

商用车球墨铸铁 V 型推力杆 结构设计与开发

吕高伟¹, 王海啸¹, 丛建臣^{1, 2}, 丛子凌³, 吕世杰², 刘凡伟², 倪培相², 张少军⁴

(1. 山东理工大学, 山东淄博 255000; 2. 天润工业技术股份有限公司, 山东威海 264400;
3. 山东威高集团医用高分子制品股份有限公司, 山东威海 264400; 4. 威海市文登技师学院, 山东威海 264400)

摘要: 针对传统商用车V型推力杆的制造工艺存在工序繁多, 生产周期长及成本高等问题, 提出了以铁代钢的技术方案, 成功开发了商用车铸态QT700-6球墨铸铁V型推力杆。球墨铸铁V型推力杆采用H型整体式结构, 与钢结构推力杆相比, 球墨铸铁V型推力杆能够有效避免内应力的产生, 同时重量降低9%, 通过有限元静力学分析发现在相同工况下球墨铸铁V型推力杆的最大应力低于钢结构V型推力杆的最大应力, 验证了球墨铸铁V型推力杆的可靠性。对球墨铸铁V型推力杆进行静态台架试验, 对比试验结果与仿真结果, 发现有7个应力误差值在15%以内。在完成纵向循环加载20万次后, 球墨铸铁V型推力杆未出现失效问题, 满足疲劳台架试验要求。

关键词: 球墨铸铁; V型推力杆; 结构设计; 性能分析

V形推力杆作为商用车平衡悬架的关键零部件之一, 用于传递车桥与车架之间的纵向载荷、侧向载荷及相应力矩, 保持车辆的稳定性^[1-3]。目前, 我国传统商用车V型推力杆由圆管、上球座(V型端头)和直球座组成, 球座和圆管均为碳钢结构, 上球座与车桥相连接, 两个直球座与车架连接^[4]。商用车V型推力杆的主要制造工艺有以下三种^[5]: 第一种是锻造工艺结合热铆接工艺, 球座端头采用锻造工艺, 圆管与球座端头的四个接口均采用热铆接工艺, 这种成形结构材料利用率不高, 在热压和冷却过程中精度会降低, 且铆接位置存在一定的内应力。第二种是锻造工艺、热铆接工艺及摩擦焊工艺三者相结合, 球座端头采用锻造工艺, 圆管与上球座的两端采用热铆接工艺, 两个直球座端头与圆管采用摩擦焊工艺。这种成形结构在一定程度上减轻了推力杆的重量, 但生产工艺复杂, 成本较高。第三种为锻造工艺结合摩擦焊工艺, 圆管与球头端的四个接口均采用摩擦焊工艺, 但工艺流程长, 需要四次摩擦焊接成形, 且焊接部位质量稳定性差及存在应力集中现象, 从而增加了工艺的复杂性和生产成本。

球墨铸铁在保持高强度和高韧性的同时, 还具有出色的铸造性能、优异的耐磨性和减振能力, 以及更低的生产成本, 表明其作为推力杆材料的巨大潜力。此外, 球墨铸铁密度约为 7.1 kg/cm^3 , 比锻钢材料低8%, 质量较轻, 这一特性有利于实现商用车零部件轻量化发展要求^[6]。因此, 本文采用以铁代钢, 以铸代锻的一体化成形方法, 开发性能良好稳定, 满足商用车低成本和轻量化发展需求的球墨铸铁推力杆, 具有极其重要的意义, 为其他产品一体化铸造提供一定参考。

1 V型推力杆结构设计

采用一体化成形设计, 杆体与球座为整体结构, 杆身为H形截面, 两边的筋一直过渡到球座末端, 杆体截面呈上下对称分布, 此外, 在现有的标准中, 球墨铸铁材料没有H型截面相关的设计原则。因此, 截面尺寸的设计参照国标GB/T 50017—

作者简介:

吕高伟(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为铸造工艺。
E-mail: 18763251735@163.com

通信作者:

丛建臣, 男, 教授。E-mail: jhcong@tianrun.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)12-1736-08

收稿日期:

2024-07-16 收到初稿,
2024-10-13 收到修订稿。

2017《钢结构设计标准》中针对轴心受压构件中宽厚比的设计原则^[10]。中间杆体的截面不能超过两端的球铰的尺寸，只能在一定的范围内设计。在满足传统推力杆刚度性能和疲劳性能的基础上，应最大程度降低质量，杆体内侧筋的高度适当降低，以达到减重的目的。综合考虑，商用车球墨铸铁V型推力杆的三维模型及杆身截面如图1所示，杆身截面相关参数如表1所示。

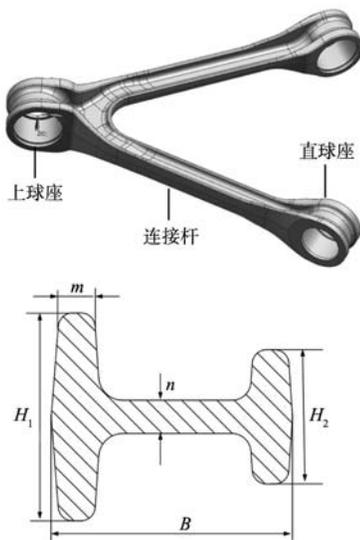


图1 球墨铸铁V型推力杆

Fig. 1 Ductile iron V-shape thrust rod

表1 球墨铸铁V型推力杆的杆体截面相关参数

Table 1 Relevant parameters of the section of ductile iron V-shape thrust rod

项目	左侧翼 缘高度 H_1/mm	右侧翼 缘高度 H_2/mm	翼缘顶 部厚度 m/mm	腹板 厚度 n/mm	截面 宽度 B/mm
数值	43.8	28.3	7.7	7	51.1

H型截面面积大于圆管截面，造成球墨铸铁推力杆杆身的质量增加，但是钢结构V型推力杆的球头端为实心结构以及上球座端头需与圆管端头部位重合，造成质量较重。综合计算，与钢结构V型推力杆相比，球墨铸铁V型推力杆质量降低了9%。H型截面的抗弯曲和抗拉压的能力均优于圆管结构，同时便于铸造成形。球墨铸铁推力杆采用铸造工艺代替了摩擦焊和铆接工艺，简化了工艺流程，提高了生产效率。另外，铸造原材料低廉，工艺简单，能够有效降低生产成本。

2 球墨铸铁V型推力杆有限元分析

2.1 有限元模型的建立

2.1.1 网格划分

球墨铸铁V型推力杆总成由推力杆本身、挡圈、

两侧端盖、橡胶体及球铰芯轴组成，几何模型如图2所示。将上述推力杆总成几何模型导入HyperMesh软件中划分网格。橡胶体、端盖和挡圈网格单元为C3D8R，V型推力杆和球铰芯轴划分网格的单元类型为C3D10M，网格单元总数为1 944 458，节点总数为2 872 579。

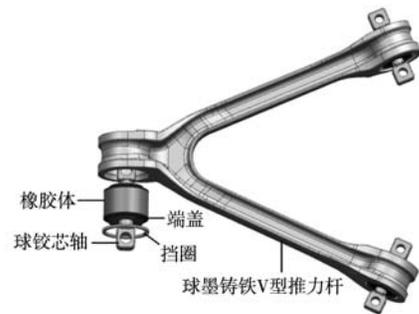


图2 球墨铸铁V型推力杆总成几何模型

Fig. 2 Geometric model of ductile iron V-type thrust rod assembly

2.1.2 材料属性定义

将划分好网格的inp文件导入ABAQUS仿真软件中，V型推力杆本身为球墨铸铁材质，球铰芯轴、端盖和挡圈均采用合金钢材质，材料参数设置为一致。相关材料的参数如表2所示。橡胶属于超弹性材料，其密度为 1.2 g/cm^3 ，定义方式采用三阶Ogden橡胶本构模型。

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

材料	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	杨氏模量/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	泊松比
球墨铸铁	7.3	1.731 05	0.3
合金钢	7.85	2.1105	0.3

2.1.3 约束及载荷条件

橡胶体、两侧端盖与球铰芯轴之间属于硫化粘结关系，不允许有相对运动，因此定义为绑定约束。而V型推力杆与橡胶体、端盖、挡圈及端盖与挡圈之间允许相对滑动，定义为接触约束，设置摩擦系数为0.001。根据V型推力杆的实际受力，设计了四种工况：工况一，V型推力杆承受径向拉载荷，载荷为150 kN；工况二，V型推力杆承受径向压载荷，载荷为150 kN；工况三，V型推力杆承受复合载荷（同时承受径向拉载荷和轴向载荷），轴向载荷为150 kN；工况四，V型推力杆承受扭转载荷，扭转载荷为 $400 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。为了方便加载，在上球座的球铰中心位置创建一个耦合点，将V型推力杆在工作中承受的载荷施加在定义的耦合点上。根据V型推力杆的实际情况来定义边界条件，在直球座的球铰芯轴螺栓孔处设置约束，如图3

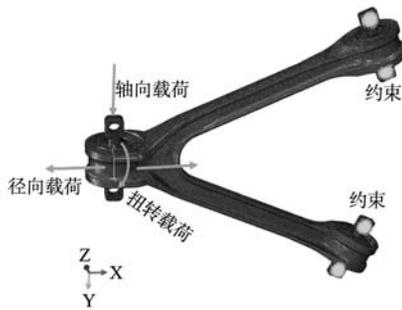


图3 球墨铸铁V型推力杆约束及加载示意图

Fig. 3 The constraint and loading diagram of ductile iron V-shape thrust rod

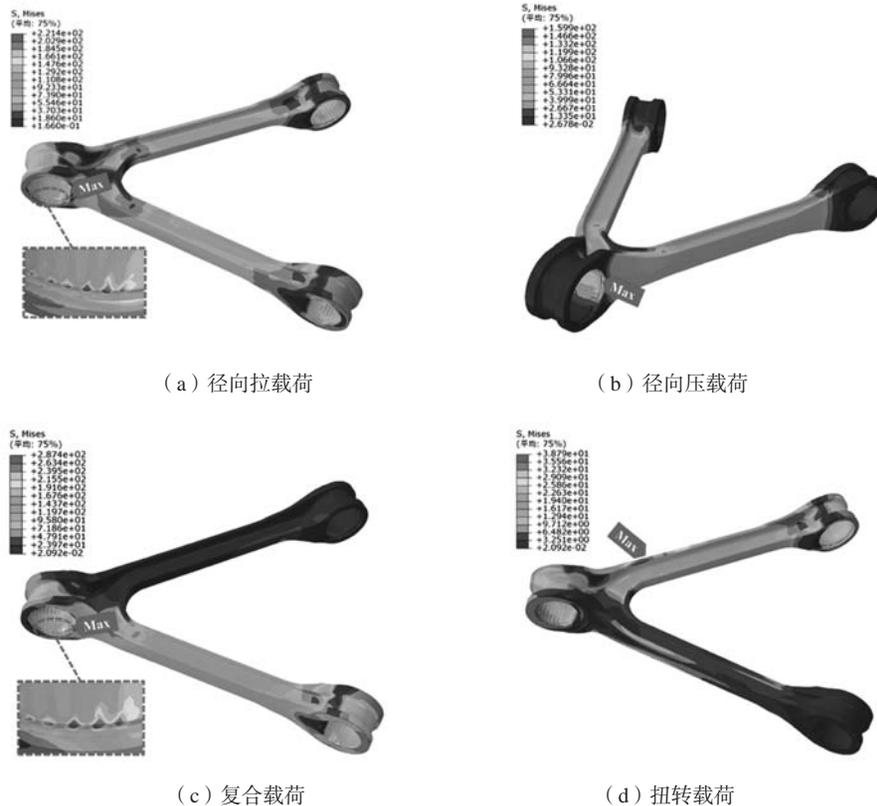


图4 球墨铸铁V型推力杆在不同工况下的Mises应力云图

Fig. 4 Mises stress nephogram of ductile iron V-shape thrust rod at different working conditions

荷时，最大应力值为159.9 MPa，出现在上球座的挡圈槽处。V型推力杆受到复合载荷时，最大应力值为287.4 MPa，同样位于上球座的挡圈槽内，两个杆身应力差异较大。V型推力杆受到扭转载荷时，最大应力值为38.79 MPa，位于杆体外侧的立筋位置。总的来说，在拉压载荷作用下球墨铸铁V型推力杆的H形杆身受力较小，最大应力均位于挡圈槽区域。

由于钢结构V型推力杆的球座和圆管在工艺上是采用摩擦焊和热铆接方法连接在一起的。因此，在静力学分析过程中球座和圆管当成一个整体来考虑。建立钢结构V型推力杆总成的几何模型，在相同的工况下，

所示。

2.2 静力学分析

本文重点分析在不同工况下球墨铸铁V型推力杆的强度，对推力杆总成中的橡胶体、芯轴、端盖及挡圈不作相应阐述，选择Von Mises应力来判断球墨铸铁V型推力杆的结构强度。

球墨铸铁V型推力杆应力结果如图4a-d所示。可以看出，V型推力杆受到径向拉载荷时，最大应力值为221.14 MPa，位于上球座挡圈槽区域，几何结构上的尖角造成微小的应力集中。V型推力杆受到径向压载

荷时，最大应力值为159.9 MPa，出现在上球座的挡圈槽处。V型推力杆受到复合载荷时，最大应力值为287.4 MPa，同样位于上球座的挡圈槽内，两个杆身应力差异较大。V型推力杆受到扭转载荷时，最大应力值为38.79 MPa，位于杆体外侧的立筋位置。总的来说，在拉压载荷作用下球墨铸铁V型推力杆的H形杆身受力较小，最大应力均位于挡圈槽区域。

钢结构V型推力杆的静力学仿真结果如图5所示。可以看出，钢结构V型推力杆受到径向拉载荷时，最大应力值为288.9 MPa，位于上球座型状截面突变处，几何结构的尖角导致应力集中；V型推力杆受到径向压载荷时，最大应力值为219.7 MPa，位于上球座A形结构横梁过渡区域；V型推力杆受到复合载荷时，最大应力值为403.6 MPa，位于上球座突变处；V型推力杆受到扭转载荷时，最大应力值为72.97 MPa，位于圆管与球头座接触位置。总的来说，前三个工况下钢结构V型推力杆的最大应力均在球头端区域。

表3展示了在不同工况下球墨铸铁V型推力杆和钢

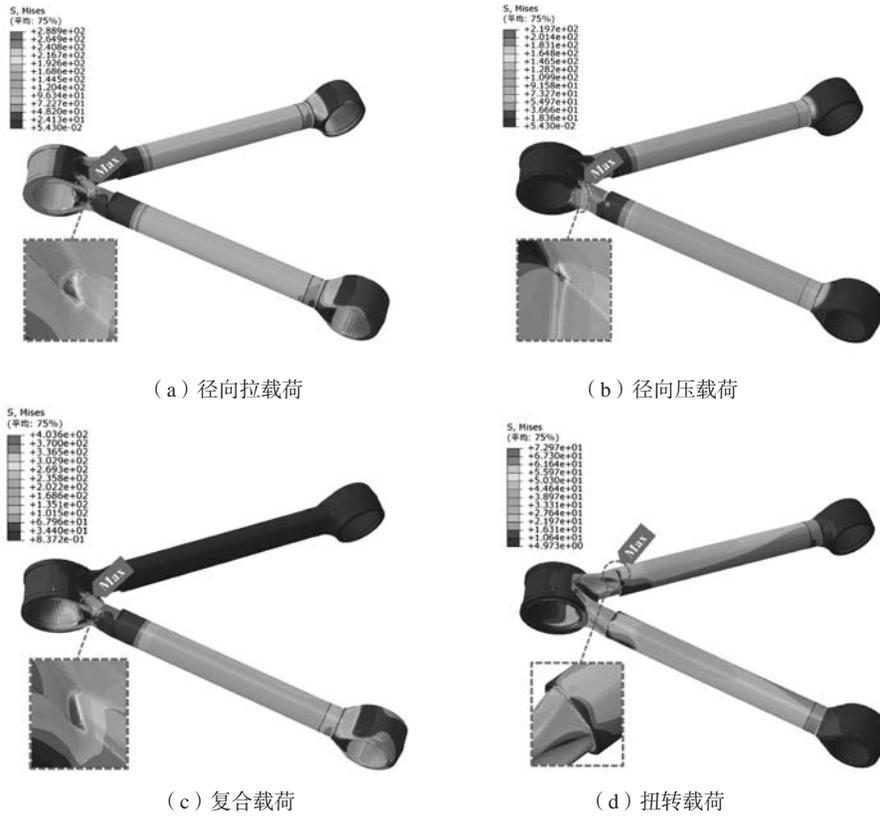


图5 钢结构V型推力杆在不同工况下的Mises应力云图

Fig. 5 Mises stress nephogram of steel structure V-type thrust rod at different working conditions

表3 不同材质V型推力杆应力对比结果
Table 3 Comparison results of stresses on steel V-type thrust rods made of different materials

项目	最大应力/MPa			
	径向 拉载荷	径向 压载荷	复合 载荷	扭转 载荷
球墨铸铁V型推力杆	221.4	159.9	287.4	38.79
钢结构V型推力杆	288.9	219.7	403.6	72.97

结构V型推力杆最大应力的对比，可以看出，在相同的工况下，球墨铸铁V型推力杆的最大应力均小于钢结构V型推力杆的最大应力，证明球墨铸铁V型推力杆的结构可靠性。

根据静力学分析结果，为了确保商用车V型推杆的可靠性，并使其最大应力值远低于材料的许用应力。因此，本文选择V型推力杆的材质为铸态高强韧QT700-6。QT700-6属于珠光体型球墨铸铁，其基体组织主要为珠光体和少量铁素体，适用于生产对强度、硬度以及一定程度韧性有较高要求的零件。铸态珠光体球墨铸铁无需进行正火热处理，从而降低能源消耗和生产成本，缩短生产周期，同时避免热处理可能引起的变型和氧化问题，符合铸造行业对环境保护与资源节约的绿色发展理念。QT700-6的力学性能如表4所示。

表4 QT700-6的力学性能
Table 4 Mechanical properties of QT700-6

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HBW
>700	>420	>6	230~290

3 球墨铸铁V型推力杆制造及台架试验

3.1 球墨铸铁V型推力杆的试制

造型线采用湿型砂静压造型线，感应电炉熔炼，采用冲入法进行球化处理，球化除渣后导入浇注机，由浇注机自动浇注，浇注过程采用随流孕育，浇注温度控制在1 380~1 400 ℃，铁液成分控制范围如表5所示。生产的球墨铸铁V型推力杆毛坯如图6所示。通过宏观检查，发现试制的V型推力杆铸件外观光整，无表面气孔，夹杂等宏观缺陷。根据AST E446检测标准，对球墨铸铁V型推力杆毛坯进行超声波探伤检测，内部无缩松、缩孔等缺陷。

3.2 金相组织检测分析

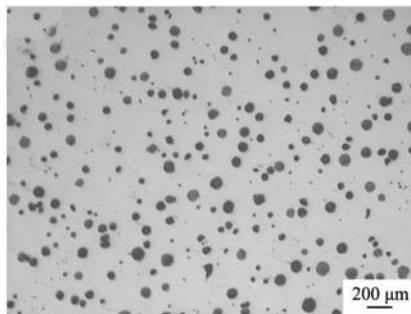
为了分析V型推力杆铸件的微观组织特征，从同批次生产的铸件中随机抽取1个铸件做金相检测。根据

表5 QT700-6的化学成分
Table 5 Chemical composition of QT700-6

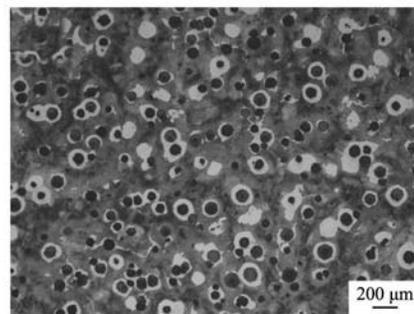
C	Si	Mn	S	P	Mg	Cr	Cu	Sn	$w_B/\%$
3.7~3.9	2.3~2.6	0.3~0.5	0.006~0.02	<0.05	0.04~0.05	<0.08	0.7~0.9	0.01~0.02	



图6 V型推力杆铸件毛坯展示
Fig. 6 V-shape thrust rod casting blank display



(a) 石墨形态



(b) 基体组织

图7 V型推力杆铸件微观组织

Fig. 7 Microstructure of V-shape thrust rod casting

部位取样并制备拉伸试样和硬度试样，试验条件为室温，拉伸试验所使用的设备为E45微机控制电子万能试验机以及硬度试验使用HBD-3000A数显布氏硬度测量仪。表6是力学性能测试结果，球墨铸铁V型推力杆铸件的平均抗拉强度为764 MPa，平均屈服强度为439 MPa，伸长率最高为7.2%，硬度HBW为249~259，试验结果达到了QT700-6的高强韧性要求。

表6 试样力学性能
Table 6 Mechanical properties of samples

试样编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HBW
1	765	440	6.9	253
2	780	443	7.2	249
3	748	434	6.7	259

3.4 静态台架试验测试分析

为了验证所建立有限元模型的准确性，需要进行球墨铸铁V型推力杆静态台架试验。试验采用的电阻应

GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》要求，对本体试样打磨，抛光后，利用OLYMPUS型金相显微镜观察。图7为V型推力杆铸件本体的典型显微组织，可以看出，石墨球细小均匀，球化率为85%，石墨大小等级为6级，珠光体含量为80%，均匀细小的石墨球有效增强了抵抗裂纹扩散的能力，为铸态QT700-6球墨铸铁的高强韧性奠定了基础。

3.3 力学性能测试分析

为了检测铸件的力学性能，在铸件本体的上球座

变片为金属箔式单向应变片，其电阻值为250 Ω，测量电路采用1/4桥。由于球头外表面为圆形，不利于应变片的粘贴。因此，本次静态试验选择的9个贴片点在杆体表面和上球头座侧面。具体粘贴位置见图8。

本次试验所使用的设备为MTS六通道协调加载试验装置，应变数据采集器为德国HBM坚固型数据采集系统，如图9所示。静态台架试验的约束条件为利用螺栓将直球座芯轴与地面铁平台固定，通过螺栓将上球座芯轴与压板固定，同时为了保证加载过程的稳定，采用四立柱导向工装进行固定。加载步骤分为两个阶段，第一阶段为竖直方向对上球座芯轴缓慢施加拉力，保持阶段速度为5 000 N/s，当拉载荷增大到150 kN时停顿5 s，然后缓慢卸载。第二阶段为竖直方向对上球座芯轴施加压力，保持阶段速度为5 000 N/s，当压载荷增大到150 kN时停顿5 s，然后缓慢卸载，记录9处单向应变片的应变。

图10展示了球墨铸铁V型推力杆的各应变片随时间变化曲线。根据各应变曲线的峰值，确定各应变片的

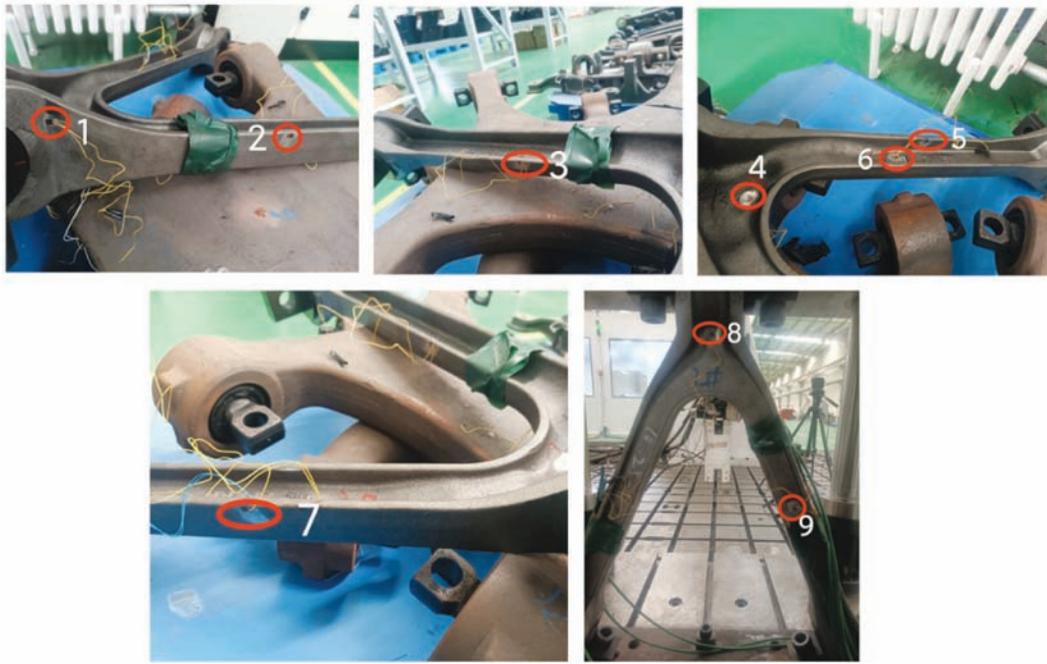


图8 球墨铸铁V型推力杆表面应变片布置
Fig. 8 Surface strain gauge layout of ductile iron V-shape thrust rod



(a) MTS六通道协调加载装置 (b) HBM坚固型数据采集系统

图9 球墨铸铁V型推力杆静态台架试验
Fig. 9 Static test of ductile iron V-shape thrust rod

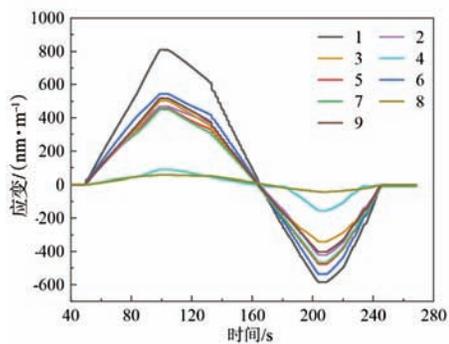


图10 各应变点的应变曲线
Fig. 10 The strain curves at each strain point

最大应变值，可以看出，贴片点1的应变值最大，贴片点8和贴片点4的应变值较小。此外，在拉载荷作用下球墨铸铁V型推力杆H型杆身处贴片点的应变值差异较小。

将得到的应变值转化为相应的应力值，考虑到静力学仿真结果Mises应力为正值，将压载荷作用下各贴片点的应变值取为正数。单向应力与应变的转换公式如式(1)所示^[12]。

$$\sigma = \varepsilon E \quad (1)$$

式中： σ 为应力； ε 为应变； E 为弹性模量，球墨铸铁取178 GPa。

依照静态试验所粘贴应变片位置, 计算得到相同位置处球墨铸铁V型推力杆仿真应力结果, 并对比其误差, 如表7和表8所示。可以看出, 在拉载荷作用下, 各贴片点的试验应力值与仿真应力值的误差均在15%以内, 在压载荷作用下, 有7个贴片点的试验应力值与仿真应力值的误差在15%以内, 基本满足有限元分析的精度要求。

表7 拉载荷作用下贴片点试验应力值与仿真应力值比较
Table 7 Comparison of test stress and simulation stress at patch point under tensile loading

测点编号	试验值/MPa	仿真值/MPa	相对误差/%
1	134.8	115.3	14.5
2	83.3	75.2	9.7
3	89.2	81.8	8.3
4	16	14.4	10
5	81.2	75.4	7.1
6	96.8	85.7	11.5
7	80.3	75.2	6.4
8	10.9	12.3	13.8
9	92	83.3	9.5

表8 压载荷作用下贴片点试验应力值与仿真应力值比较
Table 8 Comparison of test stress and simulation stress at patch point under compressive loading

测点编号	试验值/MPa	仿真值/MPa	相对误差/%
1	101.1	78.9	21.9
2	74.9	79.9	6.8
3	62.7	71.6	14.2
4	27.4	24.1	12
5	84.6	76.8	9.2
6	95.4	85.7	10.2
7	79	85.8	8.6
8	8.3	9.8	18.1
9	71.6	80.5	12.4

3.5 疲劳台架试验测试分析

V型推力杆是连接车桥和车架的关键部件, 受力情

况比较复杂, 在长时间应力反复循环作用下会发生疲劳断裂的危险。因此, 对球墨铸铁V型推力杆进行相关疲劳试验是十分必要的。疲劳试验设备与静态试验设备相同, 如图9a所示。由于载荷谱很难在台架试验中复现, 故球墨铸铁V型推力杆的疲劳试验被设计为对样件施加纵向循环载荷。具体地, 球墨铸铁V型推力杆承受垂直方向的加载力为 ± 150 kN, 频率为1.5 Hz, 载荷波形为正弦波, 试验在室温下进行。

球墨铸铁V型推力杆台架疲劳试验数据如表9所示。可以看出, 球墨铸铁V型推力杆在完成纵向循环加载20万次后未表现出失效问题, 且刚度变化率均保持在20%的范围内, 试件合格, 满足疲劳台架试验要求。

表9 球墨铸铁V型推力杆总成台架疲劳试验数据
Table 9 Bench fatigue test data of ductile iron V-shape thrust rod assembly

编号	工况/kN	刚度变化率/%	循环次数/万次	试验后产品外观状态
1	纵向 ± 150	11.8	20	完好
2	纵向 ± 150	16.1	20	完好
3	纵向 ± 150	9.4	20	完好

4 结束语

(1) 设计了一种H型整体式球墨铸铁V型推力杆, 与钢结构推力杆相比, 球墨铸铁V型推力杆能够避免内应力的产生, 同时质量降低9%, 通过静力学分析发现, 在相同工况下球墨铸铁V型推力杆的最大应力低于钢结构V型推力杆的最大应力。

(2) 对球墨铸铁V型推力杆进行静态台架试验, 通过对比试验结果与仿真结果, 在压载荷作用下, 发现有7个应力误差值在15%以内, 仿真模型基本满足精度要求。

(3) 对球墨铸铁V型推力杆总成进行疲劳台架试验, 完成纵向循环加载20万次后, 球墨铸铁V型推力杆未出现失效问题, 试件合格, 满足试验要求。

参考文献:

- [1] 潘博. 重卡用推力杆挡圈脱落机理分析及其结构优化设计 [D]. 北京: 清华大学, 2020.
- [2] FENG Guoyu, SHI Kuwen, KE Jun, et al. Analysis of commercial vehicle thrust rod load simulation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 713: 159-163.
- [3] 陈柳青, 张善昌, 薛艺, 等. 某车型下推力杆结构及疲劳仿真分析 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(19): 77-80.
- [4] 冯国雨. 商用车推力杆性能优化与疲劳寿命预测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [5] 翁明武, 徐强, 刘飞. 陕西德仕汽车部件(集团)有限责任公司一种V型推力杆的制造工艺: CN202011176111.X [P]. 2021-02-09.
- [6] 赵文涛, 徐兴有, 魏心海, 等. H型整体式铸锻成型推力杆总成设计分析 [J]. 重型汽车, 2022(3): 20-21.

- [7] ZHAN Hongyi, ZENG Guang, WANG Qigui, et al. Unified casting (UniCast) aluminum alloy—a sustainable and low-carbon materials solution for vehicle lightweighting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 154: 251–268.
- [8] 张俊荣, 张排排, 唐春红, 等. 轻量化铝合金推力杆结构设计及其性能研究 [J]. *汽车工艺与材料*, 2021 (8): 13–17.
- [9] 张华. 城市轨道交通车轮用球墨铸铁材料制备及性能研究 [D]. 上海: 上海大学, 2019.
- [10] GB T50017-2017, 钢结构设计标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] DAL H, AÇIKGÖZ K, BADIENIA Y. On the performance of isotropic hyperelastic constitutive models for rubber-like materials: A state of the art review [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2021, 73 (2): 020802.
- [12] 宾凌. 基于组合应变测试的重卡横向推力杆疲劳分析与结构改进 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

Design and Development of Ductile Iron V Shape Thrust Rod of Commercial Vehicle

LÜ Gao-wei¹, WANG Hai-xiao¹, CONG Jian-chen^{1,2}, CONG Zi-ling³, LÜ Shi-jie², LIU Fan-wei², NI Pei-xiang², ZHANG Shao-jun⁴

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. Tianrun Industry Technology Co., Ltd., Wendeng 264400, Shandong, China; 3. Shandong Weigao Group Medical Polymer Products Co., Ltd., Wendeng264400, Shandong, China; 4. Weihai Wendeng Technician College, Wendeng 264400, Shandong, China)

Abstract:

Aiming at the traditional manufacturing process of commercial vehicles V shape thrust rod, which has the problems of complicated processes, long production cycle and high cost. In this paper, the technical scheme of replacing steel with iron is proposed, and the as-cast QT700-6 ductile iron V-shaped thrust rod of commercial vehicle is successfully developed. The V-shape thrust rod of ductile iron adopts H-shape integral structure. Compared with the steel structure thrust rod, the V-shape thrust rod of ductile iron can effectively avoid the generation of internal stress and reduce the weight by 9%. Through finite element static analysis, it was found that the maximum stress of ductile iron V type thrust rod is lower than that of steel structure V type thrust rod under the same working conditions, which verifies the reliability of ductile iron V type thrust rod. The static bench test of the ductile iron V type thrust rod was carried out. Comparing the test results with the simulation results, it was found that there were 7 stress error values within 15%. After completing the longitudinal cyclic loading 200 000 times, the ductile iron V-type thrust rod has no failure problem and meets the requirements of fatigue bench test.

Key words:

ductile iron; V-shape thrust rod; structural design; performance analysis