

球墨铸铁应用于平衡重式内燃叉车转向节的论证研究

余越¹, 郭顺², 石云³, 耿淑伟⁴

(1. 安徽合力股份有限公司, 安徽合肥 230601; 2. 安庆合力车桥有限公司, 安徽安庆 246001;

3. 合肥铸锻厂, 安徽合肥 230601; 4. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要: 大批量生产复杂形状工件时, 铸造被认为是满足性能要求前提下生产效率最高、成本最低的制造方法。本研究分别对45钢锻造成形的叉车转向节和球墨铸铁铸造的叉车转向节的应力分布进行了仿真分析, 并对二者进行拉伸性能测试, 结果表明: 两者抗拉强度分别为766 MPa和785 MPa, 安全系数分别为2.048和2.04。在球墨铸铁铸造的叉车转向节的轴肩根部开设用于卸荷的退刀槽, 对其分别进行跌落和疲劳可靠性试验, 验证了叉车转向节生产时采用QT600-3球墨铸铁铸件代替45钢锻件的可行性。

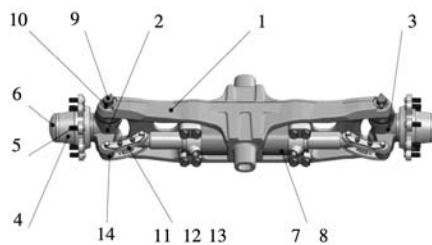
关键词: 叉车转向节; 球墨铸铁; 45钢锻件; 拉伸性能; 耐冲击性; 抗疲劳性

球墨铸铁是20世纪50年代发展起来的一种高强度铸铁材料^[1], 其综合性能接近钢材。为提高铸铁的塑性和韧性, 一般通过球化和孕育处理, 使铸铁中碳主要以球状石墨形式析出。该工艺已被用于铸造某些应力分布复杂、强度高、韧性好和耐磨的零件, 并在汽车、高铁、风电和核电等领域得到了广泛应用^[2-3]。

为确保平衡重式内燃叉车的承载能力和转向灵活性, 采取前桥驱动、后桥转向的布局模式。转向节是叉车转向桥中的重要零件之一, 其功能是传递并承受叉车后部载荷, 支承并带动后轮绕转向节主销转动, 它在转向桥中的位置如图1所示。叉车行进过程中, 它承受着多变的冲击载荷, 因此要求转向节具有较高的强度和韧性。

目前平衡重式内燃叉车的转向节为45钢锻件, HB硬度达到241~285。尽管锻件具有组织结构

致密性好、纤维方向可控、内部不易出现缺陷等优点, 但存在生产效率较低、成本高等缺点。而球墨铸铁QT600-3通过合金化处理, 其强度和硬度都很高, 考虑铸造件相较锻件生产效率高, 即便需增加粗加工工序, 前者仍具有较大的成本优势, 本文探讨利用球墨铸铁转向节替代45钢锻造转向节的可行性。



1. 转向桥桥体 2. 转向节(左) 3. 转向节(右)
4. 转向轮毂 5. 轮毂螺栓 6. 轮毂盖 7. 转向油缸
8. 油缸固定螺栓 9. 转向节主销 10. 定位销
11. 转向节臂 12. 挡板 13. 螺栓 14. 加油嘴

图1 转向桥总成

Fig. 1 Assembly of the steering axle

作者简介:

余越(1992-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为内燃叉车结构。E-mail: yuyue_sunny@126.com

通信作者:

耿淑伟, 女, 副教授, 硕士生导师。E-mail: gengsw01@yeah.net

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

01-0038-04

收稿日期:

2023-10-23 收到初稿,
2023-12-29 收到修订稿。

1 球墨铸铁转向节受力分析

满载工况时该型叉车前桥负荷大, 后桥负荷小; 而空载工况时后桥负荷大, 前桥负荷小。实际工况下还存在颠簸路况、急转弯等情形, 因此选择叉车空载工况时

转向节承受的载荷，再附加2倍动载系数作为受力条件，利用Ansys软件对转向节进行应力仿真，可以估算转向节的静弯曲应力。考虑转向节是通过一对O形布置的圆锥滚子轴承固定在转向桥主销上，因此边界条件为：上端轴承座孔的轴向和径向移动均作固定，下端轴承座孔仅固定径向移动，加载面选取转向节与轮毂接触面，有限元网格划分如图2(a)所示。应力仿真结果如图2(b)所示，表明转向节现有结构局部峰值

应力为250 MPa，小于材料许用应力。

QT600-3加入0.4%铜元素合金化，其球墨铸铁金相图如图3(a)所示，通过比较试样金相组织与评级图，得到试样球化等级2级，石墨大小6级，金相组织为铁素体+珠光体(35%)+石墨，如图3(b)所示。

对球墨铸铁转向节与45钢锻件转向节的拉伸性能进行测试，结果如表1所示。二者强度相当，抗拉强度仅相差19 MPa，规定非比例延伸强度仅差2 MPa，45钢

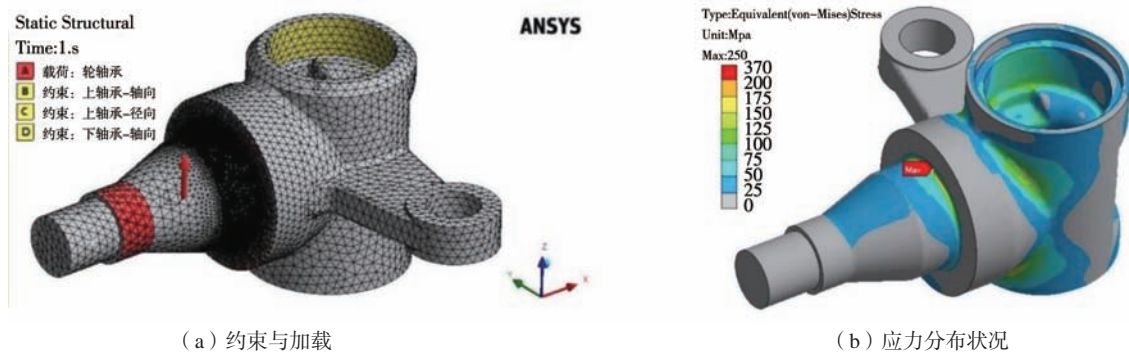


图2 现结构应力仿真

Fig. 2 Stress simulation of current structure

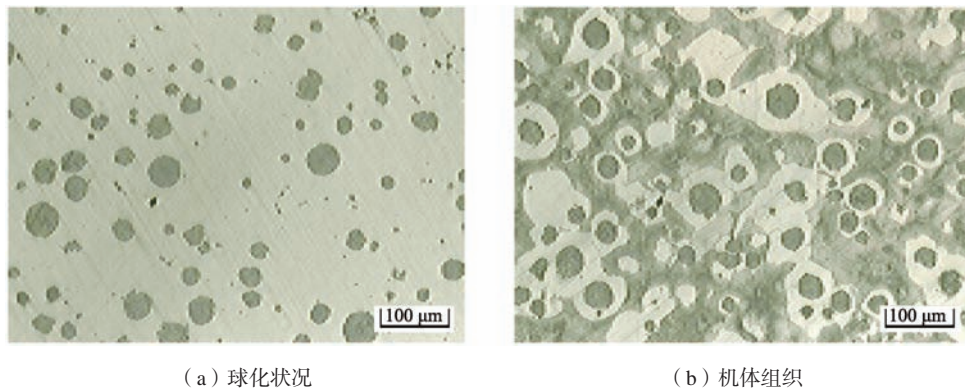


图3 球墨铸铁QT600-3转向节铸件金相图

Fig. 3 Metallographs of QT600-3 ductile iron steering knuckle casting

表1 样品拉伸性能
Tab. 1 Tensile properties of samples

材质	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A /%
45钢锻件	766	512	19.5
QT600-3铸件	785	510	11.5

锻件断后伸长率相较QT600-3铸件大8%，虽然球墨铸铁材质铸件的韧性略逊于45钢锻件，但二者断后伸长率均 $\geq 5\%$ ，按屈服强度进行校核，45钢锻件转向节安全系数为 $512/250=2.048$ ，球墨铸铁转向节安全系数为 $510/250=2.04$ ，两者均大于2，满足理论设计要求。

2 球墨铸铁转向节跌落试验

常用跌落试验与弯曲疲劳试验验证叉车转向系统

的零部件（如：转向桥桥体、转向节和转向节臂等）的安全性和可靠性。其中跌落试验可验证转向节在颠簸路况、跌落等情况下的抗冲击性^[4]；弯曲疲劳试验可验证转向节在交变弯曲应力作用下抵抗材料疲劳破坏的能力。二者均为通过性试验，不妨先进行跌落试验，然后再进行弯曲疲劳试验。

2.1 首次跌落试验与试验结果

跌落试验分两次进行，每次试验均绕前桥中心线旋转规定角度，抬起车体（图4），第一次是将轮胎转至极限位置，第二次将轮胎保持在中间位置。在做好安全措施后释放车辆，使车辆自由下坠与地面碰撞，每次试验完成后对桥体、桥体附件及车架进行检查，观察是否出现裂纹、断裂，若出现变形，则测量变形



图4 首次跌落试验
Fig. 4 First drop test

量,若构成转向桥总成的任一零部件在跌落试验中失效,该转向桥总成就被认为不合格,只有在所有的零部件均通过连续两次试验后,转向桥总成才视为通过跌落试验。

第一次配装球墨铸铁转向节的转向桥跌落试验中将轮胎转至极限位置,试验完成后可观察到左转向节完好,转向节臂发生塑性变形,右转向节断裂,如图5所示。断裂截面位于转向节轴肩根部,呈45°斜面并有一定碎片散落。试验结果表明该转向节的轴肩根部应力大,受到冲击易于破坏。右侧转向节在第一次试验中破坏,因此不再进行第二次跌落试验。



(a) 左侧转向机构变形



(b) 右侧转向节轴肩根部断裂

图5 首次跌落试验结果
Fig. 5 First drop test results

2.2 结构改进后跌落试验与试验结果

为了降低转向节轴肩根部应力,在轴肩根部开设用于卸荷的退刀槽,见图6(a),它有利于应力分布趋于均匀,同样,经有限元仿真,局部峰值应力为

174 MPa,如图6(b)所示。

仿真结果表明,增设退刀槽后,轴肩根部的局部应力峰值由原来的250 MPa降至174 MPa(表2),应力集中系数由8.1降为5.8,可见应力集中现象有所改善,

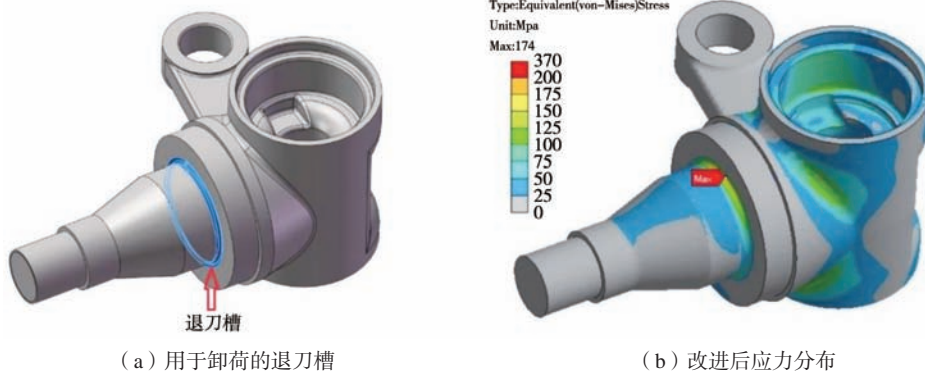


图6 结构改进与应力仿真

Fig. 6 Structure improvement and stress simulation

表2 结构改进前后应力对比

Tab. 2 Stress comparison before and after structural improvement

结构	局部峰值应力/MPa	应力集中系数
原始结构	250	8.1
改进结构	174	5.8

因此结构改进后的转向节抗冲击性能有所提高。

增加退刀槽后的转向节装车进行两次跌落试验,转向桥未见明显变形及裂纹、转向功能正常、各螺栓处无松动且各零部件变形在许用范围内。

3 球墨铸铁转向节弯曲疲劳试验

为了确保叉车行驶的可靠性与安全性，有必要对叉车转向桥及其零部件的疲劳可靠性进行分析。考虑转向桥与零部件间相互影响，疲劳除与载荷、尺寸公差和应力集中系数等因素相关外，还与装配质量等有关。

为得出正确的结论，将球墨铸铁转向节及其他转向桥零部件装配为转向桥总成后进行疲劳试验，在转向桥总成的寿命周期内对球墨铸铁转向节进行可靠性评价^[5]。

借鉴商用车驱动桥行业标准中对于驱动桥桥壳垂直弯曲疲劳试验的方法^[6]，利用液压疲劳试验机施加脉动载荷，施加等幅垂直载荷进行平面三点弯曲疲劳试验。因叉车加载、卸载频繁，工况恶劣，将荷重上限放大至叉车整机无负荷时后轮荷重的3倍，取9 000 kg，试验频率设置为2 Hz，支撑间距为叉车转向轮距970 mm，加载间距为桥体承载宽度289 mm，加载次数为三十万次，加载装置如图7所示。完成三十万次加载后，检查转向桥体与球墨铸铁转向节未发现断裂现象，相关零部件变形均在许用范围内。试验结果表明球墨铸铁转向节的可靠性是有保障的，具有足够的

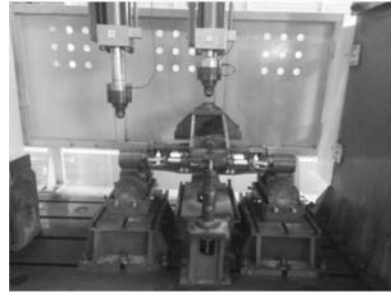


图7 疲劳试验约束及加载装置

Fig. 7 Fatigue test constraints and loading conditions

耐久性能。

4 结语

以叉车转向节为研究对象，结合应力有限元仿真与跌落试验，对球墨铸铁转向节进行结构改进，使其具备足够的抗冲击性能；利用驱动桥垂直弯曲疲劳试验的方法，考察转向桥寿命周期内球墨铸铁转向节的抗疲劳性能，证明采用QT600-3球墨铸铁铸造的代替锻件45钢锻造的叉车转向节符合技术要求，为前者的推广应用提供了依据。

参考文献:

- [1] 房贵如, 王云昭. 现代球墨铸铁的诞生应用及发展趋势 [J]. 机械工艺师, 2000, 23 (6): 13-15.
- [2] 王泽华, 徐飞龙, 张欣, 等. 关于球墨铸铁球化率评定方法的初步探讨 [J]. 铸造, 2017, 66 (4): 348-354.
- [3] 马艳东, 李松杰, 杨林, 等. 发动机缸套用球墨铸铁的组织与铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1505-1510.
- [4] 赵子文, 赵永刚, 张冰琦, 等. 叉车转向桥跌落实验及仿真研究 [J]. 安徽建筑大学学报, 2021, 29 (6): 42-48.
- [5] 吴跃成. 驱动桥疲劳可靠性分析与试验方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [6] 全国汽车标准化技术委员会. 商用车驱动桥总成: QC/T 533—2020 [S]. 北京: 北京科学技术出版社, 2021.

Demonstration Research of Ductile Iron Applied to Steering Knuckle of Counterbalanced Internal Combustion Forklift

YU Yue¹, GUO Shun², SHI Yun³, GENG Shu-wei⁴

(1. Anhui Heli Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China; 2. Anqing Heli Axle Co., Ltd., Anqing 246001, Anhui, China; 3. Hefei Casting and Forging Factory, Hefei 230601, Anhui, China; 4. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract:

When mass production of complex shape workpiece is carried out, casting is considered to be the most efficient and lowest cost manufacturing method on condition of meeting the performance requirements. In this research, the stress distributions of forklift steering knuckle forged by 45 steel and cast by ductile iron were simulated and analyzed, respectively, and the tensile tests were carried out. The results show that the tensile strengths are 766 MPa and 785 MPa, and the safety factors are 2.048 and 2.04, respectively. The feasibility of using QT600-3 ductile iron casting in place of 45 steel forging in the production of forklift steering knuckle is verified through opening a tool withdrawal groove used to unload at the root of shaft shoulder and conducting the drop and fatigue reliability tests, respectively.

Key words:

forklift steering knuckle; ductile iron; 45 steel forging; tensile property; impact resistance; fatigue resistance