

缺口导向分级触发吸能结构研究^{*}

李本怀 李成林 郑育龙

(中车长春轨道客车股份有限公司工程实验室, 130062, 长春//第一作者, 教授级高级工程师)

摘要 以轨道客车司机室端吸能结构为研究对象,提出一种基于缺口导向分级触发的吸能结构,并采用三维仿真分析方法对该吸能区结构进行优化分析。另外,对优化后的吸能区结构进行全尺寸冲击试验验证。试验结果表明,仿真分析在能量吸收、压溃行程和平台力方面的误差可保持在 10% 以内。

关键词 轨道客车; 耐撞性; 吸能结构; 能量吸收

中图分类号 U270.1⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.02.006

Study on the Gap-oriented Hierarchical Triggered Energy Absorbing Structure

LI Benhuai, LI Chenglin, ZHENG Yulong

Abstract Taking the energy absorption structure at the cab end of rail transit vehicle as the research object, a gap-oriented hierarchical triggered energy absorbing structure is proposed, a three-dimensional simulation analysis is used to optimize the energy absorption structure. Then, the optimized absorption structure is validated with a full-scale impact test. The test result shows that the errors of the simulation analysis could be controlled within 10% for energy absorption, displacement stroke and the platform force.

Key words railway vehicle; crash worthiness; energy absorption structure; energy absorption

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

轨道客车耐撞性设计是将车辆端部结构作为吸能结构的设计方法。吸能结构一般设置在带司机室的车辆端部。当列车发生碰撞时,吸能结构通过可控的撞击变形吸收冲击能量,耗散列车的碰撞能量,减小冲击加速度,保护车辆和乘客安全。

本文以轨道客车司机室端吸能结构为研究对象,提出一种基于缺口导向分级触发的吸能结构,并采用三维仿真分析方法对该吸能区结构进行优

化分析。另外,对优化后的吸能区结构进行全尺寸冲击试验验证。试验结果表明,仿真分析在能量吸收、压溃行程和平台力方面的误差可保持在 10% 以内。

1 耐撞性设计方法

轨道客车耐撞性吸能结构的研究目的是实现列车在发生撞击时,按列车碰撞速度等级分级触发各吸能结构。车钩缓冲器(类型有 EFG3 缓冲器、气液缓冲器、胶泥缓冲器)用于列车重联或撞击车档时的低速(5~10 km/h)冲击缓冲,此时缓冲器吸收全部撞击能量,车钩压溃管不触发;车钩压溃管(形式有膨胀式、刨削式、翻管等),用于吸收列车中低速(10~25 km/h)撞击时产生的能量,此时压溃管压溃,剪切螺栓不剪断;主吸能结构(结构有防爬器、吸能箱、车体吸能区等),用于吸收列车中高速(25~48 km/h)撞击时产生的能量^[1],此时剪切螺栓剪断,主吸能结构压溃,当速度超出该范围时,通过车体结构变形吸收剩余能量。

基于轨道客车耐撞性吸能结构研究的耐撞性设计方法主要包括:列车能量分配方法、确定各界面吸能量方法、吸能区结构设计及设计验证。

1.1 列车能量分配方法

轨道客车能量分配通常是采用质量-弹簧的一维单元模型来模拟的,其中车体质量以质点或刚性单元模拟,车端车钩缓冲器、压溃管、剪切螺栓、防爬器(主吸能结构)分别以线弹性和非线性弹簧元等效模拟,并以力-行程曲线信息形式输入。一维的能量分配模型可以应用 ADAMS、Simpack 等动力学软件或 LS-DYNA、PAM-CRASH 等非线性有限元软件程序来运行。由于一维能量分配模型的运行时间短,因此,可以用于列车吸能单元及各撞击界面的能量分配及优化工作,从而得出满足标准及设

^{*} 国家重点研发计划项目(2016YFB1200404-02)

计要求的列车各界面吸能结构的平台力、压溃行程及吸能量等参数信息,并依据列车各界面最佳能量吸收的力-行程特性,给出吸能结构的设计参数,同时,可在确定车体的静态压缩载荷、列车碰撞后最优维修方案等方面起到指导作用^[2]。

1.2 确定各界面吸能量方法

各界面吸能结构的吸能量取决于列车碰撞过程中需要吸收的能量等级。依据碰撞吸能原理,列车碰撞过程中更多的能量由前端碰撞界面吸收,后续界面吸能依次减少。如上所述,列车中、低速碰撞冲击过程中,能量全部由车钩吸能装置吸收。当列车发生中高速碰撞时,车钩缓冲、吸能装置无法吸收碰撞过程中产生的全部能量,因此,根据列车碰撞吸能量的大小,需要在车体的端部底架区域设置一个可更换的吸能结构(如防爬器),其具体的触发力及压溃行程由能量分配计算来确定。列车在真实碰撞过程中,除了压溃管、吸能结构外,车钩缓冲器、转向架一二系悬挂等阻尼结构在碰撞过程中也吸收能量,车体弹性变形及乘客运动等也会吸收部分能量,因此,在进行一维能量分配计算时,吸能结构压溃行程可以不必考虑过多的吸能裕量^[2]。

1.3 吸能区结构设计

列车端部吸能结构设计时通常可采用易于更换的吸能单元(如蜂窝结构、膨胀结构、刨削结构等),也可以设计成底架端部结构的一部分,通过结构变形来吸收能量,或者采用可更换吸能结构与结构自身吸能组合的吸能方式吸能。可更换吸能结构的优点是平台力稳定、重复性好、维修维护方便,但受到吸能空间及平台力的限制,吸能量有限;车体自身结构吸能优点是充分利用吸能空间,碰撞平台力高,吸能量大且垂向承载力大,防爬车性能好,但缺点是碰撞力波动较大,设计优化时需要丰富的分析经验和技巧。一个全新的吸能结构设计需借助3D非线性有限元分析软件完成,通常采用单车带吸能结构或台车+吸能结构的方式进行优化验证分析。同时,需要考虑吸能结构在碰撞压溃过程中,车体结构不发生失稳,保证吸能结构有序变形,即吸能单元与车体结构一体化^[2]。

1.4 设计验证

吸能结构的设计验证通常采用动态测试与碰撞仿真两种方式进行。试验测试验证是通过相同的配重及速度条件下仿真分析力、压溃行程和吸收能量与试验结果误差在10%以内。列车仿真验证

是建立列车三维编组碰撞仿真分析模型(包括车体结构、吸能系统、转向架结构及轨道模型等),应用三维碰撞仿真分析软件进行分析,依据碰撞吸能评价标准,对车体防撞防爬性能、防脱轨性能、司机室生存空间等列车碰撞吸能参数进行验证^[2]。

2 吸能区结构设计

2.1 吸能区结构

本文设计了一种多级触发驾驶室端部的底架吸能结构。设计目标是吸能结构在列车发生碰撞时能以有序和可控的方式压溃变形,实现所需的载荷-位移特性^[3]。从能量分配分析中选取期望的载荷-位移特性端部吸能结构进行初步设计。同时:考虑降低吸能结构的碰撞初始触发峰值力,增加缺口结构;考虑平台力的平稳性,采取结构分级触发形式。吸能结构如图1、图2所示,其触发缺口特征细节如图3、图4所示。

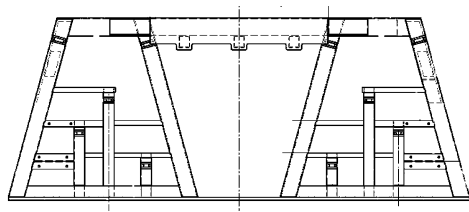


图1 吸能结构二维平面图

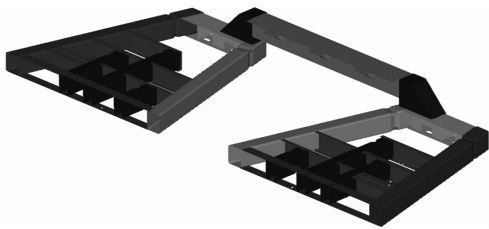


图2 吸能结构三维几何模型

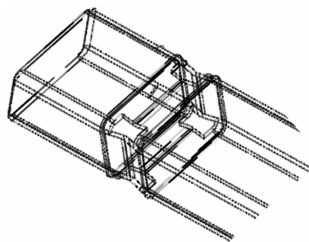


图3 吸能结构触发缺口外形

2.2 有限元分析

2.2.1 有限元模型及工况

应用 Hypermesh 软件建立仿真分析模型,如图5、图6所示。结合碰撞试验条件,确定分析模型由一个吸能结构与碰撞台车组成,采用LS-DYNA软

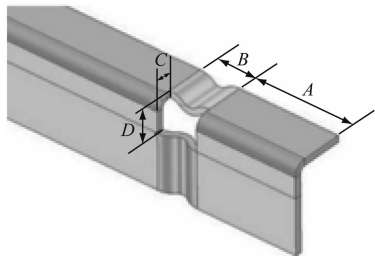


图4 吸能结构触发缺口模型

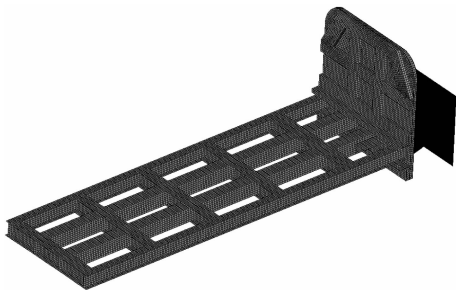


图5 带吸能结构的台车有限元模型

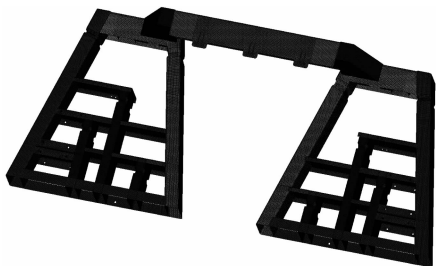


图6 吸能结构有限元模型

件进行分析。分析工况如下:质量为55.3 t的台车和吸能结构,以速度16.24 km/h撞击刚性墙,直至形成刚性屏障。模型镇流器的质量作为试验车质量,相当于一个完整的有限元模型质量。

2.2.2 材料本构模型

图7为吸能结构所用材料的工程应力-应变特性曲线,将其转换为图8所示的真实应力-应变曲线,用于仿真分析。

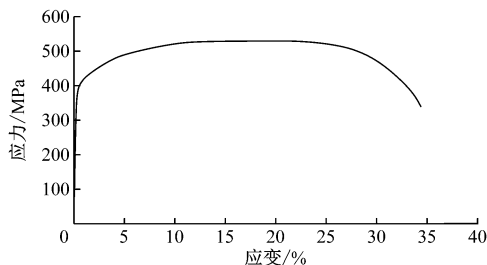


图7 吸能结构材料的工程应力-应变曲线

结构进行结构优化分析。分析结果表明,吸能结构是以受控有序、分级触发的方式变形,如图9所示;碰撞后结构的最大压溃行程为432 mm,如图10所示;碰撞力最大峰值为1 800 kN,最小值为700 kN,平均为1 300 kN,如图11所示;碰撞过程中吸能结构吸收的能量为561.7 kJ,如图12所示。

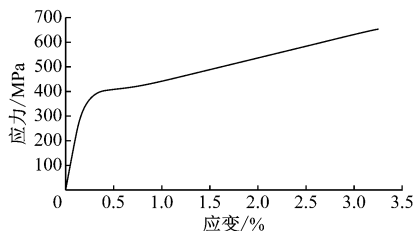


图8 吸能结构材料的真实应力-应变曲线



图9 吸能结构变形情况

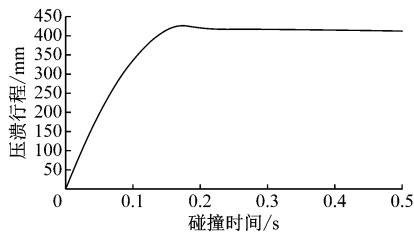


图10 吸能结构的压溃时间曲线

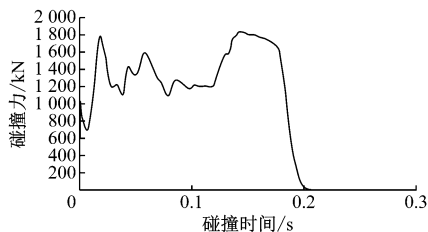


图11 吸能结构的力-时间曲线

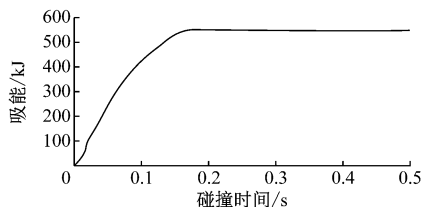


图12 吸能结构的能量-时间曲线

2.2.3 结果分析

应用显式有限元求解器 LS-DYNA 软件对吸能

2.3 碰撞试验

碰撞试验的条件与仿真分析相同,如图 13、图 14 所示。碰撞时吸能结构以可控、有序的方式变形,碰撞后防撞梁后端有局部撕裂现象出现,如图 15 所示。最大碰撞力为 23 00 kN,最小碰撞力为 500 kN,平均力为 1 221 kN,如图 16 所示。碰撞过程中吸能结构吸收的能量为 561.6 kJ^[4]。



图 13 碰撞试验用刚性碰撞墙



图 14 碰撞台车和试验样件



图 15 碰撞试验后的样件变形情况

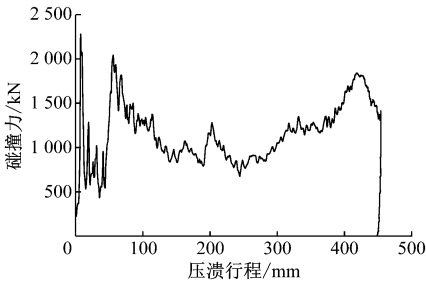


图 16 吸能结构的力-行程曲线

2.4 结果分析

样件撞击后的实际吸能可通过力-位移-响应曲线下的面积计算求得,而碰撞力则由实际吸能除以

最大压溃行程来计算^[5]。影响能量吸收的因素包括:结构中的弹性应变;试验过程中热和声产生的能量损耗。而仿真分析中除弹性应变能之外未考虑其他影响因素,但这种差异很小,可以忽略不计。

从变形趋势看,实件试验结果和有限元分析之间具有一致性,压溃的模式相同,均为受控的吸能方式^[6],如图 17 所示。从试验数据拟合的力-位移响应曲线可看出,碰撞力波动与压溃行程变化一致,如图 18 所示。其中吸能结构的最大压溃行程、碰撞力及吸能量误差在 10% 以内,如表 2 所示,满足 EN 15227 标准的要求。

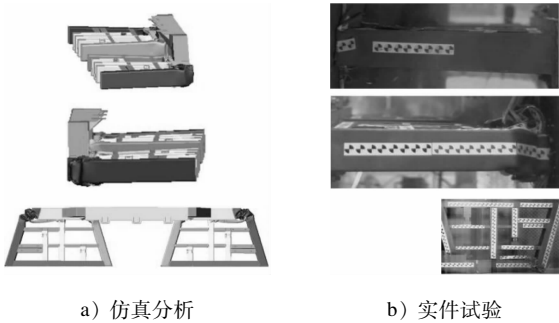


图 17 吸能结构撞击变形的仿真与试验对比

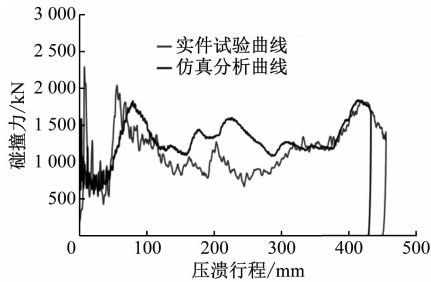


图 18 吸能结构撞击过程的力-行程曲线对比

表 2 吸能结构撞击仿真与试验结果对比

项目	系统动能	吸收能量	最大压溃行程	碰撞力
实件试验	560.0 kJ	561.6 kJ	460 mm	1 221 kN
仿真分析	560.0 kJ	561.7 kJ	432 mm	1 300 kN
误差		0.1%	-6.5%	6.1%

3 结论

(1) 本文提出了一种基于缺口导向分级触发吸能结构。通过对该吸能结构的优化分析、试验验证及试验结果对比分析表明,缺口导向结构能够有效降低吸能结构的触发峰值力,并能够诱导吸能结构按次序吸能;分级触发结构可以有效控制结构碰撞

(下转第 29 页)

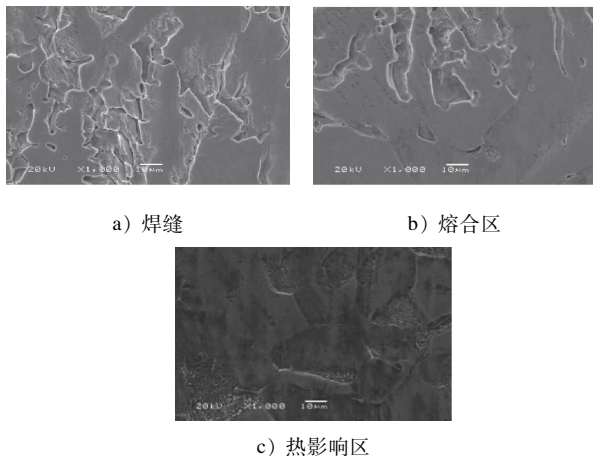


图10 接头焊缝微观组织(放大1 000倍)

3 结论

(1) 为了解决不锈钢轨道客车空调管道焊接密封不严、焊不全问题,根据实际生产条件,采用密封式自动TIG环焊夹具及焊接机头进行焊接可解决该问题并具有可行性。

(2) 对于壁厚为2 mm的不锈钢管材,通过焊接接头无损检测、拉伸、弯曲、硬度等试验,以及宏观、微观组织分析,得出以下结论:采用焊接电压9.5 V、焊接电流90 A、焊接速度100 mm/min、氩气保护

流量15 L/min、钨级伸长30 mm的焊接参数,能够使焊接接头性能相对较好。

(3) 对于壁厚为3 mm不锈钢管材,通过焊接接头无损检测、拉伸、弯曲、硬度等试验,以及宏观、微观组织分析,得出以下结论:采用焊接电压为9.5 V、焊接电流78 A、焊接速度85 mm/min、氩气保护流量15 L/min、钨级伸长30 mm的焊接参数,能够使焊接接头性能相对较好。

(4) 采用环缝全位置自动TIG焊机焊接不锈钢管,其焊缝的硬度、拉伸性能均好于母材,其宏观形貌呈梯形结构,焊缝中心组织为典型的柱状奥氏体枝晶,熔合区奥氏体呈不规则的等轴晶形态。

参考文献

- [1] 马鸣亮. 薄壁不锈钢管环缝全位置自动TIG焊[J]. 焊接技术, 2009, 38(6): 60.
- [2] 姚寿铭. 碳钢管道全位置自动TIG焊[J]. 电焊机, 2011, 12(41): 53.
- [3] 文明. 管子板焊接接头破口形式确定工艺试验[J]. 金属加工(热加工), 2017(20): 28.
- [4] 日本不锈钢协会. 冷轧不锈钢钢板和钢带: JIS G 4305—2005 [S]. 东京: 日本规格协会, 2005.

(收稿日期: 2018-10-11)

(上接第25页)

过程中的力值波动,使吸能结构的碰撞力更加平稳。

(2) 尽管分析过程中存在材料动态性能参数及试验过程中一些潜在的不确定性因素影响,但试验结果相关性表明,该吸能结构的整体碰撞吸能仿真分析与实件试验的结果趋势一致。这种相关性说明,用仿真分析手段对吸能结构进行优化分析方法合理可靠,分析和试验结果误差在10%以内,能够真实反映实际结构的碰撞性能。

(3) 该吸能结构的分析优化和试验验证表明,吸能结构能以有序、可控的方式变形,吸能行程及碰撞力满足预期要求,吸能结构满足EN 15227标准要求。

参考文献

- [1] 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.
- [2] LU Z J, LI B H, YANG, C X, et al. Numerical and experimental study on the design strategy of a new collapse zone structure for railway vehicles[J]. International Journal of Crashworthiness, 2017, 22(5): 488.

- [3] British Standards Institution. Railway applications — Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies: EN 15227—2008 [S]. London: BSI, 2008.
- [4] JACOBSEN K, TYRELL D, PERLMAN B. Impact tests of crash energy management passenger rail cars: Analysis and structural measurements[C]//ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Anaheim: American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [5] TYRELL D, JACOBSEN K, MARTINEZ E, et al. Train-to-train impact test of crash-energy management passenger rail equipment: Structural results[C]//ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago: American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [6] MARTINEZ E, TYRELL D, RANCATORE R, et al. A crush zone design for an existing passenger rail cab car[C]//ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Florida: American Society of Mechanical Engineers, 2005.

(收稿日期: 2018-10-11)