

重卡制动鼓失效分析及铸造工艺研究

穆彦青, 邓 晗, 海丰龙, 潘安霞

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 通过对重型载货汽车失效制动鼓进行裂纹失效及热-力耦合仿真分析, 发现HT250材料制动鼓由于实际工况最高应力值远大于其疲劳极限经验值, 而产生热疲劳裂纹开裂失效; 为此, 将制动鼓材料优化为RT450, 同时进行了铸造工艺优化, 获得了内部质量优异的铸件, 蠕铁制动鼓服役寿命超过12个月。

关键词: 重型汽车; 制动鼓; 失效分析; 铸造工艺

制动系统对汽车的安全行驶起着决定性作用, 而制动器直接决定制动效果, 其性能好坏对车辆及人身的安全有很大影响。制动鼓作为一种常见的制动器, 因其结构简单紧凑, 成本低廉, 制动力矩大, 广泛应用于大型载货汽车领域。目前国内外主要使用高强度灰铸铁作为制备重型载货汽车制动鼓的材料, 但在使用过程中, 制动鼓一般是在强摩擦、冷热交替较为复杂的恶劣环境中工作, 产生热疲劳裂纹而导致制动鼓失效, 严重影响对车辆的安全行驶^[1]。

1 制动鼓失效分析

如图1所示, 重型载货汽车制动鼓材料为HT250, 在服役过程中发生开裂失效, 服役时间约为2个月, 制动鼓存在径向裂纹, 垂直于制动摩擦方向。如图2所示, 选取制动鼓较大裂纹切割取出, 并经人工打开, 断面呈深灰色, 表面存在锈蚀物, 裂纹最深处约16 mm, 根据断口纹路聚敛方向判断, 裂纹源位于制动鼓内圈制动面, 裂纹扩展方向中白色箭头。



图1 HT250制动鼓
Fig. 1 HT250 brake drum

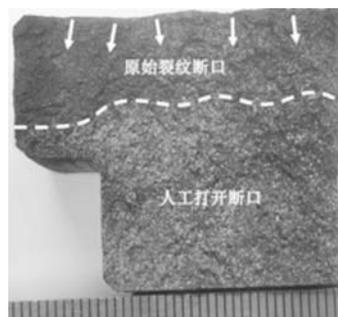


图2 裂纹断口宏观分析
Fig. 2 Macro analysis of crack fracture

根据GB/T 7216—2009《灰铸铁金相检验》评定, 失效制动鼓裂纹截面金相组织石墨以粗大A型石墨为主, 石墨长度级别为3级, 如图3所示, 基体为珠光体+约0.5%的铁素体, 未见硬化相, 如图4所示。对失效制动鼓进行力学性能测试, 其抗拉强度 R_m 为272 MPa, 规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 为208 MPa, 断后伸长率 A 为1%, 符合GB/T 9439—2010《灰铸铁件》中技术规范。

从裂纹截面微观形貌观察, 裂纹曲折, 尾部细小, 两侧耦合性较好, 裂纹主要

作者简介:

穆彦青(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铸造材料及工艺技术。电话: 18761187689, E-mail: muyanqing209@163.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)11-1422-04

收稿日期:

2023-01-23 收到初稿,
2023-04-03 收到修订稿。



图3 基体石墨微观形貌

Fig. 3 Graphite micromorphology of the matrix

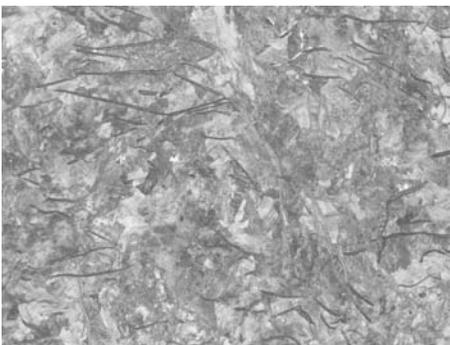


图4 基体金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of the matrix

沿片状石墨扩展，具有疲劳裂纹特征（见图5）。通过对制动鼓原始裂纹起始处进行能谱分析，除基体元素Fe、Si、Mn等，该处O元素含量较高（见图6），这与原始裂纹断面存在锈蚀有关，裂纹源处未见夹渣类缺陷元素特征。

从失效制动鼓原始裂纹起始处和尾部处金相组织分析，制动鼓在疲劳载荷作用下，由于裂纹尖端应力较小，且影响区也很小；疲劳裂纹优先从表面露头的石墨片萌生，并沿石墨片方向扩展（或通过石墨片中间，或沿石墨-基体界面），裂纹离开石墨或将离开石墨时会继续沿珠光体基体条带界面（铁素体/渗碳体界面）或晶界方向扩展（见图7、8）。其与过载开裂的

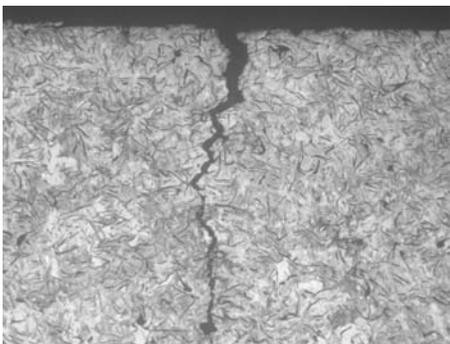


图5 原始裂纹金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of original crack

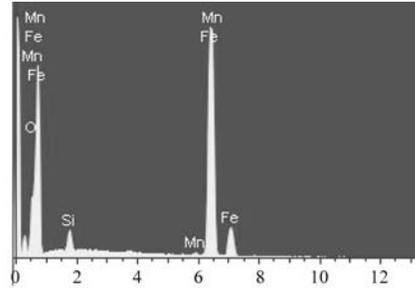


图6 原始裂纹起始处能谱分析

Fig. 6 Energy spectrum analysis of original crack initiation



图7 原始裂纹起始处金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of original crack initiation

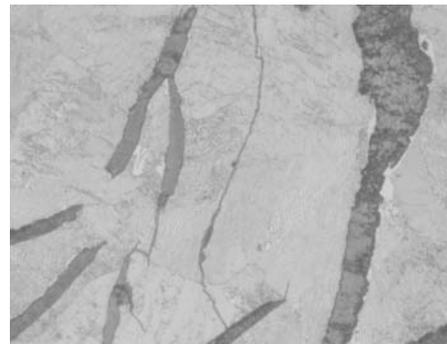


图8 原始裂纹尾部处金相组织

Fig. 8 Metallographic structure at the tail of the original crack

区别为裂纹扩展至石墨尾端与基体交界处是否存在明显的换向，在过载应力作用下，裂纹尖端应力较大，其应力影响区大于石墨间的距离；在高应力作用下，裂纹沿石墨片方向扩展（或通过石墨片中间，或沿石墨-基体界面），裂纹离开石墨或将离开石墨时会继续保持原有方向扩展^[2]。

综上所述，失效制动鼓内圈制动面裂纹符合疲劳开裂特征，疲劳源位于制动鼓内圈制动摩擦面，疲劳源处未见疏松和夹渣缺陷。该制动鼓裂纹沿径向扩展，裂纹附近及内圈制动面存在多处径向疲劳裂纹，与其制动摩擦方向垂直，由此判定，失效制动鼓开裂为热疲劳裂纹。结合其服役时间均约为2个月左右判断，该制动鼓设计强度不足是导致其疲劳寿命较短的

主要原因；此外，失效制动鼓组织中石墨粗大，会增加其表面应力集中系数，也会增大其发生疲劳开裂的风险。

2 制动鼓材料优化

制动鼓在实施制动过程中，会产生大量的热，制动鼓材料必须具有高的力学性能、导热性，还应有高的抗热疲劳强度。为进一步分析HT250制动鼓产生开裂失效的原因，对制动鼓运行工况进行了热-力耦合仿真分析，设定车辆超载总重为60 t，制动初速度为42 km/h，热循环末速度为21 km/h，初始温度为20 ℃。通过计算从而获得与实际运行情况相贴合的热-力耦合计算，HT250材料制动鼓在完成20次热循环和1次制动仿真试验后，随着制动次数的增加，制动鼓温度逐渐升高，最高温度达到275 ℃，制动鼓最高应力值为124 MPa，HT250材料的疲劳极限经验值为85 MPa，仿真得到的最大应力值远大于疲劳极限经验值，故判定HT250材料不能满足制动鼓实际工况应用。

蠕墨铸铁的石墨形态独特，主要以近似蠕虫状存在，同时还有少量球状和团絮状石墨；蠕虫状石墨介于球状和片状石墨之间，石墨端部多圆滑，承受应力时，应力集中相对较小，使得蠕墨铸铁强度高于灰铸铁，导热性能优于球墨铸铁，具有较好的抗热疲劳性能，是生产制动鼓的理想材料。为此，制动鼓材料由原来的HT250，优化为RT450，化学成分为（质量分数）：3.4%~3.6% C、2.4%~2.6% Si、0.5%~0.6% Mn、0.5%~0.7% Cu，材料微观组织蠕化率控制在70%以上，基体组织为珠光体和铁素体的混合组织，如图9所示。材料综合力学性能，如表1所示。

3 铸造工艺优化

采用呋喃树脂砂手工造型，原砂40/70目，树脂加入量1.0%~1.2%，固化剂加入量为树脂量的30%~50%。原工艺采用半封闭式浇注系统-底注工艺，一模两件

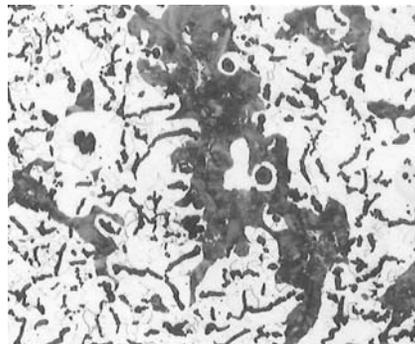


图9 RT450材料制动鼓微观组织

Fig. 9 Microstructure of RT450 material brake drum

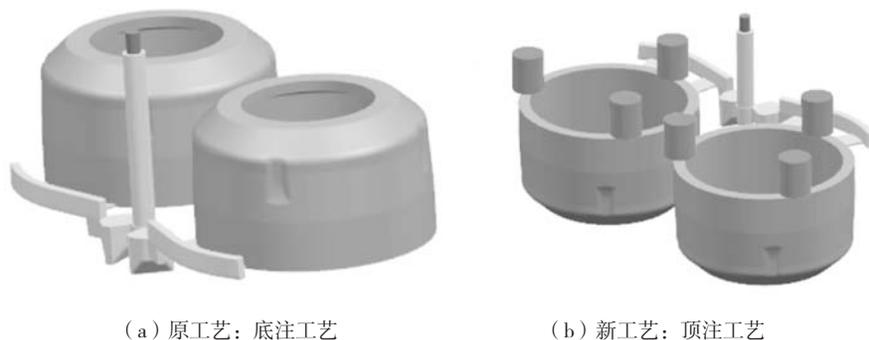
表1 制动鼓综合力学性能测试

Table 1 Comprehensive mechanical performance test of brake drum

材料	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%
RT450	461	361	2.5

（见图10a），优点为金属液充型时，由下而上，充型平稳，不易产生紊流，利于整个型腔中气体及金属液表面氧化夹渣的排出；但是由于金属液由下而上充满型腔，温度场由下而上温度递减，不利于设置补缩冒口对铸件进行补缩。为了提高铸件内部的致密性，设计了如图10b所示新工艺，经过对铸造工艺进行优化，由底注工艺优化为顶注工艺，虽然金属液充型过程从上而下易造成卷气的现象，但是由于温度场由下而上温度递增，进入金属液中的气体会迅速排出液体，进入型腔；通过在铸件顶部设计三个保温发热冒口，且将发热冒口顶部打通进行排气，不仅起到对铸件的补缩作用，且可起到排气、排渣的作用^[3-6]。

通过对原工艺和新工艺进行铸造仿真分析，可见采用半封闭式浇注系统-顶注工艺，在制动鼓端面通过均布设计三个保温发热冒口对制动鼓凝固过程进行补缩，根据缩松判据分析，铸件内部质量良好，无缩松风险，如图11所示。铸造工艺优化后，经样件试制、



(a) 原工艺：底注工艺

(b) 新工艺：顶注工艺

图10 铸造工艺

Fig. 10 Casting process

小批量生产，并对铸件进行了工业CT和超声波无损探伤，内部组织致密；并进行了批量装车验证，蠕铁制

动鼓服役寿命超过12个月，远超原服役时间（约为2个月）。

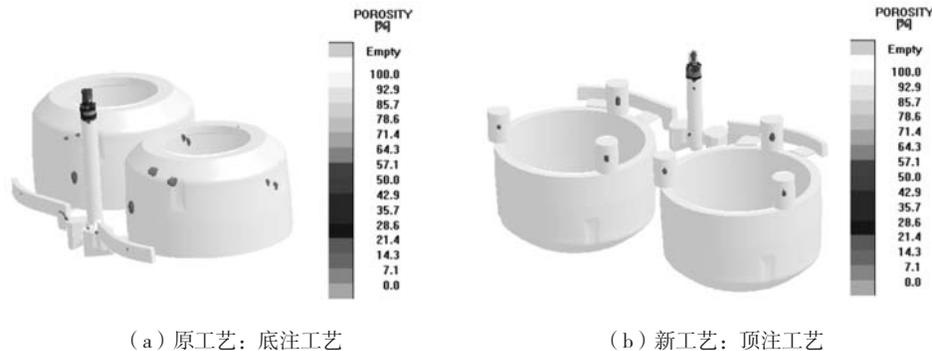


图11 缩松判据

Fig. 11 Dispersed shrinkage criterion

4 结论

(1) 通过对失效制动鼓进行裂纹失效分析和热-力耦合仿真分析，在其工作工况下，制动鼓最高应力值为124 MPa，远大于HT250材料的疲劳极限经验值85 MPa，判定HT250材料不能满足制动鼓实际工况应用。

(2) 通过将制动鼓材料由HT250优化为RT450，铸造工艺优化为半封闭式浇注系统-顶注工艺，设计三个保温发热冒口，对制动鼓凝固过程进行补缩，获得了内部质量优异的铸件。

(3) 通过工艺优化，蠕铁制动鼓服役寿命超过12个月，远超原服役时间（约为2个月）。

参考文献:

- [1] 杨燕霞. 新型蠕铁制动鼓材料的制备及其性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [2] 王传刚, 潘安霞, 金文伟, 等. 铸铁制动盘连接爪开裂原因分析及解决措施 [J]. 机车车辆工艺, 2020 (6): 42-44.
- [3] 肖恭林, 徐小辉, 喻光远, 等. 蠕墨铸铁制动盘表面片状石墨层及其控制的研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (5): 464-468.
- [4] 董鹏, 朱正锋, 封雪平, 等. 木质素改性咪喃树脂性能研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 512-515.
- [5] 穆彦青, 肖恭林, 杨志刚, 等. 大轴重机车齿轮箱铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (3): 286-291.
- [6] 李新亚. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.

Failure Analysis and Casting Technology Research of Heavy Truck Brake Drum

MU Yan-qing, DENG Han, HAI Feng-long, PAN An-xia
(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

This article conducts crack failure and thermal-mechanical coupling simulation analysis on the failed brake drum of heavy-duty trucks. It is found that the HT250 material brake drum undergoes thermal fatigue crack cracking failure due to the actual highest stress value far exceeding its fatigue limit empirical value. Therefore, the brake drum material was optimized to RT450, and the casting process was optimized to obtain castings with excellent internal quality. The service life of the vermicular iron brake drum exceeded 12 months.

Key words:

heavy duty truck; brake drum; failure analysis; casting process