

全承载客车正面碰撞吸能器设计与验证

崔崇桢

(郑州宇通客车股份有限公司, 郑州 450001)

摘要: 为开发大型全承载客车碰撞吸能器, 通过整车正面碰撞有限元仿真分析, 确定了吸能器合理的吸能量和压溃力, 以压溃力为目标进行吸能器结构参数设计。采用铝合金和 DP600 钢试制了吸能器样件, 通过静态压溃试验对比不同吸能器的压溃力和变形模式, 并通过台车碰撞和整车碰撞试验验证吸能器性能。结果表明, 铝合金吸能器的压溃变形模式稳定, 材料没有撕裂现象, 在正面碰撞、偏置碰撞、斜角碰撞等多种碰撞工况下都能产生良好变形, 满足整车碰撞安全性的要求。

关键词: 全承载大客车; 正面碰撞; 吸能器; 铝合金; 压溃力

中图分类号: U469.13

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2021.06.05

Design and Validation of an Energy Absorber for Monocoque-Body Coaches in Frontal Impact

CUI Chongzhen

(Zhengzhou Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to develop an energy absorber for the monocoque-body coach in frontal impact, the whole-coach frontal impact simulation was conducted. The reasonable energy absorption and the crushing force of the absorber were determined, based on which the structural parameters were designed. The prototypes of the energy absorber were made in aluminum alloy and DP600 steel and the corresponding crushing force and deformation modes were compared through static press tests. The performance and crushing modes of the absorber were validated by the sled impact test and the frontal impact test of the coach. The results show that the energy absorber made in aluminum alloy deforms well in frontal impact, offset frontal impact and oblique impact, with stable crushing modes and without rupture. The designed energy absorber can meet the safety requirements for the whole coach in frontal impact.

Keywords: monocoque-body coach; frontal impact; energy absorber; aluminum alloy; crush force

在客车交通事故中, 约有 50% 为碰撞事故, 所占比最高, 其中 83% 的碰撞是正面碰撞事故^[1]。国内外公路客车通常采用平头造型, 客车前部可变

形吸能空间小, 且车身结构多采用矩形型材焊接而成的桁架车架结构, 车身压溃吸能能力较弱。当发生正面碰撞事故时, 较高的碰撞能量使客车前部结

收稿日期: 2020-12-07 改稿日期: 2021-05-09

参考文献引用格式:

崔崇桢. 全承载客车正面碰撞吸能器设计与验证 [J]. 汽车工程学报, 2021, 11 (6): 427-433.

CUI Chongzhen. Design and Validation of an Energy Absorber for Monocoque-Body Coaches in Frontal Impact [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11 (6): 427-433. (in Chinese)



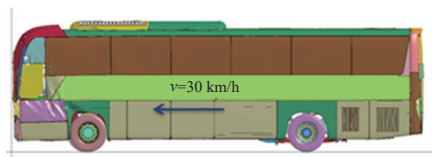
构容易产生大变形,挤压驾驶员及前排乘客。为了解决这一难题,国内外一些大学、科研机构 and 客车制造厂商对如何提高客车碰撞安全性进行了研究。CERIT 等^[2]在车架前部上方设计了两种吸能结构,降低前围结构的侵入量,增加驾驶员和导游生存空间。BERG 等^[3]设计研发了一种客车前部防碰撞保护结构 (FCG),改善了驾驶员和导游的保护效果。为推动我国客车正面碰撞安全性提升,中华人民共和国交通运输部发布了 JT/T 1369—2020 《客车正面碰撞的乘员保护》行业标准,要求客车 30 km/h 正面碰撞后,驾驶区应存在生存空间。李强^[4]、李友真^[5]、彭旺等^[6]、黎勇等^[7]从吸能结构材料厚度、诱导槽位置和形状等方面,对大客车缓冲吸能装置的耐撞性能进行了研究。曹立波等^[8]、杨延功等^[9]对大型客车正面碰撞吸能结构设计和约束系统进行了研究。以上研究主要通过仿真分析方法从理论上分析了吸能结构对提升客车正面碰撞安全性的重要性,但对大客车产品实际开发设计过程中如何进行吸能器设计及验证考虑较少,对客车工程设计人员进行不同客车正面碰撞安全性工程化开发的指导作用不足。

本文将结合全承载大客车实车结构特点,采用正向设计法,通过整车正面碰撞仿真分析计算出吸能器的压溃力设计目标,并制作铝合金和 DP 钢两种吸能器,通过台车和实车碰撞试验验证吸能器的吸能效果,为大客车碰撞吸能器设计探索一种可行的方法。

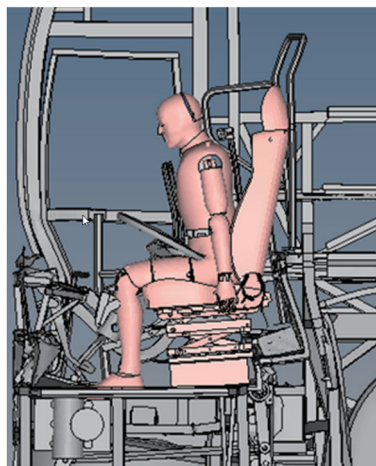
1 吸能器设计

1.1 吸能器压溃力确定

以质量为 13 t 的 12 m 全承载客车为研究对象,首先建立大客车整车有限元模型,并进行正面 30 km/h 碰撞仿真分析(碰撞动能约为 450 kJ),如图 1 所示,客车前部结构产生较大变形,向驾驶区凹陷。由于转向管柱的固定支架向车内变形,受其影响,方向盘下沿向后移动 245 mm、向下移动 99 mm,侵入驾驶员生存空间,如图 1b 所示。



(a) 大客车正面碰撞仿真分析



(b) 驾驶员生存空间被压情况

图 1 大客车正面碰撞仿真分析及驾驶员生存空间

为了改善驾驶员生存空间,在整车有限元模型中增加简化吸能器模型,并对车架传力结构进行优化设计,使吸能器承受的碰撞力向车架多条传力结构传递分散,确保吸能器能够产生轴向变形,如图 2 所示。以驾驶员生存空间不被方向盘等内饰侵入为目标,通过调整吸能器的壁厚、材料等参数,进行多次仿真分析对比,确定吸能器吸收的能量不低于整车碰撞能量的 25% 时,即吸能器吸收的能量不低于 112 kJ,前部结构变形量较低,可以满足不侵入驾驶员生存空间的要求。根据大客车车架前段吸能器实际安装空间,确定左右两侧可以安装两个吸能器,因此,单个吸能器吸能量为 56 kJ;车架前端到前围内面的距离约为 200 mm,考虑安装误差,吸能器长度设计成 180 mm;车架前端面的高度为 160 mm,确定吸能器截面轮廓尺寸为 150 mm。由于吸能器被压溃后还有一定的剩余长度,有效吸能长度约为原长度的 0.7 倍,因此,有效吸能长度约为 130 mm,根据式 (1) 可以计算出单个吸能器平均压溃力约为 430 kN。

$$F = \frac{E}{s} \quad (1)$$

式中: E 为单个吸能器吸收的能量, J ; s 为吸能器的压溃变形量, m ; F 为吸能器的平均压溃力, N 。

因此,按照 430 kN 压溃力指标进行吸能器参数设计、材料及工艺选择等。

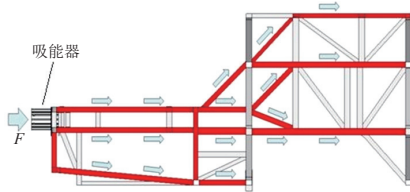


图2 客车车架传力结构示意图

1.2 吸能器结构设计

设计吸能器结构时,需要确定吸能器截面型式、材料、厚度等参数。常见的吸能器截面形状有正方形结构、田字型结构、多边形结构、嵌套结构等,常用的吸能器材料有钢材、铝合金、复合材料等^[10-11]。由于客车动能大,吸能器需要吸收的能量也较大,普通的单层薄壁结构难以满足吸能要求,所以选取内外双层八边形结构、田字型和双目型等多胞截面型式,确保吸能器的吸能量。结合材料、工艺制造的可行性,内外八边形吸能器截面结构更加复杂,焊接方式难以制造,因此选用综合性能良好的6系铝合金材料,通过挤压方式成型;田字型和双目型吸能器截面相对规则、简单,可以通过焊接方式制造,因此选用DP600钢,兼顾成型性和材料强度。以430 kN的平均压溃力为目标进行吸能器静态压溃仿真分析,从而确定理论壁厚,最终确定3种吸能器结构参数,见表1。

表1 不同吸能器参数对比

截面型式	正八边形	田字型	双目型
材料	铝合金	DP600	DP600
外廓尺寸/mm	150	150	150
壁厚/mm	3.0	2.5	2.0
制造工艺	挤压成型	焊接	焊接
截面形状			

2 样件试制

根据吸能器设计方案,采用挤压成型的工艺试制铝合金吸能器,并在铝合金吸能器前部棱边上增

加诱导孔,降低压溃力的初始峰值。为了便于在车架上安装,在铝合金吸能器的后部焊接封板,并开螺栓孔,如图3所示。

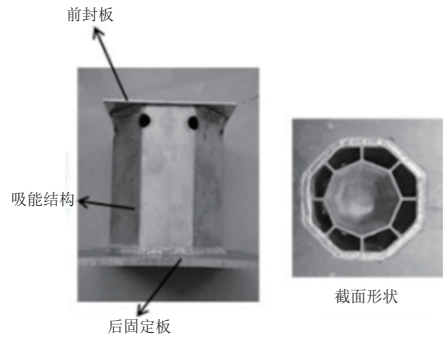


图3 铝合金吸能器样件

采用DP600的钢材试制钢吸能器,钢制吸能器外板和内板之间采用塞焊工艺,并在棱边上增加诱导孔,如图4所示。

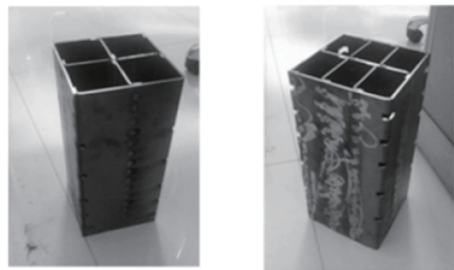


图4 田字型和双目型吸能器样件

3 试验验证

3.1 静压试验验证

在万能试验机上对两种材料的吸能器进行静态压缩试验,对比吸能器变形情况和压溃力,吸能器样件长度均为300 mm。在初步方案中铝合金吸能器采用6005材料,压溃时出现了铝型材结构碎裂,没有产生褶皱变形,变形模式不稳定,不利于碰撞吸能,不满足设计要求。改用6061材料,压溃时变形模式变好,但出现局部撕裂现象;最终通过调整铝合金吸能器的材质,采用6063P的铝合金,冷却方式采用水冷,压溃力在450 kN左右,压溃力平稳,满足设计要求,且解决了吸能器压溃过程中的撕裂问题。3种铝合金吸能器压溃变形如图5所示,6063P铝合金吸能器压溃力如图6所示。



(a) 6005



(b) 6061



(c) 6063P

图 5 三种铝合金吸能器压溃变形对比

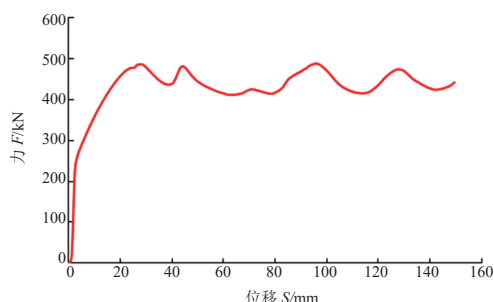


图 6 6063P 铝合金吸能器压溃力-位移曲线

两种 DP600 钢吸能器轴向压溃变形如图 7 所示, 双目型吸能器和田字型吸能器轴向变形过程中, 均出现棱边焊点、焊缝开裂失效, 部分母材撕裂, 变形模式不稳定。从图 8 压溃力曲线来看, 虽然棱边上增加了诱导孔, 但双目型吸能器在变形初始屈服时刻仍然出现了高达 800 kN 的压溃力峰值, 是铝合金吸能器的 1.67 倍, 这需要车架结构具有很高的强度保证吸能器首先压溃变形; 在压溃变形过程中由于焊点、母材失效, 导致田字型 DP 钢吸能器平

均压溃力不足 250 kN, 双目型吸能器平均压溃力不足 350 kN, 均低于设计的目标值。

从铝合金吸能器和 DP600 钢吸能器的静压试验可以看出, 6063P 铝合金吸能器变形模式稳定, 本体没有撕裂失效; 而 DP 钢吸能器屈服峰值力高, 焊点与母材撕裂失效难以控制, 且平均压溃力较低, 达不到设计要求。因此, 选用铝合金吸能器进行进一步研究。



(a) 田字型吸能器



(b) 双目型吸能器

图 7 DP600 钢吸能器变形对比

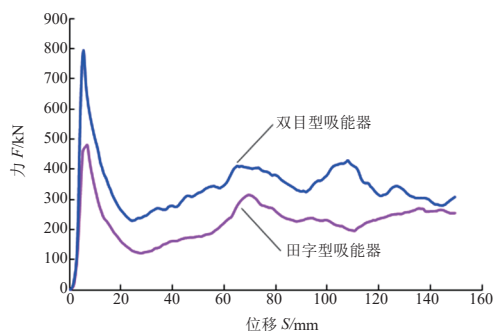


图 8 DP600 钢吸能器压溃力-位移曲线

3.2 台车碰撞试验验证

6063P 铝合金碰撞吸能器在静态压缩试验中的性能满足设计要求, 还需要对其在偏置碰撞、斜角碰撞等条件下的变形情况进行试验验证, 保证在实际碰撞工况中也能很好地产生变形。因此, 采用台车碰撞的方式, 对单吸能器碰撞、偏置碰撞、斜角碰撞 3 种工况条件下的碰撞性能进行验证。

3.2.1 单吸能器碰撞

将 6063P 铝合金吸能器固定在台车前部刚性面上, 进行碰撞。台车及吸能器总质量为 1007 kg, 碰撞时刻实际速度为 49.2 km/h。模拟在理想状态下, 铝合金吸能器的变形情况。碰撞后, 铝合金吸能器产生了褶皱变形, 变形量约为 185 mm, 没有撕裂、开裂现象出现, 如图 9 所示。



(a) 变形前

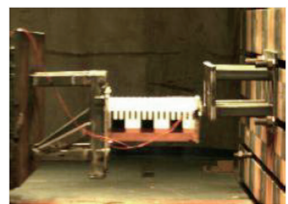


(b) 变形后

图 9 6063P 铝合金吸能器碰撞变形

3.2.2 偏置碰撞

在实际碰撞工况中, 铝合金吸能器可能局部与其他车辆或物体产生碰撞, 在这种碰撞条件下, 吸能器也要能够吸收部分能量。因此, 进行了 6063P 铝合金吸能器局部撞击障碍物的变形情况, 如图 10 所示, 台车及吸能器总质量为 1 024 kg, 偏置率为



(a) 变形前



(b) 变形后

图 10 6063P 铝合金吸能器偏置碰撞变形

50%, 碰撞时刻速度为 35.1 km/h。碰撞后, 6063P 铝合金吸能器沿撞击部位分界处产生撕裂, 被撞击部分产生了轴向压溃变形, 变形量约为 160 mm, 意味着在实际碰撞中即使吸能器局部产生碰撞, 也能起到吸能作用。

3.2.3 斜角碰撞

在实车斜角碰撞中, 由于吸能器主要碰撞受力方向与其轴向成一定角度, 吸能器的后部连接部位也要承受一定的横向力, 需要后部连接方式横向强度能够支撑吸能器产生斜角变形。因此, 进行吸能器 15° 斜角碰撞试验, 如图 11 所示, 台车及吸能器质量为 683 kg (不含配重块质量), 碰撞时刻速度为 40 km/h。吸能器产生压溃变形, 变形量约为 50 mm, 吸能器根部母材局部产生撕裂, 但吸能器后部连接方式未失效, 吸能器未脱落, 满足设计要求。



(a) 变形前



(b) 变形后

图 11 6063P 铝合金吸能器斜角碰撞变形

从以上 3 种铝合金吸能器碰撞试验可以看出, 铝合金吸能器在多种碰撞工况中都能产生压溃变形, 未发生撕裂、脱落现象, 吸能性能良好。

3.3 整车碰撞试验验证

为了验证 6063P 铝合金吸能器在整车正面碰撞中的变形情况, 在交通部公路交通试验场进行改进后整车 30 km/h 的正面碰撞试验, 试验车辆总质量 13.404 t, 以 30 km/h 的速度垂直撞击刚性壁障, 如图 12 所示, 并采用泡沫驾驶员假人测量生存空间是否被挤压。



图 12 30 km/h 正面碰撞试验车辆

碰撞后, 前部左右吸能器产生良好的轴向压溃变形, 没有失稳、撕裂现象产生, 如图 13 所示, 表明吸能器吸能效果较好。



(a) 左侧吸能器



(b) 右侧吸能器

图 13 左右侧 6063P 铝合金吸能变形对比

碰撞后方向盘向后移动 142 mm, 与驾驶员模型腹部 x 向距离为 65 mm; 方向盘由于惯性力向上轻微翻转, 方向盘下沿与驾驶员模型大腿 z 向距离增加了 12 mm, 达到 80 mm, 如图 14 所示。说明方向盘未侵入到驾驶员假人腹部, 也没有挤压驾驶员假人大腿, 驾驶员生存空间完好, 满足《客车正面碰撞的乘员保护》标准 4.1 中“客车驾驶区和前排乘客座椅区域应存在正面碰撞的生存空间”的技术要求, 达到设计目标。

整车改进前后方向盘的移动量见表 2, 方向盘后移量减少了 103 mm, 下移量减少了 111 mm, 驾驶员生存空间的改善效果明显。

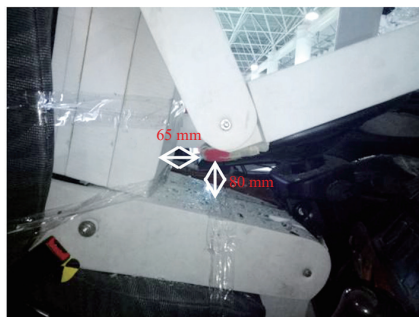


图 14 碰撞后驾驶员生存空间

表 2 改进前后驾驶员生存空间对比

改进前后 对比量	改进前 (仿真)	改进后 (试验)	改进量
方向盘后移量/mm	245	142	103
方向盘下移量/mm	99	-12	111
驾驶员生存空间	被方向盘侵入	完好	/

从以上分析结果可以看出, 通过增加吸能器和结构优化设计, 大客车在正面碰撞中前部结构变形得到有效控制, 方向盘后移量明显改善, 保证了驾驶员的生存空间不被侵入。

4 结论

(1) 结合大型全承载客车整车 30 km/h 正面碰撞仿真分析, 确定吸能器需要吸收的能量和压溃力, 作为吸能器的设计目标。

(2) 通过合理调整优化铝合金吸能器的材料、冷却方式, 可以控制吸能器的压溃力、变形模式, 获得良好的吸能效果。6063P 铝合金吸能器在多种碰撞工况中都能产生理想的变形, 满足整车碰撞安全性设计要求。

(3) DP600 钢吸能器压溃过程中屈服力大、焊缝、母材容易产生开裂失效, 实际压溃力与理论设计值差距大。

(4) 具有良好吸能特性的吸能器加上传力路径优化设计是保证客车整车碰撞中驾驶员生存空间的有效办法。

参考文献 (References)

- [1] 高水德, 张绍理, 姚常青. 国外客车被动安全性研究 [J]. 客车技术与研究, 2006, 28(3): 7-10.
GAO Shuide, ZHANG Shaoli, YAO Changqing. Study on Foreign Bus and Coach Passive Safety [J]. Bus & Coach Technology and Research, 2006, 28(3): 7-10. (in Chinese)
- [2] GERIT M E, GULER M A, BAYRAM B, et al. Improvement of the Energy Absorption Capacity of an Intercity Coach for Frontal Crash Accident [C]// 11th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, USA. 2010: 13-23.
- [3] BERG A, RUCKER P, NIEWOHNER W, et al. Status of the Secondary Safety of Coaches—updates Statistics, Current Standards and Additional Technical Measures [C]// Proceedings of the 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Seoul: [s.n.], 2013: 8-12.
- [4] 李强. 双层公路客车正面碰撞车身结构强度分析及耐撞性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
LI Qiang. Strength Analysis and Crashworthiness Research of Double-Decker Coach Body Structure Frontal Impact [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [5] 李友真. 某大型客车正面碰撞仿真与安全研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
LI Youzhen. Frontal Crash Simulation and Security Research of a Certain Type of Coach [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 彭旺, 张雅鑫. 客车正面碰撞仿真分析及性能优化 [J]. 客车技术与研究, 2019, 41(4): 9-11.
PENG Wang, ZHANF Yaxin. Simulation Analysis and Performance Optimization of Coach Frontal Collision [J]. Bus & Coach Technology and Research, 2019, 41(4): 9-11. (in Chinese)
- [7] 黎勇, 吴长风, 蓝平辉, 等. 大客车正面碰撞结构耐撞性分析与改进 [J]. 客车技术与研究, 2017, 39(1): 10-13.
LI Yong, WU Changfeng, LAN Pinghui, et al. Analysis and Improve of Structural Impact Resistance for a Large Coach [J]. Bus & Coach Technology and Research, 2017, 39(1): 10-13. (in Chinese)
- [8] 曹立波, 周登科, 朱结, 等. 全承载式客车正面碰撞安全性的改进 [J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(1): 58-65.
CAO Libo, ZHOU Dengke, ZHU Jie, et al. Improvement of a Monocoque-Body for Coach Frontal Impact Safety [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2015, 6(1): 58-65. (in Chinese)
- [9] 杨延功, 张钦超, 张立常, 等. 某 11 米全承载客车正面碰撞分析及结构优化 [J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(3): 66-68.
YANG Yangong, ZHANG Qinchao, ZHANG Lichang, et al. Simulation Analysis and Structure Optimization of 11 m Full-integral Bus Frontal Crash [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(3): 66-68. (in Chinese)
- [10] 刘中华, 程秀生, 杨海庆, 等. 薄壁直梁撞击时的变形及吸能特性 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2006, 36(1): 28-29.
LIU Zhonghua, CHENG Xiusheng, YANG Haiqing, et al. Deformation and Energy-Absorption Characteristics of Thin-Wall Straight Beam Under Central Collision [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(1): 28-29. (in Chinese)
- [11] LU Guoxing, YU Tongxi. Energy Absorption of Structures and Materials [M]. New York: CRC Press LLC, 2003: 19-24.

作者简介



崔崇桢 (1984-), 男, 河南叶县人, 博士, 高级工程师, 主要从事客车安全技术、客车结构设计、新材料应用等方面的研究工作。

Tel: 13598062636

E-mail: 155137791@qq.com