

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0053

列车分布式吸能系统的波传播特性和参数分析*

丁兆洋, 郑志军, 虞吉林

(中国科学技术大学近代力学系中国科学院材料力学行为和 design 重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 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的简化理论模型。基于一维应力波理论, 对碰撞过程中各吸能器的响应进行了理论分析, 得到相关的控制方程并求解。观察到各吸能器界面上典型的阶段性、平台样的速度响应, 并分析了其机理, 进而对如何合理设置和排布吸能器进行了分析。结果表明: 对于相邻的吸能器, 碰撞前端吸能器的压溃强度应高于后端, 否则后端吸能器无法同时发挥作用; 各吸能器的平台应力的分布和排布是决定吸能系统作用效果的控制参量, 能够决定各吸能器的吸能时长和吸能总量。具体分析相邻吸能器的平台应力分布对系统吸能性能的影响, 得到了在所研究的情况下使总吸能最大的优化设计参数。该研究可为列车分布式吸能系统的优化设计提供理论指导。

关键词: 弹性波; 分布式吸能系统; 平台应力; 优化设计; 传播特性; 压溃强度

中图分类号: O347.4

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

高速列车和城市轨道交通飞速发展, 列车的安全性问题愈发受到关注。主动安全技术是避免发生列车事故的重要手段。然而, 频繁的列车事故表明, 主动安全技术依赖于设备可靠性和驾驶员的反应时间, 并不能完全保证列车的安全性。因此, 被动安全技术仍然是列车安全的最后保障, 亟需发展。

对提高列车耐撞性的研究已经取得了一定的进展。Drazetic 等^[1]在法国进行了实际尺寸的运动列车与静止列车的对撞试验, 研究了列车在碰撞过程中的爬车问题。随着计算机技术的发展, 数值模拟结合理论分析取代实验研究成为了研究列车耐撞性的主要研究手段。学者们以多体动力学和相关数值模拟^[2-5]为技术手段, 对列车碰撞问题进行了研究。Dias 等^[6]和 Duan 等^[7]提出了一系列关于列车结构的优化设计, 提高列车的能量吸收能力和耐撞性。Tyrell 等^[8]发展了以 CEM (crash energy management) 结构专利为基础的列车, CEM 是一种提供铁路设备耐撞性的策略, 在车厢两端采用压溃区, 在碰撞过程中压溃区以一种可控的方式坍塌来吸收碰撞能量, 为乘员保留了车厢中的存活空间并限制了乘员区域的减速度。研究人员还关注了乘员在列车事故中的二次碰撞问题, 在模拟试验中加入人偶模型从而获取乘员在事故中更详尽的响应情况^[9-10]; 也进行了关于吸能器的材料和结构的研究, 提出了一些优化设计方法^[11-13]。

虽然 CEM 列车已经采用了分布式能量吸收系统, 但现有的研究主要集中于车头处吸能装置的设计和优化上。即使对于少数考虑了分布式吸能系统的研究, 也大多采用刚体模型模拟车厢。然而, 列车是一个长尺寸、车厢相互连接的结构系统, 一节车厢的长度就达到 25 m 左右。当碰撞发生时, 冲击载荷以应力波的形式从列车的前端向后端传播, 弹性波传过一节车厢大约需要 5 ms, 所涉及的长度随着时间的推移而增加。这意味着在冲击载荷到达下一个吸能器之前, 前面的吸能器已经有一部分被压缩。因此, 为了合理评估分布式吸能系统的性能, 应考虑沿车厢传播的弹性波的影响。

本文中建立一个分布式吸能系统的简化的波传播模型, 同时考虑碰撞过程中车厢中的弹性波和吸能器中塑性波的影响, 并基于该理论模型对碰撞过程中分布式吸能系统的响应、主要控制参数和机理进行理论分析, 以期能为轨道交通中列车分布式吸能系统的优化设计提供理论指导。

* 收稿日期: 2018-02-07; 修回日期: 2018-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372307, 11772330); 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2480000003)

第一作者: 丁兆洋(1988—), 男, 博士研究生, dingzhy@mail.ustc.edu.cn;

通信作者: 郑志军(1979—), 男, 副教授, zjzheng@ustc.edu.cn。

1 理论分析模型

1.1 列车碰撞模型的简化

列车的分布式吸能系统是指将吸能部件分布安置在列车的车头和车厢连接处,各部分的吸能部件在碰撞发生时逐级触发、共同作用的能量吸收系统。当碰撞发生时,冲击载荷通过车厢结构以弹性波的形式从车厢前端吸能部件传递到后端吸能部件,轴向作用对吸能部件的压溃破坏行为和碰撞载荷的传递起决定性作用。因此,可忽略复杂的三维结构对冲击载荷的传递和能量吸收的各种影响,仅考虑轴向效应,即将列车简化为一维的、由代表列车车厢的弹性杆和代表能量吸收部件的塑性夹层构成的组合模型,并基于一维应力波理论对其行为进行初步研究。

能量吸收装置通过塑性压溃吸收冲击能量,综合考虑时间尺度和关注重点,可以采用刚性-理想塑性(R-PP-L)模型^[14]模拟能量吸收装置的材料属性,如图 1 所示。该模型仅包含两个参数,即平台应力(σ_{01}, σ_{02} 或 σ_{03})和压实应变(ϵ_d),分别表征平均撞击应力和压缩效率。另一方面,由于不考虑车厢的塑性变形,采用线弹性材料模拟车厢的材料属性。每个带有能量吸收器的车厢的简化模型,如图 2 所示,由弹性杆和能量吸收层组成。车头具有独立的吸能器,车厢两端通常各有一个吸能器,为了简化起见,将两个相邻车厢之间的吸能器合并在一起并放置在后车厢前端。本文中仅考虑前 3 个吸能层,如图 3 所示,自车头向车尾依次记为 1、2 和 3。需要注意的是,车头处的吸能器应具有更大的吸能能力,而车厢中部的各吸能器通常是相同且弱于车头的,因此吸能层 1 的平台应力 σ_{01} 大于后继吸能层的平台应力 σ_{02} 和 σ_{03} 。本文中,取 $\sigma_{03}=\sigma_{02}$ 。

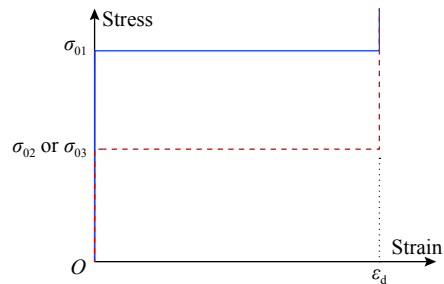


图 1 吸能器的 R-PP-L 模型

Fig. 1 The rate-independent, rigid-perfectly plastic-locking (R-PP-L) model for impact energy absorber

利用上述分节车厢的简化模型,构造含车头的多节列车的简化模型。本文中将质量块恒速撞击静止的多节组合杆的碰撞情形进行分析,该碰撞情形对应于具有一定初速度的列车撞击固定的墙体或者两列相同的列车对撞的实际情形。由于列车碰撞过程中起主要吸能作用的是车头的吸能装置以及比较靠前的车厢连接处的吸能装置,所以本文中只分析最前端的 3 个吸能装置,后面的车厢用半无限长的弹性杆代替,如图 3 所示。

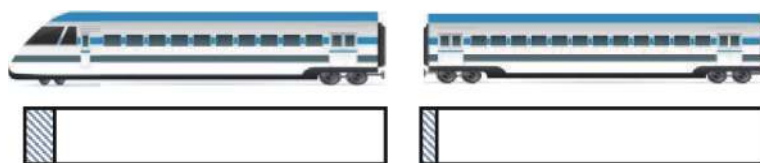


图 2 车头和车厢的简化模型

Fig. 2 Simplified models of train head and carriage

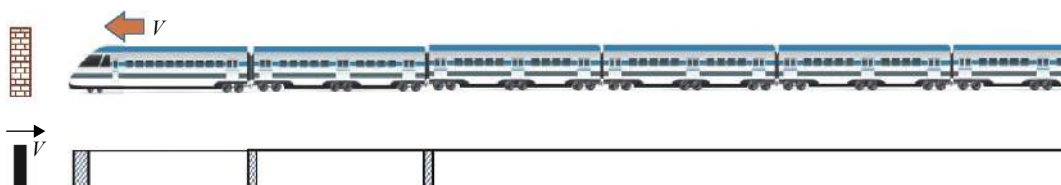


图 3 列车碰撞情形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of train collision

1.2 列车碰撞过程的理论分析

应用一维应力波理论, 对上述碰撞情景进行理论分析, 研究碰撞过程中分布式能量吸收系统的响应规律和抗冲击性能。基于拉格朗日坐标系建立碰撞响应的控制方程。

理论推导过程中采用的参数为: 吸能层 1、吸能层 2 和吸能层 3 的平台应力分别为 $\sigma_{01}=150$ MPa、 $\sigma_{02}=100$ MPa 和 $\sigma_{03}=100$ MPa; 吸能层 1 的密度和长度分别为 $\rho_1=600$ kg/m³、 $L_1=1$ m, 吸能层 2 和吸能层 3 的密度和长度分别为 $\rho_2=\rho_3=400$ kg/m³、 $L_2=L_3=0.5$ m; 各吸能层的压实应变均设为 $\varepsilon_d=0.8$; 弹性杆的杨氏模量和密度分别为 $E=66$ GPa、 $\rho_0=2\ 700$ kg/m³, 连接 3 个吸能层的两段弹性杆长度均为 $L_0=25$ m; 吸能层和弹性杆的横截面积均为 $s=0.01$ m², 质量块的恒定冲击速度为 $V=20$ m/s。

在碰撞过程中, 弹性波的传播是冲击载荷和能量从碰撞前端传递到后端的连接纽带。图 4 为碰撞过程中的变形过程和应力波传播情况的示意图。可以利用弹性波到达相应界面的时刻, 即特征时间 $t_n(n=1, 2, \dots)$, 将分析过程划分为若干阶段。对每个阶段, 杆中弹性波的传播可以分解为几个弹性简单波的叠加。因此, 弹性杆中的速度和应力分布由杆两端界面处产生的左行波、右行波两列弹性波叠加结果决定。根据应力波理论, 可以得到以界面应力和速度为变量的常微分控制方程组。特征时间满足

$$t_n = nL_0/C_0 \tag{1}$$

式中: $C_0 = \sqrt{E/\rho_0}$ 为杆中的弹性波速。

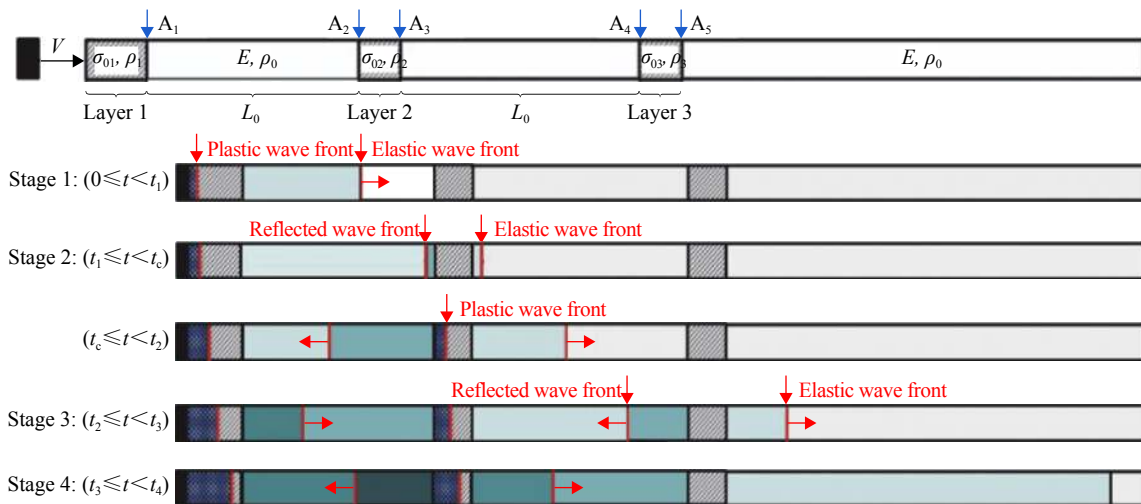


图 4 碰撞中的变形过程和应力波传播情况

Fig. 4 Schematic diagram of the deformation process and the propagation of stress waves

(a) 阶段 1 ($0 \leq t < t_1$)

当刚性墙撞击组合杆前端时, 吸能层 1 开始压溃, 压溃波开始在吸能层 1 中传播。压溃波波阵面前端的应力达到其平台应力 σ_{01} , 推动吸能层 1 的未变形部分向前加速运动。根据弹性波理论, 在这个加速过程中, 随着界面 A_1 的速度的增大, 界面 A_1 的应力随之上升直至达到 σ_{01} 。同时, 弹性波通过弹性杆以弹性波速 C_0 从界面 A_1 向界面 A_2 传播。在弹性波到达界面 A_2 之前, 吸能层 2 处于静止且未变形状态。由压溃波波阵面上的质量守恒关系和吸能层 1 未变形部分的动量守恒关系可以得到阶段 1 的控制方程为:

$$\frac{d\Phi_1^{(1)}}{dt} = \frac{V - v_{R1}^{(1)}}{\varepsilon_d} \tag{2}$$

$$\frac{dv_{R1}^{(1)}}{dt} = \frac{\sigma_{01} - E v_{R1}^{(1)} / C_0}{\rho_1 (L_1 - \Phi_1^{(1)})} \tag{3}$$

式中: Φ_1 是吸能层中被压实部分的长度, v_{R1} 是从界面 A_1 处产生的右行波在界面 A_1 处引起的质点速度,

上标“(n)”表示控制方程所代表的响应的第n个阶段; $\Phi_1^{(1)}(0) = 0, v_{R1}^{(1)}(0) = 0$ 。

(b) 阶段2 ($t_1 \leq t < t_2$)

当弹性波传递到界面 A_2 后, 在界面处产生反射波并向左传播, 同时从界面 A_3 处产生一个弹性波在杆2中向右传播。界面 A_2 处的应力和速度响应是由传递到该处的右行弹性波和此处产生的左行弹性波的叠加效应决定的。需要注意的是, 由到达的右行弹性波在界面 A_2 处引起的响应, 与其在阶段1中在界面 A_1 处产生的响应具有对应关系, 两者只相差一个时间差:

$$\Delta t = L_0/C_0 \quad (4)$$

最初很短的时间里, 界面 A_2 处的应力 σ_{A_2} 小于 σ_{02} , 吸能层2作为一个整体向右加速运动, 对整个吸能层2用动量守恒关系, 得到此段时间的控制方程:

$$\frac{dv_{L1}^{(2)}}{dt} = -\frac{2Ev_{L1}^{(2)}(t)}{C_0\rho_2L_2} - \frac{dv_{R1}^{(1)}(\bar{t})}{dt} \quad (5)$$

式中: v_{L1} 是由左行弹性波引起的界面 A_2 处的质点速度响应, $\bar{t} = t - \Delta t, v_{L1}(t_1) = 0$ 。

当界面 A_2 的应力在 t_c 时刻达到吸能层2的平台应力后, 吸能层2开始压溃吸能。时刻 t_c 可以由式(5)求得。由压溃波波阵面的质量守恒关系, 对吸能层2的变形部分和未变形部分使用动量守恒关系, 得到阶段2中压溃响应的控制方程为:

$$\frac{d\Phi_2^{(2)}}{dt} = \frac{v_{L1}^{(2)}(t) + v_{R1}^{(1)}(\bar{t}) - v_{R2}^{(2)}(t)}{\varepsilon_d} \quad (6)$$

$$\frac{dv_{L1}^{(2)}}{dt} = -\frac{E[v_{L1}^{(2)}(t) - v_{R1}^{(1)}(\bar{t})]/C_0 - \sigma_{02} - \rho_2[v_{L1}^{(2)}(t) + v_{R1}^{(1)}(\bar{t}) - v_{R2}^{(2)}(t)]^2/\varepsilon_d}{\rho_2\Phi_2^{(2)}(t)} - \frac{dv_{R1}^{(1)}(\bar{t})}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{dv_{R2}^{(2)}}{dt} = \frac{\sigma_{02} - Ev_{R2}^{(2)}/C_0}{\rho_2(L_1 - \Phi_2^{(2)})} \quad (8)$$

式中: v_{R2} 为界面 A_3 处由右行弹性波所引起的质点速度响应, $\Phi_2^{(2)}(t_{c2}) = 0, v_{L1}^{(2)}(t_{c2}) = v_{R1}^{(1)}(t_{c2} - \Delta t) - C_0\sigma_{02}/E, v_{R2}^{(2)}(t_{c2}) = 2v_{R1}^{(1)}(t_{c2} - \Delta t) - C_0\sigma_{02}/E$ 。由于没有新的弹性波传递回界面 A_1 , 关于吸能层1的控制方程没有发生改变, 故没有在这一节继续展示。在后续的理论推导部分, 也只展示该阶段出现的新的控制方程。

(c) 阶段3 ($t_2 \leq t < t_3$)

第一段弹性杆中的左行弹性波在 t_2 时刻到达界面 A_1 。相较于阶段1, 此阶段中界面 A_1 的速度响应由左行弹性波和新的右行弹性波的叠加效应决定。同样, 由吸能层1的压溃波波阵面的质量守恒关系和未变形部分的动量守恒关系, 可以得到控制方程:

$$\frac{d\Phi_1^{(3)}}{dt} = \frac{V - [v_{R1}^{(3)}(t) + v_{L1}^{(2)}(\bar{t})]}{\varepsilon_d} \quad (9)$$

$$\frac{dv_{R1}^{(3)}}{dt} = \frac{\sigma_{01} - E[v_{R1}^{(3)}(t) - v_{L1}^{(2)}(\bar{t})]/C_0}{\rho_1[L_1 - \Phi_1^{(3)}(t)]} - \frac{dv_{L1}^{(2)}(\bar{t})}{dt} \quad (10)$$

式中: $v_{L1}^{(2)}(\bar{t})$ 可以通过阶段2的控制方程求解得到, 在此处视为已知, $\Phi_1^{(3)}(t_2) = \Phi_1^{(1)}(t_2), v_{R1}^{(3)}(t_2) = v_{R1}^{(1)}(t_2) + v_{L1}^{(2)}(t_2 - \Delta t)$

同时, 第二段弹性杆中的右行弹性波在 t_2 时刻到达界面 A_4 , 吸能层3开始整体加速运动, 界面 A_4 处产生左行反射波, 界面 A_3 处产生右行弹性波传入半无限长的弹性杆。与阶段2对吸能层2的分析一致, 最初界面 A_4 处的应力小于吸能层3的平台应力, 吸能层3未发生变形。对吸能层3整体应用动量守恒关系, 得到:

$$\frac{dv_{L2}^{(3)}}{dt} = \frac{E[v_{R2}^{(2)}(\bar{t}) - v_{L2}^{(3)}(t)] - E[v_{R2}^{(2)}(\bar{t}) + v_{L2}^{(3)}(t)]}{C_0 \rho_2 L_2} - \frac{dv_{R2}^{(2)}(\bar{t})}{dt} \quad (11)$$

式中: $v_{L2}^{(3)}$ 是界面 A_4 处产生的左行弹性波引起的质点速度响应, $v_{L2}^{(3)}(t_2) = 0$

经过计算和后续的理论分析, 发现吸能层 3 不会发生压溃, 可以视为刚体。具体结果和分析将在下一节进行详细论述。

(d) 阶段 4 ($t_3 \leq t < t_4$)

在 t_3 时刻, 新的右行弹性波传递到界面 A_2 , 从吸能层 3 处反弹产生的左行弹性波到达了界面 A_3 。在阶段 4 中, 界面 A_3 的响应由左行弹性波和右行弹性波的叠加效应决定, 这是此阶段响应与阶段 2 响应的唯一不同。类比于阶段 2, 得到阶段 4 的控制方程为:

$$\frac{d\Phi_2^{(4)}}{dt} = \frac{v_{R1}^{(3)}(\bar{t}) + v_{L1}^{(4)}(t) - [v_{R2}^{(4)}(t) + v_{L2}^{(3)}(\bar{t})]}{\varepsilon_d} \quad (12)$$

$$\frac{dv_{L1}^{(4)}}{dt} = -\frac{E[v_{L1}^{(4)}(t) - v_{R1}^{(3)}(\bar{t})] / C_0 + \sigma_{02} + \rho_2 [v_{L1}^{(4)}(t) + v_{R1}^{(3)}(\bar{t}) - v_{R2}^{(4)}(t) - v_{L2}^{(3)}(\bar{t})]^2 / \varepsilon_d}{\rho_2 \Phi_2^{(4)}(t)} - \frac{dv_{R1}^{(3)}(\bar{t})}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dv_{R2}^{(4)}}{dt} = \frac{\sigma_{02} - E[v_{R2}^{(4)}(t) - v_{L2}^{(3)}(\bar{t})] / C_0}{\rho_2 [L_2 - \Phi_2^{(4)}(t)]} \quad (14)$$

式中: $\Phi_2^{(4)}(t_3) = \Phi_2^{(3)}(t_3)$, $v_{L1}^{(4)}(t_3) = v_{R1}^{(3)}(t_3 - \Delta t) - C_0 \sigma_{02} / E$, $v_{R2}^{(4)}(t_3) = v_{R2}^{(2)}(t_3) + v_{L2}^{(3)}(t_3 - \Delta t)$ 。

本文中理论推导部分只展示了碰撞过程中前 4 个阶段的响应控制方程。类似地, 在需要的情况下可以拓展到后继的阶段。

利用弹性简单波的传播特性将分析过程分成不同的阶段后, 每个阶段中相应界面的响应可以用弹性波的叠加进行分析求解, 而吸能层中压溃波的传播情况可利用压溃波波阵面上的质量守恒和动量守恒条件分析, 从而将一个需要求解偏微分方程组的弹性波与塑性波耦合的复杂问题简化为只需要通过求解常微分方程组得到各个界面上的质点速度和应力的响应。

2 结果与讨论

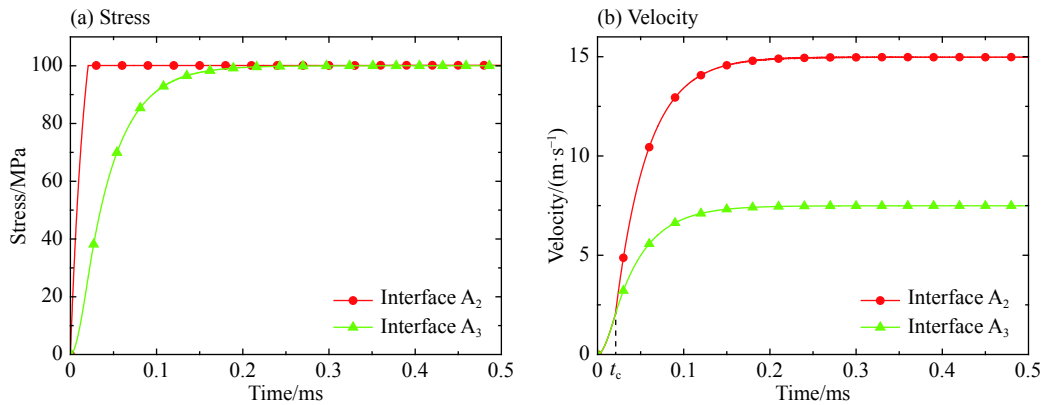
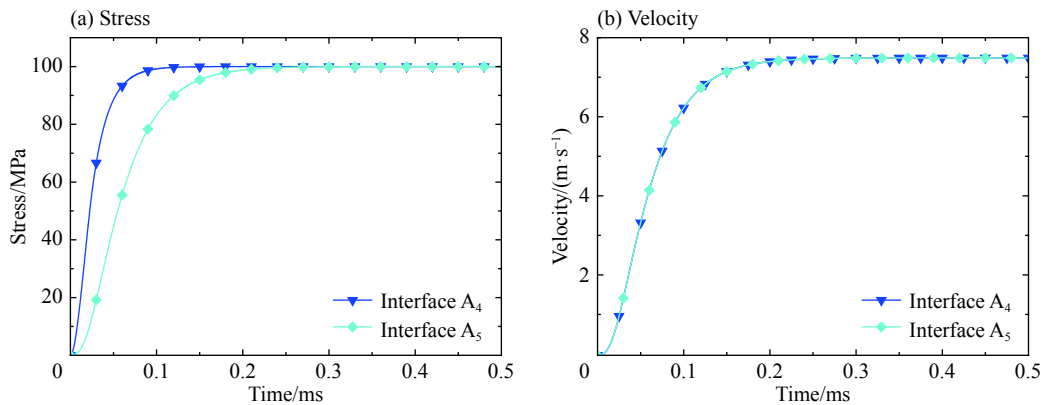
运用四阶龙格-库塔 (Runge-Kutta) 法对各个阶段的控制方程进行求解, 可以得到每个阶段整个系统的响应, 并对系统的吸能特性和机理进行分析。

2.1 吸能层 2 和吸能层 3 的响应

对于各个吸能层来说, 如果发生压溃, 则该吸能层至少有一个界面的应力高于平台应力, 并且该界面与另一界面有沿应力方向的相对运动。

以阶段 2 中的吸能层 2 为例, 在最初弹性波到达界面 A_2 时, 吸能层 2 未被压溃。吸能层 2 的响应可以通过未变形阶段的控制方程式 (5) 结合初始条件求解出 v_{L2} 来表征。而当界面 A_2 的应力于时刻 t_c 达到吸能层 2 的平台应力后, 式 (5) 不再适用。从时刻 t_c 起, 要运用压溃情形下的方程, 即式 (6)~(8) 继续计算吸能层 2 的响应。图 5 给出了吸能层 2 的两个界面 A_2 和 A_3 在阶段 2 的前 0.5 ms 内的应力和速度响应结果, 图中以阶段 2 开始时刻作为时间原点。

对于吸能层 3, 在阶段 3 弹性波到达界面 A_4 后, 吸能层 3 整体进行加速运动, 利用式 (11) 对吸能层 3 的响应进行求解, 得到其两个界面的应力和速度响应, 如图 6 所示, 图中时间原点为阶段 3 开始时刻。结果表明, 在整个加速过程直到稳定阶段, 两个界面的应力皆没有超过吸能层 3 的平台应力, 两个界面也始终未发生相对运动。因此, 响应过程中吸能层 3 未发生压溃, 式 (11) 适用于吸能层 3 的整个阶段 3 的响应。而且, 通过相同的分析方法可以获知吸能层 3 在后续的阶段也不会发生压溃。

图 5 界面 A₂ 和 A₃ 在阶段 2 内的应力 (a) 和速度 (b) 响应结果Fig. 5 Stress (a) and velocity (b) response results of interfaces A₂ and A₃ at stage 2图 6 界面 A₄、A₅ 在阶段 3 内的应力 (a) 和速度 (b) 响应结果Fig. 6 Stress (a) and velocity (b) response results of interfaces A₄ and A₅ at stage 3

分析吸能层 2 和吸能层 3 的响应差异, 可以发现: 前端吸能层的平台应力是否大于后端吸能层, 决定了后端吸能层能否压溃 (除非前端吸能层已经完全压实而导致应力提高)。通常车厢两端的吸能结构并不以其位置而异, 所以后端的吸能结构只有在前面的吸能结构已完全压实后才起作用。若想让后端的吸能层有效地吸能, 前置吸能层材料的平台应力应高于后置吸能层。

由于吸能层 3 未发生压溃吸能, 故后续分析只展示前两个吸能层的响应情形。

2.2 响应特征和机理解释

界面 A₁、A₂ 和 A₃ 的速度和应力的时程曲线如图 7 所示。由计算结果可以获知, 在阶段 5 界面 A₁ 处的速度达到 20 m/s, 与吸能层 1 碰撞前端的界面速度相同, 吸能层 1 停止吸能。界面 A₁ 处的应力发生卸载, 满足界面处的应力和速度的协调关系, 应力降为 67 MPa。弹性杆中各个位置各个时刻的响应是由弹性杆两端界面处产生的弹性波的叠加决定的, 可以通过端面处的响应得到。本文主要关注碰撞前期前置吸能器的吸能响应, 故只进行了碰撞过程前 5 个阶段的求解与分析。

可以看出, 3 个界面的速度响应表现出明显的阶段性特征: 3 个界面的速度每两个阶段变化一次, 对应于弹性波在两个界面之间来回传播的时长; 速度大小只在相应阶段的开始发生跳跃性变化, 之后在每一阶段内几乎保持不变。下面以界面 A₁ 为例分析这种阶段性特征响应出现的原因。界面是连接两种不同材料的纽带, 所以每个界面的响应既要满足弹性材料的性质, 也要满足刚性-理想塑性材料的性质。当吸能层 1 开始压溃时, 其未变形部分可以看作一个刚性整体, 这个整体的左端应力为吸能层 1 的平台应力, 右端为界面 A₁ 的应力。界面 A₁ 的初始速度和应力都为零。由于左右两端界面的应力差, 刚性体做加速运动。由于界面 A₁ 的速度和应力满足弹性波相容关系, 随着速度的增加, 界面 A₁ 的应力增大, 刚性

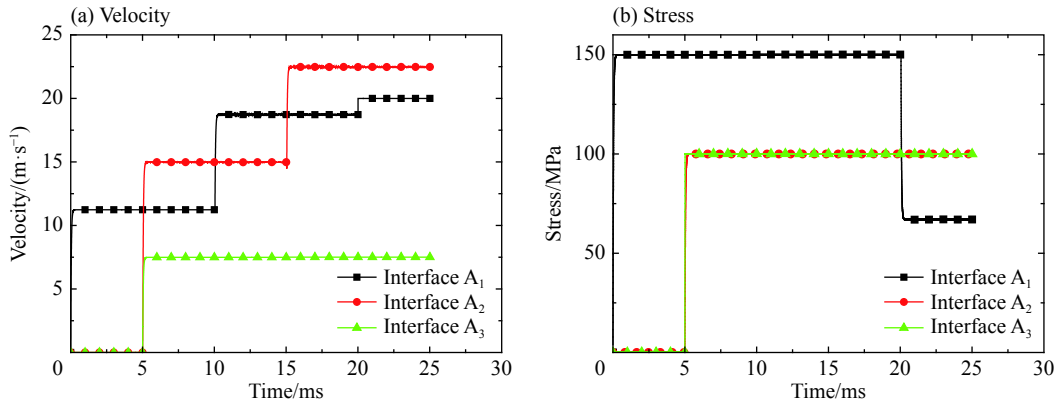


图 7 界面 A₁、A₂ 和 A₃ 的速度 (a) 和应力 (b) 的历史曲线

Fig. 7 Velocity (a) and stress (b) response results of interfaces A₁, A₂ and A₃

体两端的应力差减小, 整体加速度减小。当界面 A₁ 的应力达到平台应力, 整体加速度降为零, 其速度达到并保持在对应的特征速度, 这是界面 A₁ 的速度在加速过程结束后保持恒定的原因。由加速过程的初始加速度 $\sigma_{01}/\rho_1 L_1$ 和特征速度 $\sigma_{01} C_0/E$ 可以得到加速过程的特征时间尺度为 $t_a = \rho_1 L_1 C_0/E$, 它与一个阶段的时长 Δt 的比值为 8.9×10^{-3} , 即 $t_a/\Delta t \ll 1$ 。因此, 前一个平台阶段几乎是跳跃式地过渡到后一个平台阶段。

2.3 系统参数对吸能性能的影响

由于吸能层的材料采用 R-PP-L 模型, 所以认为被压溃波扫过的部分立即被压实。各吸能层中压溃波的拉格朗日速度(压溃波波速), 即为压实长度 Φ_1 、 Φ_2 对时间的导数, 由其两端的界面速度决定。结合计算求解得到的各界面的速度, 可以得到压溃波波速的时程曲线, 如图 8 所示。可以看到压溃波波速也表现出典型的阶段性、平台样特征。

进而可以通过压实应力、横截面积 s 、压溃波波速和压实应变的乘积对时间的积分得到两个吸能层的吸能量 E_1 、 E_2 , 即:

$$E_1 = \int \sigma_1 s \dot{\Phi}_1 \varepsilon_d dt \quad (15)$$

$$E_2 = \int \sigma_2 s \dot{\Phi}_2 \varepsilon_d dt \quad (16)$$

式中: σ_1 和 σ_2 分别是两个吸能层中压溃波波阵面上的压实应力, 满足:

$$\sigma_1 = \sigma_{01} + \rho_2 (V - v_{A1})^2 / \varepsilon_d \quad (17)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{02} + \rho_2 (v_{A2} - v_{A3})^2 / \varepsilon_d \quad (18)$$

式中: v_{A1} 、 v_{A2} 、 v_{A3} 为界面 A₁、A₂、A₃ 的质点速度。计算得到两个吸能层的能量吸收结果如图 9 所示。

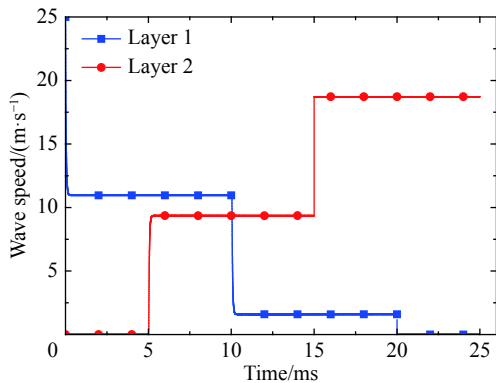


图 8 碰撞过程中各吸能层内的压溃波波速

Fig. 8 Crushing wave speed in each energy absorbing layer

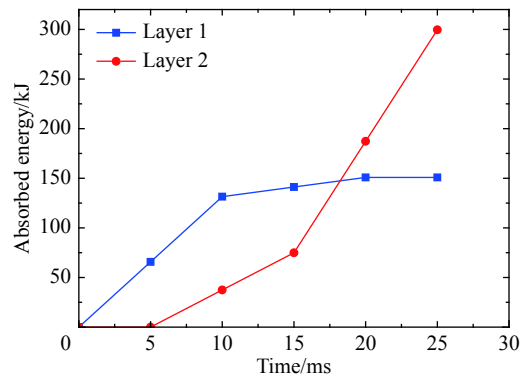


图 9 吸能层 1、吸能层 2 的吸能量

Fig. 9 Energy absorption of layer 1 and layer 2

分析关于吸能量的积分公式不难发现,若把横截面积和压实应变看作常数,则压实应力由吸能层的平台应力和两个界面的速度决定,压溃波波速和压溃时间也可以通过界面速度的响应来判断。各个界面的速度响应由吸能层的平台应力和弹性杆的弹性模量、密度共同决定。对于工程实际来说,弹性杆代表车厢,材料参数不具有可设计性,可以看作常数,这意味着通过控制各个吸能层的平台应力的设置即能改变吸能系统的能量吸收能力。

关注各吸能层的平台应力,对于原有模型,只改变各吸能层的平台应力,其他材料参数保持不变,设置对照模型 1 和 2,其平台应力的配置如表 1 所示。

表 1 不同模型的平台应力设置和吸能量

Table 1 The setting of plateau stresses and the energy absorption of the models

模型	平台应力/MPa		吸收能量/kJ		吸能总量/kJ
	吸能层1	吸能层2	吸能层1	吸能层2	
原模型	150	100	150.9	299.6	450.5
对照模型1	130	100	234.5	134.9	369.4
对照模型2	150	80	131.5	224.2	355.7

对于对照模型,采用第 2 节中的方法进行分析并计算求解得到对照模型各吸能层压溃波波速和吸收能量的计算结果,并与原模型结果进行比较,如图 10 和图 11 所示。由图 10 可以看到,原模型和对照模型 2 中吸能层 1 分别在阶段 5 和阶段 3 停止吸能,而对照模型 1 的吸能层 1 在阶段 5 仍继续吸能,即吸能层 1 的作用时间发生了改变。同时,各个阶段各吸能层中的压溃波波速也发生了改变。这是因为各吸能层材料的平台应力分布改变后,各个阶段相应界面的响应速度也发生了改变。从图 11 可以看到,各吸能层的吸能量和相对的吸能分布都发生了明显变化,这是由吸能时长、压溃波波速和压实应力共同决定的,即由吸能层的平台应力控制,阶段 5 结束时的吸能量见表 1。

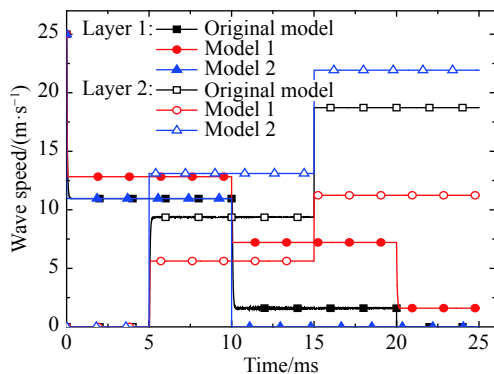


图 10 三种参数设置下各吸能层中压溃波波速的比较
Fig. 10 Crushing wave Speed in each energy absorbing layer for three cases of different parameters

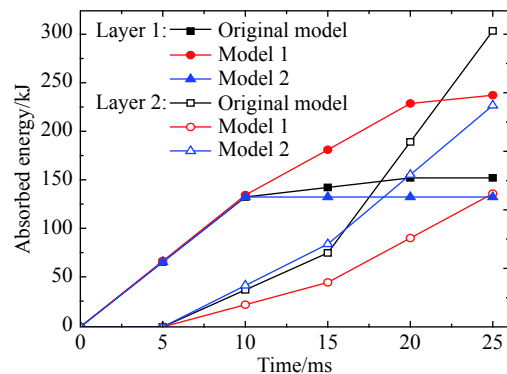


图 11 三种模型参数设置下各吸能层中吸能量的比较
Fig. 11 Energy absorption in each energy absorption layer for three cases of model parameters

进一步引入比例参数 $\alpha = \sigma_{01} / \sigma_{02}$ 分析相邻吸能器的平台应力分布对吸能器作用效果的影响。通常,中间车厢吸能器的尺寸和压溃力取决于车厢结构和所允许的冲击减速度,但对车头吸能器的限制相对较少。因此,从工程实际考虑,将车厢中部的吸能器即吸能层 2 保持不变,设置为 $\sigma_{02} = 80$ MPa,通过改变 σ_{01} 的大小,得到不同的 α 设置下吸能层 1、吸能层 2 和总吸能量的对照结果,如图 12 所示。结果表明:在所考虑的区间内,随着 α 的增大,吸能层 1 的吸能量持续减小,但在 $\alpha = 1.8$ 后减小趋势减缓,吸能层 2 的吸能量先增加后在 $\alpha = 1.8$ 后达到稳定;而总吸能呈现先升高后降低的趋势,并在 $\alpha = 1.7$ 附近出现峰

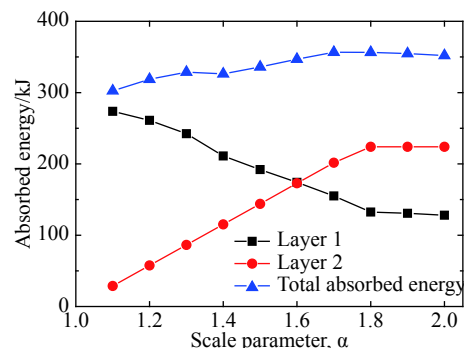


图 12 不同的 α 设置下吸能层 1、吸能层 2 和总吸能量的对照结果

Fig. 12 Comparison of energy absorption for different parameters of α

值。由对照结果可以看出: 相邻吸能器的平台应力分布对各个吸能器的吸能响应和总吸能量都有决定性的影响; 在确定的碰撞条件下, 可以通过改变吸能器的平台应力分布, 得到最优的结果。若以总吸能量为设计标准的话, 则 $\alpha=1.7$ 附近为最优设计。

3 结 论

本文建立了列车分布式吸能系统的波传播简化模型, 考虑了碰撞过程中车厢中弹性波效应的影响。基于该模型, 运用一维应力波理论, 对碰撞过程中各吸能器的响应进行了理论分析和推导, 得到了分阶段式的控制方程并进行了求解。结果显示, 对于列车的分布式吸能系统, 前置吸能器的压垮强度应高于其相邻的后置吸能器, 否则后置吸能器无法在前置吸能器完全压实以前有效吸能。同时, 由于弹性波的传播和叠加效应, 吸能器的各个界面的速度表现出典型的阶段性、平台样的响应特征。

围绕不同的平台应力条件进行了对照和参数分析。结果表明, 对于给定的碰撞情形, 前后吸能层的平台应力是决定吸能系统响应的主要控制参数, 各吸能层以弹性波为纽带相互影响, 各吸能层平台应力的设置和排布能够决定各吸能层的吸能时长和压溃波波速, 进而决定各吸能层的吸能总量。对所研究的情况, 得到了使总吸能量最大的优化设计参数。

虽然本文的分析仅针对特定的碰撞情形, 但该分析方法可以直接应用于各种不同的碰撞情况。按照总吸能量、吸能作用时间、车厢减速度要求等设计标准, 可以通过改变吸能器的设置, 得到相应的优化设计。此外, 对吸能器采用更为实际的材料模型, 如刚性-线性强化塑性-锁定 (R-LHP-L) 模型^[15], 可望提高理论模型对列车吸能能力的更准确的评估。本文的分析方法可以对列车分布式吸能系统的优化设计提供理论指导。

参考文献:

- [1] DRAZETIC P, TASSIN R, RAVALARD Y, et al. Experimentation and modelling of climbing phenomena of guided transport vehicles [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail & Rapid Transit*, 1995, 209(16): 11–17.
- [2] AMBRÓSIO J A C, PEREIRA M F O S, DIAS J P. Distributed and discrete nonlinear deformations on multibody dynamics [J]. *Nonlinear Dynamics*, 1996, 10(4): 359–379.
- [3] HAN H S, KOO J S. Simulation of train crashes in three dimensions [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2003, 40(6): 435–450.
- [4] FMILHO J, CAMBRÓSIO J A, SPEREIRA M F O. Validated multibody model for train crash analysis [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2003, 8(4): 339–352.
- [5] PEREIRA M, AMBROSIO J, DIAS J. Crashworthiness analysis and design using rigid-flexible multibody dynamics with application to train vehicles [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1997, 40(4): 655–687.
- [6] DIAS J P, PEREIRA M S. Optimization methods for crashworthiness design using multibody models [J]. *Computers & Structures*, 2004, 82(17-19): 1371–1380.
- [7] DUAN L, SUN G, CUI J, et al. Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank [J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53(2): 321–338.
- [8] 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.
- [9] WKIRKPATRICK S, MSCHROEDER, SIMONS J W. Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2001, 6(1): 95–106.
- [10] SIMONS J W, KIRKPATRICK S W. High-speed passenger train crashworthiness and occupant survivability [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2012, 4(2): 121–132.
- [11] BELINGARDI G, CAVATORTA M P, DUELLA R. Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train [J]. *Composite Structures*, 2003, 61(1/2): 13–25.
- [12] HU D, WANG Y, SONG B, et al. Energy absorption characteristics of a foam-filled tri-tube under axial quasi-static loading: experiment and numerical simulation [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2017: 1–16.

- [13] 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.
LI Songyan, ZHENG Zhijun, YU Jilin. Energy-absorbing structure design and crashworthiness analysis of high-speed trains [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 164–170.
- [14] REID S R, PENG C. Dynamic uniaxial crushing of wood [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(5/6): 531–570.
- [15] ZHENG Z J, LIU Y D, YU J L, et al. Dynamic crushing of cellular materials: continuum-based wave models for the transitional and shock modes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 42: 66–79.

Wave propagation characteristics and parameter analysis of the distributed energy absorption system of trains

DING Zhaoyang, ZHENG Zhijun, YU Jilin

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In this study we established a simplified theoretical model of the distributed energy absorption system of trains with the influence of the propagation of elastic waves in the train carriage taken into account. Based on the one-dimensional stress wave theory, the responses of energy absorbers in the collision process were analyzed and the governing equations were obtained and solved. The typical stage and platform response of the velocities on the interfaces of each energy absorber was observed and the mechanism was revealed. The analysis about how to set up and arrange the energy absorbing devices was also carried out. The results show that the crushing strength of the front one should be higher than that of the rear one for the adjacent energy absorbers; otherwise the energy absorber at the rear end cannot work at the same time. The plateau stress and its arrangement of each absorber determine the performance of the energy absorption system, which can thereby determine the duration of the energy absorption and the total energy absorption of each energy absorber. The influence of the plateau stress distribution of the adjacent energy absorbers on the energy absorption performance of the system was analyzed in detail, and the optimal design parameter that maximizes the total energy consumption was obtained. Our study can serve as theoretical guidance for the train's optimization design of the distributed energy absorption system.

Keywords: elastic wave; distributed energy absorption system; plateau stress; optimal design; wave propagation characteristics; crushing strength

(责任编辑 王小飞)