

管材成形

## 某轻卡后下防护热辊弯轻量化方案设计与开发

陈仙凤<sup>1,2</sup>, 石磊<sup>1,2</sup>, 王振岩<sup>3</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司 中央研究院, 上海 201900; 2. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室 (宝钢), 上海 201900;  
3. 安徽江淮汽车集团股份有限公司 轻型商用车研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 设计了某轻卡后下防护热辊弯全管状结构方案, 实现轻量化 30.2%。根据静态加载试验要求, 建立仿真评估模型, 并试验验证仿真模型的准确性。基于试验结果建立仿真模型, 并比较了原设计方案与热辊弯优化设计方案的各个使用性能。采用热辊弯工艺进行横杆和各支架管的样件试制, 获得抗拉强度大于或等于 1500 MPa 的管件; 在热辊弯加热弯曲状态下实现支架管弯曲半径为  $2d$  的小半径弯曲且不起皱, 并通过两件拼接加工提升了材料利用率及加工效率。研究结果表明: 热辊弯管状结构适用于后下防护, 其结构简单、通用性强、制造流程短, 具有材料与工艺综合成本低的技术优势。

**关键词:** 后下防护装置; 轻量化; 热辊弯; 管状结构; 材料利用率

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.018

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 04-0134-07

## Design and development on a lightweight scheme of hot roll bending for rear underrun protection of a light truck

Chen Xianfeng<sup>1,2</sup>, Shi Lei<sup>1,2</sup>, Wang Zhenyan<sup>3</sup>

(1. Research Institute (R&D Center), Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

2. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (BAOSTEEL), Shanghai 201900, China;

3. Institute of Light Commercial Vehicles, Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Hefei 230601, China)

**Abstract:** The hot roll bending full tubular structure scheme of rear underrun protection for a light truck was designed, and a light weight of 30.2% was achieved. According to the requirements of static loading test, the simulation evaluation model was established, and the accuracy of the simulation model was verified by the test. The simulation model was established based on the test results, the individual performances of the original design scheme and the hot roll bending optimization design scheme were compared. Then, the cross-bar and each bracket tube were trial-produced by the hot roll bending process to obtain the tubes with tensile strength greater than or equal to 1500 MPa, and in the hot bending state of hot roll bending, the bracket tube with the bending radius of  $2d$  was realized without wrinkling. Furthermore, the material utilization rate and the processing efficiency were improved by splicing and processing two pieces. The results show that the hotroll bending tubular structure is suitable for rear underrun protection, which has simple structure, strong universality and short manufacturing process, and can realize the technical advantages of low comprehensive cost for materials and processes.

**Key words:** rear underrun protection; lightweight; hot roll bending; tubular structure; material utilization rate

在汽车碰撞事故中, 发生几率高且属于恶性事故的是乘用车与商用车的追尾碰撞 (图 1), 其最易造成人员伤亡。商用车后下防护装置 (图 2) 在追尾碰撞中可以起到很好的缓冲吸能作用, 并且可以有效地阻挡乘用车钻入商用车尾部后下方, 保护追尾乘用车车内的乘员<sup>[1]</sup>。对比国内外制定了相应的标准, 中国借鉴欧洲 ECE 法规制定了 GB 11567—2017<sup>[2]</sup>, 对后下防护装置的技术要求和试验条件均



图 1 乘用车追尾碰撞商用车

Fig. 1 Rear end collision of passenger car with commercial vehicle

作了具体明确的规定, 以期提高汽车被动安全性和碰撞相容性, 预防和降低事故的伤害程度。

**收稿日期:** 2021-04-12; **修订日期:** 2021-07-16

**作者简介:** 陈仙凤 (1976-), 女, 博士, 高级工程师

**E-mail:** chenxianfeng@baosteel.com



图2 后下防护装置

Fig. 2 Rear underrun protection device

目前,我国商用车后下防护装置主要存在以下问题:(1)标准规定范围内的车辆中,大部分车辆未安装后下防护装置;(2)安装的后下防护装置不满足标准要求,不能有效地防止乘用车钻入商用车后下方,对乘用车内乘员不能起到有效的保护作用;(3)后下防护装置用材还比较低端,主流采用Q235/Q345钢材,少数采用B510L~B700L钢材,主要还是通过设计各种繁杂的支撑板结构,体积大

且质量重。自2016年发布治超新规,轻量化成为商用车的发展趋势,而对于后下防护装置如何在满足法规要求的前提下又能实现轻量化成为难题。

为解决这个难题,商用车后下防护装置急需引入新的结构优化设计、先进材料及先进制造工艺<sup>[3]</sup>。本文引入宝山钢铁股份有限公司新研发的热辊弯成形工艺,将后下防护装置的主要零件横杆和支架均设计为热辊弯管状结构,成形后材料的抗拉强度大于或等于1500 MPa,有效地提高了后下防护装置的刚性及抵抗变形的能力,满足标准要求,并实现了轻量化。经过实际开发样件,验证该结构具有结构简单、通用性强、制造流程短等技术优势。

## 1 热辊弯成形工艺特点

针对超高强钢封闭截面管件,常规的冷弯曲成形的工艺窗口小,常出现内壁起皱、外壁开裂及回弹难控制等工艺缺陷<sup>[4-6]</sup>(图3),急需开发适合于超高强钢的新型弯曲成形工艺。

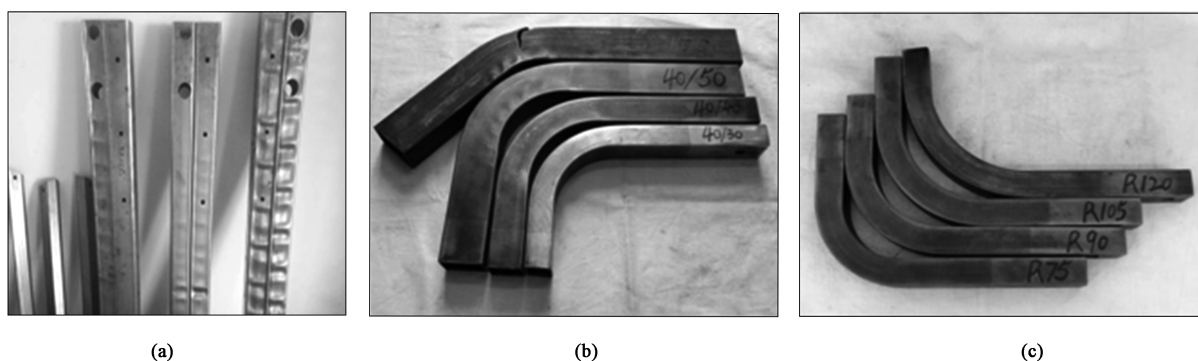


图3 冷弯曲成形工艺缺陷

(a) 起皱 (b) 开裂 (c) 回弹

Fig. 3 Defects in cold bending process

(a) Wrinkle (b) Crack (c) Springback

宝山钢铁股份有限公司应客户及市场需求,开发了热辊弯成形工艺。该工艺适合用于采用热成形钢材制造的各种截面管件的弯曲成形,是将电磁感应加热技术与无模弯曲技术相结合,形成用于生产超高强变曲率复杂截面管件的一种成形工艺<sup>[7-8]</sup>,其工艺原理见图4。具有3个典型特点:(1)管件在加热奥氏体化下弯曲,提升了管件的弯曲成形性能;(2)在线淬火强化,获得抗拉强度大于或等于1500 MPa、屈服强度大于或等于1000 MPa的性能,提升了成形后零件的强度;(3)在线弯曲机构,可实现变曲率自由弯曲。热辊弯设备的核心有进给装置、夹持装置、感应加热装置、在线水冷淬火装置

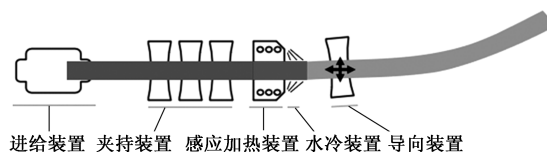


图4 热辊弯工艺原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of principle for hot roll bending process

及弯曲导向装置,分别完成推进、夹持、加热淬火以及推弯等重要功能。

本文研究中将后下防护装置的主要零件横杆和支架均设计为热辊弯管件,材料为热成形用钢B1500HS,材料价格相对其他同级别强度的高强钢

较低, 室温状态下的主要金相组织为铁素体和碳化物颗粒, 热辊弯成形前的抗拉强度大约为 550 MPa, 通过热辊弯成形工艺实现淬火强化后的主要金相组织为马氏体, 抗拉强度大于或等于 1500 MPa。

## 2 后下防护装置结构优化设计

本文涉及的后下防护装置的原设计方案如图 5 所示, 相应的部件、材料、厚度及质量见表 1, 小总成总质量为 15.09 kg。

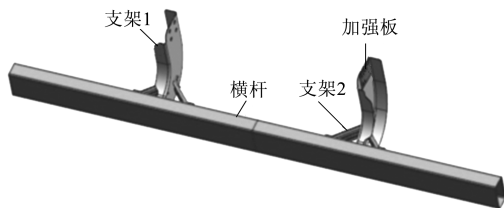


图 5 后下防护装置原设计方案

Fig. 5 Original design scheme of rear underrun protection device

表 1 原后下防护装置的部件及参数

Table 1 Parts and parameters of original rear underrun protection device

部件名称	数量/个	材料牌号	厚度/mm	质量/kg
横杆	1	Q235 钢	2.0	10.21
支架 1	2	B510L 钢	3.0	3.54
加强板	2	B510L 钢	2.0	0.15
支架 2	4	Q235 钢	3.0	1.19

根据标准 GB 11567—2017<sup>[2]</sup>的技术要求, 后下防护装置的结构设计应考虑满足截面尺寸的问题、离地高度的问题、结构刚度的问题、总体布置的问题, 还要考虑多系列车型的通用性问题等, 新设计方案考虑如下。

(1) 横杆截面尺寸设计。本后下防护装置所属车型为 N2 类车辆, 要求截面高度不小于 100 mm, 原设计方案的截面尺寸 (高度×宽度) 为 120 mm×60 mm, 优化设计方案的截面尺寸为 100 mm×60 mm, 并且对厚度进行减薄。

(2) 材料的选择。优化设计采用热辊弯管状结构, 采用热成形钢材, 牌号为 B1500HS。

(3) 结构优化设计。安装支架区域由于包络空间受限, 考虑到弯曲成形性, 采用双弯管结构设计, 可增加支架的结构刚性及解决小半径弯曲成形问题<sup>[4]</sup>。

采用三维造型软件 UG 设计的优化结构如图 6 所示, 相应的部件、材料、厚度及质量见表 2, 小总成总质量为 10.53 kg。相对原设计方案, 减重 4.56 kg, 减重比例达 30.2%。

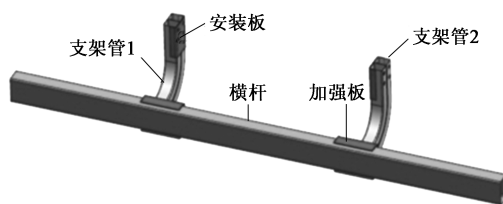


图 6 后下防护装置的优化设计方案

Fig. 6 Optimization design scheme of rear underrun protection device

表 2 优化后后下防护装置的部件及参数

Table 2 Parts and parameters of rear underrun device protection after optimization

部件名称	数量/个	材料牌号	厚度/mm	质量/kg
横杆	1	B1500HS 钢	1.3	5.91
支架管 1	2	B1500HS 钢	1.6	1.46
支架管 2	2	B1500HS 钢	1.6	1.73
安装板	2	B510L 钢	2.0	0.50
加强板	2	B510L 钢	2.0	0.93

## 3 后下防护试验与仿真评估

按照 GB 11567—2017<sup>[2]</sup>的要求, 对后下防护装置进行静态加载试验及仿真评估。本文研究的后下防护装置配载车型申报公告为 8.25 t, 静态加载试验分为两点加载和三点加载, 加载头尺寸为 250 mm×200 mm。分别设置加载点 P1、P2、P3, 各加载点位置见图 7。加载力要求如下:

(1) 两点加载时, 每个加载点的加载力为 100 kN 或相当于车辆最大设计总质量的 50% 的水平载荷 (取两者较小值), 本后下防护装置的加载载荷为 41.250 kN。

(2) 三点加载时, 每个加载点的加载力为 50 kN 或相当于车辆最大设计总质量的 25% 的水平载荷 (取两者较小值), 本后下防护装置的加载载荷为 20.625 kN。

原设计方案的加载试验见图 8。两点加载试验后, 后下防护装置未发生明显变形; 三点加载试验后, 后下防护装置变形很小。整个后防护栏装置未发生开裂现象, 经试验验证满足标准要求。

结合后下防护装置的 CAD 数模与截取车架部分后段, 在有限元软件 HYPERMESH14.0 中建立有限元仿真模型, 建立的有限元模型如图 9 所示。后下防护装置有限元仿真模型主要包括车架左/右边梁、后下防护横杆、车架横梁、后下防护安装支架、后下防护加强支架、后下防护支架加强板和加载压头等。



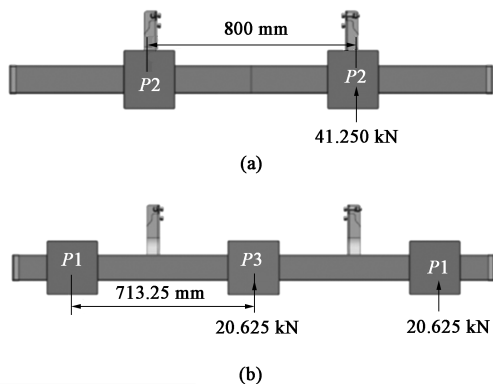


图 7 后下防护装置静态加载试验的加载点位置  
(a) 两点加载的加载点位置 (b) 三点加载的加载点位置  
Fig. 7 Loading point positions of rear underrun protection device in static loading test

- (a) Loading point positions of two-point loading  
(b) Loading point positions of three-point loading

模型中的薄板采用壳单元，考虑求解精度和兼顾求解效率，采用 5 mm 网格进行划分，以四边形为主、三角形为辅。关于连接的处理：(1) 焊缝网格采用壳单元中的四边形，厚度等于连接的两个部件厚度的平均值；(2) 螺栓连接采用 RBE2 单元<sup>[9-11]</sup>，如图 10 所示。

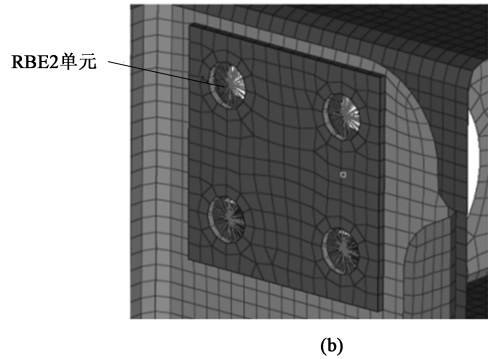
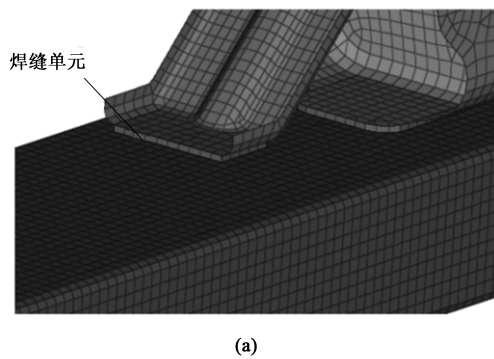


图 10 CAE 建模的关键连接  
(a) 焊缝连接 (b) 螺栓连接  
Fig. 10 Key connection of CAE model  
(a) Connection through seam welding (b) Connection through bolt

采用 SPC 定义约束：(1) 在车架左/右边梁的端面处节点约束 6 个自由度；(2) 加载压头建模时只截取与横梁接触面部分，截取端部处约束 3 个自由度，可实现加载压头随横杆的变形而转动。

采用 LS-DYNA 进行仿真计算。根据试验结果及数据验证仿真模型的准确性，再开展后续的仿真计算。

有限元仿真加载力施加方式为：0.3 s 内施加作用力，并持续 0.2 s。加载力-时间关系曲线如图 11 所示。

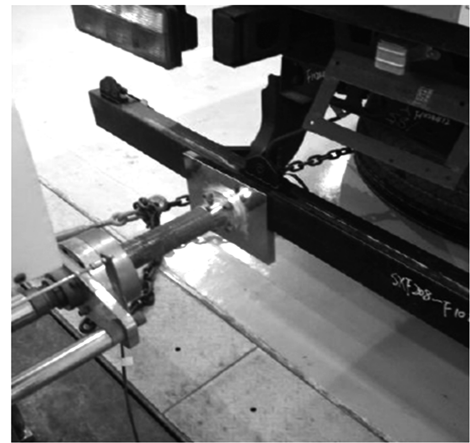


图 8 后下防护装置两点加载试验  
Fig. 8 Two-point loading test of rear underrun protection device

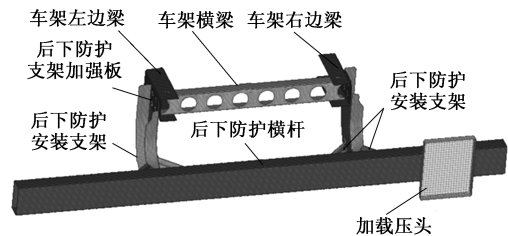


图 9 后下防护装置有限元模型  
Fig. 9 FE model of rear underrun protection device

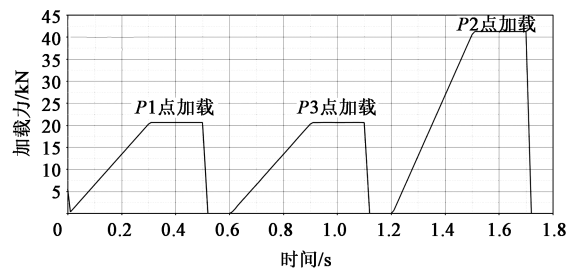


图 11 仿真加载曲线  
Fig. 11 Loading curve for simulation

采用 HYPERVIEW 进行结果后处理。仿真评估原设计方案与热辊弯优化设计方案的静态加载

性能,得到的变形云图如图 12 所示,相关数据见表 3。

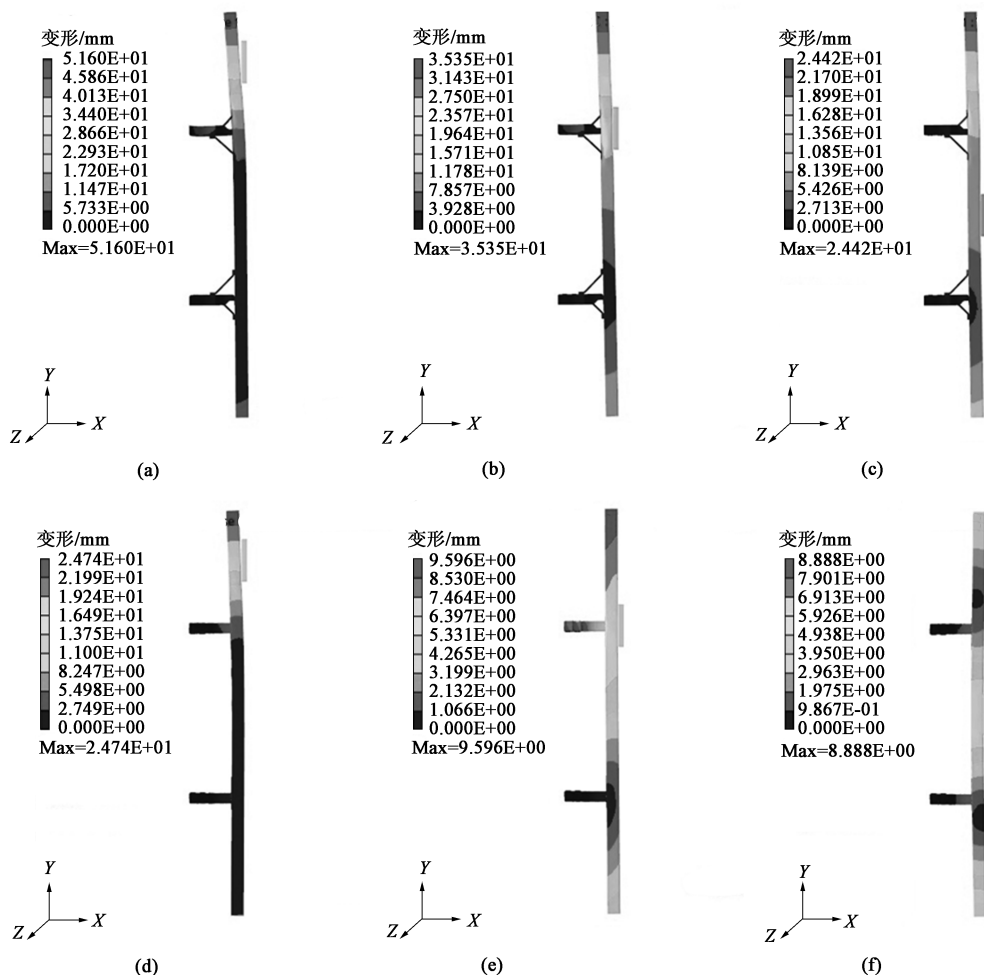


图 12 静态加载变形云图

(a) 原设计方案, 加载点 P1 (b) 原设计方案, 加载点 P2 (c) 原设计方案, 加载点 P3 (d) 热辊弯设计方案, 加载点 P1  
(e) 热辊弯设计方案, 加载点 P2 (f) 热辊弯设计方案, 加载点 P3

Fig. 12 Deformation nephograms of static loading

(a) Original design scheme, loading point P1 (b) Original design scheme, loading point P2  
(c) Original design scheme, loading point P3 (d) Hot roll bending design scheme, loading point P1  
(e) Hot roll bending design scheme, loading point P2 (f) Hot roll bending design scheme, loading point P3

表 3 后下防护装置的性能参数

Table 3 Property parameters of rear underrun protection device

方案	质量/kg	加载变形量/mm		
		P1	P2	P3
原设计方案	15.09	51.6	35.4	24.4
热辊弯方案	10.53	24.7	9.60	8.89

考虑后下防护装置曾出现过共振开裂的现象, 故需评估模态以防止共振。第 1 阶模态频率需避开车辆行驶时路面的载荷频率 (20~25 Hz 左右), 以频率相差越大越好, 现仿真分析热辊弯方案的第 1

阶模态频率与路面载荷频率的差值均大于原设计方案, 防共振性能更好。第 1 阶模态在自由和约束状态的变形云图及频率见图 13 及表 4。

## 4 热辊弯方案样件开发

采用热辊弯工艺进行横杆及支架管的样件开发。支架管的弯曲半径为  $2d$ , 采用常规冷弯曲工艺成形会存在起皱缺陷<sup>[12]</sup>, 热辊弯工艺可解决这个问题。考虑支架管的材料利用率, 进行两件拼接, 热辊弯后再进行激光切割, 可提升材料利用率约 10%, 效率提升约 20%, 拼接方式及切割后样件如图 14 所示。

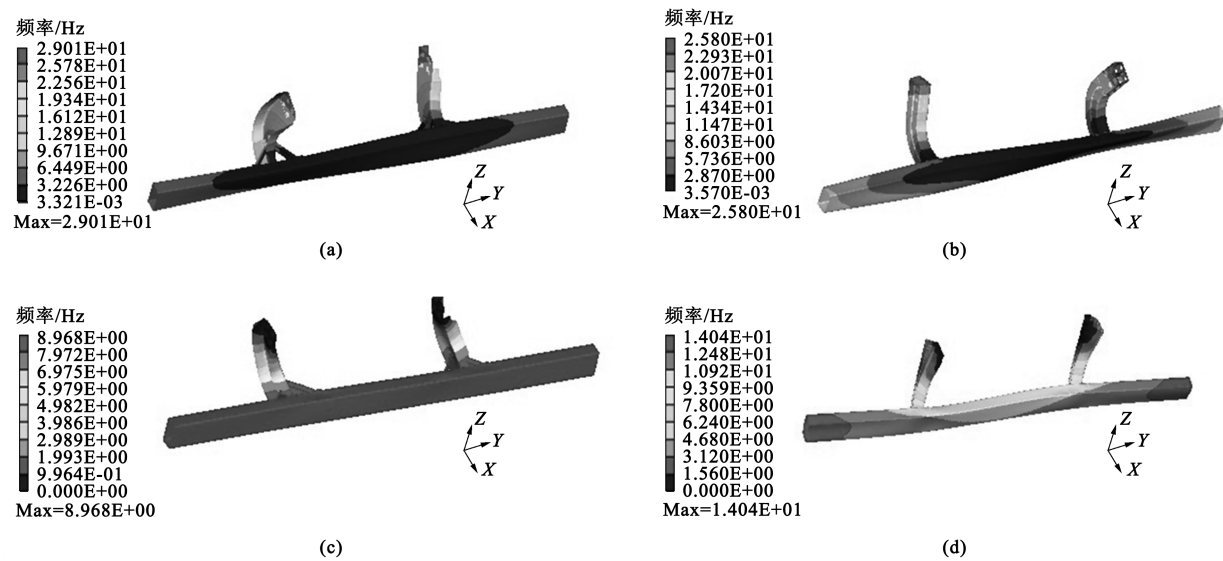


图 13 模态云图

(a) 原设计方案，自由状态 (b) 热辊弯设计方案，自由状态 (c) 原设计方案，约束状态 (d) 热辊弯设计方案，约束状态

Fig. 13 Model nephograms

(a) Original design scheme, free state (b) Hot roll bending design scheme, free state (c) Original design scheme, constraint state (d) Hot roll bending design scheme, constraint state

表 4 后下防护装置的模态频率 (Hz)

Table 4 Modal frequencies of rear underrun protection device (Hz)

方案	自由状态	约束状态
原设计方案	69.2	46.3
热辊弯方案	72.3	95.7

小总成采用二保焊，首先分别进行支架管和横杆小分总成的焊接，然后将两个小分总成焊接在一起，试制的样件见图 15。整个成形工艺简单，工艺流程短，能实现材料与工艺综合成本低的技术优势；且通用性好，螺栓安装简便，适应于推广至轻卡统一平台后下防护的标准配置。

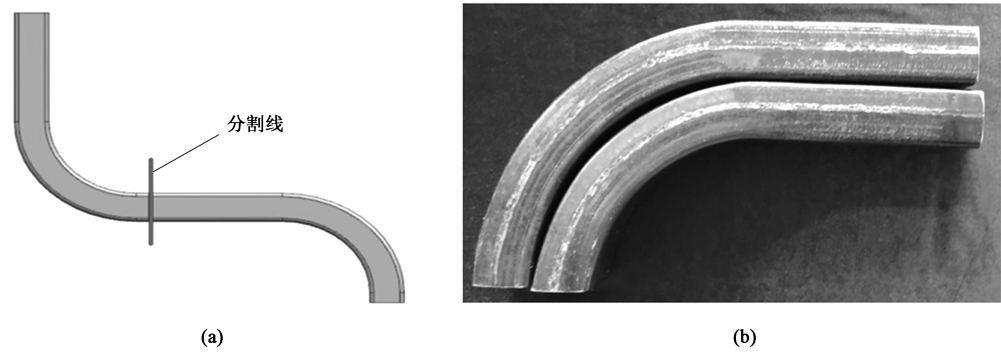


图 14 支架管开发

(a) 热辊弯工艺拼接 (b) 热辊弯工艺样件

Fig. 14 Manufacturing for bracket tube

(a) Splicing of hot roll bending process (b) Sample pieces of hot roll bending process

5 结论

(1) 管状结构设计可以提高结构刚度，解决轻卡后下防护装置稳定性差、受撞击后横杆易与安装

支架部分发生严重的溃缩变形的问题。

(2) 热辊弯工艺能够实现 1500 MPa 以上的管件的小半径弯曲，解决后下防护包络空间受限的问题。

(3) 热辊弯工艺应用于轻卡后下防护装置，能



图 15 热辊弯设计方案样件

Fig. 15 Sample pieces of hot roll bending design scheme

在实现 30% 左右轻量化的前提下, 性能不降低。

(4) 根据后下防护装置静态试验加载要求, 结合试验与仿真, 可很好地评估其碰撞性能。

(5) 采用热辊弯工艺制造后下防护装置, 工艺简单, 流程短, 能实现材料与工艺综合成本低的技术优势。

(6) 可根据车型的公告吨位, 通过调整管件的厚度来满足标准的要求, 通用性好。

#### 参考文献:

- [1] 邓善良. 商用车后下部防护装置及乘用车高低速耐撞性优化设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
Deng S L. Optimization and Design for Rear Underride Guards of Commercial Vehicles and High-speed and Low-speed Crashworthiness of Passenger Vehicles [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [2] GB 11567—2017, 汽车及挂车侧面和后下部防护要求 [S].  
GB 11567—2017, Motor vehicles and trailers-lateral and rear underrun protection requirements [S].
- [3] 王爱成. 商用车防护梁辊弯与绕弯成形技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
Wang A C. Research on Roll Forming and Pure Rolling Rotary Draw Bending Technologies of Commercial Vehicle Bumper Beam [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [4] Cheng J J, Cao J G, Zhao Q F, et al. A novel approach to springback control of high-strength steel in cold roll forming [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107 (1): 1793-1804.
- [5] 韩飞, 牛丽丽, 王允, 等. 超高强钢辊弯成形回弹机理分析及控制研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54 (2): 131-137.  
Han F, Niu L L, Wang Y, et al. Research on springback mechanism and control of ultra high strength steel in roll forming process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (2): 131-137.
- [6] 王翠竹, 牛卫中. 芯管间隙对 JAC590Y 高强钢矩形管绕弯成形质量的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 94-99.  
Wang C Z, Niu W Z. Influences of clearance between mandrel and tube on forming quality for JAC590Y high strength steel rectan-

gular tube in rotary-draw bending [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 94-99.

- [7] 袁静玺, 贾丽刚, 石磊. 基于热辊弯工艺的汽车前保险杠变强度优化设计 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 127-133.  
Yuan J X, Jia L G, Shi L. Optimization design on variable strength of automobile front bumper based on hot roll bending process [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 127-133.
- [8] 张骥超, 雷呈喜, 石磊. B 形防撞梁热辊弯成形过程仿真和试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (11): 41-46.  
Zhang J C, Lei C X, Shi L. Simulation and experimental research on hot roll-bending forming process of B-shaped bumper [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 27 (11): 41-46.
- [9] 赵紫剑. 商用车被动安全性仿真分析与改进设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
Zhao Z J. Simulation Analysis and Improved Design of Commercial Vehicle Passive Safety [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [10] 郑龙月, 王吉忠, 吕林, 等. 某商用车后下防护装置碰撞仿真与设计改进 [J]. 汽车零部件, 2019, 19 (8): 23-26.  
Zheng L Y, Wang J Z, Lyu L, et al. Collision simulation and optimization design of rear-down protective device of a commercial vehicle [J]. Automobile Parts, 2019, 19 (8): 23-26.
- [11] 王琪, 朱春东, 张易, 等. 基于 Hypermesh 的轧辊轴数值模拟及优化设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 111-116.  
Wang Q, Zhu C D, Zhang Y, et al. Numerical simulation and optimization design on roll shaft based on Hypermesh [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 111-116.
- [12] 吴磊, 黄凯东, 苏开华, 等. 一种弯管成形半径的影响因素研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 118-123.  
Wu L, Huang K D, Su K H, et al. Research on influencing factors of forming radius for a bent pipe [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 118-123.

## 《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益, 坚决抵制学术不端行为, 积极倡导优良学风, 努力为学术创新营造良好氛围, 本刊郑重声明: 对一稿多投, 重复发表, 存在署名有争议, 引用他人著述未注明出处, 抄袭、剽窃、弄虚作假, 或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章, 坚决拒绝刊登。一经发现, 立即撤稿, 并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚, 情节严重者, 将以适当方式予以公布, 该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部