

基于数值仿真的 1500 MPa 级抗疲劳扭力梁管梁研制与性能评价

李晓林¹, 李 欢²

(1. 长春职业技术学院 机电学院, 吉林 长春 130022; 2. 一汽奔腾轿车有限公司, 吉林 长春 130012)

摘要: 为提升扭力梁管梁的抗疲劳性, 针对某电动出租车 1500 MPa 级抗疲劳扭力梁管梁的关键技术进行了研究, 在完成管梁结构设计后, 采用产品数值仿真和成形数值仿真技术分别验证了产品性能和可制造性能, 完成了样件试制且通过了总成产品的试验验证, 最终设计了一种既能满足抗疲劳性, 又能实现轻量化和低成本要求的管梁正向开发技术。结果显示: 在正向设计管梁结构时, 需先利用侧倾中心反推出管梁剪切中心, 再计算出管梁剪切中心, 确定管梁 X 向和 Z 向位置后再进行结构的详细设计; 产品数值仿真技术确认了管梁扭转刚度为 $435.5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{deg}^{-1}$ 、扭转耐久外应力为 454 MPa, 均满足产品性能要求; 成形数值仿真技术显示管梁的最大减薄率为 12.9%, 满足可制造性要求; 高频淬火后, 管梁的抗拉强度从 420~800 MPa 提升至 1300~1700 MPa; 扭转耐久台架试验和道路试验表明, 高频淬火后的管梁抗疲劳性约为非高频淬火管梁的 4 倍。

关键词: 扭力梁; 管梁; 抗疲劳性; 高频淬火; 正向设计

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.016

中图分类号: U466

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 10-0108-08

Development and performance evaluation on 1500 MPa anti-fatigue torsion tubular beam based on numerical simulation

Li Xiaolin¹, Li Huan²

(1. Academy for Electromechanical, Changchun Polytechnic, Changchun 130022, China;

2. FAW Car Co., Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: In order to improve the fatigue resistance of the torsion tubular beam, the key technology of the 1500 MPa anti-fatigue torsion tubular beam of an electric taxi was studied, and after completing the design of the tubular beam structure, the product performance and manufacturability were verified by using the product numerical simulation and forming numerical simulation technology. Then, the prototype was completed and passed the test verification of the assembly product. Finally, a forward development technology for tubular beams that not only met the requirements of fatigue resistance, but also met the requirements of lightweight and low cost was designed. The results show that when designing the tubular beam structure forward, the shear center of the tubular beam should be firstly deduced from the side tilt center, and then the shear center of the tubular beam is calculated to determine the X and Z positions of the tubular beam before proceeding to detailed structure design. Torsional rigidity of the tubular beam $435.5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{deg}^{-1}$ and torsional durability external stress 454 MPa are confirmed by the product numerical simulation technology, which meet the product requirements. Maximum thinning rate 12.9% of the tubular beam is showed by using the forming numerical simulation technology, which meets the requirements of manufacturability. After high-frequency quenching, the tensile strength of tubular beam is increased from 420~800 MPa to 1300~1700 MPa, and the torsional durability bench tests and road tests show that the fatigue resistance of the tubular beam after high-frequency quenching is about four times that of the non-high-frequency quenching tubular beam.

Key words: torsion beam; tubular beam; fatigue resistance; high-frequency quenching; forward design

扭力梁式悬架是 A 级车后悬架中应用非常普

遍的一种非独立悬架形式, 其优点是结构简单、部件少和成本低, 缺点是受力极为复杂, 抗疲劳要求较高。横梁作为扭力梁中最重要的性能件, 尤其对于电动出租车其承载要求高, 运营中行驶工况复杂、严苛, 扭力梁横梁通常存在以下问题: (1) 抗疲劳性不足, 在常见的扭转工况下横梁本体容易发生疲劳断裂, 严重影响车辆安全和扭力

收稿日期: 2023-02-15; 修订日期: 2023-05-13

基金项目: 吉林省教育厅科研产业处课题 (JJKH20221360SK);
吉林省科技发展计划项目 (20200703018ZP)

作者简介: 李晓林 (1981-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: 20305930@qq.com

通信作者: 李 欢 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: lihuan@fawcar.com.cn

梁抗疲劳寿命, 后续的维修成本也比较高; (2) 若横梁设计的较重, 则会造成簧下质量增大, 不仅影响了车辆操稳和平顺性能, 还会导致扭力梁材料成本增加。

对于扭力梁, 目前已有越来越多的国内外主机厂在应用封闭管梁方案, 如图 1 所示。相比冷冲压板梁方案, 封闭管梁可实现减重 20%~30%, 成本降低 15%~20%, 扭力梁横梁的典型截面示例如图 2 所示。

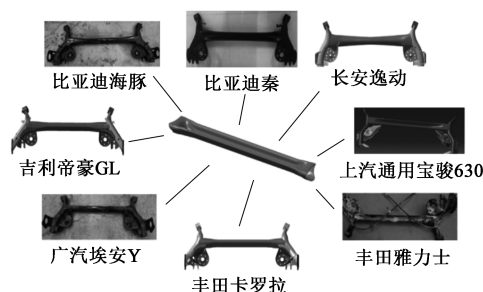


图 1 主机厂应用扭力梁管梁示例

Fig. 1 Examples of torsion tubular beam applied by OEM

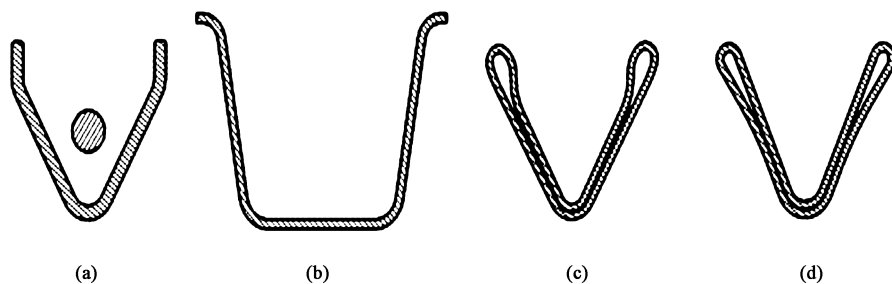


图 2 扭力梁横梁的典型截面示例

(a) 大众 PQ34 平台 (b) 大众 MQB 平台 (c) 吉利帝豪 (d) 丰田卡罗拉

Fig. 2 Examples of typical cross-sections for torsion beam

(a) Volkswagen PQ34 platform (b) Volkswagen MQB platform (c) Geely Emgrand (d) Toyota Corolla

对于应用封闭管梁方案的扭力梁横梁的常见问题是疲劳开裂, 通常为管梁本体疲劳开裂; 扭力梁管梁本体开裂的根本原因是管梁外应力和内应力叠加作用导致的, 通过降低结构外应力、降低工艺内应力和提高材料抗应力能力 3 个方面来解决疲劳开裂问题, 最后通过试验完成验证。

徐小华^[1]针对含热成形扭力梁管梁在台架试验中疲劳开裂的问题进行了微观组织研究, 得出开裂原因为管梁在热处理后表面形成的脱碳层过深, 通过优化热处理工艺降低脱碳层深度有效提升了疲劳性能。韩国学者 Park J K 等^[2]对扭力梁管梁通过模具淬火和管内喷水的混合淬火开展研究, 试验表明对扭力梁采用混合淬火工艺可有效减少冷却时间和热变形。张旭等^[3]从材料、结构、成形和热处理方面对 1000 MPa 级扭力梁管梁进行了研究, 最后试验验证抗疲劳性满足要求; 张岩红等^[4]通过数值仿真研究了不同支撑内压对 DP780 高强钢扭力梁内高压成形结果的影响, 以改善零件的成形质量, 研究表明在预成形工序中, 适当的支撑内压对管梁的壁厚分布有改善作用。黄晓峰^[5]通过数值仿真和试验相结合的方法重点研究了扭力梁管梁内高压成形过程中影响成形质量的关键因素。国内对于扭力梁管梁产品开发和工艺开发的综合研究文献较少, 尤其

是对 1500 MPa 级抗疲劳扭力梁管梁产品开发和工艺开发的综合研究国内还无相关研究文献。

本文以某电动出租车 1500 MPa 级抗疲劳扭力梁管梁开发为研究对象, 主要包括管梁结构设计、产品有限元仿真、成形有限元仿真和试验验证, 最终设计了一种既能满足抗疲劳性, 又能实现轻量化、低成本要求的管梁正向开发技术, 为主机厂开发提供一定的参考。

1 管梁产品设计

1.1 位置设计

管梁位置设计包括空间 X 向、 Y 向和 Z 向位置设计; 对于管梁 Y 向位置, 即管梁的长度, 依据扭力梁的宽度尺寸便可以确定, 重点是管梁的 X 向和 Z 向设计, 可分别运用图解法和数值仿真完成; 下文将重点阐述管梁 X 向和 Z 向位置设计。

管梁 X 向位置设计需依据侧倾中心高度反推剪切中心, 确定了剪切中心的 X 向坐标便确定了管梁的 X 向位置, 因剪切中心的 X 向位置基本在管梁几何中心处, 具体反推过程可利用图 3 所示的图解法: 在扭力梁悬架后视图中, 连接轮心点 W 和接地点 T , 取车辆中心面和接地线 TT' 的交点 H , 过 H 点做 TT' 垂线段 R_0H , 其即为侧倾中心高度; 然后连接点 T

和点 R_0 并延长, 与过轮心轴的垂面相交于点 P ; 在扭力梁悬架俯视图中, 连接前衬套硬点 A 和点 P , 直线 AP 与车辆中心面交点为 S_c , 即为扭力梁管梁的剪切中心位置^[6-7]。

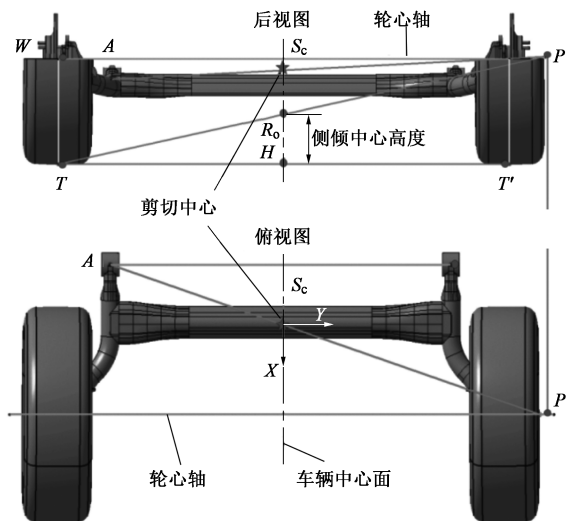


图 3 扭力梁管梁侧倾中心高反推剪切中心

Fig. 3 Roll center height thrust shear center of torsion tubular beam

管梁的 Z 向位置设计需先完成管梁截面设计后再利用数值仿真对管梁截面进行剪切中心求解, 依据求解结果便可以确定管梁的 Z 向位置^[8]。本文通过 Catia 截取管梁中心截面, 以 igs 格式导入 Hypermesh, 完成网格划分后利用 Hyperbeam 模块即可求解出管梁剪切中心位置^[9-10]。图 4 为本文研究扭力梁管梁剪切中心的有限元计算结果, 结果显示管梁 Z 向位置在其剪切中心 Z 向下方 13.2 mm 处, 不同管梁截面设计的 Z 向距离稍有不同。

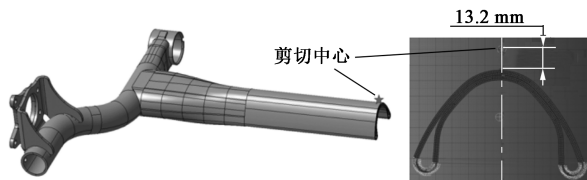


图 4 扭力梁管梁剪切中心有限元计算结果

Fig. 4 Finite element calculation result of shear center for torsion tubular beam

1.2 材料设计

扭力梁管梁选用宝武钢铁集团生产的热冲压用热连轧钢板 BR1500HS, 壁厚为 3.0 mm, 经过电阻高频焊完成制管, 管径为 $\Phi 114.3$ mm。因其是热成形用钢, 拥有高淬火特性, 所以, 在管梁热处理前后材料性能会发生大幅变化, 其力学性能如表 1 所示, 化学成分如表 2 所示。

表 1 管梁 BR1500HS 钢板的力学性能

Table 1 Mechanical properties of BR1500HS steel plate for tubular beam

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
热处理前	420~800	320~630	≥ 15
热处理后	1300~1700	950~1250	≥ 5

表 2 管梁 BR1500HS 钢板的化学成分 (% , 质量分数)

Table 2 Chemical compositions of BR1500HS steel plate for tubular beam (% , mass fraction)

C	Si	Mn	P	S
0.20~0.25	≤ 0.40	1.00~1.40	≤ 0.025	≤ 0.010
Alt	B	Cr	Ti	Mo
0.01~0.06	≤ 0.005	≤ 0.35	0.02~0.05	≤ 0.35

1.3 结构设计

扭力梁管梁的结构会直接影响车辆的动力学性能和抗疲劳性能, 所以, 管梁是扭力梁最核心的部件^[11]。正向设计等截面封闭管梁结构时, 需通过管梁截面设计降低管梁冲压成形内应力和扭转工况外应力幅值及优化分布, 从而在结构设计阶段充分降低管梁扭转工况下常见的疲劳开裂风险, 通过内、外应力有限元仿真研究下文有相关阐述^[12-13]。管梁截面变化如图 5 所示, 截面形状从中间 A-A 截面处的 V 字型光滑过渡到端头 E-E 截面处的椭圆形。

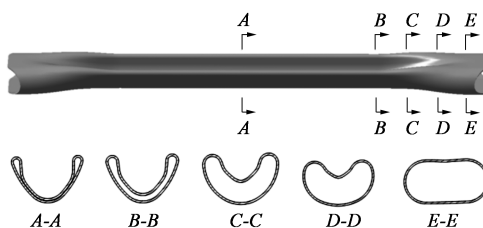


图 5 扭力梁管梁典型截面

Fig. 5 Typical cross-sections of torsion tubular beam

2 有限元仿真分析

2.1 产品有限元仿真

2.1.1 扭转刚度

扭转刚度是扭力梁总成最重要的性能指标, 而管梁的空间位置、截面尺寸和壁厚对扭转刚度有直接影响。在完成管梁初版结构设计后需搭载扭力梁总成, 利用有限元仿真手段进行扭转刚度校核^[14-15]。依据本文研究的采用封闭管梁的扭力梁总成 CAD 数据, 利用 Hypermesh 建立扭转刚度 CAE

模型，如图 6 所示。

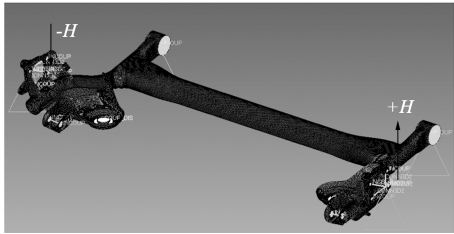


图 6 扭转刚度 CAE 模型
Fig. 6 CAE model of torsional stiffness

在扭转刚度 CAE 模型中只需赋予相关冲压部件钢质材料特性，如表 3 所示。

表 3 冲压部件钢质材料特性
Table 3 Steel material properties of stamping part

参数	杨氏模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)
数值	210000	0.3	7.85×10^{-6}

在扭转刚度 CAE 模型中前衬套硬点处施加 XYZ 三向位移自由度约束；在双侧轮心处分别施加垂直反向位荷 $\pm H$ ， H 一般取 50 mm；利用 Abaqus 求解后通过其后处理模块测量位移下的双侧轮心的支反力，并取其平均值 F_r 。扭转刚度可按式 (1) 计算：

$$K_{\alpha} = (F_r \cdot L) / \arctan(2H/L) \quad (1)$$

式 (1) 中扭转刚度计算参数说明如表 4 所示。

表 4 式 (1) 中扭转刚度计算参数

Table 4 Calculation parameters of torsional stiffness in equation (1)

参数	数值
轮距 L/mm	1568
位移载荷 H/mm	50
双侧轮心的支反力均值 F_r/N	1013
扭转角度 $\arctan(2H/L)/(^{\circ})$	3.6491
扭转刚度 $K_{\alpha}/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{deg}^{-1})$	435.5

2.1.2 扭转耐久

对于管梁的可靠耐久性，主要是扭转耐久，管梁的空间位置、截面尺寸和壁厚对扭转耐久有直接影响，在完成管梁初版结构设计后需搭载扭力梁总成，利用有限元手段进行扭转耐久外应力校核^[16]。依据本文研究的采用封闭管梁的扭力梁总成 CAD 数据，利用 Hypermesh 建立扭转耐久多体有限元模型，如图 7 所示。

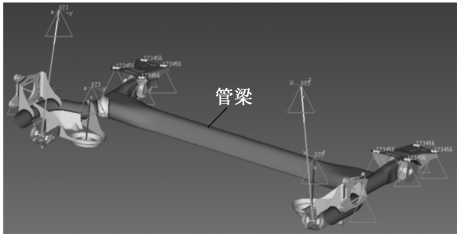


图 7 扭力梁悬架多体模型
Fig. 7 Multibody model of torsion beam suspension

以降低扭转耐久工况下管梁外应力幅值、优化外应力分布为目标导向，利用产品数值仿真技术驱动结构优化设计。采用扭力梁悬架多体模型来模拟实际悬架系统台架试验，在双侧轮心点施加反向位移载荷，利用 Abaqus 对其进行求解和后处理，扭转工况下扭力梁管梁的外应力计算结果如图 8 所示，管梁外应力满足产品要求。

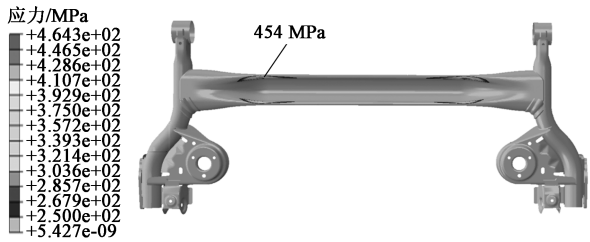


图 8 扭转工况下扭力梁管梁的外应力计算结果
Fig. 8 Calculation results of external stress for torsion tubular beam under torsion condition

2.2 成形有限元仿真

2.2.1 成形工艺

对于某电动出租车扭力梁管梁，其典型成形工序包括 OP10 预成形、OP20 成形和 OP30 激光切割。其中，预成形是决定复杂截面管梁能否顺利成形的重要因素，通过合理控制预成形截面的高宽尺寸和形状，可以避免成形过程中合模咬边和过度减薄缺陷。管梁成形工艺如图 9 所示。

2.2.2 建立模型

依据管梁截面形状和成形工艺方案，利用 Autoform 建立冷冲压预成形和成形有限元模型，分别如图 10 和图 11 所示。

在 Autoform 建立的有限元模型中，扭力梁管梁 BR1500HS 钢板采用的塑性模型曲线如图 12 所示。

2.2.3 分析结果

利用 Autoform 对管梁冷冲压成形进行全工序有限元仿真，管梁预成形有限元分析结果如图 13 所示，结果显示成形性良好，无预成形合模咬边问题，



图 9 管梁成形工艺

Fig. 9 Forming process of tubular beam

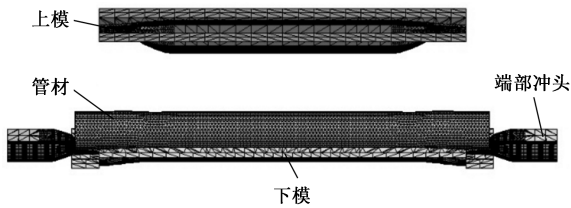


图 10 OP10 预成形有限元模型

Fig. 10 Finite element model of OP10 preforming

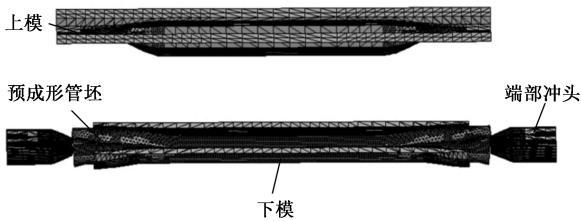


图 11 OP20 成形有限元模型

Fig. 11 Finite element model of OP20 forming

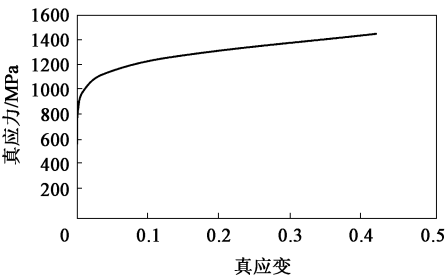


图 12 BR1500HS 钢板真应力-真应变曲线

Fig. 12 True stress-ture strain curve of BR1500HS steel plate

最大减薄率为 8.2%，出现在椭圆型截面和 V 型截面过渡段位置。

管梁成形有限元仿真结果如图 14 所示，结果显示成形性良好，无成形合模咬边问题，最大减薄率

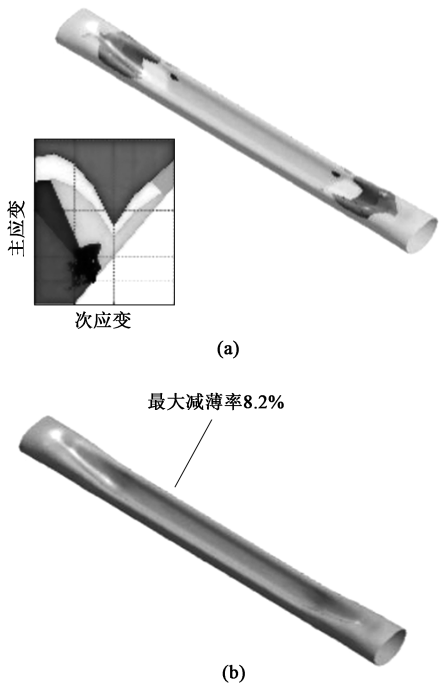


图 13 预成形工序有限元仿真结果

(a) 成形性 (b) 减薄率

Fig. 13 Finite element simulation results of preforming process

(a) Formability (b) Thinning rate

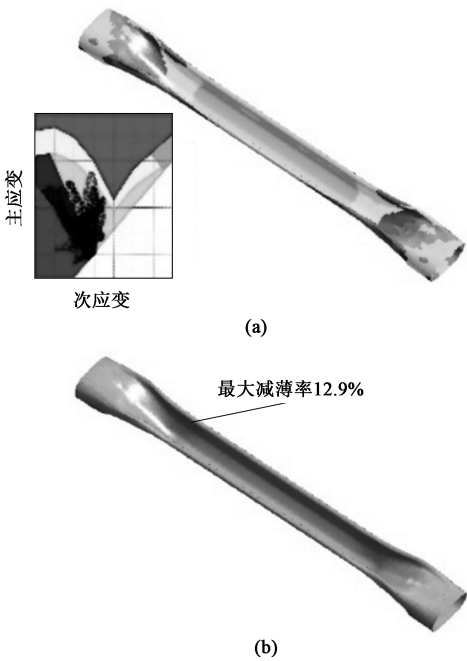


图 14 成形工序有限元仿真结果

(a) 成形性 (b) 减薄率

Fig. 14 Finite element simulation results of forming process

(a) Formability (b) Thinning rate

为 12.9%，满足要求，同样出现在椭圆型截面和 V 型截面过渡段位置。

管梁激光切割和回弹的有限元仿真结果如图 15

所示，结果显示激光切割工艺性良好，最大回弹量为 2.8 mm，同样满足要求，因管梁中部 V 型截面位置无焊接匹配要求，其成形内应力和扭转外应力均较小，回弹后对管梁产品性能影响微小。

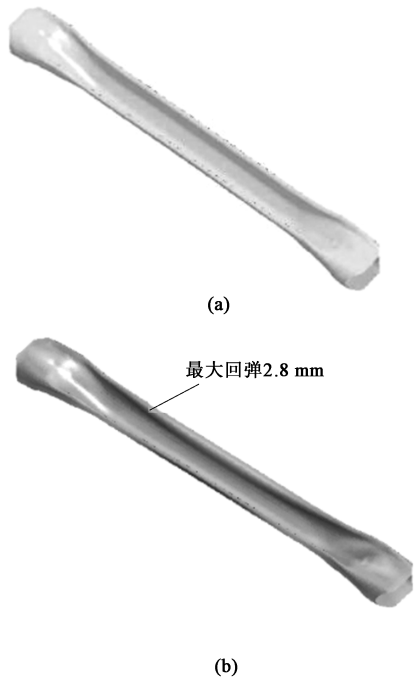


图 15 激光切割 (a) 和回弹有限元仿真结果 (b)
Fig. 15 Finite element simulation results of laser cutting (a) and springback (b)

综上所述，利用 Autoform 对管梁完成冷冲压成形全工序有限元仿真，结果显示管梁具有良好的成形可制造性。

3 试验验证

3.1 样件制造

本文研究管梁采用 V 型封闭管梁结构，管梁工艺和工序排布为：OP10 预成形→OP20 成形→OP30 高频淬火→OP40 回火→OP50 抛丸→OP60 激光切割，各工序关键产品的特性和控制特性如表 5 所示。

管梁采用封闭管冷冲压成形工艺，只需预成形和成形两序即可完成。预成形和成形工序中，两侧端头均配置支撑，避免管梁端板凹陷。管梁冲压模具如图 16 所示。本文研究的 1500 MPa 级抗疲劳管梁制造工序件如图 17 所示。

由于管梁材料 BR1500HS 钢板具有高淬硬特性，管梁冷冲压成形后，采用高频淬火工艺，通过设定高频感应线圈的功率、速度和淬火液温度，使管梁铁素体加珠光体组织马氏体化，硬度显著提升，抗拉强度从 420~800 MPa 提升至 1300~1700 MPa。通过高频淬火工艺极大地提升了管梁抗外应力能力，降低了管梁扭转工况下的疲劳开裂风险。管梁经高

表 5 管梁制造各工序关键产品和控制特性

Table 5 Key products and control characteristics of each process for tubular beam manufacturing

工序		关键产品特性	关键控制特性
冲压	OP10 预成形	成形性良好； 减薄率合格； 尺寸合格	模面设计； 合模力
	OP20 成形		
热处理	OP30 高频淬火	硬度合格； 无变形	淬火液温度为 18~30 ℃； 淬火温度 (830±5) ℃，通过调整线圈功率和速度实现
	OP40 回火	无变形； 金相组织合格	回火温度； 保温时间
OP50 抛丸		钢丸规格； 空气压力； 抛丸时间	表面无残余油脂、不牢固的氧化皮和铁锈
OP60 激光切割		定位准确； 激光头功率/速度	切割尺寸合格

频淬火后还需回火处理，从而降低管梁的残余内应力，进一步提升抗疲劳性。管梁经回火后还需对其表面进行抛丸处理，去除其表面氧化皮和异物，最终完成 1500 MPa 级抗疲劳扭力梁总成样件试制，如图 18 所示。

3.2 台架和路试验证

本文研究的 1500 MPa 抗疲劳管梁结构扭力梁总

成样件，搭载扭转耐久台架试验，如图 19 所示。为满足电动租车用户需求，设置扭转耐久工况目标循环为 75 万次（当量用户里程为 6.0×10⁵ km），试验实际完成循环 84 万次（当量用户里程为 6.72×10⁵ km），扭力梁管梁的安全余量为 1.75 倍。

某传统车型的扭力梁管梁的质量问题如图 20 所

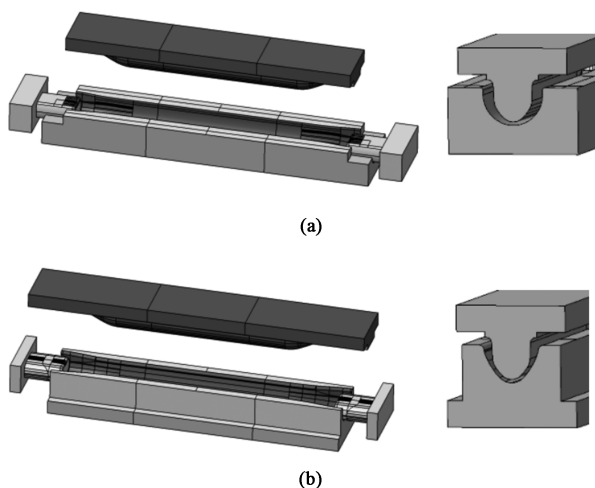


图 16 管梁冷冲压成形模具示意图

(a) OP10 预成形模具 (b) OP20 成形模具

Fig. 16 Schematic diagram of cold stamping forming die for tubular beam

(a) OP10 preforming mold (b) OP20 forming mold

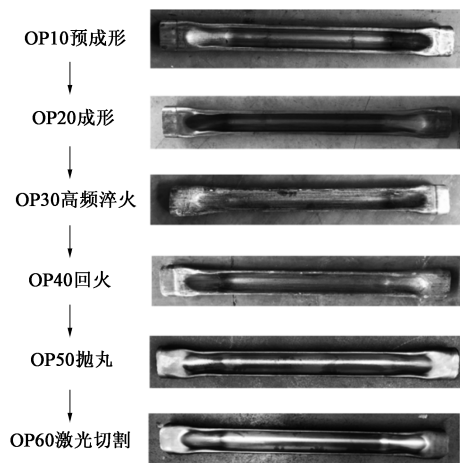


图 17 1500 MPa 级抗疲劳管梁试制

Fig. 17 Trial production of 1500 MPa anti-fatigue tubular beam

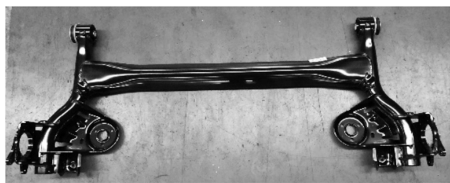


图 18 1500 MPa 抗疲劳扭力梁总成样件试制

Fig. 18 Trial production of 1500 MPa anti-fatigue torsion beam assembly sample

beam assembly sample

示,在扭转耐久 DV 试验中管梁开裂,扭转耐久工况目标循环为 30 万次(用户当量里程为 2.4×10^5 km),试验实际完成循环 21 万次(用户当量里程为 1.68×10^5 km),扭转 V 型管梁耳部出现裂纹。

管梁作为扭力梁总成中最重要的性能件,本文研究电动出租车扭力梁管梁正向开发,已充分规避

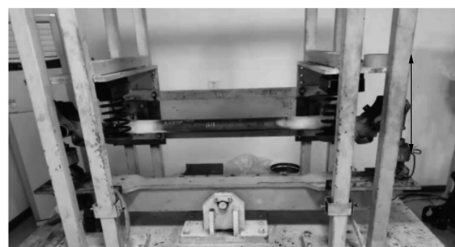


图 19 某电动出租车扭力梁扭转耐久台架试验

Fig. 19 Torsional durability bench test of torsion beam for an electric taxi

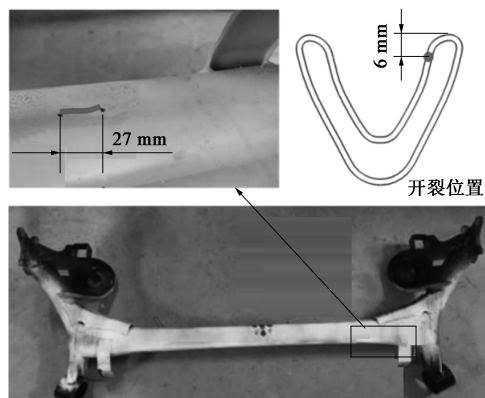


图 20 某传统车型扭力梁扭转耐久台架试验

Fig. 20 Torsional durability bench test of torsion beam for a traditional car

和改善了平台车型管梁抗疲劳性不足的问题。相比于某传统车型扭力梁,同样采用 V 型封闭管梁,但未经高频淬火处理,其扭转耐久性能未能满足要求。本文中由于采用高频淬火及回火工艺,极大地提高了管梁抗外应力能力,抗疲劳性是非高频淬火管梁的 4 倍,如表 6 所示。

表 6 扭力梁悬架系统扭转耐久台架试验结果对比

Table 6 Comparison of torsional durability bench test results for torsion beam suspension system

扭力梁 类型	位移载荷/ mm	试验标准		试验结果		结论
		循环 次数/ 次	当量 里程/ km	循环 次数/ 次	当量 里程/ km	
传统车型	± 41.9	≥ 30 万	2.4×10^5	21 万	1.68×10^5	NO
电动出租车	± 41.9	≥ 75 万	6.0×10^5	84 万	6.72×10^5	OK

采用管梁结构的扭力梁总成样件搭载电动出租车实车路试,通过用户当量里程 60 万千米考核,扭力梁管梁无开裂,如图 21 所示。

4 结论

(1) 在正向设计管梁结构时需首先利用侧倾中



图 21 某电动出租车搭载扭力梁实车路试

Fig. 21 Real road test of an electric taxi equipped with torsion beam

心高度反推出管梁剪切中心, 然后利用产品数值仿真技术计算出管梁剪切中心, 从而确定管梁 X 向和 Z 向位置, 之后再进行结构详细设计。

(2) 利用产品数值仿真技术确认了管梁扭转刚度性能和扭转耐久外应力值, 利用成形数值仿真技术确认了管梁成形性和最大减薄率, 产品性能和可制造性能均满足要求。

(3) 分析了管梁制造各工序的关键产品和控制特性, 尤其是管梁通过高频淬火工艺使得抗拉强度得到较大提升, 从而提升了管梁抗疲劳能力。

(4) 扭力梁总成样件通过了扭转耐久台架试验和道路试验验证, 试验结果表明, 采用高频淬火工艺的管梁抗疲劳性约是非高频淬火管梁的 4 倍。

参考文献:

- [1] 徐小华. 含硼钢管状扭力梁热处理脱碳层对疲劳性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 235-240.
Xu X H. Effect of heat treatment decarburization layer on fatigue properties of boron-containing steel pipetorsion beam [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 235-240.
- [2] Park J K, Kim Y S, Suh C H, et al. Hybrid quenching method of hot stamping for automotive tubular beams [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231 (9): 147-153.
- [3] 张旭, 赵天会, 代慈华, 等. 轻量化封闭截面式扭力梁横梁工艺分析 [J]. 汽车工程师, 2018, (3): 48-50.
Zhang X, Zhao T H, Dai C H, et al. Analysis on processing of lightweight closed cross sectional torsion beam [J]. Automotive Engineer, 2018, (3): 48-50.
- [4] 张岩红, 许东辉, 冯海龙, 等. 支撑内压对某型高强钢扭力梁液压成形的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 117-126.
Zhang Y H, Xu D H, Feng H L, et al. Influence of supporting internal pressure on hydroforming for a certain type high-strength steel torsion beam [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 117-126.
- [5] 黄晓峰, 胡勇, 易成珂, 等. 管状变截面汽车扭力梁内高压成形工艺 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (2): 103-108.
Huang X F, Hu Y, Yi C K, et al. Hydroforming process of tubular variable cross section automotive torsion beam [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (2): 103-108.
- [6] 李秋寒, 郭子峰, 郭佳, 等. 500 MPa 级汽车管状扭力梁横梁开裂分析 [J]. 中国冶金, 2020, 30 (8): 51-55, 63.

- Li Q H, Guo Z F, Guo J, et al. Crack analysis of 500 MPa automobile tubular torsion beam crossbeam [J]. China Metallurgy, 2020, 30 (8): 51-55, 63.
- [7] 周澍, 陈荣, 徐沛瑶. 轻型管状扭转梁的材料及退火工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (2): 81-86.
Zhou S, Chen R, Xu P Y. Materials and annealing processes for lightweight tubular torsion beams [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (2): 81-86.
- [8] 黄晓峰, 胡勇, 易成珂, 等. 管状变截面汽车扭力梁内高压成形工艺 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (2): 103-108.
Huang X F, Hu Y, Yi C K, et al. Hydroforming process of tubular variable cross section automotive torsion beam [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (2): 103-108.
- [9] 唐明松, 王岩松, 赵礼辉. 扭力梁后桥耐久性快速评价 [J]. 机械强度, 2017, 39 (1): 183-187.
Tang M S, Wang Y S, Zhao L H. Rapid evaluation of durability of torsion beam rearbridge [J]. Mechanical Strength, 2017, 39 (1): 183-187.
- [10] 韩聪, 张伟伟, 苑世剑, 等. 预制坯形状对扭力梁内高压成形影响分析 [J]. 材料科学与工艺, 2011, 19 (4): 1-5.
Han C, Zhang W W, Yuan S J, et al. The influence analysis of internal high pressure forming preform shape of the torsion beam in high pressure [J]. Materials Science and Technology, 2011, 19 (4): 1-5.
- [11] 张伟伟, 韩聪, 苑世剑, 等. 加载路径对扭力梁内高压成形壁厚分布和精度的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2012, 20 (4): 1-6.
Zhang W W, Han C, Yuan S J, et al. Effect of loading paths on thickness distribution and precision of a hydroformed torsion beam [J]. Materials Science and Technology, 2012, 20 (4): 1-6.
- [12] 周澍, 陈荣, 徐沛瑶. 轻型管状扭转梁的材料及退火工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (2): 81-86.
Zhou S, Chen R, Xu P Y. Materials and annealing processes for lightweight tubular torsion beams [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11 (2): 81-86.
- [13] 崔俊佳, 于海平, 李春峰, 等. 高强钢板热冲压工艺中的相变模拟 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (1): 48-52.
Cui J J, Yu H P, Li C F, et al. Phase transformation simulation of high strength steel under hot stamping process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (1): 48-52.
- [14] 余凯, 程和法, 陈文琳, 等. 扭力梁热成形过程温度与微观组织的研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (3): 109-114.
Yu K, Cheng H F, Chen W L, et al. Research on temperature and microstructure of torsion beam during hot forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (3): 109-114.
- [15] 罗明军, 赵永玲, 宋立新, 等. 典型危险工况下汽车后扭力梁结构开裂分析 [J]. 机械强度, 2014, 36 (1): 81-85.
Luo M J, Zhao Y L, Song L X, et al. Crack analysis of automobile rear torsion beam under typical dangerous working conditions [J]. Mechanical Strength, 2014, 36 (1): 81-85.
- [16] 毛玉婷. 扭力梁悬架静态性能分析与轻量化设计 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (20): 60-65.
Mao Y T. Static and dynamic performance analysis and lightweight design of torsion beamsuspension [J]. Machine Tools and Hydraulics, 2020, 48 (20): 60-65.