较少。

### 2.3 理论分析

目前对列车碰撞力学行为的理论研究还很缺乏, 鲜有的一些研究也是基于车辆系统纵向动力学理论的列车碰撞建模研究。田红旗等<sup>[54]</sup>采用多质点系统动力学理论和 Lagrange 方程建立了列车一维(纵向)碰撞动力学理论模型, 对列车碰撞过程中车体结构产生塑性变形的机理开展了理论分析, 为研究列车纵向撞击规律和车体结构动态响应以及设计变刚度耐撞性车体提供了有益的参考。卢毓江等<sup>[55]</sup>为研究列车碰撞响应机理, 基于多体动力学方法发展了包括轨道子系统、轮轨子系统、车钩缓冲防爬子系统以及车辆子系统的列车纵向-垂向耦合碰撞动力学模型, 通过轮轨关系子系统和钩缓-防爬器子系统的纽带作用, 将列车耦合成一个相互作用、相互反馈的系统, 最后将建立的耦合碰撞动力学方程进行显式时域求解, 并通过与试验和仿真数据进行比较验证了模型的合理性。但是, 该模型是在平面碰撞假设下提出的, 仅能分析列车碰撞产生的爬车和跳轨等失稳现象, 不能反映车辆发生横向碰撞时的响应关系。最近, Ding 等<sup>[56]</sup>基于一维应力波理论建立了考虑车厢中弹性波传播影响的列车分布式吸能系统简化理论模型(见图 8), 对列车碰撞过程中各吸能结构的响应特征进行了理论分析, 得到了相关控制方程并进行求解。在此基础上, 探讨了相邻吸能结构的平台应力分布对系统吸能特性的影响, 并以总吸收能量最大为目标开展了吸能结构的参数优化设计。该分析方法可直接应用于求解各种不同碰撞工况下的响应特征, 并按总吸能量、吸能作用时间、车厢减速度等设计标准, 通过改变吸能器的设置得到最优解, 可指导列车分布式吸能系统的设计与优化研究。

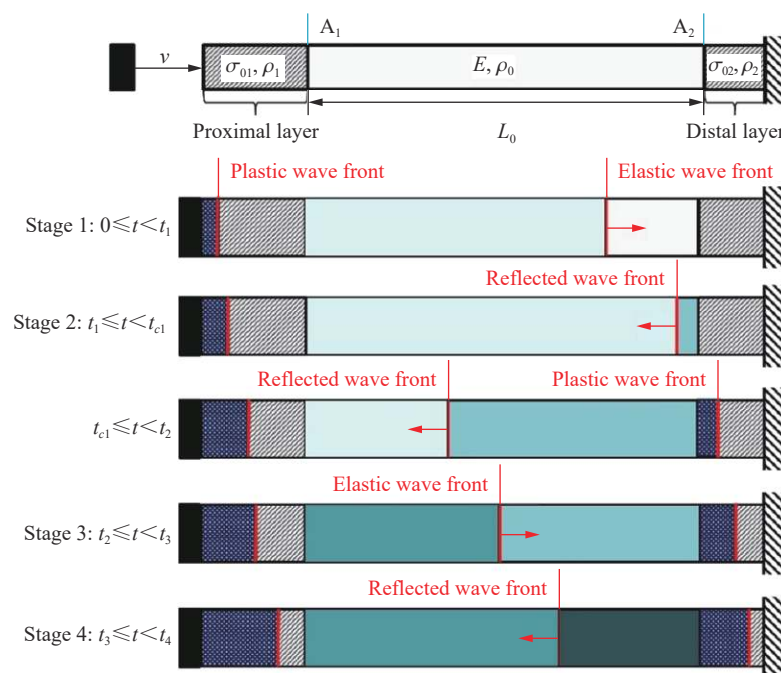


图 8 列车碰撞变形过程和应力波传播的简化理论模型<sup>[56]</sup>

Fig. 8 A simplified theoretical model for train collision deformation process and stress wave propagation<sup>[56]</sup>



### 3 列车碰撞响应姿态及脱轨机理

列车发生碰撞后的动态失稳行为受到横向、纵向和垂向 3 个方向的耦合影响,会出现不同的碰撞响应姿态,造成列车脱轨、侧翻、爬车等危险行为。因此,开展列车碰撞后响应姿态及脱轨机理研究,可为列车耐撞性设计与结构优化提供技术指导。

#### 3.1 列车碰撞响应姿态

列车发生碰撞后出现的响应姿态大致可分为以下 5 类(见图 9): (1) 正面碰撞——列车在轨道上加速或减速同时伴随着车辆端部的压缩,乘客在冲击方向上由于加速或减速而与车内座位可能发生二次碰撞; (2) 爬车——撞击列车端部底架结构骑在被撞击列车前端车辆的底架上,或撞击/被撞击列车中的某一节车厢骑在相邻车厢上,导致被压车辆端部结构严重破坏; (3) 垂直拱起(或垂向褶曲)——车辆绕与轨道垂直的水平轴线发生转动; (4) 褶曲(横向折曲)——车辆绕与轨道垂直的轴线转动; (5) 翻转——通常出现在冲击速度较高的情况下,车辆碰撞后发生倾覆并与轨道成一定角度,这种情况下乘客可能在车厢内部被扔出一段距离,甚至被抛出车外<sup>[57]</sup>。

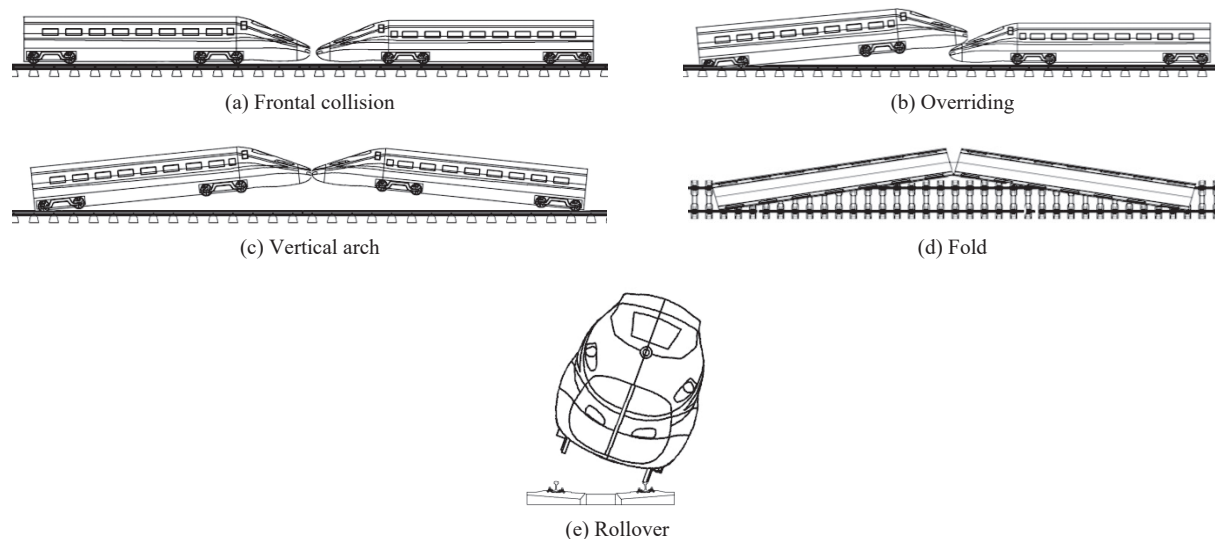


图 9 列车碰撞响应姿态示意图<sup>[57]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of response posture during train collision<sup>[57]</sup>

列车正面碰撞可能导致爬车、拱起和褶曲等行为,严重时甚至会造成列车脱轨等次生灾害<sup>[58-59]</sup>。Han 等<sup>[60]</sup>通过建立的由 20 节车辆组成的多体动力学三维碰撞计算模型研究了列车的碰撞力学行为,发现当列车与刚性障碍物发生正碰和斜碰时,车辆会出现爬车、拱起以及横向褶曲等行为。周和超等<sup>[43]</sup>采用多体动力学和有限元两种方法仿真分析了列车碰撞后的爬车行为,发现列车质量、质心高度、点头频率等会显著影响列车碰撞后的爬车行为,如相邻车厢的点头行为不同步、车端间存在高度差等。与直线区段列车碰撞相比,曲线路段发生列车碰撞的后果更为严重,常常会发生横向褶曲等行为并最终导致列车脱轨,造成更严重的经济损失和人员伤亡。Mayville 等<sup>[61]</sup>采用 ADAMS 软件建立了不同编组形式的列车碰撞动力学模型,仿真分析了碰撞过程中列车的横向褶曲(锯齿式和大位移横向)行为。研究发现,列车在曲线区段以 48 km/h 的速度撞击刚性障碍物时,8 车及以上编组的列车出现了大位移横向褶曲行为,而短编组列车的横向位移随碰撞速度的增大略微增加。Kirkpatrick 等<sup>[62]</sup>利用 LS-DYNA 有限元软件建立了三维列车碰撞模型,模拟了列车在曲线路段碰撞后的脱轨过程,发现在脱轨初期列车表现出锯齿式褶曲行为,而随着列车继续滑行,其横向褶曲模式转变为“Z”字型,最终列车完全失控而出现大位移横向褶曲行为。此外,还有一些研究专门针对列车侧翻场景进行了数值模拟,讨论了不同翻转角速度对乘员生存空间破坏程度的影响<sup>[63-64]</sup>。

### 3.2 碰撞脱轨机理

列车碰撞过程中产生的冲击力会通过悬挂系统从车体传递到转向架和车轴, 车辆由于施加到车轴上的水平和垂向冲击力而发生脱轨。因此, 列车碰撞引起的脱轨通常是由车体传递到轮对的高冲击力引起的<sup>[65]</sup>, 与常规运行条件下列车的脱轨机理(受列车编组、牵引、轨道几何形状、车辆动力学性能等耦合影响)有所不同<sup>[66-71]</sup>。Koo 等<sup>[65]</sup>提出了一种利用简化的轮对模型预测和评估碰撞致脱轨的理论方法, 将脱轨分为滑移、滑移/侧翻、爬升、爬升/侧翻和纯侧翻等几种类型, 并认为脱轨类型取决于轮轨横向力、垂向力、轮缘角和摩擦因数等。Cho 等<sup>[72]</sup>使用韩国高速列车虚拟试验模型研究了列车碰撞后车轮提升和翻车而导致的脱轨机制, 首次揭示了混合滑移/翻滚式脱轨的内在机制。Zhou 等<sup>[70]</sup>采用多体动力学方法对城市有轨电车碰撞进行了仿真分析, 结果表明城市有轨电车与斜障碍物的最大碰撞角应小于  $25^\circ$  以避免撞后脱轨, 并提出了防止电车相撞脱轨的两种措施: 一是使用二系横向减震器来吸收碰撞能量, 二是增加二系弹簧的横向刚度和横向间隙, 以便在悬挂装置中储存更多的碰撞能量。

为研究冲击角对正面倾斜碰撞下列车脱轨行为的影响, 进一步揭示其脱轨机理, Yao 等<sup>[73]</sup>建立了不同倾斜冲击角度 ( $6.34^\circ \sim 45^\circ$ ) 下四编组列车撞击刚性墙的有限元仿真模型, 研究发现, 中间车钩缓冲装置的运动及产生的侧向冲击力是影响列车倾斜碰撞后脱轨的两个主要因素。Ling 等<sup>[74-77]</sup>针对客运列车与卡车正面碰撞后导致的列车脱轨机理及相关冲击防护措施开展了大量研究, 并引入了脱轨边界线的概念, 如图 10(a) 所示, 其中横坐标  $f_a$  表示不可控因素或参数(例如冲击角、卡车质量等), 纵坐标  $f_b$  表示可控或可变参数(例如列车撞击速度、轮轨摩擦因数等)。图 10(b) 中给出了卡车正面斜撞击列车时的脱轨边界线, 其具体定义为撞击角度和列车速度的函数, 在脱轨边界线下方的区域列车将是安全的, 而如果碰撞速度和碰撞角度位于脱轨边界上方的区域时, 列车在发生碰撞后将会出现脱轨现象。此外, 他们还研究发现由侧向冲击力引起的车体横移和摇头是正面斜碰撞引起列车脱轨的根本原因<sup>[74]</sup>, 改进列车转向架悬挂参数(包括二系减振器和横向减振器)可以降低碰撞导致列车发生脱轨事故的概率<sup>[75]</sup>。为避免列车碰撞后发生脱轨事故、减少二次碰撞造成的严重损失和人员伤亡<sup>[78-80]</sup>, 列车碰撞被动安全防脱轨装置是一种有效的尝试, Ling 等<sup>[76]</sup>提出了一种新型的公路-铁路交叉口轨道结构设计方案, 在最大可能保证轮轨接触不失效的同时, 也降低了列车正面碰撞后出现脱轨的可能性。

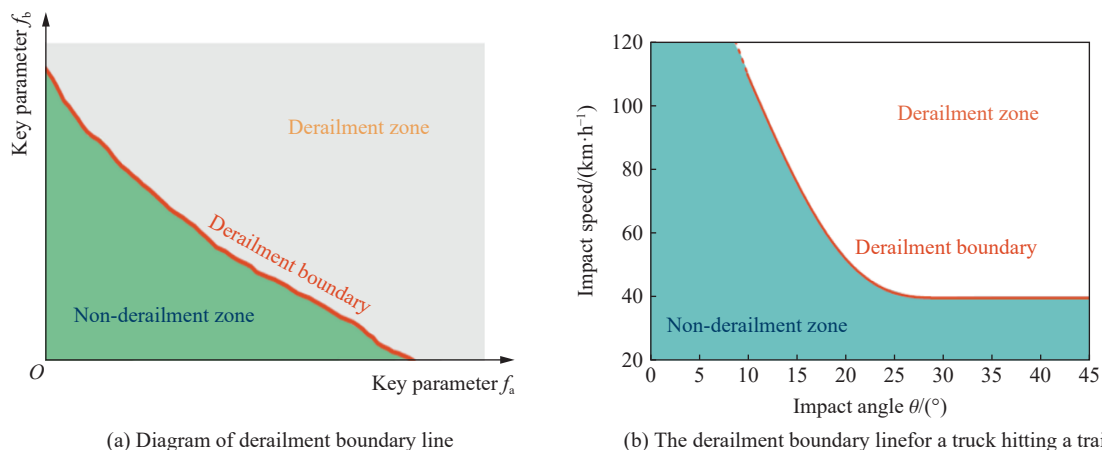


图 10 列车碰撞脱轨边界线<sup>[74]</sup>  
Fig. 10 The boundary line of derailment under train collision<sup>[74]</sup>

## 4 列车系统耐撞性设计与评估

为提高列车耐撞性能和优化能量耗散机制, 基于列车耐撞性设计与评价指标, 已开展了大量研究工作, 以期通过碰撞能量的分级耗散和吸收实现列车碰撞后列车只沿纵向平稳压溃, 车厢间不挤压、挤压不脱轨、脱轨不掉线, 尽可能保证列车发生碰撞后的安全。下面主要从耐撞性设计/评价标准、基于多级能量耗散机制的吸能结构设计以及车体结构耐撞性设计等方面进行概述。

#### 4.1 车辆耐撞性设计与评价标准

半个多世纪以来,欧美等国对列车被动安全开展了系统深入的研究,并通过事故统计分析、数值仿真计算及实车试验等方法制定了一系列详细的耐撞性标准。借鉴国外相关碰撞标准,我国于 2018 年颁布了《动车组车体耐撞性要求与验证规范》(TB/T 3500—2018)和《机车车辆碰撞试验测试方法》(TB/T 3501—2018)两部列车耐撞性标准。由于早期各国在列车耐撞性研究方法、内容和场景等方面都具有差异性,使得各国标准的适用范围及其对列车耐撞性能的评价指标有所不同。

从 20 世纪 50 年代开始,欧洲范围内的铁道车辆车体强度设计主要采用国际铁路联盟(UIC)的 UIC 566 标准《客车车体及其零部件的载荷》,其对列车冲击试验做了相关要求:结构的任何部位不应发生永久性变形、冲击试验后车辆状态应完好、车辆的任何装置不应破坏等<sup>[81]</sup>。2010 年,欧洲标准委员会(CEN)颁布了《铁道车辆车体结构要求,第 1 部分:机车和客车》(EN12663—1: 2010)和《铁道车辆车体结构要求,第 2 部分:货车》(EN12663—2: 2010),提出了通过分析和测试等方式对设计进行验证时应采用的原则,要求在明显超出额外载荷(如碰撞载荷)条件下,保证车体不发生严重性断裂,最大程度保护乘客区安全空间完整<sup>[82-83]</sup>。欧盟颁布的标准《铁路应用—铁路车辆车体耐撞性要求》(EN15227)中对列车被动安全性的要求与 EN12663 中的要求基本一致,指出要降低列车碰撞后的爬车风险,使其以一种可控有序的方式吸收冲击能量,保证救生空间和乘客区域结构的完整性。此外,该标准中还对列车碰撞场景作了规定:两列相同类型的列车前端碰撞、两列不同类型的列车前端碰撞、列车前端与一辆大型公路车辆在平交道口碰撞以及列车与高度较低的障碍物(如小轿车、动物、平交道口的大垃圾堆)碰撞<sup>[9]</sup>。在欧洲法规体系中,欧盟铁路互联互通技术规范 TSI 具有强制性,其对欧盟 EN15227 和 EN12663 标准中的相关条款进行了修订<sup>[84]</sup>。

英国 GM/RT2100 标准规定,当两列同类型的车辆发生碰撞时,车辆端部纵向变形量不允许大于 1 m,车辆前端吸收能量不小于 1 MJ,相邻车辆界面之间的吸收能量不少于 0.5 MJ。对于动车组和固定编组的列车,碰撞产生的最大冲击力不超过 3 000 kN;而对于其他编组的列车,碰撞最大冲击力不超过 4 000 kN,同时防爬器需承受 100 kN 的垂向载荷<sup>[9]</sup>。此外,英国 ATOCAV/ST9001 标准中还规定了车辆内饰耐撞性、利用内饰设计减少乘员二次损伤以及乘员生物损伤的评价指标,为评估人体损伤提供了参考依据<sup>[85]</sup>。

美国联邦铁路管理局(FRA)颁布的法规中指出,车头和车间的防爬器应分别承受 890 kN 和 450 kN 的载荷。当列车运行速度超过 200 km/h 后,列车总共需吸收 13 MJ 的能量,其中头车总共吸收 8 MJ 的动能(驾驶室吸收 5 MJ),后面的车辆总共需吸收 5 MJ 的动能。当列车以 48 km/h 的速度碰撞后,最大减速度值不应超过 8g<sup>[86-87]</sup>。北美铁道协会(AAR)针对货运发布了相关技术标准,确保各公司的机车车辆及其部件的互换性和兼容性,以协调各成员之间安全运输方面的问题<sup>[88]</sup>。2000 年,美国公共运输协会(APTA)针对客运列车颁布了标准 APTA SS-C&S-034-99,该标准中包含了对所有类型的铁路客运设备在结构耐撞性方面提出的要求<sup>[89-90]</sup>。此外,美国铁路安全咨询委员会发布的《DRAFT RSAC REPORT 9-16-10》也是针对速度在 0~200 km/h 范围内的铁路客车设备在耐撞性和乘员保护性能评估方面的技术标准。

我国颁布了《动车组车体耐撞性要求与验证规范》(TB/T 3500—2018)和《机车车辆碰撞试验测试方法》(TB/T 3501—2018)两部列车耐撞性标准<sup>[91-92]</sup>。TB/T 3500—2018 标准主要规定了动车组的碰撞场景、被动安全要求与耐撞性验证方法,适用于 200 km/h 及以上新型动车组;而 TB/T 3501—2018 标准中阐述了机车车辆碰撞试验的总体要求与测试内容,包括试验场地与被试结构、所需测试设备和采用的测试方法、测试程序 and 数据处理等,适用于采用缩比或全尺寸进行碰撞试验的机车、客车、动车组列车、单节车厢、车辆部件和吸能元件等。

各国标准在纵向力、爬车防护、碰撞能量吸收、乘员减速度等方面有着不同的要求,如表 3 所示。标准中对于纵向载荷幅值的规定主要是基于静强度制定的,目的是确保列车发生碰撞时乘员的救生空间具有足够的强度,美国标准中对于该项指标的要求较为严格。爬车是列车碰撞后造成乘员大量伤亡的主要原因之一,各个标准中均提出了在车体端部安装防爬吸能装置的要求,但具体要求并不相同。EN15227 标准中要求在速度 36 km/h 的碰撞模拟中,至少要保证转向架的一个轮对在轨道上;TB/T 3500—

2018 标准中要求列车发生碰撞时, 转向架至少有一个轮对在轨道上方的垂向位移不大于轮缘名义高度的 75%。对于碰撞吸能量的要求, 英国标准中规定了 3 种可供选择的吸能量; 而欧盟标准中只规定了 3 种碰撞场景, 并没有对吸能量具体数值作要求; 美国标准则是给出了特定碰撞场景下吸能量的分配方式。对于乘员减速度, 英国标准中规定的是整个碰撞过程中的撞击力, 其他国家标准则是规定了减速度的大小; EN15227 中限制是 5g, 最大不应超过 7.5g, 在驾驶室可以允许更高, 但瞬态持续时间不应超过 5 ms; TB/T 3500—2018 中要求不同碰撞场景下生存空间的纵向平均加速度值应小于 5g, 减速度值应小于 7.5g。

表 3 各国车辆耐撞性设计标准对比

Table 3 The comparison of design standard for vehicle crashworthiness in different countries

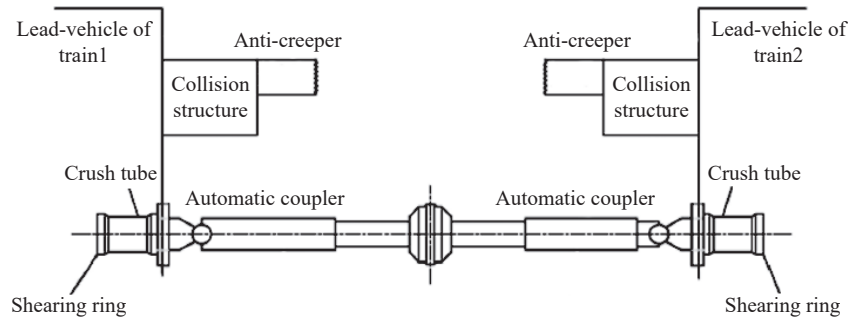
标准	车钩纵向力	防爬能力	加/减速度	适用范围
英国GM/RT 2100	压缩载荷2 000 kN; 拉伸载荷1 500 kN	垂向载荷100 kN; 横向载荷100 kN; 压缩载荷1 000 kN	无明确规定	200 km/h以上列车
欧盟EN 15227	压缩载荷2 000 kN; 拉伸载荷1 000 kN	垂向载荷150 kN, 至少保证 一个车轮与钢轨接触	加速度 $\leq 5g$ ; 减速度 $\leq 7.5g$	各类型客车
美国FRA法规	压缩载荷3 560 kN	中部垂向载荷445 kN; 端部垂向载荷890 kN	$\leq 8g$	128~240 km/h客车
欧盟TSI	压缩载荷1 500 kN	端部应安装防爬装置	$\leq 5g$	各类车辆(190 km/h以上)
中国TB/T 3500-2018	无明确规定	每个转向架至少有一个轮对 在轨道上方的垂直位移不大 于轮缘名义高度的75%	加速度 $\leq 5g$ ; 减速度 $\leq 7.5g$	200 km/h以上动车组及部件

## 4.2 吸能系统设计策略

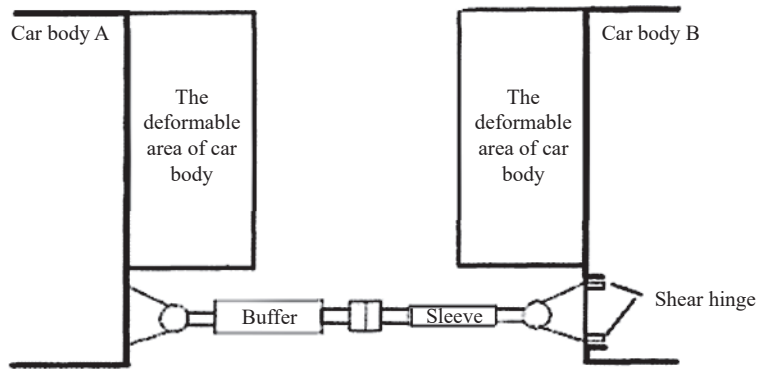
通常情况下, 列车头车的分级吸能系统(见图 11(a))主要包括可剪切车钩缓冲装置、吸能式防爬装置以及车辆端部结构, 而列车中间结构的分级吸能系统(见图 11(b))主要包括车钩缓冲装置和车辆端部吸能结构两个部分<sup>[57,93]</sup>。当列车以较低速度发生碰撞时, 其碰撞能量主要通过车钩缓冲装置来吸收; 而随着碰撞速度的增加, 钩缓装置后端的压溃管开始发生压溃变形并参与吸能; 当碰撞速度继续增大时, 车钩剪切装置使车钩脱落, 吸能防爬器中的吸能元件开始参与吸能; 如果列车碰撞速度更高, 列车端部结构将通过塑性变形进一步吸收能量。可以看出, 为实现列车碰撞能量分级耗散、分级吸收的目的, 从而减小客室车厢塑性变形以满足乘客生存条件, 应使列车各个吸能结构和车体在整个碰撞过程中有序、可控的变形, 各部分理想的力-位移曲线如图 12 中所示<sup>[93]</sup>。

### 4.2.1 车钩缓冲装置

车钩缓冲装置不仅在车辆与车辆、机车与动车之间起连挂、传递牵引力/制动力并缓和纵向冲击的作用, 而且一旦发生碰撞, 还可以在保持列车横向/垂直稳定性以及限制车辆爬车、脱轨等方面起到关键牵制作用<sup>[10,58,94-96]</sup>。目前车钩缓冲装置中的压溃管大多采用圆管压溃吸能的模式, 其变形模式主要包括轴对称坍塌<sup>[97-100]</sup>、非轴对称塌陷<sup>[101-103]</sup>、反转倒塌<sup>[104-105]</sup>等。除压溃吸能外, 可变形管在轴向压缩下的膨胀是另一种有效的吸能方式<sup>[106]</sup>。与压溃式吸能模式相比, 膨胀式吸能管的变形过程相对稳定、冲击力较为平稳。目前对膨胀管的研究主要集中在能量吸收特性和基于耐撞性的结构参数优化方面<sup>[107-108]</sup>。Li 等<sup>[109]</sup>采用试验和数值模拟等手段研究了膨胀管变形过程中的能量吸收情况, 发现其主要通过 3 种变形和破坏模式实现吸能: 管的弹塑性弯曲、管壁开裂以及管与模具之间的摩擦。Yan 等<sup>[110]</sup>发现膨胀圆管主要是通过塑性变形和摩擦来耗散能量的, 同时还得出了膨胀角、摩擦因数与稳定压缩力之间的关系。Waldeck 等<sup>[23]</sup>在 ICE 动车的耐撞性研究中指出, 安装防爬吸能装置能够显著提高列车的耐撞性能, 但是该装置只能安装在中央车钩上部的邻近位置, 因此在车钩中需要设置剪切失效装置, 使防爬吸能器能够真正起到吸能作用, 带螺栓剪切的车钩缓冲装置力-位移曲线如图 13 所示<sup>[111]</sup>。



(a) Graded energy absorption system for head car<sup>[57]</sup>



(b) Graded energy absorption system for middle car<sup>[93]</sup>

图 11 列车碰撞能量分级吸收系统<sup>[57,93]</sup>

Fig. 11 The graded energy absorption system of train collision<sup>[57,93]</sup>

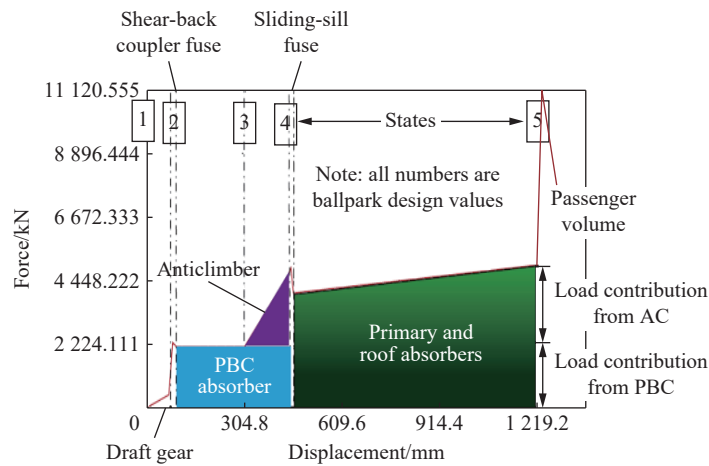


图 12 列车碰撞过程中理想的力-位移曲线<sup>[93]</sup>

Fig. 12 The ideal force-displacement curves during train collision process<sup>[93]</sup>

车钩缓冲装置建模方法将会很大程度影响仿真结果的准确性。因此,合理的简化和建模方法至关重要。Zhu 等<sup>[112]</sup>建立了包含四个刚体、一个球形关节、两个非线性扭簧单元和两个非线性迟滞单元的车钩缓冲装置力学模型,研究了城际列车的碰撞过程,发现该模型的轴向特性合理、能够有效模拟车钩的俯仰运动。Duncan 等<sup>[113]</sup>提出了一种具有迟滞特性的非线性钩缓装置数学模型,该模型能够很好地考虑车钩间隙特性、缓冲器阻抗特性和钩缓装置行程结束后的刚性冲击特性等。Lu<sup>[114]</sup>利用落锤冲击试验机得到了气液缓冲器的吸能特性曲线,在此基础上建立了可分析结构大变形的客运列车碰撞动力学模型,其中缓冲器的力学性能通过输入力-位移特性曲线的形式来模拟。Milho 等<sup>[115]</sup>基于建立的含防爬吸

能装置的列车二维(纵向与垂向)多体动力学碰撞模型研究了不同列车间的碰撞行为,模型中采用非线性弹簧(力-位移曲线取自设计规范)模拟了钩缓装置中的缓冲器与压溃管,发现仿真计算结果与同一工况下的碰撞试验数据吻合较好;然后将试验获得的钩缓特性曲线重新输入到碰撞仿真模型中,获得的各车辆速度、加速度等响应均与试验结果高度一致。目前,车钩缓冲装置种类繁多复杂,不同的钩缓装置需要建立不同的力学模型来模拟。庞艳凤等<sup>[116]</sup>针对钩缓装置种类繁多的现状,提出了对车钩缓冲装置进行统型的设想以减小列车碰撞研究的复杂程度,但这种思想仍需进一步的探究。

#### 4.2.2 防爬吸能结构

早期发生的许多列车碰撞事故中都观察到了爬车现象<sup>[117]</sup>。作为列车吸能系统中的一个重要组成部分,防爬器通常对称安装在列车车体的前端和两节车厢中间,同时兼具防爬和吸能两种功能。碰撞发生后随着车钩缓冲装置的失效,防爬器前端的防爬齿开始发挥作用并防止两节车厢间发生拱起、爬车等现象,同时防爬器后端的吸能装置发生塑性变形而吸收能量。图 14 中对比了设置与不设置防爬器的两列车碰撞后的车体变形情况,可以明显看出安装防爬装置的列车在发生碰撞后破坏程度有所减缓,车体变形较小且没有发生爬车、拱起等破坏性现象<sup>[14]</sup>。

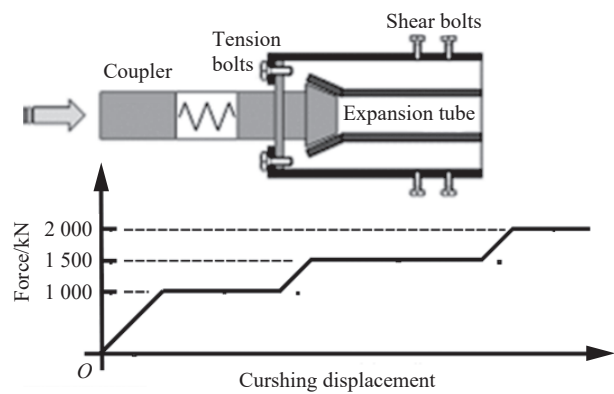
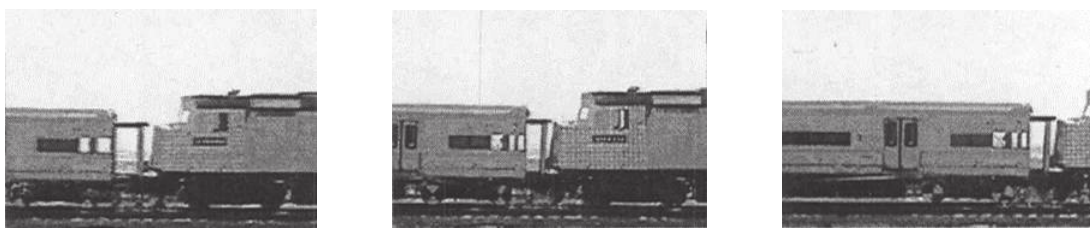


图 13 带螺栓剪切的车钩缓冲装置力-位移曲线<sup>[111]</sup>

Fig. 13 Force-displacement curve of coupler buffering device with bolt shear<sup>[111]</sup>



(a) Train collision without installing anti-climbing device



(b) Train collision with installing anti-climbing device

图 14 防爬器对两列车碰撞行为的影响<sup>[14]</sup>

Fig. 14 Influence of anti-climbing device on the train collision behavior<sup>[14]</sup>

防爬器的端部设有齿形槽状防爬部,当两列车相撞时,列车车体前端的防爬齿、各车厢之间的防爬齿便会啮合在一起防止两列车、各车厢间相互交叠攀爬。为揭示列车爬车现象的机理与原因,首先需研究列车碰撞过程中车轮的抬升情况。Yang 等<sup>[118]</sup>发现列车碰撞后第一节车厢的第二个转向架具有最大的车轮抬升量,而且列车编组数量对低速碰撞中的爬车现象影响较小;车轮抬升量随着列车碰撞速度的增加而迅速增加,其主要与轴向刚性冲击产生的巨大耦合力有关。列车碰撞后由于严重的垂向屈曲以及垂向偏移量的增大,防爬器的能量吸收能力和抗倾覆能力受到很大影响。为提高列车偏心碰撞时结构吸能和防爬性能,Yao 等<sup>[119]</sup>基于地铁车辆防爬吸能结构有限元模型,研究了在 0~80 mm 垂直偏移量

和 0~40 mm 水平偏移量下的耐撞性能, 结果表明, 当水平偏移量大于 30 mm 时, 原始结构容易失稳, 通过结构参数优化后发现在所有初始水平偏移下均未出现明显的不稳定现象。Zhou 等<sup>[117,120]</sup> 分析了碰撞时防爬器的垂向屈曲机理, 发现列车碰撞产生的较大约束力和弯矩导致了防爬器严重的垂向屈曲现象。除了 EN15227 标准中规定的初始垂向偏移量外, 爬车还取决于碰撞质量、俯仰频率、质心高度等多种因素, 而相比于碰撞质量, 爬车现象对俯仰频率和质心高度的变化更为敏感。

在车辆出厂设计阶段往往只考虑了与配置有相同型号防爬器列车之间的耐撞性能, 因此在列车实际运行阶段, 当两列配有不同型号防爬器的列车发生碰撞时, 由于大的非协调变形可能导致防爬器的受力情况比配置同一型号防爬器的列车碰撞时所承受的力更大, 所以仍存在较大的爬车风险。目前使用的防爬器根据后面端部吸能结构的变形模式主要有为压溃型、胀破型以及切削型 3 种<sup>[121-123]</sup>, 如图 15 所示。张云峰等<sup>[124]</sup> 试验和仿真分析了整体型蜂窝式防爬结构和切削式防爬结构碰撞后的吸能特性, 发现碰撞后切削式防爬器的受力情况更加恶劣, 而整体型蜂窝式防爬器的受力较小, 且二者均可正常变形压缩。通常情况下防爬装置安装在车钩缓冲装置钩头后方, 以实现逐级吸能的目的, 但不能充分利用二者之间的有效变形吸能空间。Gao 等<sup>[121]</sup> 研发了一种新型防爬结构, 在碰撞前吸能器的变形管会在可逆执行器的作用下伸长, 突破了车钩缓冲装置对防爬吸能结构纵向尺寸的限制, 显著增加了防爬器的变形行程。

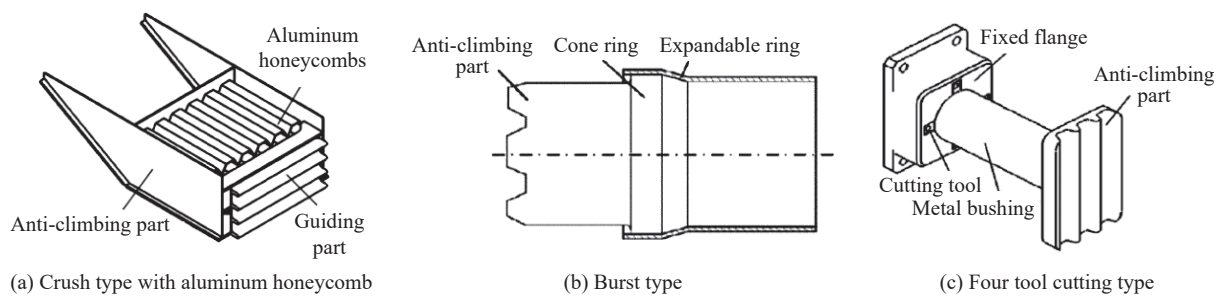


图 15 不同类型防爬器示意图<sup>[123]</sup>

Fig. 15 Schematic diagram of different types of anti-climbing devices<sup>[123]</sup>

#### 4.2.3 车体端部及其他吸能结构

车体端部吸能结构是铁路列车的关键部件, 兼具吸能、连接和支撑等多种功能。列车正常运行中, 端部结构可以支撑相邻部件和附属设备; 而在列车碰撞过程中, 当车钩缓冲装置及防爬吸能结构失效后, 列车端部易变形区将发生塑性变形而进一步吸收能量。Xu 等<sup>[47]</sup> 采用试验台车对新设计的车体端部结构在冲击荷载作用下的渐进式吸能特性开展了试验研究, 并采用非支配排序遗传算法 (NSGA) 进行了多目标优化设计, 获得了最大的吸能量和最小的峰值压溃力。大多数对于端部结构塌陷区的研究都是基于预定义的拓扑几何结构, 因此难以对最佳材料分布进行系统研究以开发出更有效的结构。尽管研究中发现现有列车的端部能量吸收结构均能够满足 EN 15227: 2008 标准中规定的碰撞条件, 但列车运营速度的不断提升给车辆端部结构的耐撞性提出了更高要求。Baykasoglu 等<sup>[125]</sup> 分两个阶段对某铁路客车的耐撞性进行了评价并提出了改进建议: 首先对初始概念设计客车的耐撞性进行分析, 观察到结构局部屈曲发生在不同的点, 这破坏了在车体中期望的渐进变形模式; 紧接着对初始设计进行了修改, 通过优化尺寸参数、改变钣金零件厚度等获得了渐进压缩变形模式, 得到了具有较好耐撞性能的客车设计方案。Xue 等<sup>[126]</sup> 对带驾驶室轨道车辆进行了耐撞性评估, 发现向下弯曲是传统轨道车辆的固有缺陷, 其失效形式主要表现为弯折; 经改进驾驶室结构后克服了原有缺陷, 在仿真结果中表现出了理想的渐进破坏行为。

除了上述 3 部分列车中最重要、最典型的吸能结构外, 还有一些轻质多孔泡沫金属夹芯结构在列车中也得到了广泛应用。铝蜂窝作为一种典型的轻质薄壁材料, 具有轻质高强、高比刚度、高比吸能、缓冲和抗冲击性能良好等优点, 因此在高速列车吸能装置中常作为吸能材料。Xie 等<sup>[127-128]</sup> 基于建立的蜂窝吸能结构有限元模型分别对 3 种不同铝蜂窝结构和无蜂窝结构开展了数值模拟, 发现蜂窝材料的平台应力越大, 对整个结构的吸能量贡献率越高, 而且随着材料平台应力的增加, 整个吸能结构的能量耗

散能力也有所增强。Li 等<sup>[129]</sup>设计了一种适用于高速列车的套筒状蜂窝吸能装置, 如图 16 所示, 并开展了实车碰撞刚性墙试验。结果表明, 与普通的蜂窝吸能结构相比, 该吸能装置的弯曲和破坏均得到了有效抑制。Peng 等<sup>[130]</sup>研究了用于地铁车辆的由薄壁管和蜂窝材料组成的吸能结构的耐撞性能, 结果显示该吸能结构可实现可控的破坏变形模式, 且随着薄壁管厚度和蜂窝屈服强度的增加, 碰撞初始峰值力和平均冲击力均显著增加。

为进一步提高结构的耐撞性, 由 2 个截面相同或不同的同心型材构成的“双管结构”薄壁结构也被尝试用于列车吸能系统中。Shafiri 等<sup>[131]</sup>讨论了直径和厚度等关键几何尺寸对圆形双管结构吸能特性的影响, 并通过调节切口槽的高度降低了撞击峰值载荷。Rahi<sup>[132]</sup>讨论了横截面形状(圆形和方形)对单管和双管组合型结构能量吸收特性的影响, 发现当组合的双管结构采用圆形截面形状时, 其能量吸收能力可以提高 25%。Vinayagar 等<sup>[133]</sup>开展了双截面双管结构(外部圆形截面管、内部多边形截面管)的耐撞性分析, 结果表明具有六边形截面内管的双截面双管结构具有较好的耐撞性能。此外, 也有研究通过在管内填充泡沫等轻质材料来改善双管结构的吸能特性<sup>[134-135]</sup>。

### 4.3 基于碰撞能量管理的列车结构耐撞性设计

大量碰撞事故表明, 列车头车的挤压变形危害性是较大的<sup>[136]</sup>, 而列车发生剧烈碰撞后, 车体乘客区的严重变形和乘客身体受到较大减速度是导致伤亡的主要原因。因此, 车体结构耐撞性设计的重点在于保证乘员生存空间的完整性、控制人体所受减速度在乘员可接受范围内。碰撞能量管理(crash energy management, CEM)就是一种通过轨道车辆专用区域坍塌来耗散碰撞能量并将冲击分散到整个列车长度的设计方法<sup>[137]</sup>, 其核心是使列车结构的纵向刚度遵循乘员区刚度较大、非乘员区刚度较小的原则, 即重新分配车体结构各部位的刚度: 前/后端部非乘客区为弱刚度结构、中间部分乘客区为强刚度结构, 使车体纵向刚度呈“弱-强-弱”分布规律<sup>[138]</sup>。这样车体结构就有“变形吸能区”和“乘员生存区”之分, 列车发生碰撞时“变形吸能区”将率先产生可控有序的变形而吸收碰撞能量, 瞬时接触产生的撞击力峰值也将会沿着冲击方向迅速衰减; 而当撞击力传递到“乘员生存区”时, 其峰值就可能已经降低到安全值以下, “乘员生存区”也不会发生较大变形以保证生存空间, 同时乘员所受减速度也得到有效缓和, 最终达到了主动控制列车碰撞变形区域、避免头车端部受到严重挤压变形、实现碰撞能量分级耗散/吸收及保护司乘人员生命安全的目的。

从 1999 年到 2005 年, 美国联邦铁路局开展了包括传统列车和 CEM 列车在内的 6 次碰撞试验, 通过比较和评估, 发现采用 CEM 设计理念能够显著提高列车结构的耐撞性<sup>[137,139-141]</sup>。Jacobsen 等<sup>[142]</sup>对比分析了单节车厢和两节连挂列车分别撞击刚性墙的试验结果, 发现与传统列车相比, CEM 列车在发生碰撞后能更有效地耗散冲击能量且仍能很好地保持在轨道内, 从而避免了碰撞后发生横向褶曲和爬车行为, 碰撞试验过程中 CEM 列车和传统列车的变形对比如图 17 所示。Meran 等<sup>[143]</sup>模拟了土耳其 N13 型全尺寸铁路客车(CEM 列车)与刚性墙的碰撞情况, 并将相关碰撞响应及变形模式与传统客车进行了对比分析, 进一步凸显了 CEM 列车相比于传统客车在耐撞性能方面的优势。Fang 等<sup>[144]</sup>基于有限元仿真和碰撞试验研究了 CEM 系统在美国地铁列车耐撞性方面的有效性, 该新型 CEM 系统包括了钩缓装置、蜂窝铝结构箱、压溃管以及端部结构在内的四级吸能装置, 通过分析撞击力、应力/应变、速度/加速度曲线等验证了 CEM 系统在列车结构耐撞性能中所发挥的作用。

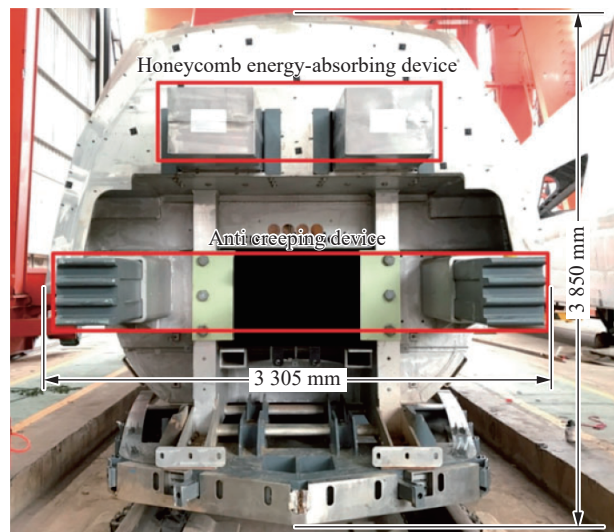
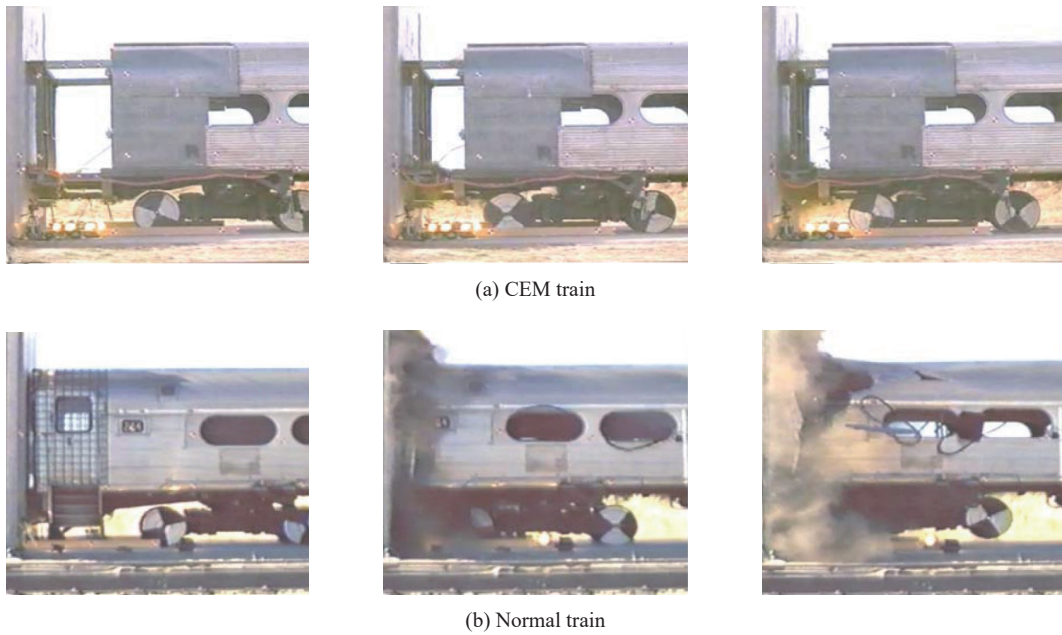


图 16 蜂窝吸能装置的布置<sup>[129]</sup>

Fig. 16 The arrangements of honeycomb energy-absorbing device<sup>[129]</sup>



图 17 碰撞试验后的车体变形情况<sup>[142]</sup>Fig. 17 Deformation of car body after crash test<sup>[142]</sup>

列车碰撞能量管理设计方法已被广泛应用于轨道车辆结构设计中,且耐撞性已成为列车重要的性能考核指标。然而,CEM设计方法只是提供了一种可行有效的列车设计理念,而具体如何实现列车各碰撞界面之间能量耗散和力学性能的匹配与优化是另一个需要解决的问题。被撞列车在冲击载荷作用下所产生的应力/应变是以波的形式沿纵向传播,所以列车发生碰撞后各车厢并不是同时受到冲击,此外由于波传播过程中能量损失的存在,使得车厢各端面所承受的撞击力、变形、冲击速度/加速度以及能量吸收等均不相同<sup>[138]</sup>,所以各碰撞界面能量耗散的匹配对合理设计耐撞车体结构同样至关重要。Lu<sup>[145]</sup>基于列车质量、速度和碰撞界面位置等研究了列车碰撞能量的分配方案,得到了适用于所有轨道列车碰撞工况的端部和中间部位能量吸收计算公式:

$$E_d = \frac{R_1}{2f_d} k_1 \quad (1)$$

$$E_i = R_3 E_d \quad (2)$$

式中:  $E_d$  为列车端部的设计能量,  $E_i$  为列车中间部位的设计能量,  $R_1$  为吸收能量与界面动能之比,  $R_3$  为界面 2 吸收能量与界面 1 吸收能量之比,  $k_1$  为头车的动能,  $f_d$  为动态因子。此外,通过研究编组数量对列车端部和中间位置碰撞能量的影响发现,3 节或 4 节编组列车之间的碰撞足以等效整列车的碰撞,这或许对于列车碰撞研究中降低计算机数值模拟和实车碰撞试验的成本具有重要参考价值。Zhang 等<sup>[36]</sup>根据 EN 15227 标准中对于铁路车辆耐撞性的要求,以平均纵向减速度和车辆抬升量为优化目标,对我国新投入运行的高速列车进行了碰撞能量优化分配和设计,优化后的列车碰撞界面压缩量和冲击能量分布情况如图 18 所示,其结果可应用于在列车概念设计过程中,以获得列车结构和能吸装置的最佳耐撞性能。杨宝柱等<sup>[146]</sup>基于列车碰撞纵向多体动力学模型,以 2 列完全相同的 8 编组列车碰撞为例,研究了列车司机室吸能装置行程、界面力以及中间车钩缓装置界面力等对列车碰撞响应的影响,并对配置不同吸能方案列车的碰撞动态响应特性进行了对比分析。研究表明,在不超过最优值的前提下,增加司机室吸能装置的行程可以减小碰撞后各车辆的加速度,而增加司机室吸能装置界面力、减小各中间车钩缓装置界面力均会使车辆加速度显著增大。此外,钩缓装置界面力依次递减可以增加中间车端部吸能量、钩缓装置界面力依次递增可以增加司机室端部吸能量。

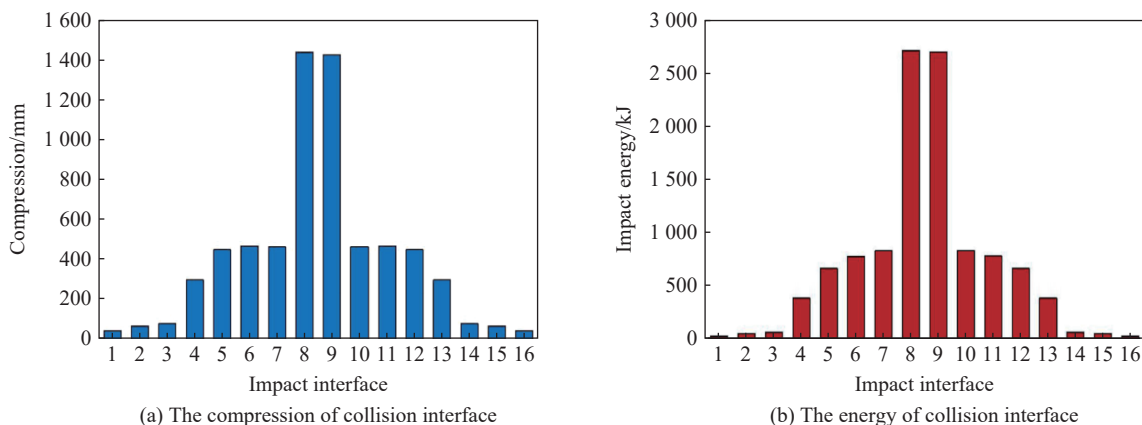


图 18 优化后的列车碰撞界面压缩量和冲击能量分布情况<sup>[36]</sup>

Fig. 18 The distribution of compression and impact energy in train collision interface after optimization<sup>[36]</sup>

### 5 司乘人员冲击生物损伤

列车碰撞被动安全性的核心是保护司乘人员的生命安全, 研究司乘人员关键部位损伤响应特征, 揭示司乘人员在列车碰撞后的冲击生物损伤与防护机理, 确定列车在不同碰撞场景下司乘人员关键部位的生物损伤评价指标和耐受限度, 是改善列车内部结构耐撞性、保障司乘人员生命安全的基础。目前这方面的研究主要包括相关损伤评判标准、司乘人员冲击生物损伤响应特征及减缓司乘人员生物损伤的防护措施等。

#### 5.1 损伤评判标准

铁路客车无约束乘员与内饰结构(座椅、桌子等)相互作用造成的人体不同部位损伤比例如图 19 所示。结合我国“7·23”甬温线动车碰撞事故存活伤员的损伤特点, 可以发现, 列车碰撞后头部、颈部、胸部、腹部、下肢等身体部位均会出现不同程度的损伤<sup>[85,147]</sup>, 其中头部和胸部的伤害最严重。为了定量评估碰撞事故中的人体生物损伤程度, 需要基于损伤生物力学及危险判据制定相关评价标准。目前汽车行业已在碰撞人体生物损伤方面形成了较为成熟的标准和法规。而铁道车辆领域在该方面的研究起步较晚, 虽然目前也有相关标准颁布, 如英国标准 ATOC AV/ST9001 和美国公共交通委员会颁布的通勤列车座椅标准《Standard for Row-to-Row Seating in Commuter Rail Cars》, 但这些标准对于乘员安全性判据的规定也多是借鉴汽车领域的相关研究成果制定的。

头部损伤是碰撞事故中对人体伤害最严重的损伤类型,  $C_{hi,15}$  (head injury criterion) 则是目前被广泛认可的头部损伤判据, 其计算表达式为<sup>[85]</sup>:

$$C_{hi,15} = \max(t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a_r dt \right]^{2.5} \quad (3)$$

式中:  $t_1$  和  $t_2$  分别表示使  $C_{hi}$  值达到最大的 15 ms 时间间隔所对应的起始和终止时刻;  $a_r$  为合成加速度。英国 ATOCAV/ST9001 标准中要求  $C_{hi,15}$  值不得超过 500, 否则人体头脑部位将极有可能出现不可恢复的损伤。此外还有与  $C_{hi,15}$  对应的  $C_{hi,36}$  损伤判据, 指 36 ms 时间间隔内的  $C_{hi}$  值。

碰撞过程中, 人体颈部上端受力位置(枕髁)处的变形按照其剪切力  $F_x$ 、轴向力  $F_z$  和弯矩  $M_{ocy}$  的作用情况可分为 4 种可能出现的情形:

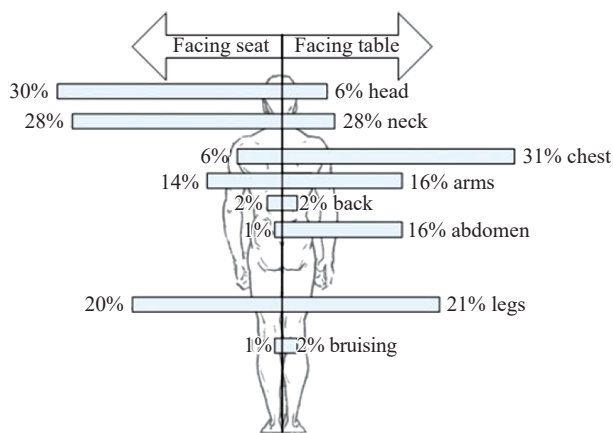


图 19 身体各部位的损伤比例<sup>[147]</sup>

Fig. 19 The proportion of injuries in different parts of body<sup>[147]</sup>

拉伸并向前延长弯曲、拉伸和向前弯曲、压缩和向后延长弯曲以及压缩和向前弯曲。碰撞中任意时刻人体颈部受力只可能出现上述某一种情况,因此颈部损伤判据  $N_{ij}$  可通过下式计算得到<sup>[85]</sup>:

$$N_{ij} = \left( \frac{F_z}{F_{zc}} \right) + \left( \frac{M_{ocy}}{M_{yc}} \right) \quad (4)$$

式中:当  $F_z$  为拉力时,  $F_{zc}=6806$  N; 当  $F_z$  为压力时,  $F_{zc}=6160$  N; 当弯矩  $M_{ocy}$  为正(向前弯曲)时,  $M_{yc}=310$  N·m; 当弯矩  $M_{ocy}$  为负(向后弯曲)时,  $M_{yc}=135$  N·m。标准中要求任意时刻计算得到的  $N_{ij}$  都不能大于 1, 否则将会出现严重损伤情况。

对于胸部,其持续时间大于 3 ms 的合成加速度最大值不应超过 60g,且胸骨相对脊柱的压缩变形不应超过 76 mm<sup>[85]</sup>; 对于股骨(即大腿骨),在碰撞脉冲影响下其所受轴向力要求在  $0 < t < 0.010$  s 时间段内不得超过 9070 N,在  $t > 0.010$  s 时间段内不得超过 7560 N<sup>[85]</sup>; 对于胫骨(即小腿骨),其损伤判据通常采用与小腿所受轴向压缩力和弯矩有关的胫骨指数来计算<sup>[85]</sup>:

$$T_i = \left| \frac{M}{M_c} \right| + \left| \frac{F_z}{F_c} \right| \quad (5)$$

式中:  $F_z$  为轴向压缩力,  $M$  为合弯矩,  $F_c=35.9$  kN 和  $M_c=225$  N·m 分别为轴向压缩力和合弯矩的临界值。标准中要求胫骨指数不得超过 1.3, 否则小腿存在骨折危险。对于胫骨的损伤评判,除了胫骨指数  $T_i$  外,还规定每根胫骨所受压力不得超过 8000 N。

现有轨道车辆碰撞标准中关于司乘人员安全性判据的规定都是借鉴汽车领域的研究成果。然而,由于列车碰撞和汽车碰撞显著的差异性(如多编组、大质量、动力分散、无安全约束、碰撞响应时间历程等),如何有效借鉴和参考汽车行业的成熟经验还需要系统深入的探索。此外,我国人体在生物损伤、生物力学性能等方面与欧美人体有着显著差异,在司乘人员生物损伤安全评判标准的制订中,应考虑以我国人体生物损伤数据为依据,建立轨道交通领域有效的司乘人员冲击生物损伤评价标准,来指导我国高速轨道车辆的耐撞性设计和被动安全研究。

## 5.2 司乘人员冲击生物损伤响应特征

铁路客车普通车厢内部结构布局主要包括“乘客-桌子”、“乘客-座椅”、“乘客-乘客”3种情况,座椅和相关内饰在列车碰撞中会对乘客产生额外的伤害。Xie 等<sup>[147-148]</sup>基于编组列车耦合碰撞模型在乘员的二次碰撞生物损伤方面开展了大量研究,分析了各车厢在碰撞中的速度和加速度变化情况,并绘制了乘员二次碰撞速度图,得到了假人运动规律、头部加速度响应以及各安全性评价指标与二次碰撞速度之间的关系。结果表明,颅脑内部损伤与胸部累积 3 ms 损伤均随着乘员二次碰撞速度的增加而增加。Vaningen-dunn 等<sup>[149]</sup>在对庞巴迪轨道列车背靠背座椅进行测试时发现,对于无小桌乘员,颈部力和力矩均超过了颈部损伤标准规定值,也超过了颈部损伤判据  $N_{ij}$ ,且发现乘员在靠近过道位置受到的冲击载荷要比靠窗位置低很多;但对于有小桌乘员,试验中测量的乘员生物损伤值均低于标准中规定的阈值,但该项研究中没有测量腹部所受冲击载荷情况,因此无法评估腹部损伤程度。Severson 等<sup>[140]</sup>评估了在改进桌椅布局和配备 CEM 设备后乘员的生物损伤情况,结果显示,改进后的列车对乘员造成的二次冲击生物损伤比传统列车更加严重,但可以通过采取相应措施缓解较高的二次冲击速度,比如在座椅靠背上安装更硬或更厚的衬垫是缓解头颈部损伤的一种有效手段。Tyrell 等<sup>[150]</sup>在科罗拉多州普韦布洛的运输技术中心开展了列车碰撞试验,讨论了列车纵向、垂向和横向运动对假人响应的影响,重点关注了列车碰撞中乘员保护措施(车厢内饰和乘客约束)的有效性,基于头部损伤标准、胸部减速度和颈部轴向负荷对乘员受到二次撞击的致死率进行了评估<sup>[151]</sup>。Carvalho 等<sup>[152-154]</sup>基于试验和仿真对目前铁路列车中广泛采用的内联座椅与乘员间的碰撞安全开展了大量研究(见图 20),根据乘员各部位损伤指数,发现大多数身体部位的损伤指数都接近中度损伤阈值,而头部损伤指数高于中度损伤阈值但低于严重损伤风险,只有膝关节的损伤值在中度和重度损伤阈值之间,总体来看内联座椅布局可以是安全可靠的<sup>[152]</sup>。

列车碰撞事故中,卧姿乘客会表现出与坐姿乘员不同的碰撞响应与人体生物损伤情况。施青松等<sup>[155]</sup>对卧铺车厢内乘员开展了多工况、多指标的碰撞安全性能评价,讨论比较了不同姿态、不同位置下乘员的受伤情况,研究结果表明,在列车碰撞中,坐姿乘员比卧姿乘员更容易受伤,背对列车运行方向的卧姿

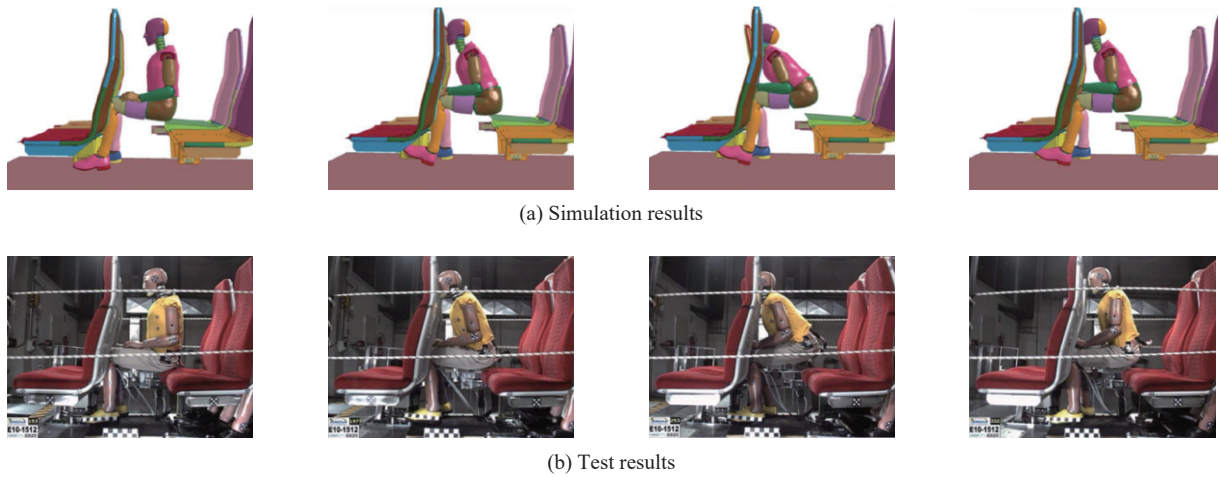


图 20 座椅与乘员间的撞击过程<sup>[153]</sup>

Fig. 20 The collision process between the seat and the occupant<sup>[153]</sup>

乘员受到的伤害相对较小,此外,下铺卧姿乘员头部可能与桌椅发生多次碰撞而产生更大的伤害,中、上铺乘员容易与护栏发生碰撞而导致身体翻转、坠落。佟鑫等<sup>[156]</sup>分析了纵向卧铺列车结构设计特点,建立了含假人的纵向卧铺列车碰撞有限元模型,基于假人的碰撞响应及损伤情况评估了列车结构的被动安全防护能力,并与 25T 型横向卧铺客车做了对比。发现对于纵向卧铺客车,其在正向冲击载荷下乘员的头部损伤值  $C_{hi,15}$  和颈部损伤值  $N_{ij}$  均超过了标准限值,分别为 626 和 2.5;而在反向冲击载荷下,乘员腿部股骨最大轴向压力超过标准限值,为 6.4 kN。乘员在纵向和横向卧铺结构中出现的损伤位置、数量和程度大不相同,且纵向卧铺由于其对乘员“自由运动”的约束而降低了二次碰撞的损伤风险。Omino 等<sup>[157]</sup>比较了板式/管式两种座椅隔离装置造成坐姿成员碰撞损伤的差异性,如图 21 所示。结果表明,板式隔离装置对乘员造成的肋部变形小于管式结构的,这意味着板式隔离装置降低了乘员胸部损伤的严

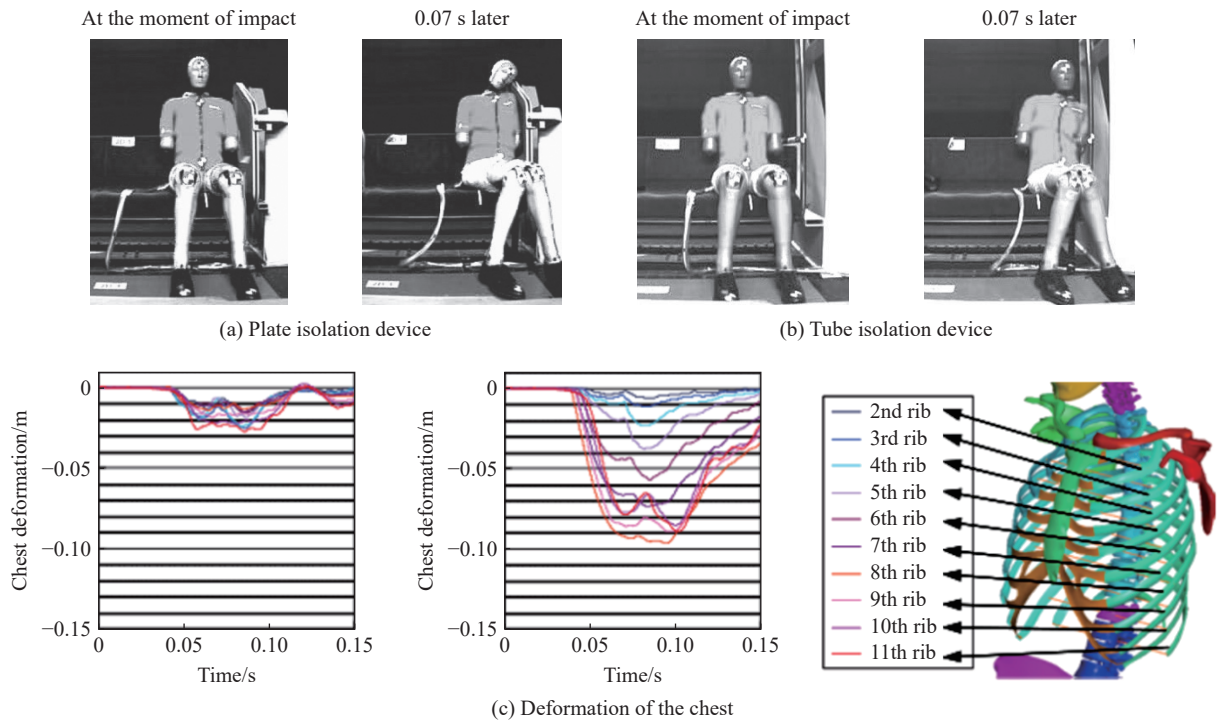


图 21 管式和板式座椅隔离装置及其对乘客胸部损伤的影响<sup>[157]</sup>

Fig. 21 The tubular and plate dividers of seat and its influence on chest injury<sup>[157]</sup>

重程度。此外,目前对于站姿乘客的生物损伤研究较少,只有极少数研究给出了公共交通中站姿乘客的头部运动学数据<sup>[158]</sup>。但对于城市轨道交通而言,这种情况是非常常见的,因此在发生紧急制动或轻微碰撞事故后,站姿乘客的运动情况和损伤机理有待进一步深入研究,以保障站姿乘客的人身安全。

由于司机所处位置的特殊性,在列车发生碰撞后受到的损伤更严重。Hault-Dubrule 等<sup>[159]</sup>提出了一种分析列车碰撞事故中驾驶员生存能力的方法,基于实验装置和数值模型分析了司机生物损伤情况,并与损伤阈值进行了比较,如表 4 所示。结果表明,在碰撞过程中,司机胸腔很可能会撞击桌子下部,导致胸部压缩量超出耐受限度。Zhou 等<sup>[160]</sup>建立了考虑司机室详细结构的客车有限元模型,研究了司机的冲击损伤行为,发现二次碰撞过程中司机座位位置对其损伤程度有显著影响,且头部

损伤指标( $C_{hi,15}$ )与司机座椅和操作台之间的纵向、垂直距离成正比,而腿部损伤指标( $T_l$ )与纵向距离成反比、与垂直距离成正比,此外手臂放在控制台上的司机比手臂自然下落的司机在碰撞中所受到的损伤小。

### 5.3 减缓司乘人员损伤的措施

#### 5.3.1 乘客

图 22 给出了乘员和列车在碰撞过程中的速度变化曲线。从图中可以看出,乘员在车厢中的运动可以分为 3 个阶段:(1)第 I 阶段,车辆以初始速度  $v_0$  撞击障碍物并减速,而乘员以速度  $v_0$  匀速运动直至自由空间用尽;(2)第 II 阶段,乘员在  $t_1$  时刻与车厢内部结构发生碰撞,乘员速度迅速下降直到与车厢的相对速度为零,由于二者的相对运动使乘员产生了二次碰撞速度(secondary impact velocity, SIV);(3)第 III 阶段,乘员与车厢内部结构保持接触并一起运动直至速度为零(假设乘员与车厢内部之间是理想塑性接触),否则乘员被反弹而撞击其他物体(非理性塑性接触),造成二次伤害<sup>[148]</sup>。因此,乘员只能通过人体变形和与车厢变形两种途径来消耗列车碰撞过程中所获得的大量动能,但从图 22 可以明显看出,目前的现状是乘客主要通过第二阶段与车厢相互作用(人体变形)来快速耗散碰撞动能,却没有充分利用车内空间及车体结构变形,这样导致人体在极短时间内受到很大的冲击作用力,造成严重的人体生物损伤。因此,为减缓二次撞击带来的人体生物损伤,第 1 种方法是采用约束系统让乘客尽可能保持在座位上;第 2 种方法是采用性能优越的吸能结构来改善座椅及内饰的耐撞性;第 3 种方法是乘员通过自我防护姿势来提高生存概率<sup>[148]</sup>。

使用安全带可以较好地缓解列车碰撞事故造成的人体伤害<sup>[161]</sup>。因为有约束系统的乘员在碰撞发生时可以通过以下 3 种途径消耗动能:约束系统做功、车辆结构通过约束耦合做功和人体变形,这样可以充分利用约束系统、车内空间及车体结构变形等将动能缓慢消耗,使人体受到均匀且较小的撞击载荷。Caputo 等<sup>[162]</sup>开展了系有两点式和三点式安全带的乘客在列车碰撞过程中的生物损伤力学性能研究,并与无安全带乘客进行了比较,如图 23 所示。

表 4 列车碰撞中司机冲击损伤试验结果<sup>[159]</sup>

Table 4 The test results of impact damage for driver during train collision process<sup>[159]</sup>

损伤指标	试验结果	最大耐受水平
$C_{hi,15}$	18.6	500
头部加速度	23.5g	80g
胸部压缩量/m	0.081	0.05
颈部损伤 $N_{ij}$	0.19	1
股骨力-左/N	167.68	7560
股骨力-右/N	170.45	7560
胫骨指数-左	1.3	1.3
胫骨指数-右	0.3	1.3
胫骨压缩力-左/N	4.17	8000
胫骨压缩力-右/N	6.17	8000

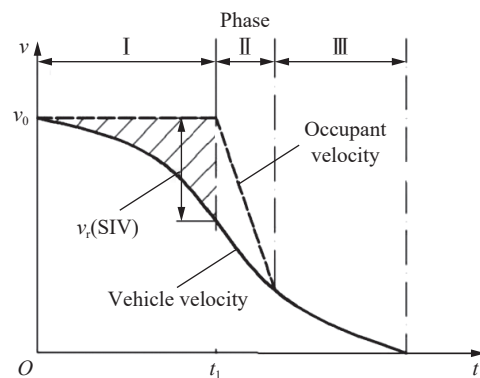


图 22 乘员和车辆在碰撞过程中的速度变化曲线<sup>[148]</sup>

Fig. 22 The velocity curves of occupants and vehicles in a collision<sup>[148]</sup>

结果表明, 两点式安全带对于保护乘客颈部而言作用不大, 但头部和股骨部位的损伤程度略有降低(能够避免膝盖与前排座椅靠背之间的碰撞)。相比于无安全带的乘客, 系有三点式安全带的乘客受到的损伤程度明显降低, 但由于从乘客身上转移的惯性载荷, 使得安全带对座椅框架产生了额外载荷。这是座椅设计中必须考虑的问题, 如果不能加强座椅框架以承受附加载荷, 安全带的使用反而会加剧乘客的损伤程度<sup>[161]</sup>。

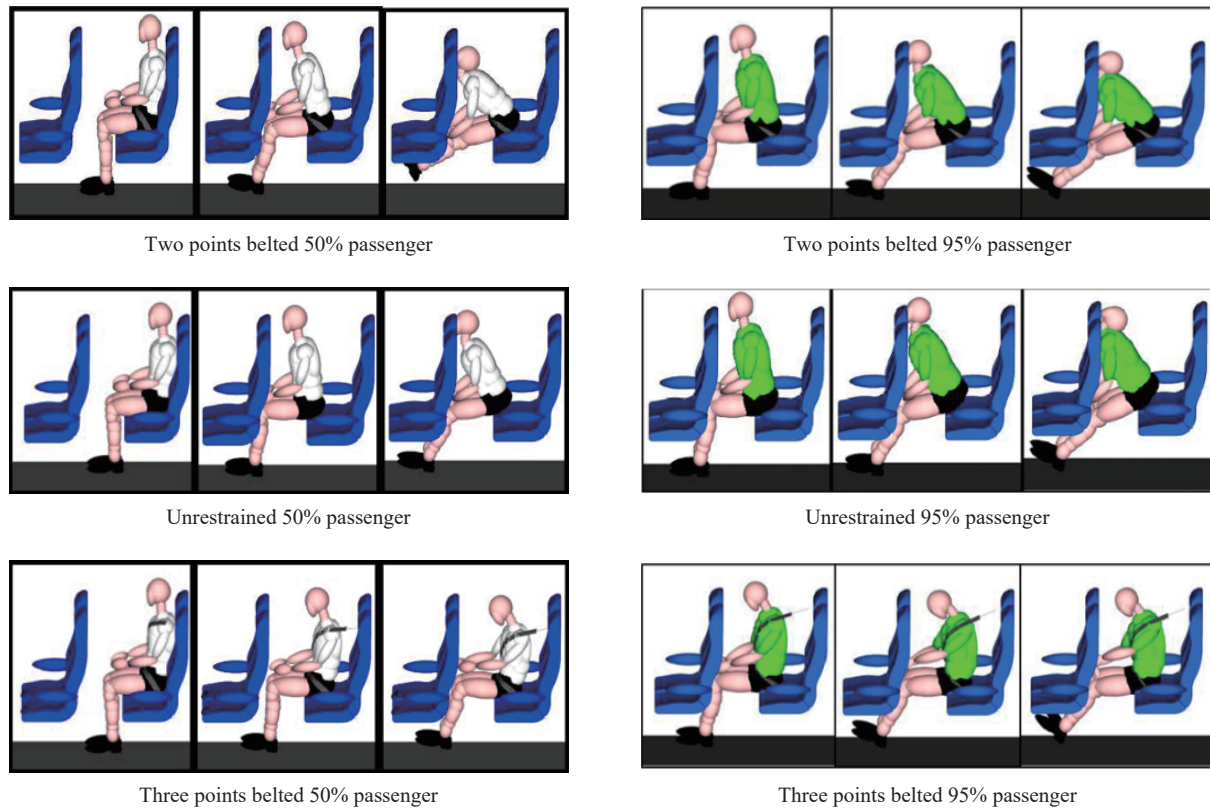


图 23 安全带在保护乘员中发挥的作用<sup>[162]</sup>

Fig. 23 The role of seat belts in protecting occupants<sup>[162]</sup>

车厢内部的小桌子在列车碰撞事故中也有加剧乘员腹部损伤的风险<sup>[163]</sup>。为减小桌子对乘员造成的损伤, 有研究提出将桌子桌面设计为由泡沫、空心管或蜂窝等软材料组成的边缘可压碎、吸能部分和中间刚性框架支撑部分(见图 24), 这种桌面结构设计能够隔离桌子两侧乘员、避免相互之间的撞击, 同时桌子柔性边缘能够及时耗散巨大的冲击能量、有效分散和限制乘客腹部所受到的冲击载荷<sup>[163]</sup>。Severson 等<sup>[164]</sup>以通勤铁路客车为例, 提出了座椅改进策略以更好地管理和耗散二次碰撞中的冲击能量, 有效缓解了乘员颈部、胸部的冲击生物损伤, 改进后的座椅调整了后背高度, 通过增加吸能保护层改善了靠背的力-变形力学性能。Xie 等<sup>[165]</sup>研究了桌子高度、桌子与座位间距离、相邻座椅间距离、桌面接触刚度、座椅接触刚度等因素在列车二次碰撞中对乘员损伤程度的影响, 通过分析乘员损伤参数对这些影响因素的敏感性, 指出优化座椅和桌子的结构和尺寸参数可以有效减缓乘员在碰撞中受到的冲击损伤。Wei 等<sup>[166]</sup>对我国列车座椅的耐撞性进行了评估, 并通过改进/优化座椅结构的铰链、用缓冲弹簧将座椅靠背与底座结构连接, 实现了靠背在碰撞过程中前后小角度范围内的旋转, 起到限制乘员活动范围和缓冲撞击的作用。研究发现改进后的座椅可以明显降低乘员二次冲击带来的损伤, 其中头部(HIC)和颈部损伤指数分别从 2 153 和 4.37 降至 502 和 1.07, 胸部加速度的峰值在座椅后背的保护下降到了 37g, 证明改进座椅中采用的缓冲弹簧是一种有效的乘员隔离策略。

列车碰撞事故中, 乘员位置的微小变化将会大幅增加受伤的风险<sup>[167]</sup>。轨道列车由于其特殊的多节

车厢编组结构(相比于汽车), 在发生碰撞时后部车厢内乘员可以在短时间内迅速做出反应。因此, 在列车发出事故预警或者乘员感知到突发状况时, 如何及时做出有效的自我防护姿势, 对于减缓人体冲击生物损伤、提高乘员生存概率具有重要意义。Yang 等<sup>[168]</sup>提出了一种列车发生碰撞时的乘员自我保护姿势, 即双手放在脑部后面、整个身体蜷曲, 并在仿真中验证了该保护姿势的有效性。然后为了获得身体蜷曲状态下的最佳保护姿势, 将腰部角、腿部角、臀部向后旋转角设计为变量, 对人体蜷曲姿势参数进行优化, 并在 48 km/h 的列车碰撞仿真系统中进行验证, 结果发现, 优化后的最佳保护姿势为 40°-0°-8°, 这种姿势使乘员头部损伤降低了 88%, 颈部轴向力和弯矩分别降低了约 50% 和 80%, 股骨和胫骨的应力分别降低了 53% 和 56%。

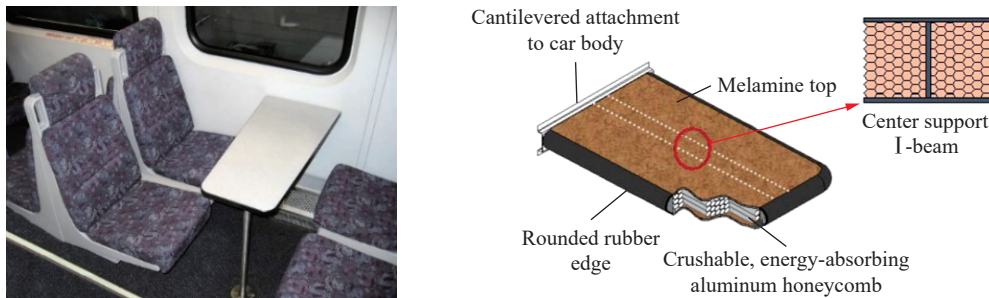


图 24 改进后的小桌板结构示意图<sup>[163]</sup>

Fig. 24 The structural diagram of the improved workstation table<sup>[163]</sup>

### 5.3.2 司机

如果头车驾驶室内缺乏安全有效的限制/防护装置, 列车发生正面碰撞, 将会对司机造成极大伤害。为了提高列车司机的防护能力, Chevalier 等<sup>[169]</sup>探究了将汽车中使用的司机约束系统应用于列车的可行性和适用性, 主要研究和评估了以下两种情况下司机的损伤风险: (1) 座椅配有三点式安全带约束系统和头枕; (2) 在仪表板安装汽车用驾驶员安全气囊, 并与没有安装任何约束装置下的司机损伤情况作了对比。表 5 中列出了 3 种情况(无任何约束、配备安全带、安装安全气囊)下试验测得的司机各关键部位生物损伤评价指标。结果显示, 当司机座椅配备安全带时, 颈部和头部受到损伤的风险反而更高, 这与乘员配备安全带后出现的效果相反; 而当安装安全气囊后, 司机颈部和胸部的生物损伤指标均有所降低, 说明安装安全气囊在某种程度上可有效保护列车司机。因此, 汽车行业一些成熟的司机保护措施可以为列车司机的安全防护提供一定参考, 但同时也需要考虑到二者结构的差异性。

表 5 试验测得的司机各关键部位生物损伤指标<sup>[169]</sup>

Table 5 The biological damage indexes of key parts for drivers measured from tests<sup>[169]</sup>

损伤指标	胸部压缩量/mm	胸部加速度	颈部伸长力矩/mN	头部加速度	$C_{hi}$	股骨载荷/kN
无任何约束	84	94.3g	37.2	37.3g	200	10.0
配备安全带	79	41.5g	45.0	40.6g	297	4.5
安装气囊	27	31.0g	7.9	31.0g		14.0
标准限值	50		57.0	80.0g	1000	9.07(0<t<10 ms) 7.58(t>10 ms)

与乘员类似, 除了利用约束系统让司机保持在座位上而避免二次碰撞带来的伤害外, 还可通过改善司机室周围结构的耐撞性能来减缓其冲击损伤程度。Hault-Dubrullc 等<sup>[170]</sup>对驾驶室内部结构进行了改进和优化, 以保护驾驶员在列车碰撞中的安全。改进后的保护装置包括司机操作台和护膝垫板两部分, 二者均设置了中间可压溃变形区域(见图 25), 期望通过中间区域的塑性变形来耗散驾驶员的动能, 最大程度限制作用在司机膝盖和胸部的冲击力、避免司机出现弹性回弹现象。最后通过试验验证了该保护

装置的有效性,分析结果证明改进后的装置在不增加其他区域(头部、颈部、股骨和胫骨)损伤的前提下,有效性降低了胸部损伤的风险。为避免在大多数列车碰撞中出现的对司机造成严重伤害的情况发生,Anghileri 等<sup>[171]</sup>研制了一种新型应急安全防护装置——驾驶员 SPB(seat push-back)系统,该系统主要包括驾驶员座椅滑动装置、推回装置、连结销和安全带系统,当发生严重的碰撞时,SPB 系统会将驾驶员的座位往后推,以保证其生存空间。仿真验证结果表明,该装置对于防止驾驶员受到严重伤害是可行有效的。Peng 等<sup>[172]</sup>基于司机的碰撞动态响应和生物损伤结果,以司机不同部位(头部、颈部、腹部、胸部、骨盆、四肢)的损伤指标为目标,对司机室的结构参数进行了多目标优化,结果表明,对列车头部司机室开展优化设计可显著降低驾驶员在二次碰撞中造成的损伤。因此,调整司机室的空间结构尺寸参数(操作台与座椅之间的纵向距离、控制台与护膝之间的纵向距离、控制台的横截面厚度等)也可以作为一种减缓司机冲击生物损伤的有效策略。Zolock 等<sup>[173]</sup>改进了司机室内部的结构配置,选用了两根附着在司机室内部的管状可充气结构和一个连接到司机室前端的可变形衬垫,其中管状约束装置呈“V”字形张开,配合衬垫来限制司机的相对运动、提供足够的弯曲保护来避免司机遭受巨大冲击能量,从而减小躯干、颈部和头部等关键部位受伤的可能性。

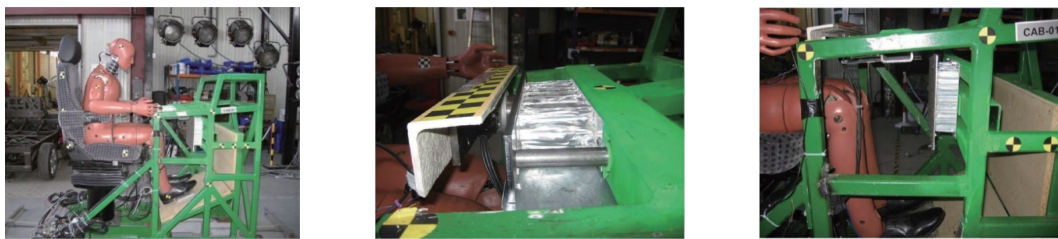


图 25 改进后的司机室保护装置及耐撞性测试<sup>[170]</sup>

Fig. 25 The improved protection device cab and the corresponding crashworthiness test<sup>[170]</sup>

## 6 结 语

随着列车提速和高速化的不断发展,列车运行高安全性和高可靠性保障要求受到了更多的关注和重视。列车发生碰撞事故的概率虽然很小,但一旦发生,就会造成非常严重的人员伤亡和巨大的经济损失。因此,在提高列车主动安全保护以尽可能避免碰撞事故发生的同时,如何进一步提高列车碰撞被动安全防护性能,对提高列车运行安全性具有重要意义。近些年来,基于冲击碰撞试验、数值模拟等手段,在列车碰撞响应姿态、吸能结构和耐撞性车体设计、司乘人员冲击生物损伤等方面已开展了大量研究,为列车碰撞安全分析与被动安全性设计积累了宝贵的研究经验和工作基础。

然而,列车碰撞被动安全防护是一项系统工程,由于列车多编组、大质量、动力分散、乘员无约束等特点,其碰撞后的响应姿态、动态失稳行为和脱轨机理非常复杂,需要从结构部件、车体、列车系统等多个方面开展深入系统的研究,涉及整车能量分配、车体不同区域刚度优化和匹配、吸能材料和结构选型与设计等内容。

在后续列车碰撞被动安全与司乘人员冲击生物损伤研究中,以下几个方面的问题还应该着重考虑:

(1)随着列车高速化发展,现有列车耐撞性标准的适用性有待探究;

(2)目前列车碰撞行为的理论研究还很匮乏,应进一步发展高速动车组碰撞动力学理论;

(3)轨道车辆现有的乘员损伤安全性判据都是借鉴欧美国家汽车碰撞安全的研究成果,由于列车碰撞与汽车碰撞存在显著的差异,以及我国人体与欧美人体在生物力学性能等方面的差异性,如何有效借鉴和参考汽车行业的成熟经验,在我国轨道交通领域建立有效的司乘人员安全性评价标准,仍需要系统深入的研究;

(4)列车被动安全性的核心是保护司乘人员的人身安全,应发展基于司乘人员冲击生物损伤的列车被动安全性设计与评估理论及方法。



## 参考文献:

- [1] 余也艺. 高速运输系统安全 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [2] 雷成, 肖守讷, 罗世辉, 等. 轨道车辆耐碰撞性研究进展 [J]. *铁道学报*, 2013, 35(1): 31–40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.01.005.  
LEI C, XIAO S N, LUO S H, et al. State-of-the-art research development of rail vehicles crashworthiness [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(1): 31–40. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.01.005.
- [3] ZHU T, XIAO S N, LEI C, et al. Rail vehicle crashworthiness based on collision energy management: an overview [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2021, 9(2): 101–131. DOI: 10.1080/23248378.2020.1777908.
- [4] GAO G J, ZHUO T Y, GUAN W Y. Recent research development of energy-absorption structure and application for railway vehicles [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(4): 1012–1038. DOI: 10.1007/s11771-020-4349-3.
- [5] GUAN W Y, GAO G J, YU Y, et al. Crashworthiness analysis and multi-objective optimization of expanding circular tube energy absorbers with cylindrical anti-clamber under eccentric loading for subway vehicles [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 61(4): 1711–1729. DOI: 10.1007/s00158-019-02427-z.
- [6] LI Z X, MA W, YAO S G, et al. Crashworthiness performance of corrugation-reinforced multicell tubular structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 190: 106038. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106038.
- [7] Railway Group Standard. Requirements for rail vehicle structures: GM/RT 2100 [S]. London: Rail Safety and Standards Board Limited, 2012.
- [8] 张振森, 逢增祯. 轨道车辆碰撞能量吸收装置原理及结构设计 (待续) [J]. *国外铁道车辆*, 2001, 38(3): 13–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2001.03.004.  
ZHAGN Z M, PANG Z Z. Principles and structure design of collision energy absorption equipment for rail cars (to be continued) [J]. *Foreign Rolling Stock*, 2001, 38(3): 13–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2001.03.004.
- [9] BSI Standards. Railway applications—Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies: BSEN 15227: 2008+A1: 2010 [S]. Brussels: The British Standards Institution, 2011.
- [10] TYRELL D, SEVERSON K, PERLMAN B. An overview of passenger equipment full scale impact tests: results to date [C] // Proceedings of the World Congress on Railway Research. Cologne, Germany: World Congress on Railway Research, 2001.
- [11] TYRELL D, SEVERSON K, PERLMAN A B. Single passenger rail car impact test. Volume I: overview and selected results: DOT/FRA/ORD-00/02.1 [R]. Washington: U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2000.
- [12] VANINGEN-DUNN C. Single passenger rail car impact test. Volume II: summary of occupant protection program: DOT/FRA/ORD-00/02.2 [R]. Washington: U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2000.
- [13] TYRELL D, SEVERSON K, ZOLOCK J, et al. Passenger rail two-car impact test. Volume I: overview and selected results: DOT/FRA/ORD-01/22.1 [R]. Washington: U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2002.
- [14] TYRELL D, JACOBSEN K, MARTINEZ E, et al. Train-to-train impact test of crash energy management passenger rail equipment: structural results [C] // Proceedings of the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago: ASME, 2006. DOI:10.1115/IMECE2006-13597.
- [15] 畑弘敏, 刘克鲜, 王凤洲. 运用碰撞仿真技术进行提高铁道车辆安全性的研究 [J]. *国外铁道车辆*, 2004, 41(6): 22–27, 31. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2004.06.007.  
TIAN H M, LIU K X, WANG F Z. Research on improvement of rolling stock safety with the collision simulation technology [J]. *Foreign Rolling Stock*, 2004, 41(6): 22–27, 31. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2004.06.007.
- [16] 谢素超, 田红旗, 姚松. 车辆吸能部件的碰撞试验与数值仿真 [J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(3): 1–5. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2008.03.001.  
XIE S C, TIAN H Q, YAO S. Impacting experiment and numerical simulation of energy-absorbing component of vehicles [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8(3): 1–5. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2008.03.001.
- [17] 刘金朝, 房加志, 王成国, 等. 铁道客车大变形碰撞仿真研究 [J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(6): 1–8. DOI: 10.3321/j.issn:1001-4632.2004.06.001.  
LIU J Z, FANG J Z, WANG C G, et al. Simulation research on finite deformation crashworthiness of railway passenger car [J]. *China Railway Science*, 2004, 25(6): 1–8. DOI: 10.3321/j.issn:1001-4632.2004.06.001.
- [18] 李兰. 城轨车辆耐碰撞结构设计及其乘员安全数字仿真研究 [D]. 北京: 铁道科学研究院, 2007.

- [19] 张乐乐, 张啸雨, 崔进, 等. 地铁头车车体耐撞性仿真分析 [J]. *铁道学报*, 2012, 34(3): 22–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2012.03.004.  
ZHANG L L, ZHANG X Y, CUI J, et al. Numerical analysis on crashworthiness of subway head-car body [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(3): 22–27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2012.03.004.
- [20] 卫亮, 张乐乐, 崔进, 等. 地铁碰撞事故中站姿假人的响应仿真与损伤预测 [J]. *铁道学报*, 2015, 37(1): 16–23. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.01.003.  
WEI L, ZHANG L L, CUI J, et al. Response simulation and injury prediction of standing dummy in a subway collision [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(1): 16–23. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.01.003.
- [21] 王存义, 张乐乐, 卫亮, 等. 基于坐姿假人的地铁乘员二次碰撞损伤影响分析 [J]. *铁道学报*, 2015, 37(3): 14–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.03.003.  
WANG C Y, ZHANG L L, WEI L, et al. Analysis of secondary impact on passenger injuries in a subway vehicle based on sitting dummy [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(3): 14–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.03.003.
- [22] WANG W B, REN L H, ZHOU H C, et al. Energy absorption configuration of crashworthy metro train [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 466/467: 724–728. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.466-467.724.
- [23] WALDECK H, 肖守讷. ICE 动力车碰撞仿真 [J]. *控制与信息技术*, 1996(4): 26–32. DOI: 10.13889/j.issn.2095-3631.1996.04.006.  
WALDECK H, XIAO S N. ICE powered car crash simulation [J]. *Control and Information Technology*, 1996(4): 26–32. DOI: 10.13889/j.issn.2095-3631.1996.04.006.
- [24] 张志新, 肖守讷, 阳光武, 等. 高速列车乘员碰撞安全性研究 [J]. *铁道学报*, 2013, 35(10): 24–32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.10.004.  
ZHANG Z X, XIAO S N, YANG G W, et al. Research on collision safety of high-speed train crews & passengers [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(10): 24–32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.10.004.
- [25] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 基于显式有限元的高速列车吸能装置吸能原理研究 [J]. *铁道机车车辆*, 2012, 32(2): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1008-7842.2012.02.001.  
LEI C, XIAO S N, LUO S H. Research on the energy-absorbing theory of high speed train energy-absorbing component based on the explicit finite element [J]. *Railway Locomotive & Car*, 2012, 32(2): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.1008-7842.2012.02.001.
- [26] 丁兆洋, 郑志军, 虞吉林. 列车分布式吸能系统的波传播特性和参数分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(3): 035101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0053.  
DING Z Y, ZHENG Z J, YU J L. Wave propagation characteristics and parameter analysis of the distributed energy absorption system of trains [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(3): 035101. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0053.
- [27] 腾讯网. 日本 40 年来最严重铁路事故—福知山线脱轨事故 [EB/OL]. (2021-04-26) [2021-12-8]. <https://new.qq.com/rain/a/20210426V0CB5C00>.
- [28] 央视网. 追问 7·23 动车追尾事故 [EB/OL]. (2011-07-27) [2021-12-8]. <https://tv.cctv.com/2011/07/27/VIDE1336928346085433.shtml>.
- [29] 央视网. 瑞士: 发生火车相撞事故, 多人受伤 [EB/OL]. (2015-02-21) [2021-12-8]. <http://tv.cctv.com/2015/02/21/VIDE1424453038742862.shtml>.
- [30] 凤凰网. 德国两辆火车迎面相撞, 死伤者多达上百人 [EB/OL]. (2016-02-09) [2021-12-8]. [https://news.ifeng.com/a/20160209/47400747\\_0.shtml](https://news.ifeng.com/a/20160209/47400747_0.shtml).
- [31] 央视网. 美国南卡罗来纳州发生列车相撞事故, 2 人死亡 [EB/OL]. (2018-02-05) [2021-12-8]. <http://tv.cctv.com/2018/02/05/VIDEqbGvWMyAeF5O1r18sDzs180205.shtml>.
- [32] 腾讯网. 台湾列车脱轨事故 [EB/OL]. (2021-04-19) [2021-12-8]. <https://new.qq.com/rain/a/20210419a0ek7y00>.
- [33] FORSBERG R, BJÖRNSTIG U. One hundred years of railway disasters and recent trends [J]. *Prehospital and Disaster Medicine*, 2011, 26(5): 367–373. DOI: 10.1017/S1049023X1100639X.
- [34] 维基百科. 中华人民共和国铁路事故列表 [EB/OL]. (2021-06-04)[2021-07-27]. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%AD%E5%8D%8E%E4%BA%BA%E6%B0%91%E5%85%B1%E5%92%8C%E5%9B%BD%E9%93%81%E8%B7%AF%E4%BA%8B%E6%95%85%E5%88%97%E8%A1%A8>.
- [35] 闻浩, 林露阳, 陈大庆, 等. “7·23”温州动车事故存活伤员损伤特点及救治分析 [J]. *中华急诊医学杂志*, 2011, 20(12): 1248–1250. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2011.12.005.

- WEN H, LIN L Y, CHEN D Q, et al. Features of survived casualties and treatment after “July23” EMU railway accident at Wenzhou station [J]. *Chinese Journal of Emergency Medicine*, 2011, 20(12): 1248–1250. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-0282.2011.12.005.
- [36] ZHANG H H, PENG Y, HOU L, et al. Multistage impact energy distribution for whole vehicles in high-speed train collisions: modeling and solution methodology [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(4): 2486–2499. DOI: 10.1109/TII.2019.2936048.
- [37] DIAS J P, PEREIRA M S. Optimization methods for crashworthiness design using multibody models [J]. *Computers & Structures*, 2004, 82(17/18/19): 1371–1380. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.03.032.
- [38] ZHU T, XIAO S N, HU G Z, et al. Crashworthiness analysis of the structure of metro vehicles constructed from typical materials and the lumped parameter model of frontal impact [J]. *Transport*, 2019, 34(1): 75–88. DOI: 10.3846/transport.2019.7552.
- [39] 李松晏, 郑志军, 虞吉林. 高速列车吸能结构设计和耐撞性分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 164–170. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0164-07.
- LI S Y, ZHENG Z J, YU J L. Energy-absorbing structure design and crashworthiness analysis of high-speed trains [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 164–170. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0164-07.
- [40] KOO J S, YOUN Y H. Crashworthy design and evaluation on the front-end structure of Korean high speed train [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2004, 5(3): 173–180. DOI: 10.1109/TVT.2004.832409.
- [41] XUE X, SCHMID F, SMITH R A. Analysis of the structural characteristics of an intermediate rail vehicle and their effect on vehicle crash performance [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, 221(3): 339–352. DOI: 10.1243/09544097jrrt77.
- [42] XUE X, SCHMID F, SMITH R A. A study of modelling approaches for rail vehicle collision behaviour [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2004, 9(5): 515–525. DOI: 10.1533/ijcr.2004.0307.
- [43] 周和超, 徐世洲, 詹军, 等. 基于有限元和多刚体动力学联合仿真技术的列车碰撞爬车现象研究 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12): 166–171. DOI: 10.3901/JME.2017.12.166.
- ZHOU H C, XU S Z, ZHAN J, et al. Research on the overriding phenomenon during train collision based on FEM and MBS joint simulation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(12): 166–171. DOI: 10.3901/JME.2017.12.166.
- [44] HECHT M. 有轨电车和轻轨车辆的防碰撞性 [J]. *国外铁道车辆*, 2005, 42(5): 39–41. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2005.05.008.
- HECHT M. The crashworthiness of tramcar and LRV [J]. *Foreign Rolling Stock*, 2005, 42(5): 39–41. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2005.05.008.
- [45] 王万静, 梁建英, 崔洪举, 等. 铁道车辆车体撞击试验台建设必要性分析及建议 [J]. *国外铁道车辆*, 2013, 50(6): 1–6. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2013.06.001.
- WANG W J, LIANG J Y, CUI H J, et al. The necessity analysis of construction of the impact test bench for rolling stock carbodies [J]. *Foreign Rolling Stock*, 2013, 50(6): 1–6. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7610.2013.06.001.
- [46] 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室. “列车碰撞试验系统构建与安全评估理论” 研究进展 [EB/OL]. (2018-04-19)[2021-07-27]. <https://hpcm.csu.edu.cn/info/1016/1014.htm>.
- [47] XU P, YANG C X, PENG Y, et al. Crash performance and multi-objective optimization of a gradual energy-absorbing structure for subway vehicles [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 107: 1–12. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.001.
- [48] 刘志祥, 王万静, 张志强, 等. 基于电机牵引方式的轨道车辆碰撞试验台研制 [J]. *中国基础科学*, 2018, 20(6): 11–14, 24. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2018.06.003.
- LIU Z X, WANG W J, ZHANG Z Q, et al. Research and development of the crash test bench for railway vehicles based on motor traction [J]. *China Basic Science*, 2018, 20(6): 11–14, 24. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2412.2018.06.003.
- [49] 中国中车. 76km/h! 中车完成高速列车最高速实车对撞试验 [EB/OL]. (2019-09-27)[2021-11-03]. [https://mp.weixin.qq.com/s/UwbHZvtvdhHAg\\_8M7www](https://mp.weixin.qq.com/s/UwbHZvtvdhHAg_8M7www).
- [50] 高广军, 于尧, 关维元. 用于碰撞实验的列车缩比等效模型构建方法及其系统: CN107798171A [P]. 2018-03-13.
- [51] LU S S, XU P, YAN K B, et al. A force/stiffness equivalence method for the scaled modelling of a high-speed train head car [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 137: 129–142. DOI: 10.1016/j.tws.2019.01.016.

- [52] YU Y, GAO G J, GUAN W Y, et al. Scale similitude rules with acceleration consistency for trains collision [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(10): 2466–2480. DOI: 10.1177/0954409718773562.
- [53] JONES N. Structural impact [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. DOI: 10.1017/CBO9780511624285.
- [54] 田红旗, 卢执中. 列车撞击动力学建模研究 [J]. *铁道车辆*, 1997, 35(4): 8–11.  
TIAN H Q, LU Z Z. High speed trains modelling study on train impact dynamics [J]. *Rolling Stock*, 1997, 35(4): 8–11.
- [55] 卢毓江, 肖守讷, 朱涛, 等. 列车纵向-垂向碰撞动力学耦合模型建模与研究 [J]. *铁道学报*, 2014, 36(12): 6–13. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2014.12.002.  
LU Y J, XIAO S N, ZHU T, et al. Construction of dynamic coupling model of longitudinal-vertical train crash [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(12): 6–13. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2014.12.002.
- [56] DING Z Y, ZHENG Z J, YU J L. A wave propagation model of distributed energy absorption system for trains [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2019, 24(5): 508–522. DOI: 10.1080/13588265.2018.1479482.
- [57] 王文斌. 轨道车辆耐碰撞结构及乘员安全防护技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [58] SCHOLE S A, LEWIS J H. Development of crashworthiness for railway vehicle structures [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 1993, 207(1): 1–16. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1993\_207\_222\_02.
- [59] SCHOLE S A. Railway passenger vehicle design loads and structural crashworthiness [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering*, 1987, 201(3): 201–207. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1987\_201\_177\_02.
- [60] HAN H S, KOO J S. Simulation of train crashes in three dimensions [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2003, 40(6): 435–450. DOI: 10.1076/vesd.40.6.435.17906.
- [61] MAYVILLE R, RANCATORE R, TEGELER L. Investigation and simulation of lateral buckling in trains [C] // Proceedings of the 1999 ASME/IEEE Joint Railroad Conference. Dallas: IEEE, 1999. DOI: 10.1109/RRCON.1999.762407.
- [62] KIRKPATRICK S W, SCHROEDER M, SIMONS J W. Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2001, 6(1): 95–106. DOI: 10.1533/cras.2001.0165.
- [63] BAYKASOGLU C, MUGAN A, SUNBULOGLU E, et al. Rollover crashworthiness analysis of a railroad passenger car [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2013, 18(5): 492–501. DOI: 10.1080/13588265.2013.809645.
- [64] CUARTERO J, LIZARANZU M, CASTEJÓN L, et al. Evaluation of passenger railroad car roll over crashworthiness [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2006, 11(5): 419–424. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0120.
- [65] KOO J S, CHOI S Y. Theoretical development of a simplified wheelset model to evaluate collision-induced derailments of rolling stock [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(13): 3172–3198. DOI: 10.1016/j.jsv.2012.02.014.
- [66] WU X W, CHI M R, GAO H. The study of post-derailment dynamic behavior of railway vehicle based on running tests [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 44: 382–399. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.05.021.
- [67] WANG W, LI G X. Development of high-speed railway vehicle derailment simulation-Part II: exploring the derailment mechanism [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 24: 93–111. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.02.001.
- [68] LING L, DHANASEKAR M, WANG K Y, et al. Collision derailments on bridges containing ballastless slab tracks [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 105: 869–882. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.07.042.
- [69] XU J M, WANG J, WANG P, et al. Study on the derailment behaviour of a railway wheelset with solid axles in a railway turnout [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(1): 123–143. DOI: 10.1080/00423114.2019.1566558.
- [70] ZHOU H C, WANG W B, HECHT M. Three-dimensional derailment analysis of a crashed city tram [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(8): 1200–1215. DOI: 10.1080/00423114.2013.790553.
- [71] KOO J S, CHO H J. A method to predict the derailment of rolling stock due to collision using a theoretical wheelset derailment model [J]. *Multibody System Dynamics*, 2012, 27(4): 403–422. DOI: 10.1007/s11044-011-9270-y.
- [72] CHO H J, KOO J S. A numerical study of the derailment caused by collision of a rail vehicle using a virtual testing model [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(1): 79–108. DOI: 10.1080/00423114.2011.563860.
- [73] YAO S G, ZHU H F, YAN K B, et al. The derailment behaviour and mechanism of a subway train under frontal oblique collisions [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2021, 26(2): 133–146. DOI: 10.1080/13588265.2019.1692506.
- [74] LING L, DHANASEKAR M, THAMBIRATNAM D P. Frontal collision of trains onto obliquely stuck road trucks at level crossings: derailment mechanisms and simulation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 100: 154–165. DOI:

- 10.1016/j.ijimpeng.2016.11.002.
- [75] LING L, DHANASEKAR M, THAMBIRATNAM DP, et al. Lateral impact derailment mechanisms, simulation and analysis [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 94: 36–49. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.04.001.
- [76] LING L, DHANASEKAR M, THAMBIRATNAM D P. A passive road-rail crossing design to minimise wheel-rail contact failure risk under frontal collision of trains onto stuck trucks [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 80: 403–415. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.003.
- [77] LING L, GUAN Q H, DHANASEKAR M, et al. Dynamic simulation of train-truck collision at level crossings [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2017, 55(1): 1–22. DOI: 10.1080/00423114.2016.1240811.
- [78] BAE H U, YUN K M, LIM N H. Containment capacity and estimation of crashworthiness of derailment containment walls against high-speed trains [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(3): 680–696. DOI: 10.1177/0954409716684663.
- [79] BAE H U, YUN K M, MOON J, et al. Impact force evaluation of the derailment containment wall for high-speed train through a collision simulation [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 2626905. DOI: 10.1155/2018/2626905.
- [80] SONG I H, KIM J W, KOO J S, et al. Modeling and simulation of collision-causing derailment to design the derailment containment provision using a simplified vehicle model [J]. *Applied Sciences*, 2019, 10(1): 118. DOI: 10.3390/app10010118.
- [81] International Union of Railways. Loadings of coach bodies and their components: UIC-566 [S]. Paris: International Union of Railways, 1990.
- [82] BSI Standards. 2014 Railway applications—structural requirements of railway vehicle bodies—part 1: locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons): BS EN 12663-1: 2010+A1 [S]. Brussels: The British Standards Institution, 2015.
- [83] BSI Standards. 2010 Railway applications-structural requirements of railway vehicle bodies—part 2: freight wagons: BS EN 12663-2 [S]. Brussels: The British Standards Institution, 2010.
- [84] European Union. Technical specification for interoperability (TSI) [S]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2008.
- [85] ATOC Vehicle Standard. AV/ST9001 Vehicle interior crashworthiness [S]. London: Association of Train Operating Companies, 2002.
- [86] Federal Railroad Administration. 49 CFR Part 229 Railroad locomotive safety standards [S]. Florida: U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2006.
- [87] Federal Railroad Administration. 49 CFR Part 238 Passenger equipment safety standards [S]. Florida: U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2003.
- [88] Association of American Railroads. Standard S-580: mechanical section-manual of standards and recommended practices, locomotive crashworthiness requirements [S]. Washington: Association of American Railroads, 1994.
- [89] American Public Transportation Association. Manual of standards and recommended practices for passenger rail equipment [R]. Washington: American Public Transportation Association, 1999.
- [90] Passenger Rail Equipment Safety Standards (PRESS) Construction and Structural Working Group. Standard for the design and construction of passenger railroad rolling stock: APTA SS-C& S-034-99 [S]. Washington: American Public Transportation Association, 2000.
- [91] 国家铁路局. 动车组车体耐撞性要求与验证规范: TB/T 3500-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [92] 国家铁路局. 机车车辆碰撞试验测试方法: TB/T 3501-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [93] SHAO H, XU P, YAO S G, et al. Improved multibody dynamics for investigating energy dissipation in train collisions based on scaling laws [J]. *Shock and Vibration*, 2016, 2016: 3084052. DOI: 10.1155/2016/3084052.
- [94] CHEN D. Derailment risk due to coupler jack-knifing under longitudinal buff force [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2010, 224(5): 483–490. DOI: 10.1243/09544097JRR363.
- [95] EL-SIBAIE M. Recent advancements in buff and draft testing techniques [C] // Proceedings of the 1993 IEEE/ASME Joint Railroad Conference. Pittsburgh: IEEE, 1993: 115-119. DOI: 10.1109/rrcon.1993.292955.
- [96] LEWIS J H, RASAIH W G, SCHOLAS A. Validation of measures to improve rail vehicle crashworthiness [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 1996, 210(2): 73–85. DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1996\_210\_330\_02.
- [97] JAHROMI A G, HATAMI H. Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact [J].

- [Thin-Walled Structures](#), 2017, 116: 1–11. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.005.
- [98] HATAMI H, RAD M S, JAHROMI A G. A theoretical analysis of the energy absorption response of expanded metal tubes under impact loads [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2017, 109: 224–239. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.06.009.
- [99] NOURI M D, HATAMI H, JAHROMI A G. Experimental and numerical investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading [J]. [Structural Engineering and Mechanics](#), 2015, 54(6): 1245–1266. DOI: 10.12989/sem.2015.54.6.1245.
- [100] HATAMI H, NOURI M D. Experimental and numerical investigation of lattice-walled cylindrical shell under low axial impact velocities [J]. [Latin American Journal of Solids and Structures](#), 2015, 12(10): 1950–1971. DOI: 10.1590/1679-78251919.
- [101] YANG J L, LUO M, HUA Y L, et al. Energy absorption of expansion tubes using a conical–cylindrical die: experiments and numerical simulation [J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 2010, 52(5): 716–725. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.015.
- [102] QI C, YANG S, DONG F L. Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading [J]. [Thin-Walled Structures](#), 2012, 59: 103–119. DOI: 10.1016/j.tws.2012.05.008.
- [103] GUILLOW S R, LU G, GRZEBIETA R H. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminum tubes [J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 2001, 43(9): 2103–2123. DOI: 10.1016/S0020-7403(01)00031-5.
- [104] REDDY T Y. Guist and marble revisited—on the natural knuckle radius in tube inversion [J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 1992, 34(10): 761–768. DOI: 10.1016/0020-7403(92)90040-N.
- [105] REID S R, HARRIGAN J J. Transient effects in the quasi-static and dynamic internal inversion and nosing of metal tubes [J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 1998, 40(2/3): 263–280. DOI: 10.1016/S0020-7403(97)00054-4.
- [106] SHAKERI M, SALEHGHAFARI S, MIRZAEIFAR R. Expansion of circular tubes by rigid tubes as impact energy absorbers: experimental and theoretical investigation [J]. [International Journal of Crashworthiness](#), 2007, 12(5): 493–501. DOI: 10.1080/13588260701483540.
- [107] AL-ABRI O S, PERVEZ T. Structural behavior of solid expandable tubular undergoes radial expansion process—Analytical, numerical, and experimental approaches [J]. [International Journal of Solids and Structures](#), 2013, 50(19): 2980–2994. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.05.013.
- [108] SEIBI A C, BARSOUM I, MOLKI A. Experimental and numerical study of expanded aluminum and steel tubes [J]. [Procedia Engineering](#), 2011, 10: 3049–3055. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.505.
- [109] LI J, GAO G J, DONG H P, et al. Study on the energy absorption of the expanding–splitting circular tube by experimental investigations and numerical simulations [J]. [Thin-Walled Structures](#), 2016, 103: 105–114. DOI: 10.1016/j.tws.2016.01.031.
- [110] YAN J L, YAO S G, XU P, et al. Theoretical prediction and numerical studies of expanding circular tubes as energy absorbers [J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 2016, 105: 206–214. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.11.022.
- [111] KIM J S, HUH H, KWON T S. Crashworthiness design of the shear bolts for light collision safety devices [J]. [International Journal of Modern Physics B](#), 2008, 22(31–32): 5603–5608. DOI: 10.1142/S0217979208050887.
- [112] ZHU T, YANG B Z, YANG C, et al. The mechanism for the coupler and draft gear and its influence on safety during a train collision [J]. [Vehicle System Dynamics](#), 2018, 56(9): 1375–1393. DOI: 10.1080/00423114.2017.1413198.
- [113] DUNCAN I B, WEBB P A. The longitudinal behaviour of heavy haul trains using remote locomotives [C] // Proceedings of the Fourth International Heavy Haul Railway Conference. Brisbane: Institution of Engineers, 1989: 587–590.
- [114] LU G. Collision behaviour of crashworthy vehicles in rakes [J]. [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit](#), 1999, 213(3): 143–160. DOI: 10.1243/0954409991531100.
- [115] MILHO J F, AMBRÓSIO J A C, PEREIRA M F O S. Validated multibody model for train crash analysis [J]. [International Journal of Crashworthiness](#), 2003, 8(4): 339–352. DOI: 10.1533/ijcr.2003.0242.
- [116] 庞艳凤, 陈凯. 国内城轨车辆车钩缓冲装置应用情况和统型设想 [J]. [铁道车辆](#), 2011, 49(1): 22–25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7602.2011.01.007.
- PANG Y F, CHEN K. Application of coupler draft gears on domestic urban rail vehicles and the idea of unifying models [J]. [Rolling Stock](#), 2011, 49(1): 22–25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-7602.2011.01.007.
- [117] ZHOU H C, MEI M S, ZHANG J M, et al. Investigations on the vertical buckling of railway vehicle's anti-climber [J]. [International Journal of Crashworthiness](#), 2021, 26(2): 171–181. DOI: 10.1080/13588265.2019.1701354.

- [118] YANG C, LI Q, XIAO S N, et al. On the overriding issue of train front end collision in rail vehicle dynamics [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2018, 56(4): 506–528. DOI: 10.1080/00423114.2017.1394472.
- [119] YAO S G, XIAO X L, XU P, et al. The impact performance of honeycomb-filled structures under eccentric loading for subway vehicles [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 123: 360–370. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.031.
- [120] ZHOU H C, WANG W B, HECHT M. Three-dimensional override analysis of crashed railway multiple units [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(4): 663–674. DOI: 10.1080/00423114.2011.631552.
- [121] GAO G J, GUAN W Y, LI J, et al. Experimental investigation of an active–passive integration energy absorber for railway vehicles [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 117: 89–97. DOI: 10.1016/j.tws.2017.03.029.
- [122] GUAN W Y, GAO G J, LI J, et al. Crushing analysis and multi-objective optimization of a cutting aluminum tube absorber for railway vehicles under quasi-static loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 123: 395–408. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.031.
- [123] 岳伟玲. 轨道车辆拉削式防爬器吸能特性的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [124] 张云峰, 杭志洲, 方灵任. 刨削式与整体型蜂窝式车辆防爬器对撞性能分析 [J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(2): 26–30. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.02.007.
- ZHANG Y F, HANG Z Z, FANG J R. Collision performance analysis of planing and integral honeycombing anti-climbs for vehicles [J]. *Urban Mass Transit*, 2020, 23(2): 26–30. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.02.007.
- [125] BAYKASOĞLU C, SÜNBÜLOĞLU E, BOZDAĞ S E, et al. Railroad passenger car collision analysis and modifications for improved crashworthiness [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2011, 16(3): 319–329. DOI: 10.1080/13588265.2011.566475.
- [126] XUE X, SMITH R A, SCHMID F. Analysis of crush behaviours of a rail cab car and structural modifications for improved crashworthiness [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2005, 10(2): 125–136. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0332.
- [127] XIE S C, LIANG X F, ZHOU H, et al. Crashworthiness optimisation of the front-end structure of the lead car of a high-speed train [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53(2): 339–347. DOI: 10.1007/s00158-015-1332-y.
- [128] XIE S C, LIANG X F, ZHOU H. Design and analysis of a composite energy-absorbing structure for use on railway vehicles [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(3): 825–839. DOI: 10.1177/0954409714566058.
- [129] LI B H, LU Z J, YAN K B, et al. Experimental study of a honeycomb energy-absorbing device for high-speed trains [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2020, 234(10): 1170–1183. DOI: 10.1177/0954409719882564.
- [130] PENG Y, DENG W Y, XU P, et al. Study on the collision performance of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 94: 663–672. DOI: 10.1016/j.tws.2015.05.016.
- [131] SHARIFI S, SHAKERI M, FAKHARI H E, et al. Experimental investigation of bitubal circular energy absorbers under quasi-static axial load [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 89: 42–53. DOI: 10.1016/j.tws.2014.12.008.
- [132] RAHI A. Controlling energy absorption capacity of combined bitubular tubes under axial loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 123: 222–231. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.032.
- [133] VINAYAGAR K, KUMAR A S. Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, 112: 184–193. DOI: 10.1016/j.tws.2016.12.008.
- [134] AZIMI M B, ASGARI M. A new bi-tubular conical-circular structure for improving crushing behavior under axial and oblique impacts [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 105: 253–265. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.11.012.
- [135] FANG J G, GAO Y K, SUN G Y, et al. Crashworthiness design of foam-filled bitubal structures with uncertainty [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2014, 67: 120–132. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2014.08.005.
- [136] TYRELL D, PERLMAN A B. Evaluation of rail passenger equipment crashworthiness strategies [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003, 1825(1): 8–14. DOI: 10.3141/1825-02.
- [137] SEVERSON K J, TYRELL D C, PERLMAN A B. Collision safety comparison of conventional and crash energy management passenger rail car designs [C] // Proceedings of the IEEE/ASME 2003 Joint Rail Conference. Chicago: ASME, 2003: 83–90. DOI: 10.1115/rtd2003-1657.
- [138] 田红旗. 客运列车耐冲击吸能车体设计方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2001, 1(1): 110–114. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2001.01.028.

- TIAN H Q. Crashworthy energy absorbing car-body design method for passenger train [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2001, 1(1): 110–114. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2001.01.028.
- [139] JACOBSEN K, TYRELL D, PERLMAN B. Impact test of a crash-energy management passenger rail car [C] // Proceedings of the ASME/IEEE 2004 Joint Rail Conference. Baltimore: ASME, 2004. DOI: 10.1115/rtd2004-66045.
- [140] SEVERSON K J, PARENT D P. Train-to-train impact test of crash energy management passenger rail equipment: occupant experiments [C] // Proceedings of the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago: ASME, 2006. DOI: 10.1115/imece2006-14420.
- [141] TYRELL D, GORDON J. Crash energy management: an overview of federal railroad administration research [J]. *TR News*, 2013(286): 4–10.
- [142] JACOBSEN K M. Collision dynamics modeling of crash energy management passenger rail equipment [D]. Medford-Somerville: Tufts University, 2008.
- [143] MERAN A P, BAYKASOGLU C, MUGAN A, et al. Development of a design for a crash energy management system for use in a railway passenger car [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2014, 230(1): 206–219. DOI: 10.1177/0954409714533321.
- [144] FANG Z W, WANG J R, LIU H T, et al. Design and analysis for a 4-stage crash energy management system for railway vehicles [C] // ICRVS 2018: International Conference on Railway Vehicles and Systems. Barcelona, Spain: International Journal of Transport and Vehicle Engineering, 2018.
- [145] LU G. Energy absorption requirement for crashworthy vehicles [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2002, 216(1): 31–39. DOI: 10.1243/0954409021531665.
- [146] 杨宝柱, 肖守讷, 杨超. 能量吸收方案对列车碰撞响应的影响 [J]. *城市轨道交通研究*, 2018, 21(3): 48–51. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.03.013.
- YANG B Z, XIAO S N, YANG C. Effect of energy absorbing schemes on train crash re-sponse [J]. *Urban Mass Transit*, 2018, 21(3): 48–51. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2018.03.013.
- [147] XIE S C, ZHOU H. Forecasting impact injuries of unrestrained occupants in railway vehicle passenger compartments [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2014, 15(7): 740–747. DOI: 10.1080/15389588.2013.862590.
- [148] XIE S C, TIAN H Q. Dynamic simulation of railway vehicle occupants under secondary impact [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(12): 1803–1817. DOI: 10.1080/00423114.2013.834368.
- [149] VANINGEN-DUNN C. Commuter rail seat testing and analysis of facing seats: DOT/FRA/ORD-03/06 [R]. Washington: U. S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, 2003.
- [150] TYRELL D, ZOLOCK J, VANINGEN-DUNN C. Train-to-train impact test: occupant protection experiments [C] // Proceedings of the ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, USA: ASME, 2002. DOI:10.1115/IMECE2002-39611.
- [151] TYRELL D C, SEVERSON K J, MARQUIS B P. Analysis of occupant protection strategies in train collisions [C] // Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. San Francisco, USA: ASME, 1995.
- [152] CARVALHO M, AMBROSIO J, MILHO J. Implications of the inline seating layout on the protection of occupants of railway coach interiors [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2011, 16(5): 557–568. DOI: 10.1080/13588265.2011.611399.
- [153] CARVALHO M, MARTINS A, MILHO J. Validation of a railway inline seating model for occupants injury biomechanics [J]. *International journal of crashworthiness*, 2018, 23(3): 328–335. DOI: 10.1080/13588265.2017.1328651.
- [154] CARVALHO M, MILHOJ, AMBROSIO J, et al. Railway occupant passive safety improvement by optimal design [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2017, 22(6): 624–634. DOI: 10.1080/13588265.2016.1221332.
- [155] 施青松, 刘艳文, 杨超, 等. 轨道卧铺客车乘员二次碰撞安全性研究 [J]. *机车车辆工艺*, 2013(6): 6–8,10. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6034.2013.06.003.
- SHI Q S, LIU Y W, YANG C, et al. Research of secondary crashworthiness for passengers in railway sleeping cars [J]. *Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2013(6): 6–8,10. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6034.2013.06.003.
- [156] 佟鑫, 张乐乐, 刘文, 等. 新型纵向卧铺结构被动安全性仿真分析与评估 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(1): 147–155. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180942.



- TONG X, ZHANG L L, LIU W, et al. Simulation analysis and evaluation on passive safety of the longitudinal berth [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(1): 147–155. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20180942.
- [157] OMINO K, SHIROTO H, SAITOH A, et al. Behavior analysis of passengers on bench seats in a train collision [J]. *Quarterly Report of RTRI*, 2008, 49(1): 47–52. DOI: 10.2219/rtriq.49.47.
- [158] ROBERT T, BEILLAS P, MAUPAS A, et al. Conditions of possible head impacts for standing passengers in public transportation: an experimental study [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2007, 12(3): 319–327. DOI: 10.1080/13588260701433552.
- [159] HAULT-DUBRULLE A, ROBACHE F, DRAZETIC P, et al. Analysis of train driver protection in rail collisions: part I. evaluation of injury outcome for train driver in desk impact [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2013, 18(2): 183–193. DOI: 10.1080/13588265.2013.769484.
- [160] ZHOU H C, ZHAN J, WANG W B, et al. Dynamic simulation of train driver under secondary impact [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(12): 1–10. DOI: 10.1177/1687814017743111.
- [161] CAPUTO F, LAMANNA G, SOPRANO A. On the evaluation of the overloads coming from the use of seat-belts on a passenger railway seat [J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2012, 8(4): 335–348. DOI: 10.1007/s10999-012-9199-1.
- [162] CAPUTO F, FIDANZA F, LAMANNA G. Multibody investigation on the passive safety performances of seats in railway vehicles [C] // Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Istanbul, Turkey: ASME, 2010. DOI:10.1115/ESDA2010-24766.
- [163] PARENT D P, TYRELL D C, RANCATORE R, et al. Design of a workstation table with improved crashworthiness performance [C]//Proceedings of theASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando: ASME, 2005. DOI:10.1115/IMECE2005-82779.
- [164] SEVERSON K J, TYRELL D C, RANCATORE R. Crashworthiness requirements for commuter rail passenger seats [C]// Proceedings of theASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando, USA: ASME, 2005. DOI: 10.1115/IMECE2005-82643.
- [165] XIE S C, TIAN H Q. Influencing factors and sensitivity analysis of occupant impact injury in passenger compartment [J]. *Traffic Injury Prevention*, 2013, 14(8): 816–822. DOI: 10.1080/15389588.2013.768341.
- [166] WEI L, ZHANG L L. Evaluation and improvement of crashworthiness for high-speed train seats [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2018, 23(5): 561–568. DOI: 10.1080/13588265.2017.1367354.
- [167] PROCHOWSKI L, ŻUCHOWSKI A. Analysis of the influence of passenger position in a car on a risk of injuries during a car accident [J]. *Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2014, 16(3): 360–366.
- [168] YANG W L, XIE S C, LI H H, et al. Design and injury analysis of the seated occupant protection posture in train collision [J]. *Safety Science*, 2019, 117: 263–275. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.04.028.
- [169] CHEVALIER M C, MAUPAS A, LEVEQUE D, et al. Air-bag protection of the train driver during a collision [C] // Proceedings of the 2005 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact. Prague, Czechoslovakia: IRCOBI Conference, 2015.
- [170] HAULT-DUBRULLE A, ROBACHE F, DRAZETIC P, et al. Analysis of train driver protection in rail collisions: part II. design of a desk with improved crashworthiness performance [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2013, 18(2): 194–205. DOI: 10.1080/13588265.2013.769485.
- [171] ANGHILERI M, CASTELLETTI L M L, PIROLA M, et al. CIV class tram crashworthiness assessment [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2008, 13(4): 425–435. DOI: 10.1080/13588260802049372.
- [172] PENG Y, HOU L, YANG M Z, et al. Investigation of the train driver injuries and the optimization design of driver workspace during a collision [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2017, 231(8): 902–915. DOI: 10.1177/0954409716647418.
- [173] ZOLOCK J D, TYRELL D C. Locomotive cab occupant protection [C] // Proceedings of the ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Washington, USA: ASME, 2003. DOI: 10.1115/IMECE2003-55121.

(责任编辑 曾月蓉)