

文章编号: 1001-1455(2009)04-0337-08

强动载荷下结构的柔性防护和刚性防护*

王礼立, 杨黎明, 周风华

(宁波大学力学和材料科学研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 通过研究柔性防护和刚性防护方面的实例, 结合作者的研究结果, 对应力波效应和材料动态特性效应如何影响强动载荷下的结构安全防护进行了分析和讨论。研究表明, 在研究强动载荷下的结构安全防护时, 不论结构承受的是爆炸冲击波还是弹体的直接撞击, 都应该考虑结构与周围介质中的波传播效应与材料的应变率效应, 以及这两者之间的互相联系和互相耦合。

关键词: 爆炸力学; 材料动态特性; 强动载荷; 结构安全防护; 应力波; 应变率效应

中图分类号: O347.1

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

在重要工程和基础设施的各类安全防护问题中, 结构在爆炸/冲击等强动载荷作用下由于动态失效所导致的灾变事故, 是当前特别值得深切关注和亟待加强的前沿性研究热点^[1]。

强动载荷的特征是短历时内发生显著变化的高强度载荷^[2]。当度量载荷变化的时间标度 t_1 与应力波以波速 c 传过结构特征长度 L 所需的特征时间 t_0 ($t_0 = L/c$) 相比是同量级或更小量级时, 介质的微元体处于随时间迅速变化着的动态过程中, 这时必须计及介质微元体的惯性, 也即必须计及应力波效应。另外, 强动载荷在短历时内发生显著变化就意味着高载荷率或高应变率, 一般比准静态载荷下的应变率高数个或十几个量级; 而大量实验表明, 材料在不同应变率下的力学行为往往是不同的, 因此这类问题又都涉及到材料力学特性的高应变率效应。

在这类载荷作用下, 各种结构的动态响应以时间上高度非定常而在空间上高度局域化为共同特征。例如, 无论飞机其他部分的强度多么高, 鸟在高速撞击下都会给机翼造成高度局域化破坏(图 1)^[3]。

(a) Before impact



(b) After impact



图 1 国产运七型飞机的鸟撞实验

Fig. 1 Experiment of bird strike on Yun-7 aircrafts

从机理上看, 这种高度局域化的变形/破坏过程主要取决于结构中波传播特性和材料的冲击特性。所以从根本上说, 结构安全防护问题的研究和解决离不开对波传播和材料冲击特性的研究。

一旦考虑到波传播, 结构的动态响应实际上总与波在载荷-结构界面处的透射-反射过程相联系。与准静态载荷下的力学问题不同, 界面处的载荷实际上并非事先已知或可以事先给定的, 而是需要在解题过程中同时分析结构及其周围

* 收稿日期: 2008-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10872101); 中国工程物理研究院专项合作项目;

宁波大学王宽诚幸福基金项目

作者简介: 王礼立(1934—), 男, 教授。

介质中的波传播、并随着波的来回传播和相互作用而逐步加以确定,即属于所谓的载荷-结构相耦合的待定边界条件。而且,在一定的结构-介质耦合条件下,结构除了加载失效外还可能发生由于卸载波相互作用等导致的各类拉伸断裂(如层裂),统称为卸载失效^[4]。这种结构与载荷间的耦合(或结构与介质间的耦合)正是强动载荷下结构动力学的特点和难点之一。

问题还在于,结构和周围介质中的波传播又与材料的动态力学特性、特别是其应变率效应互相联系、互相影响、互相依赖、互相耦合,使问题变得更加复杂。事实上,一方面,在应力波传播的研究中,材料动态本构方程是组成整个问题基本控制方程组所不可缺少的部分;换言之,波传播以材料动态本构关系已知为前提,并且波传播特性强烈地依赖于材料动态本构关系;而另一方面,在进行材料高应变率下动态本构关系的试验研究时,又必须计及试验装置中和试件中的应力波传播及相互作用;换言之,材料动态响应研究中又要依靠所试验材料中应力波传播的知识来分析。于是,人们在应力波效应和材料应变率效应的研究中,遇到了波传播和材料冲击特性相耦合的难题。

在结构安全防护研究中,曾采取各种解耦的简化处理。例如,用以研究材料冲击特性的 SHPB 技术在满足一维应力波和试样均匀变形 2 个基本假定的条件下,可把波效应和材料冲击效应解耦处理。又如,战斗部对结构的撞击本质上是弹-靶相互作用的耦合问题。为简化处理,当侧重于靶体研究时,把弹体简化为刚体(忽略了弹体变形和波在弹体中的传播);而当侧重于弹体研究时,又把靶体简化为刚体(忽略了靶体变形和波在靶体中的传播)。但随着现代计算机和数值模拟技术的迅速发展和广泛应用,这类近似的解耦处理已无必要,也已不能满足武器效应精细化分析的迫切需求。

以金属长杆弹对混凝土靶的侵彻为例,首先会在混凝土靶表面形成弹坑及放射状径向裂纹(见图 2)^[5-6]。其形成是弹与靶相互作用的耦合过程,既与混凝土靶中的波传播(特别是自由表面激发的稀疏卸载波所导致的碎块飞溅)密切相关,又与混凝土材料的动态力学特性(特别是动态抗拉强度及碎块形成准则)等密切相关。

对侵彻试验后的混凝土靶板纵剖面作进一步观察分析后发现(见图 2(b)~(c)),在前进的长杆弹前方,靶板中形成了一个向前推进的破碎区。侵彻的动态过程至少包含了:首先是传播得最快的应力波,随后的是破碎损伤区的传播(破坏波),再后才是弹体的推进运动,包含弹头本身的冲蚀。可见,对于结构的抗侵彻研究实际上既涉及应力波和破坏波传播的研究,也涉及弹和靶二者在不同应变率下材料动态本构关系及破坏准则的研究。否则,难以从根本上解决问题,也难以有重大创新。

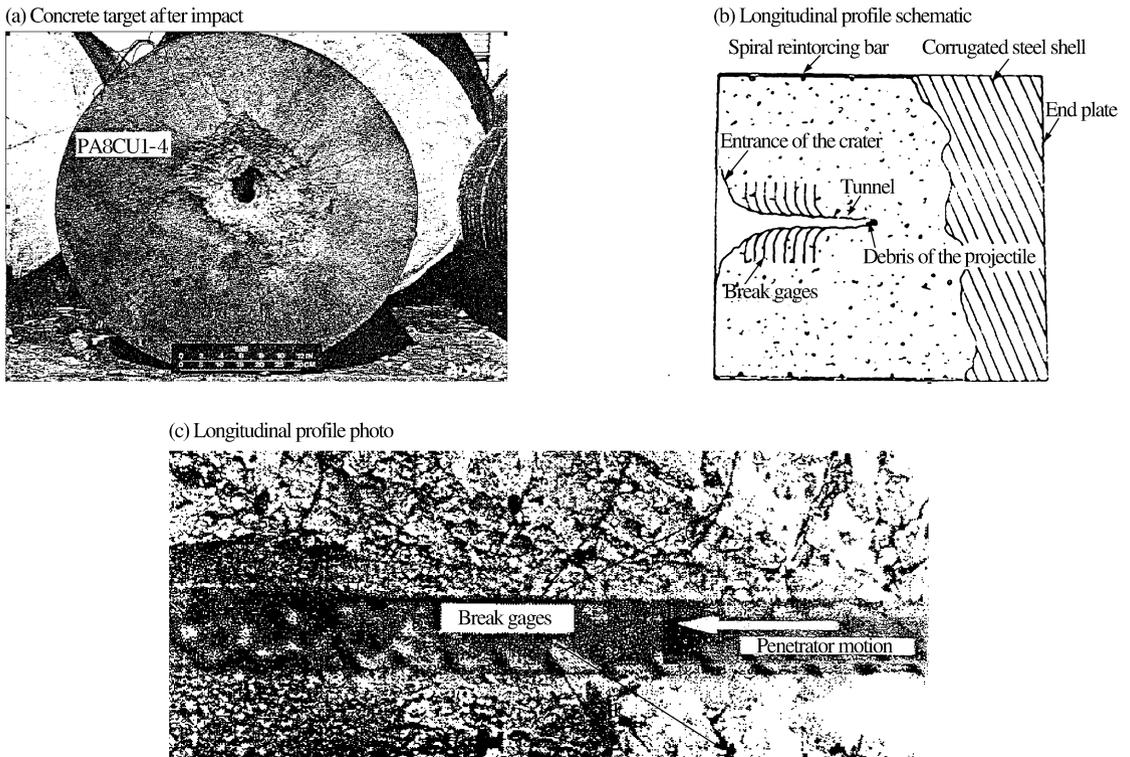


图 2 长杆弹对混凝土靶的侵彻($v_0 = 1.836 \text{ km/s}$)

Fig. 2 Penetration of a long projectile into a concrete target

还应该看到,计算机模拟技术为结构安全防护研究提供了强有力的手段,但也正是数值模拟技术的迅速发展,对力学模型的完善建立提出了更高要求。关键之一在于控制方程组或计算程序中是否有一个在物理本质上能正确全面地反映材料动态力学特性的本构方程,以及相应的失效准则。

本文中结合我们的研究工作,分析和讨论应力波效应和材料动态特性效应如何影响强动载荷下结构安全的柔性防护和刚性防护,以及今后迫切有待进一步解决的问题,以期引起共同关注。

2 爆炸载荷下结构的柔性防护与刚性防护

爆炸强冲击波是破坏结构的重要手段之一。曾有人提出利用泡沫塑料等软材料来防护爆炸波对结构的破坏作用,然而实践结果却事与愿违。例如:为防止炮弹发射时产生的爆炸波致伤,曾让炮手穿上泡沫塑料背心,但实际致伤程度反而更加严重;在实施切割爆炸时,为防止冲击波对临近的特种装置产生冲击破坏作用,曾尝试将泡沫材料覆盖在钢制特种装置上,结果钢制特种装置上测到的冲击波幅值反而意外地升高了。到底是采用软材料进行柔性防护好,还是采用硬材料进行刚性防护好,这需要根据应力波理论对具体问题进行分析。

由应力波理论知(以一维弹性波为例说明)^[2],如果应力波在材料 A 中无干扰地传播,质点速度 v 和应力 σ 之间有如下关系(负号对应于右行波而正号应于左行波)

$$v = \mp \frac{\sigma}{\rho_A c_A} \tag{1}$$

而当应力波从材料 A 透射进入材料 B 时,则透射应力 σ_T 与入射应力 σ_1 之间、透射质点速度 v_T 与入射质点速度 v_1 之间,分别有如下关系

$$\sigma_T = T\sigma_1, \quad v_T = nTv_1 \quad T = \frac{2}{1+n}, \quad n = \frac{\rho_A c_A}{\rho_B c_B} \tag{2}$$

式中: ρ 为材料密度, c 为波速, ρc 称为材料的波阻抗,下标 A、B 分别指材料 A 和材料 B, n 为材料的波阻抗比, T 为透射因数。可见,透射因数仅与这 2 种材料的波阻抗比值有关,即与这 2 种介质的相对软(波阻抗小)还是硬(波阻抗大)有关。如果 $\rho_A c_A < \rho_B c_B$,即应力波由软材料传入硬材料($T > 1$)时,透射波的应力幅值 σ_T 高于入射波幅值 σ_1 ;反之若 $\rho_A c_A > \rho_B c_B$,即应力波由硬材料传入软材料($T < 1$)时,透射波的应力幅值 σ_T 低于入射波幅值 σ_1 。

如果上述需要防护的特种装置是人的话,则所要研究的问题就等价于研究人在冲击波作用下应该穿什么样的防护背心。

以 $\rho_a c_a$ 和 $\rho_p c_p$ 分别表示空气和人体的波阻抗,而以 $\rho_s c_s$ 表示防护材料的波阻抗,且已知有

$$\rho_a c_a < \rho_p c_p, \quad \rho_a c_a < \rho_s c_s$$

则由式(1)知,在不穿防护背心时,在空气中传播的冲击波 σ_1 直接伤害人体时的透射波强度为

$$\sigma_{T,ap} = \frac{2}{1 + \rho_a c_a / \rho_p c_p} \sigma_1 = T_{ap} \sigma_1 \tag{3}$$

而当空气中的冲击波通过防护背心再透射到人体时,其透射波强度则为

$$\sigma_{T,asp} = \frac{2^2}{(1 + \rho_a c_a / \rho_s c_s)(1 + \rho_s c_s / \rho_p c_p)} \sigma_1 = T_{asp} \sigma_1 \tag{4}$$

可见,为使防护背心能削弱空气冲击波对人体的危害作用,显然两种情况下的透射因数的比值应小于 1,即

$$R = \frac{T_{asp}}{T_{ap}} = \frac{2(1 + \rho_a c_a / \rho_p c_p)}{(1 + \rho_a c_a / \rho_s c_s)(1 + \rho_s c_s / \rho_p c_p)} < 1 \tag{5}$$

经演算,上式可进一步化简为

$$(\rho_s c_s - \rho_a c_a)(\rho_s c_s - \rho_p c_p) > 0 \tag{6}$$

再由已知条件 $\rho_s c_s > \rho_a c_a$,则为满足 $R < 1$,必须有

$$\rho_s c_s > \rho_p c_p \tag{7}$$

这意味着防护层的波阻抗应该比人体的波阻抗大。

上述应力波的人射-透射关系可以对应地在应力-速度图上来表示和讨论。对于具有不同波阻抗的材料,式(1)在应力-速度图上表现为具有不同斜率 ρc 的直线,如图 3 所示。如果从空气中传来的冲击波对应于状态点 A,不经过任何防护材料直接传到人体,则人体受到的冲击波压力对应于

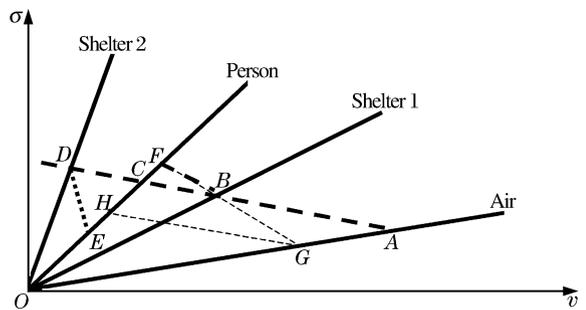


图 3 空气冲击波在不同介质界面上透射压力的示意图
Fig. 3 Schematic of the transmitted pressures at interfaces of different media for air shock waves

图中点 C; 如果经过软防护材料 1 再传到人体, 即有 $\rho_s c_s < \rho_p c_p$, 则人体受到的冲击波压力对应于图中点 F; 如果经过硬防护材料 2 再传到人体, 即有 $\rho_s c_s > \rho_p c_p$, 则人体受到的冲击波压力对应于图中点 E。这说明防护背心的波阻抗必须大于人体波阻抗, 才能减弱从空气中传来的冲击波对人体的伤害, 且防护背心的波阻抗愈大愈好(这里暂不考虑防护材料本身的内耗对于冲击波的衰减作用)。反之, 当防护材料的波阻抗低于人体波阻抗时(如泡沫塑料), 不仅不能减弱、反而会增强空气冲击波对人体的伤害。这就是在爆炸载荷下钢制特种装置的外表面上不宜直接覆盖任何波阻抗低的泡沫防护材料的原因。

当抗爆覆盖层是由 n 层不同材料组成时, 根据应力波理论分析, 透射因数可广义化为^[7]

$$T_n = \frac{2}{1 + \rho_1 c_1 / \rho_2 c_2} \frac{2}{1 + \rho_2 c_2 / \rho_3 c_3} \cdots \frac{2}{1 + \rho_{n-1} c_{n-1} / \rho_n c_n} = \frac{2^{n-1}}{\prod_{i=1}^{n-1} (1 + \rho_i c_i / \rho_{i+1} c_{i+1})} \quad (8)$$

显然, $\prod_{i=1}^{n-1} (1 + \rho_i c_i / \rho_{i+1} c_{i+1})$ 的大小直接影响透射波的强度, 而不同层材料的排列次序则会影响它的大小。针对具体的实际工程, 通过求此值的极大值, 即可获得透射波最弱的防护方案。

式(1)~(8)虽然是以弹性波简化为例列出的, 其原理对于爆炸冲击波同样适用。

以上的讨论是以降低传入结构的爆炸冲击波强度为目的所进行的分析。具体情况和目的不同时, 就要运用应力波理论并考虑到材料动态特性的不同作具体分析, 而不能一概而论。

(a) Non-coated



(b) Polymer-coated



图 4 喷涂与未喷涂条件下爆炸实验比较^[8]

Fig. 4 Comparison of explosion experiments between the polymer-coated condition and the non-coated condition

事实上, 对于混凝土砌块 (concrete masonry units, CMU) 墙的研究表明^[8]: 在其表面粘合或喷涂一层高聚物 (高弹性体如聚脲等) 后, 可以增强其抗爆炸冲击波的能力。这已成为近几年发展的一种增强结构抗爆炸冲击的新技术。对于混凝土砌块墙, 通过在其内部或内外喷涂高聚物 (如聚脲等), 其抗爆能力有明显提高。推荐的内表面喷涂厚度为 1.27 cm, 或内、外表面喷涂 3.175 mm。图 4 为喷涂与未喷涂条件下爆炸实验比较, 在同样的爆炸条件下未喷涂的墙体倒塌了, 而喷涂的墙体未倒塌。图 5 是采用双对数坐标给出的喷涂和未喷涂的混凝土砌块墙安全距离 d 与炸药量 Q 的关系。由图可见, 随着药量的增加, 防护效果更加明显。如在 454 kg 的 TNT 作用下, 喷涂的混凝土砌块墙体安全距离为 61 m, 而未喷涂的混凝土砌块墙体安全距离需 366 m 以上。

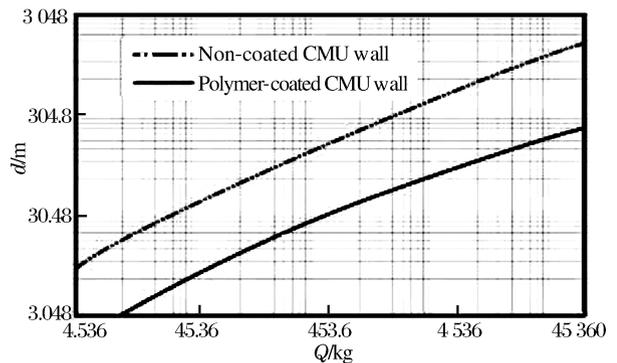


图 5 混凝土墙体安全距离^[8]

Fig. 5 The standoff of CMU wall

目前, 金属/高聚物涂层复合板的冲力力学特性、防护设计及机理的研究已成为冲击动力学界当前最重要的研究方向之一。尽管高聚物弹性体涂层在抑制爆炸冲击破坏方面的有效性已被肯定, 但技术细节尚未见公开报道, 关于这一技术能明显提高抗爆能力的机理也待进一步研究。显然, 这已经不单纯与透射波的强弱和自由表面效应等有关, 还与结构和材料的动态损伤演化与动态失效机制(例如混凝土砌块间的界面强度和裂纹扩展、混凝土砌块的脆快形成机制等)密切相关。

总之, 爆炸载荷下结构安全的防护是采用柔性防护还是刚性防护, 实际上应从应力波传播和材料动态特性 2 方面综合起来, 针对具体对象和目的的不同进行分析。

3 冲击载荷下结构的柔性防护与刚性防护

在爆炸载荷下的结构安全防护问题的研究中,除炸药与结构的接触爆炸外,爆炸冲击波一般通过空气传播而作用于结构。而在冲击载荷下的结构安全防护问题的研究中,强动载荷一般是通过弹-靶直接碰撞而作用于结构。就结构安全的研究而言,实质上这就是在弹-靶这一对矛盾的对抗中更侧重于靶的抗冲击能力。对此,同样有刚性防护和柔性防护2类不同的思路、方法、机理和技术。例如,钢甲防弹衣属于刚性防护,而芳纶编织防弹衣则属于柔性防护。

对于靶板(结构)的刚性防护已有了大量研究,取得了一系列重大研究成果,例如发展了以新型工程陶瓷材料为主体的装甲系列等。也研发了刚柔结合的复合装甲,例如以新型工程陶瓷材料为抗弹表层材料、以轻质耗能泡沫材料为次层对冲击波起阻尼衰减作用、而以纤维增强高聚物复合材料为背层以避免层裂等等。与此相对照,对于冲击载荷下结构的柔性防护则研究得较少。下面,以船撞桥为例,着重于从应力波和材料动态特性相结合的角度,讨论结构抗冲击的柔性防护的机理。

船和桥墩相撞的事故不断发生,古已有之,于今为烈。过去这类事故的发生是非故意人为的,而现在还要防止恐怖主义份子故意制造的人为灾难。因此,如何避免或减轻船舶与桥梁相撞的灾难,已成为具有广泛意义的国际性课题,日益引起各国政府、学者和工程界的关注。古今中外,解决这一问题的基本措施集中在建造桥墩的防护设施。需在科学地认识船-桥撞击过程的基础上,合理地设计抗撞防护设施,以避免船桥两败俱伤。

船舶通过桥梁时的航速虽然一般要求降低到数米每秒量级,但由于船舶的大质量(以 $10^6 \sim 10^8$ kg量级计)、大尺度(以 10^2 m量级计)和大动能(以 10^2 MJ量级计),船桥相撞是一个在毫秒到秒短历程中包含巨大能量交换的动态过程,本质上仍是一个复杂和困难的冲击动力学问题。

为保证桥墩结构在受到船撞时不损坏,桥梁设计师通常容易倾向于建造高刚度、高强度的刚性防护设施。但桥墩防护设施越坚固,船只受损越严重,会导致船毁人亡及污染环境等灾害。对此,我们从冲击动力学的角度出发,根据多层介质中的应力波传播的特点及波阻抗比对于波传播的影响,提出一种以钢丝绳圈为基本元件的柔性耗能防撞装置,以期桥墩和船在相撞时都不坏(两不坏),甚至连防护设施都可反复使用(三不坏)。

这种新型钢丝绳圈柔性防撞装置以大量钢丝绳圈为基本元件,通过并联和串联的形式与内、外钢围子相组合,在桥桩外围构成浮动的防撞装置。图6为我们针对全长约4 km的广东湛江海湾大桥遭遇满载排水量62 500 t散装货轮撞击的情况所设计的、以并联串联的钢丝绳圈为基本元件,与内外钢围相组合的船撞桥柔性耗能防撞装置。其中,钢丝绳圈选用受压弯变形时内摩擦大的钢丝绳结构品种,采用紧密堆垒排列的方式层层绕制,再以铝合金压接技术把绳端紧固,使绳圈在多次冲击载荷下不会失效,而钢绳之间通过摩擦发热,使部分撞击动能以不可逆的能耗形式耗散掉。

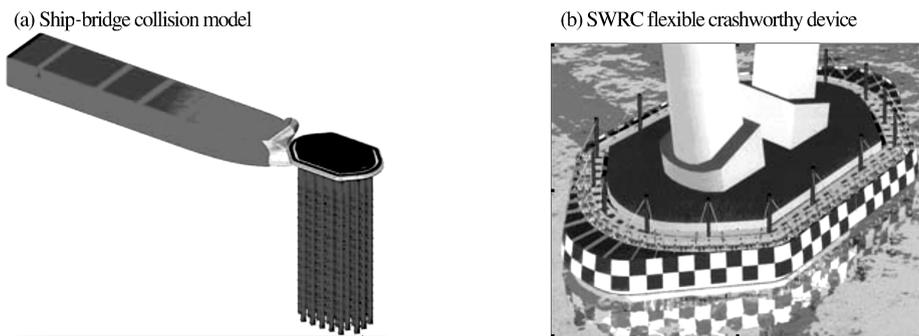


图6 用于湛江海湾大桥的船撞桥钢丝绳圈柔性耗能防撞装置
Fig. 6 The steel-wire-rope coil (SWRC) flexible crashworthy device for protecting the Zhanjiang Bay Bridge

钢丝绳圈在准静载下和冲击动载下具有不同的力学特性,即力-位移曲线是应变率相关的(见图7),但都表现出低柔度和耗能特性,力-位移曲线具有凹向上的滞回曲线形式,即一开始在较低的撞击力下产生较大变形;随着钢丝绳圈的压扁,撞击力随变形陡然增加;而卸载时几乎没有残余变形,加-卸载形成滞回曲线,所包围的面积代表不可逆的耗散能。上述特性可归类为应变率相关的非线性粘弹性本构响应,这是有利于作为低柔度防撞耗能元件应用的。

为进行船撞桥的数值模拟,首先解决的是钢丝绳圈的非线性粘弹性本构特性的正确建模。

关于应变率相关的非线性粘弹性本构关系,朱兆祥、王礼立、唐志平和合作者们近20年来曾对典型的工程塑料(包括环氧树脂、有机玻璃 PMMA、聚碳酸酯 PC、尼龙、ABS、PBT 等)进行的一系列实验研究^[9]表明,在准静载荷到冲击载

荷(应变率为 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$)的范围内,材料的非线性粘弹性本构关系可以用如下的 ZWT 方程较准确地描述

$$\sigma = f_e(\epsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (9)$$

$$f_e(\epsilon) = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3$$

式中: σ 为应力, ϵ 为应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, t 为时间; $f_e(\epsilon)$ 描述非线性弹性平衡响应, E_0 、 α 和 β 是对应的弹性常数;第 1 个积分项描述低应变率下的粘弹性响应, E_1 和 θ_1 分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间;而后 1 个积分项描述高应变率下的粘弹性响应, E_2 和 θ_2 则分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。实验还表明, θ_1 通常是 $10 \sim 10^2 \text{ s}$ 量级, θ_2 通常是 $10^{-6} \sim 10^{-1} \text{ s}$ 量级。既然 θ_1 比 θ_2 高 4~6 个量级,而每个松弛时间的影响范围仅占约 4.5 个量级,因此 θ_1 和 θ_2 将各自在自己的有效影响域范围内发挥作用。这样,在时间尺度以微秒和毫秒计的冲击加载条件下,具有松弛时间 θ_1 为 $10 \sim 10^2 \text{ s}$ 的低频 Maxwell 单元将无足够的时间来松弛。这时,低频 Maxwell 单元化为弹性常数为 E_1 的简单弹簧,式(9)简化为

$$\sigma = f_e(\epsilon) + E_1 \epsilon + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau = \sigma_e(\epsilon) + E_2 \int_0^t \dot{\epsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (10)$$

$$\sigma_e(\epsilon) = (E_0 + E_1) \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3$$

这说明粘弹性体在冲击载荷下的非线性粘弹性波的传播特性实际上由式(10)控制。

尝试将 ZWT 方程推广应用到钢丝绳圈。对于外径为 D 的钢丝绳圈,如以 s 和 v 表示外径两点间的位移和速度,则钢丝绳圈受压时的名义应变 $\epsilon = s/D$,名义应变率 $\dot{\epsilon} = v/D$;于是上式可表达为力 F 与位移 s 的关系

$$F = K(s)s + K_2 \int_0^t v(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (11)$$

拟合曲线与试验曲线的比较如图 8 所示,相应的粘弹性特性参数分别为: $K(s) = 61.3 - 0.596s + 2.99 \times 10^{-3} s^2$ ($K(s)$ 、 s 的单位分别为 N/mm 、 mm), $K_2 = 395 \text{ N/mm}$, $\theta_2 = 1.673 \text{ ms}$ 。经与试验数据拟合,发现钢丝绳圈在冲击动载下的力-位移曲线可以较准确地用式(11)描述。式(11)说明钢丝绳圈在受到冲击载荷时的动态响应可以分为 2 部分,1 部分为主要体现低柔性的非线性弹性响应,另 1 部分是体现阻尼耗散作用的 Maxwell 体所表示的线性粘弹性响应。

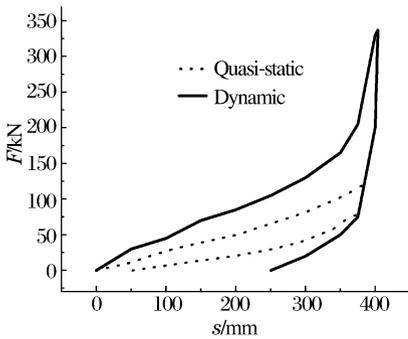


图 7 钢丝绳圈的准静态和冲击动态力-位移曲线

Fig. 7 The force-displacement curves of SWRC

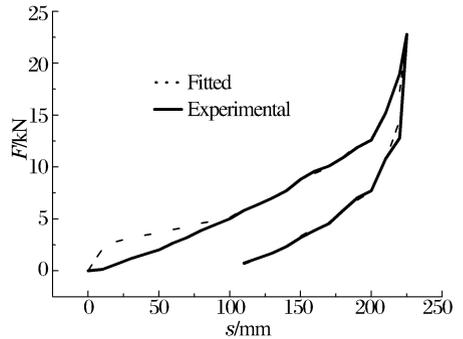


图 8 拟合的动态力-位移曲线

Fig. 8 The fitted force-displacement curve

当船以轴线与桥墩长边平行的情况下与桥墩相撞时,数值计算给出的撞击力时程曲线(包括船与柔性防撞装置外钢围接触面处的撞击力曲线和柔性防撞装置内钢围与桥墩承台接触面处的撞击力曲线)如图 9 所示,撞击过程中系统的能量(总能量 E_t 、动能 E_k 、变形能 E_d 和计算中的沙漏能 E_s)随时间的变化如图 10 所示。

由图 9 可见,在碰撞的初期(约 800 ms 之前),撞击力相当低(仅约 2.5 MN),且变化缓慢,这显然是由于钢丝绳圈的低柔度所致;而且由于钢丝绳圈粘弹性的松弛耗散作用,桥墩在延迟约 500 ms 之后才受到撞击作用,且传递到的撞击力更低。对照数值模拟给出的防撞装置在各个不同时刻的变形和 Mises 应力云图^[10],可知防撞装置在碰撞初期有一个从局部受力发展到整体受力的过程,体现了应力波传播效应;直到大致 800 ms 时,防撞装置开始整体起作用,这与图 9 给出的撞击力在大致 800 ms 时开始快速增加是一致的。

应该指出,由于撞击力的方向一般不通过船的质心,必然对船施加了一个力矩,将促使船的转动而改变航行方向。从数值模拟给出的船在各个不同时期的变形图^[10]可以判定,在 1.2 s 时,船头肯定已经改变了原来的航行方向。与此相对应,在图 9 上,撞击力在约 1.3 s 时达到最大值(18 MN),此后开始带有震荡地下降,到 2.5 s 的时候,接触力已基本降到了零,意味着船头已经完全摆开,碰撞结束。如果无防撞装置,数值模拟给出的撞击力时程曲线从撞击开始一直持续上升,在约 4.0 s 时达到最大值(高达约 80 MN)。

从图 10 给出系统能量随撞击时程的变化可见：在撞击前系统的总能量只包含船的动能，在撞击过程中船的动能减少，转变为系统的变形能，主要是船和防撞装置的变形能。在 2.5 s 时，与图 9 所示撞击力降为零是一致的，撞击能量的交换这时也结束了。特别值得注意的是，船的动能在撞击前后的变化不大，仅占船的总动能的约 5%。这意味着船在转向并脱离碰撞后带走了大部分剩余动能，这是避免船桥两败俱伤的关键所在。

至于由这 5% 动能所转换的系统变形能中，船的变形能仅占约 28%，防撞装置的变形能占约 72%（其中钢围子变形能占约 50%，钢丝绳圈粘弹性变形能占约 22%）。这意味着撞击过程中柔性耗能防撞装置比船吸收了更大部分的能量，从而在保护了桥的同时也保护了船，实现了预期目标。

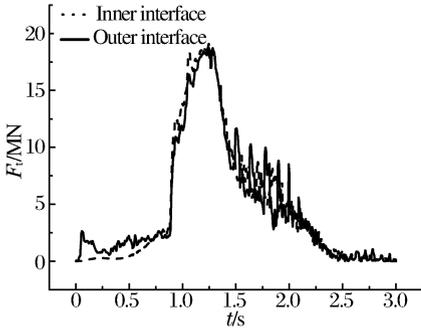


图 9 船桥相撞界面处撞击力
Fig. 9 Impact force calculated

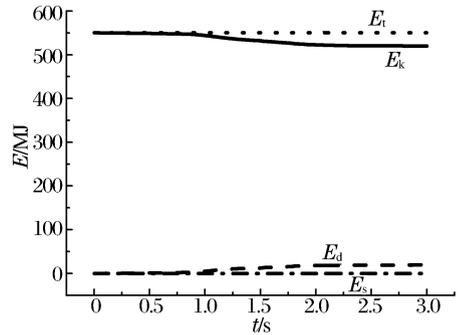


图 10 系统能量
Fig. 10 Curves of energy

上述数值模拟结果说明，钢丝绳圈柔性耗能防撞装置的优越性主要表现在^[11]：

- (1) 柔性抗撞可大大降低撞击力，特别在撞击初期。采用钢丝绳圈柔性耗能防撞装置后的最大撞击力(18 MN)仅为无防撞装置时最大撞击力(约 80 MN)的 1/4。
- (2) 延长低撞击力的历时，从而让船头有足够时间转变方向，及早脱离碰撞，使船的总动能中以尽可能少的部分参与撞击能量交换，而使尽可能多的部分以剩余动能的形式由转向的船带走。这一点至关重要，否则如果在撞击过程中船的全部动能参与了撞击能量交换，后果会十分严重。这类似于弹体与装甲的撞击作用，即：使弹体偏离航向而带走大量剩余动能，保护装甲。
- (3) 由系统变形所吸收的撞击能中，柔性耗能防撞装置的变形(包括钢丝绳圈的粘性耗散)起了主要作用，从而尽可能降低了船的变形破坏，实现了船桥两不坏。

由此可见，对于冲击载荷下结构的安全防护，基于应力波传播和材料动力学特性的综合分析，针对不同的结构对象和目的，注意到柔性防护可以发挥以柔制刚的特点，发展刚柔共济的复合防护结构，值得今后进一步深入研究。

4 结 语

与准静载荷下的力学问题相比较，强动载荷作用下的爆炸/冲击动力学问题以计及结构微元的惯性效应和材料力学特性的应变率效应为主要特征和难点。前者导致各种形式的、精确或简化的波传播的研究，促进了结构冲击动力学的发展；而后者则导致各种类型的应变率相关的(率型)本构关系和失效准则的研究，促进了材料动力学的发展。

在研究强动载荷下的结构安全防护时，不论对于靶还是对于弹，不论对于结构本身还是与之相耦合的介质，都应该考虑波传播效应与材料的应变率效应之间的互相联系和互相耦合。在进行数值研究时，应正确建立体现波传播和率相关的材料本构方程及动态失效准则的控制方程组。

强动载荷下的结构安全防护到底是采用柔性防护好，还是采用刚性防护好，应该根据应力波理论和材料动力学特性，对具体问题进行分析。综合运用刚性防护和柔性防护，发展刚柔共济的复合防护结构，是值得重视的研究方向。

参考文献：

[1] 董宏晓, 秦有权, 周丰峻, 等. 国外核武器发展趋势及对防护工程的影响[C]//中国土木工程学会防护工程分会第九次学术年会论文集. 2004:44-47.

[2] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2005.

[3] 王礼立, 朱锡雄, 施绍裘, 等. 鸟撞高速飞机风档若干问题的冲击动力学研究[J]. 航空学报, 1991, 12(2): 27-33.

WANG Li-li, ZHU Xi-xiong, SHI Shao-qiu, et al. An impact dynamics investigation on some problems in bird

- strike on windshields of high speed aircrafts[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1991,12(2):27-33.
- [4] WANG Li-li. Unloading waves and unloading failures in structures under impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004,30(8-9):889-900.
- [5] Gold V M, Pearson J C, Turci J P. A study of impact response of concrete and reinforced concrete targets for the velocities circa 0.2 cm/ms[C]//Maekawa I. *Proceedings of International Symposium on Impact Engineering*. Sendai, 1992:217-222.
- [6] Gold V M. Study of constitutive models for concrete penetration analysis[R]. AD-E402790, 1996.
- [7] 宋博,胡时胜,王礼立. 分层材料的不同排列次序对透射冲击波强度的影响[J]. *兵工学报*, 2000,21(3):81-83.
SONG Bo, HU Shi-sheng, WANG Li-li. Influence on the transmitted intensity of shock wave through different tactic orders of layered materials[J]. *Acta Armamentarii*, 2000,21(3):81-83.
- [8] Baylot J T, Woodson S C, O'Daniel J L, et al. Analysis and retrofit of CMU walls[C]//Chang P C. *Proceedings of Structures 2001—A Structural Engineering Odyssey*. Washington DC, USA, 2001.
- [9] 王礼立,杨黎明. 固体高分子材料非线性粘弹性本构关系[C]//王礼立,余同希,李永池. *冲击动力学进展*. 合肥:中国科技大学出版社,1992:88-116.
- [10] 张忠伟. 钢丝绳圈防撞装置力学建模与船撞桥数值模拟研究[D]. 宁波:宁波大学,2004.
- [11] 王礼立,张忠伟,黄德进,等. 船撞桥的钢丝绳圈柔性防撞装置的冲击动力学分析[C]//洪友士. *应用力学进展——祝贺郑哲敏先生八十华诞*. 北京:科学出版社,2004:172-180.

On flexible protection and stiff protection for structure safety under explosive/impact loading

WANG Li-li*, YANG Li-ming, ZHOU Feng-hua

*(Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University,
Ningbo 315211, Zhejiang, China)*

Abstract: Some examples of both flexible protection and stiff protection were discussed in connection with the authors' research results to explore influences of stress wave effects and material strain-rate effects on structure safety protection under intense dynamic loads. Results display that in studies on structure safety protection under intense dynamic loading, either the loading is due to shock waves or projectile impact, wave propagation effects and material strain-rate effects for the structure itself and the around media, as well as the interaction between them, should be taken into account.

Key words: mechanics of explosion; material dynamic behavior; intense dynamic loading; structure safety protection; stress wave; strain rate effect

* Corresponding author: WANG Li-li
Telephone: 86-574-87600451

E-mail address: wanglili@nbu.edu.cn