DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0164-07

# 高速列车吸能结构设计和耐撞性分析*

李松晏,郑志军,虞吉林
(中国科学技术大学中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要**: 建立了高速列车头车的有限元模型,运用有限元软件 LS-DYNA 模拟了头车碰撞刚性墙的冲击过程。在碰撞发生时,原有设计方案的牵引梁主体的变形以整体屈曲为主,不利于缓冲吸能。在对原设计的耐撞性分析的基础上,建议对原有牵引梁结构加以改进,并在前端增加两组不同尺寸和厚度的带圆角的方管作为缓冲吸能管,考虑了在缓冲管中填充泡沫铝与否,形成了 4 种设计方案。数值模拟结果表明,与原设计方案相比,新方案的整个头车的吸能量有大幅度提高,刚性墙反力的峰值也有一定程度的降低,采用大的圆角半径的厚管并填充泡沫铝的方案的改进效果最明显。

**关键词**: 固体力学;耐撞性;有限元方法;吸能结构;高速列车
**中图分类号**: O342 **国标学科代码**: 1301565 **文献标志码**: A

列车安全问题备受关注,在各国相继展开了车辆碰撞研究[1-4]。在英国,提出了碰撞车体结构设计和可控大变形的吸能方式[1]。在美国,经过对大量的列车碰撞实验和数值模拟研究,提出了碰撞能量管理设计思想[3],强调将变形区域控制在非乘员区域。在日本,在 E217 系电动车组上首次设计了两个不同冲击能量吸收的区域[4]。

通过碰撞实验和数值模拟对铁道车辆进行耐撞性设计与分析[5],以及在车体的主要变形区域安装吸能装置,尽可能多地吸收撞击产生的能量,并降低碰撞作用的峰值[6],可增强车辆的被动安全性。余同希[7]提出利用金属塑性变形原理可以设计碰撞能量吸收装置。田红旗[8]对列车吸能装置进行了模拟实验并提出耐撞性客车设计方法。蒋家桥等[9]根据泡沫金属材料的动态特性,设计了新型金属缓冲器。丁晨等[10]应用耐撞性系统设计思想,设计了采用新型结构和填充物的排障器设计方案。雷成等[11]对高速列车吸能装置吸能原理进行了研究,分析结果表明薄壁结构轴向压溃吸能是一种非常理想的碰撞能量耗散形式。宋宏伟等[12]发现多孔材料填充的薄壁结构多孔材料与管壁的相互作用,薄壁结构的吸能有所增加,多孔材料的吸能增加 40%左右。王蕊等[13]对轴压作用下圆管的力学行为进行了实验研究,结果表明圆管壁厚对撕裂能和塑性弯曲变形能在总能耗中所占比例的影响效果明显。

在一些国家,建立了列车的耐撞性标准,但现有标准大都是针对常规的集中动力型低速列车的。目前,涉及动车组列车的车体耐撞性标准有欧洲标准 EN 15227:2008+A1[14]。该标准认为,要求车体结构在任何碰撞情况下都可以保证乘客安全是不现实的,设计目标应是在一些经常发生的碰撞事故中对乘客提供一定程度的保护。标准要求车辆设计中采取措施降低爬车风险,以可控方式吸收冲击能量,保持救生空间和乘客区域的结构完整性,限制减速度并防止脱轨和减轻撞击轨道障碍物产生的后果。

本文中,采用有限元方法模拟某型动车组头车以一定速度撞击刚性墙的冲击过程,对原头车的牵引梁结构进行适当改进,并增加专门的吸能缓冲管结构,探讨提高列车耐撞性的方法。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型的简化

动车车组一般由 8 节或者 16 节车厢构成。其中头车的结构相对复杂,主要由车钩、牵引梁、排障

* **收稿日期**: 2013-07-23; **修回日期**: 2013-11-06
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(11372307);中国科学院创新工程方向项目(KJCX2-EW-L03)
**第一作者**: 李松晏(1984— ),男,博士研究生; **通讯作者**: 郑志军,zjzheng@ustc.edu.cn。

器、头部蒙皮、车身三层板结构、加强筋、司机室等部分组成。本文几何模型中主要考虑了头车的整体结构，确保与实际车体保持一致，尤其是参与冲击碰撞的部分。对于一些经过分析对计算影响不大的部分，进行了合理的简化，如底架、门把手、焊接件等。图 1 为完整的动车组头车的有限元模型，采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行模拟。经过质量校核，头车车体的有限元模型总质量为 23.57 t，除去转向架、车钩、排障器的质量，其余部分 6.68 t，比实际车体的质量 7.728 t 少了 13.56%，这是因为忽略了吊饰等一些次要的结构。

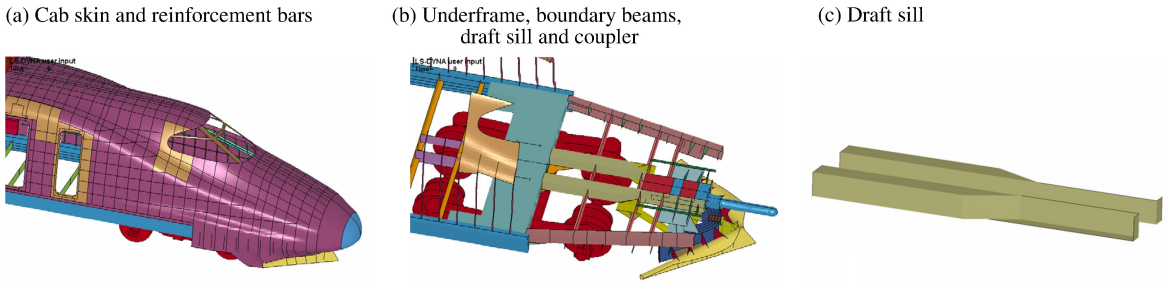


图 1 某型动车组头车的有限元模型

Fig. 1 The finite element model of a head car of a high-speed train

### 1.2　材料和单元类型

动车组车体的主要结构材料为铝合金板材和型材，如头车的流线型蒙皮、车身的三层板铝制型材，以及各种横梁、纵梁、司机室结构等，几何尺寸（如厚度）随具体位置而不同。在转向架以及局部加强结构（如司机室门框）采用钢结构。所用的主要材料及其力学性能见表 1，计算中各材料采用双线性各向同性硬化模型。车体铝制材料大部分结构采用 SHELL 163 单元，转向架等实体材料采用 SOLID 164 单元。考虑到对称性，计算中采用一半的模型，其单元数量为约 26 万个，分为 45 个部分，并采用自动单面接触模式。

**表 1 材料参数**

**Table 1 Material properties**

| 材料 | $E$/GPa | $\nu$ | $\sigma_y$/MPa | $G$/MPa | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Q235 钢 | 210 | 0.3 | 235 | 2 100 | 7 800 |
| A6N01 铝合金 | 70 | 0.3 | 250 | 573 | 2 700 |
| A5083 铝合金 | 62 | 0.3 | 150 | 1 610 | 2 700 |
| A7N01 铝合金 | 66 | 0.3 | 290 | 1 232 | 2 700 |

### 1.3　边界条件和计算工况

头车模型关于 $YZ$ 平面对称，在对称面上约束 $X$ 方向的平动和 $Y$、$Z$ 方向的转动，实现对称边界条件。数值模型为车头以 $v$=10，20 m/s 初始速度撞击刚性墙（相当于列车以 $2v$，即 72 或 144 km/h 的运行速度追尾一列相同的静止列车）。该型列车的日常行驶速度在 200 km/h 以下，在遇到危险时，司机通常会采取紧急刹车减速，因此很少情况会全速撞击。文中所考虑的撞击速度可以满足该型列车的撞击安全性能评估的需要。车钩在较大速度的碰撞中在较短的时间内会脱落，对耐撞性分析影响很小，因此计算中忽略了车钩在撞击事件中的作用。计算中，事件时长为 300 ms。

## 2　头车的耐撞性分析

### 2.1　头车的整体和局部变形

由图 2（未显示蒙皮，下同）可见，撞击变形主要集中在司机室前端的牵引梁区域和排障器部分。撞击速度为 10 m/s 时司机室前部变形相对较小。撞击速度 20 m/s 时，破坏明显更加严重，

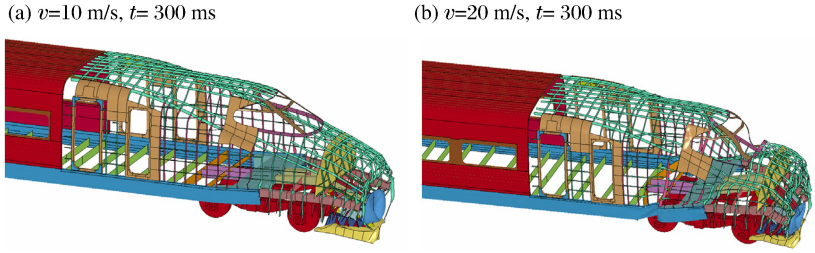


图 2 头车撞击刚性墙时的变形情况

Fig. 2 Structural deformation of the head car crashing a rigid wall

边梁和加强筋部分也发生了塑性形变，司机室整体破坏比较严重，排障器和前端的底架均发生翘曲导致地板变形严重。司机室的严重变形不利于人员的安全，底架和梁的弯曲变形也不利于能量的吸收。

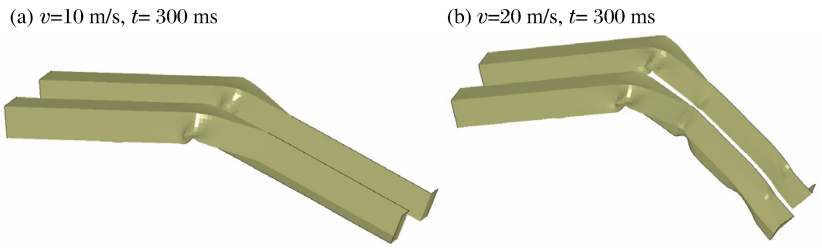


图 3 撞击刚性墙时牵引梁的变形情况

Fig. 3 Structural deformation of the draft sill crashing a rigid wall

由图 3 可见，牵引梁的变形模式均是以整体屈曲为主，即在牵引梁的中部发生弯曲，随着碰撞的进行，弯曲愈加明显。与撞击速度 10 m/s 的情况相比，在 20 m/s 的速度撞击下，牵引梁整体弯曲更加严重，还伴随着前端出现一些局部的塑性变形。整体屈曲不利于缓冲撞击力和吸收能量。

### 2.2 刚性墙反力和牵引梁的吸能量

刚性墙反力的峰值出现过早和过大，均不利于乘员的安全。图 4 给出头车以 10 和 20 m/s 的速度撞击刚性墙时，刚性墙反力随时间变化曲线。10 m/s 时，刚性墙的最大反力为约 1 MN，此时对应头车的牵引梁结构与刚性墙开始发生碰撞。20 m/s 时，并可以看出明显的双峰结构：第 1 个峰值出现在 50 ms左右，峰值为约 1.7 MN，对应于头部蒙皮与刚性墙的撞击过程；第 2 个峰值出现在 100 ms 左右，峰值为约 3.5 MN，对应于牵引梁主体结构与刚性墙的撞击过程。

牵引梁是主要承载结构，在撞击过程中发生屈曲时，其吸能量的多少将会直接影响头车的变形破坏情况和乘员的安全。图 5 为牵引梁的吸能量随时间变化曲线。10 m/s 时，吸能过程比较平缓，最大吸能量不到 80 kJ；而 20 m/s 时，撞击更剧烈，牵引梁塑性变形更明显，最大吸能量为约 170 kJ，是前者的两倍多。

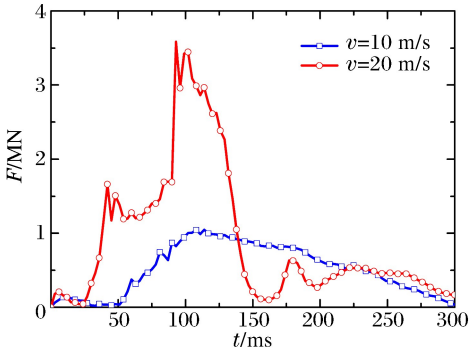


图 4 刚性墙反力

Fig. 4 Force on the rigid wall

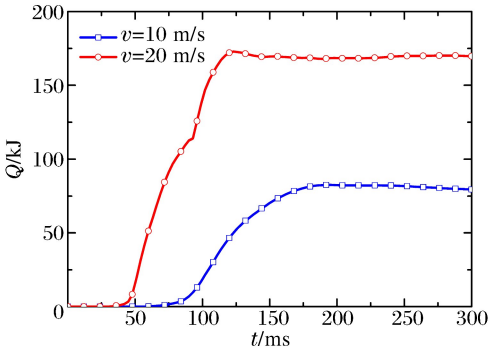


图 5 牵引梁的吸能量

Fig. 5 Energy absorbed by the draft sill

## 3 吸能结构的设计和性能分析

### 3.1 提高耐撞性的方法

提高车体的耐撞性是指，在撞击发生过程中，通过合适的吸能结构尽可能多地吸收撞击过程所产生的能量，而且在吸能的同时又不能产生过高的撞击反力。对动车组来讲，管状的吸能结构在安装和使用方面都比较合适。

从增加吸能量角度考虑，可以采取两种方式改进。一是对原有的主要受力部件（如牵引梁）进行改造，使其在撞击时可以发生渐进屈曲，通过稳定、重复的变形方式（塑性耗散）吸收更多能量。二是额外增加吸能元件，新增加的元件在列车正常运行时不承载，在撞击时发生变形以吸收能量。但需确保撞击力的峰值不能过大。

在撞击力受限制的情况下，只有加大吸能元件的行程，才能提高车辆的耐撞性。在高速动车组原有结构下，增加吸能部件行程，意味着要加长司机室前端的车鼻部分的长度，这将牵扯到头部结构和内部总体结构的布局。本文设计只限于对现有头车设计的局部改进，因此只考虑对牵引梁的改进和在适当位置增加缓冲管。

### 3.2　新吸能结构的设计方案

为提高牵引梁的吸能量，改进方案主要分为两步。第 1 步，在满足强度校核的前提下，将原有的牵引梁主体部分由方管结构改为带圆角的方管，并减少壁厚、降低其压垮载荷，使其在撞击过程中更好地吸收能量。第 2 步，在牵引梁前端的空余位置增加与牵引梁共轴的带圆角的缓冲管，当发生碰撞时，在车钩脱离后，缓冲管首先起到吸能作用，在排障器严重破坏前，压迫牵引梁发生压缩变形，这样做可以保证其按照预想的变形模式发挥作用。同时也考虑了在缓冲管中添加泡沫铝，以达到更好的缓冲和吸能效果。改进后牵引梁和吸能管的位置见图 6。改进后，牵引梁的外部尺寸与原设计相同，为 200 mm。数值模拟部分的改进方案详情见表 2。表中，$c$ 为方管厚度，$r$ 为圆角半径，$d$ 为缓冲管厚度。

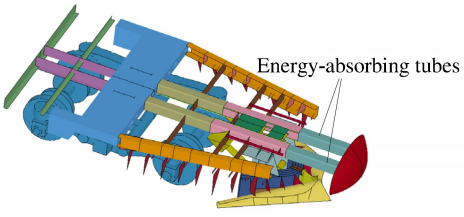


图 6 改进设计后的牵引梁和吸能管

Fig. 6 The draft sill and the energy-absorbing tubes in the improvement schemes

表 2 改进方案

Table 2 Improvement schemes

| 方案 | $c$/mm | $r$/mm | $d$/mm | 填充泡沫铝 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 20 | 5 | 否 |
| 2 | 7 | 20 | 5 | 是 |
| 3 | 8 | 35 | 5 | 否 |
| 4 | 8 | 35 | 5 | 是 |

### 3.3　改进方案的吸能性能

通过数值模拟，比较了 4 种牵引梁改进方案的吸能性能（见图 7），并分析了不同改进方案下，牵引梁的主要变形模式和吸能规律。结果表明：

（1）4 种改进方案在吸能量的提升方面，比原设计均有明显的提高。原设计在发生撞击时，主要吸能结构牵引梁发生整体屈曲，不利于持续、稳定地吸收能量，改进后的牵引梁在撞击时吸能管首先发生压缩，然后牵引梁主体由于受到压缩载荷作用也发生部分压缩，继而弯曲失稳。

（2）在壁厚和圆角半径相同的条件下，填充泡沫铝的结构在吸能方面要优于空管，主要原因是泡沫铝本身以及通过与管壁相互作用都会吸收部分能量[12]。同时，吸能管由于有填充物，相比于空管较难发生弯曲失稳，因此更容易沿着轴向逐级压缩。

（3）方案 4 的设计在吸能性方面表现最优。10 m/s 时，牵引梁加上吸能管的吸能量相比原设计提高了 322%，20 m/s 时，吸能量相比原来提高了 288%。

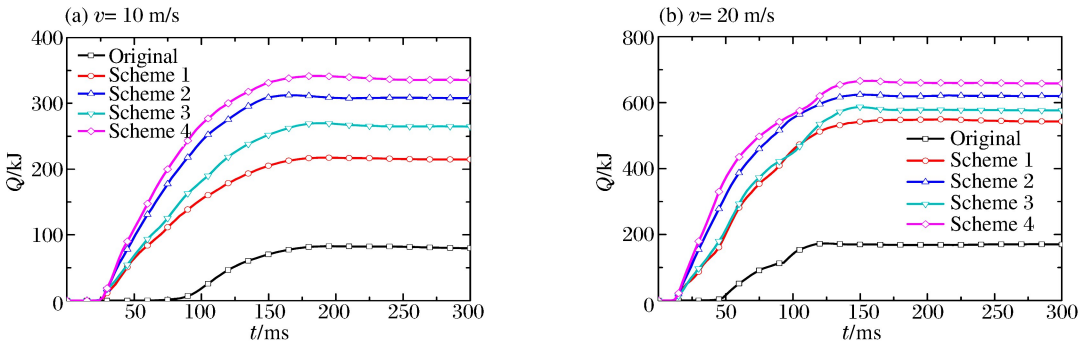


图 7 不同方案的吸能量

Fig. 7 Energy absorbed in the different schemes

### 3.4 改进方案的刚性墙反力

理想的缓冲吸能装置应该是,在吸收撞击能量的同时,又可以适当降低撞击力的峰值,并延缓峰值出现的时间,从而最大程度地保护乘员的安全。图 8 给出了刚性墙反力,通过比较可见:

(1)10 m/s 时,刚性墙反力的峰值和原设计相比变化不明显;20 m/s 时,反力峰值的降低效果比较明显。

(2)10 m/s 时,刚性墙反力在 30 ms 左右产生一个原设计不会产生的峰值,原因是增加吸能管后,吸能管与刚性墙发生碰撞,但是产生的新峰值大小没有超过原设计中的最大峰值。20 m/s 时,没有产生新的峰值,因为速度较高时,缓冲管和排障器一起与刚性墙发生撞击并立即发生轴向屈曲;而方案 3、4 的最大峰值出现的时间由原来的 100 ms 左右推迟到 140 ms 左右。

(3)方案 4 的改进效果最好:10 m/s 时,反力峰值降低了 12%;20 m/s 时,反力峰值降低了 36%。

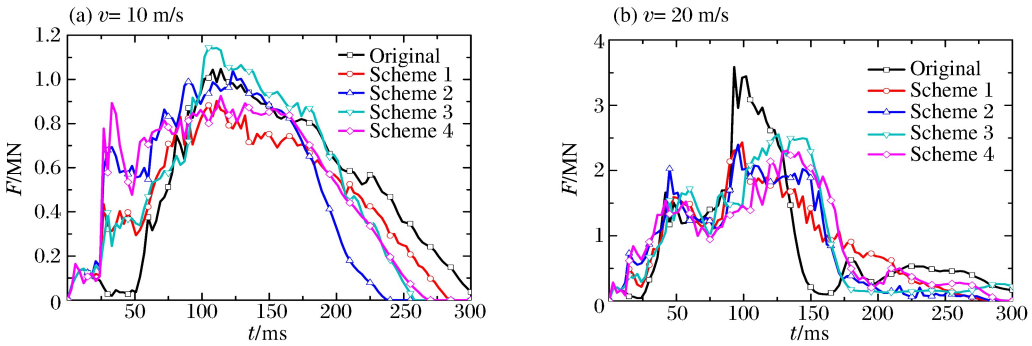


图 8 不同方案的刚性墙反力

Fig. 8 The force on the rigid wall in the different schemes

### 3.5 牵引梁的变形模式和司机室破坏情况

通过对原头车的耐撞性分析和对 4 种改进方案的比较发现,方案 4 的牵引梁改进和增加的吸能管结构不仅在吸收撞击能量方面表现出色,而且在延迟和降低刚性墙反力峰值方面效果良好,其主要原因是吸能模式的改变。原设计的牵引梁在碰撞发生时,由于壁厚较厚,容易直接发生整体屈曲,不利于缓冲和能量吸收。改进后的牵引梁在同样满足强度校核要求的前提下,厚度方面有所降低,并添加了圆角,使得牵引梁更容易发生轴向屈曲,和原设计相比,4 个圆角也避免了牵引梁和吸能管在屈曲过程中因过大的应力集中造成撕裂。改进后的牵引梁,前端的吸能管在撞击发生时最先发生屈曲以吸收能量,使得司机室的破坏程度减小,更利于乘员的逃生。图 9 为在两种速度撞击下方案 4 的主要吸能结构牵引梁和吸能管的变形情况。图 10 是在两种速度撞击下方案 4 的头车司机室整体在撞击后的变形图。通过比较可见:在两种速度撞击下,改进方案 4 的吸能管均发生了可观的压缩变形,吸收了较多能量,尤其是 20 m/s 时,变形更为充分。方案 4 的司机室隔板后端的结构相对于原设计,破坏降低,尤其是边梁和枕梁在改进后,破坏明显减轻。牵引梁的弯曲主要是由排障器在撞击时传递来的弯矩造成的,目前的改进设计仍无法避免这一问题。进一步提高头车的耐撞性,需要改变排障器与主梁的连接方式。

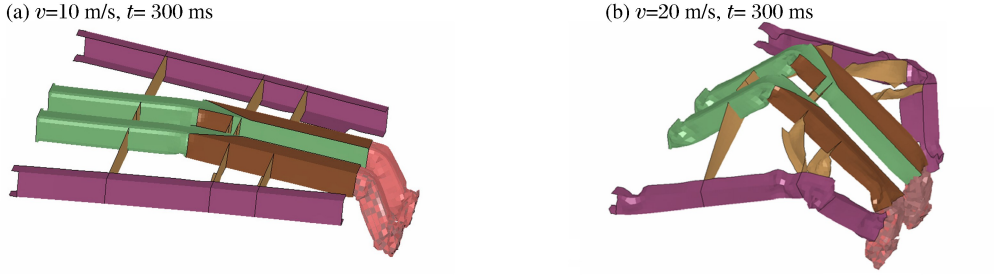


图 9 方案 4 的牵引梁和吸能管的变形情况

Fig. 9 The deformation of the draft sill and the energy absorber in scheme 4

(a) $v$=10 m/s, $t$=300 ms　　(b) $v$=20 m/s, $t$=300 ms

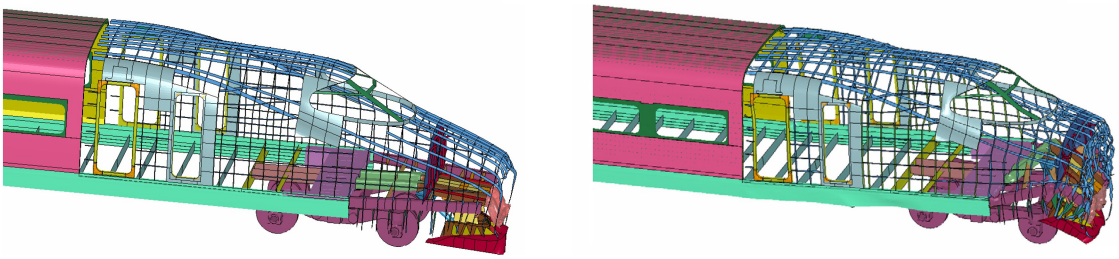

图 10 方案 4 的司机室变形情况

Fig. 10 The deformation of the cab in scheme 4

## 4 结　论

利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟了高速列车头车以一定速度撞击刚性墙的过程。通过对原有车辆的耐撞性分析，发现原有头车结构在撞击发生时，没有专门的吸能机构，主要撞击部件牵引梁以弯曲变形为主，不利于能量的吸收和冲击力的缓冲。针对只能对原有头车设计作局部改进以及车体不加长等实际情况，提出了 4 种改进方案，将牵引梁的主体部分由原来的方管结构改为带圆角的方管，并在牵引梁的前端添加同样结构的吸能管使其与牵引梁共轴。通过数值模拟，得到了 4 种方案两种撞击速度下牵引梁吸能曲线和刚性墙反力曲线，并比较了 4 种改进方案的吸能性能和 4 种方案下主要吸能结构的变形模式和吸能规律。结果发现，方案 4 的改进效果最好：10 m/s 时，牵引梁和吸能管的吸能量相比原设计提高了 322%，反力峰值降低了 12%；20 m/s 时，吸能量相比原来提高了 288%，反力峰值降低了 36%。

## 参考文献：


[1] 张振淼，逄增帧. 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.
Zhang Zhen-miao，Feng Zeng-zhen. Principles and structure design of collision energy absorption equipment for rail cars (to be continued)[J]. Foreign Rolling Stock，2001，38(3)：13-19.

[2] Lu G. Energy absorption requirement for crashworthy vechicles[J]. Journal of Rail and Rapid Transit，2002，216(F3)：31-39.

[3] Tyrell D，Severson K，Marquis B. Crashworthiness of passenger trains：Safety of high-speed ground transportation systems[R]. Washington DC：US Department of Transportation，1998.

[4] 烟弘敏，刘克鲜. 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)：22-31.
Tian Hong-min，Liu Ke-xian. Research on improvement of rolling stock safety with the collision simulation technology[J]. Foreign Rolling Stock，2004，41(6)：22-31.

[5] 陆冠东. 铁道车辆的耐碰撞性设计[J]. 铁道车辆，2007，45(10)：1-5.
Lu Guan-dong. The bumping resistance design for rolling stock[J]. Rolling Stock，2007，45(10)：1-5.

[6] 杨俊杰，王立杰，李幸人. 机车车体碰撞吸能装置结构设计与仿真分析[J]. 铁道机车车辆，2011，31(1)：72-75.
Yang Jun-jie，Wang Li-jie，Li Xing-ren. Development and simulation of crashworthniess device for locomotive body [J]. Railway Locomotive & Car，2011，31(1)：72-75.

[7] 余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J]. 力学进展，1986，16(1)：28-38.
Yu Tong-xi. Impact energy absorbing devices based upon the plastic deformation of metallic element[J]. Advances in Mechanics，1986，16(1)：28-38.

[8] 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.
Tian Hong-qi. Crashworthy energy absorbing car-body design method for passenger train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2001，1(1)：110-114.

[9] 蒋家桥，黄西成，胡时胜. 泡沫金属缓冲器的设计新方法及应用[J]. 爆炸与冲击，2004，24(6)：519-523.
Jiang Jia-qiao，Huang Xi-cheng，Hu Shi-sheng. Application and design of the foam matalic buffer[J]. Explosion

and Shock Waves, 2004,24(6):519-523.

[10] 丁晨,赵洪伦.高速列车头车吸能排障器设计与仿真研究[J].铁道车辆,2011,49(1):1-4.
Ding Chen, Zhao Hong-lun. Design and simulation research on energy absorption fender on the head car of a high speed train[J]. Rolling Stock, 2011,49(1):1-4.

[11] 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):7-11.
Lei Cheng, Xiao Shou-ne, Luo Shi-hui. 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):7-11.

[12] 宋宏伟,虞钢,范子杰,等.多孔材料填充薄壁结构吸能的相互作用效应[J].力学学报,2005,37(6):697-703.
Song Hong-wei, Yu Gang, Fan Zi-jie, et al. Interaction effect in energy absorption of porous material filled thin-walled structure[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005,37(6):697-703.

[13] 王蕊,秦庆华,程国强,等.壁厚对金属圆管撕裂卷曲耗能影响的研究[J].力学学报,2005,37(2):244-248.
Wang Rui, Qin Qing-hua, Cheng Guo-qiang, et al. Research for the influence of thickness on the energy distribution of splitting and curling circular steel tube[J]. Acta Mechanica Sinica, 2005,37(2):244-248.

[14] EN 15227:2008+A1:2010, Railway applications: Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies[S]. European Committee for Standardization, 2010.

# Energy-absorbing structure design and crashworthiness analysis of high-speed trains

Li Song-yan, Zheng Zhi-jun, Yu Ji-lin

(*CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *Anhui, China*)

**Abstract**: A finite element model was established for the head car of a high-speed train and its crashing progresses with a rigid wall at different speeds, simulated by using LS-DYNA software. It is found that when a crash occurs the draft sill deforms mainly in the Euler bending mode, which is harmful to buffering and energy absorption. Based on the understanding from the crashworthiness analysis of the original design, we propose to redesign the structure of the draft sill through adding square tubes with round corners as energy-absorbing tubes, which are either filled with aluminum foam or not. Two different sizes are chosen, thus four schemes are formed. The results of numerical simulation show that, compared to the original design, the energy absorption capacity in all of the new schemes has greatly improved, and the peak force on the rigid wall decreases in a certain extend. The scheme with the tubes having large radius of round corner, thick thickness and aluminum foam filler has the most obvious improvement.

**Key words**: solid mechanics; crashworthiness; finite element method; energy-absorbing structure; high-speed train

(责任编辑 丁 峰)