DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2111

重型卡车铸铁制动鼓开裂失效行为的机理研究

李　建[1],刘鸣放[2],李世杰[1],张伟伟[3],秦鹏鹏[1],陶　磊[1],李福山[3]

(1. 驻马店中集华骏铸造有限公司,河南 驻马店 463000; 2. 河南省煤科院耐磨技术有限公司,河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 材料科学与工程学院,河南 郑州 450001)

摘　要:制动装置对于车辆的安全行驶起着至关重要的作用。目前,载重货车所采用的制动装置主要为灰铸铁制动鼓,当汽车在山路或坡道连续刹车行驶时,制动鼓通常会出现裂纹,影响制动效果,甚至引发交通事故。本文以某铸造公司生产的HT250制动鼓为研究对象,对未服役和服役失效制动鼓试样的微观组织和显微硬度进行了分析和比较。结果表明,制动鼓失效后工作面的石墨片变得粗大,且石墨与珠光体界面出现裂纹,石墨片部分有灰色相生成,而侧面的组织无明显变化。此外,失效制动鼓的硬度有所提高。灰铸铁制动鼓开裂失效行机理主要为经多次冷热循环后,石墨与基体间产生微裂纹,经扩展后导致制动鼓开裂失效。

关键词:车辆;重型卡车;灰铸铁;开裂失效;失效机理

中图分类号:TG143　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)03-0263-05

Research on the Mechanism of the Cracking Failure Behavior of Cast Iron Brake Drum for Heavy Trucks

LI Jian[1], LIU Mingfang[2], LI Shijie[1], ZHANG Weiwei[3], QIN Pengpeng[1], TAO Lei[1], LI Fushan[3]

(1. Zhumadian CIMC Huajun Casting Co., Ltd., Zhumadian 463000, China; 2. Henan Igood Wear-resisting Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Braking devices play a vitally important role in the safe operation of vehicles. At present, most of the brake devices used in heavy trucks are gray cast iron brake drums. When the vehicle brakes continuously on mountain roads or ramps, initiation and growth of the crack are usually promoted on the surface of the brake drum, which will attenuate the braking effect and even cause traffic accidents. In this paper, the microstructure and microhardness of the original and failed HT250 brake drum were comprehensively investigated. The experimental results show that the microstructural size of graphite is increased in the working face of the brake drum after failure. Moreover, the crack appears in the vicinity of the interface between graphite and pearlite, and the grey phase is formed in the graphite part. In contrast, no significant change is found in the microstructure of the side face of the failure brake drum. Furthermore, the hardness of the brake drum is enhanced after failure. The cracking failure mechanism of grey cast iron brake drum is mainly that microcracks are generated between graphite and pearlite after multiple thermal cycles, which will further propagate to failure.

Key words: vehicle; heavy truck; grey cast iron; cracking failure; failure mechanism

制动鼓作为汽车的关键组成部件,其制动效果和服役可靠性对于车辆的安全行驶起到了至关重要的作用[1]。重型货车在山区公路坡道行驶时,频繁制动致使制动鼓温度升高、制动效能下降甚至失效,是发生重特大事故的主要原因[2]。制动鼓在长时间工作条件下,由于摩擦生热将导致温度急剧升高。目前,我国重型卡车采用的制动鼓降温方式是直接向制动鼓喷水冷却。制动鼓承受这种高温-激冷热冲击时,会在制动鼓内部引入大量内应力,从而加快制动鼓的开裂失效[3]。据统计表明,我国由于制动鼓

收稿日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金(U1704159)

作者简介:李　建,1976年生,本科,高级工程师.主要从事铸铁熔炼、铸造材料及铸造工艺研究方面的工作.
Email:jian.li_zmd@cimc.com

通讯作者:李福山,1963年生,博士,教授.研究方向:铸造成型及新技术材料.Email: fsli@zzu.edu.cn

引用格式:李建,刘鸣放,李世杰,等.重型卡车铸铁制动鼓开裂失效行为的机理研究[J].铸造技术,2023,44(3): 263-267.
LI J, LIU M F, LI S J, et al. Research on the mechanism of the cracking failure behavior of cast iron brake drum for heavy trucks[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 263-267.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

失效引起的车祸占车祸总数的45%[4]。因此,研究制动鼓开裂失效的机理对于高性能制动鼓的设计生产以及保障车辆安全行驶都具有重要意义。

卡车制动鼓的性能受材质、成型方式及铸造工艺等多因素的影响,其中材料的成分及微观组织结构对制动鼓性能起着关键作用[1,5-7]。卡车制动鼓目前采用的铸造材料主要为灰铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁[8-10]。其中,灰铸铁由于热导率高、减震耐磨性好、性价比高等优点被广泛应用于重型货车制动鼓。本文针对某重型货车用HT250制动鼓长时服役后出现开裂失效这一问题,通过对未服役试样和失效试样进行化学成分分析、显微组织观察、力学性能测试来探究其服役前后微观组织的变化特征,分析其开裂失效的原因及机理,从而为我国制动刹车鼓的长时间安全服役提供一定理论指导和技术支撑。

1 实验材料与方法

本实验所采用的试样取自某铸造公司生产的实际卡车制动鼓灰铸铁铸件(牌号HT250)。由于制动鼓主要从工作面开裂,因此取服役失效制动鼓工作面含有裂纹的部分作为服役失效试样进行分析。为了客观对比服役前后试样组织特点和力学性能变化,本研究以同一批次生产但未服役的制动鼓作为比较,并取未服役制动鼓工作面部分作为未服役试样分析。对于未服役制动鼓,不同取样位置得到的试样化学成分分析和力学性能测试结果分别如表1和表2所示。由表1~2结果可知,未服役试样的化学成分和力学性能均处于GB/T 228-2010对HT250制动鼓铸件的要求范围之内[11],说明制动鼓质量合格。

本研究采用OLYMPUS BX51M金相显微镜和双束扫描电子显微镜(Thermo Scientific/Helios G4 CX,SEM)对制动鼓未服役和服役失效试样的微观组织进行观察,观察前用4%(体积分数)硝酸酒精溶液腐蚀试样表面。此外,利用HXD-1000TM SC/LCD显微硬度计对服役失效试样和未服役试样的硬度进行测试,所有试样在显微硬度测试之前都依次使用200#、400#、600#、800#、1000#金相砂纸进行打磨,再使用金相抛光机进行抛光。

表1 HT250制动鼓化学成分 *w*/%
Tab.1 Chemical compositions of the HT250 brake drum

元素	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
含量	3.4~3.7	1.5~2.1	0.6~0.9	≤0.15	0.06~0.12	0.4~0.6	0.2~0.5

表2 HT250制动鼓力学性能
Tab.2 Mechanical properties of the HT250 brake drum

力学性能	测试值	取样位置
抗拉强度	单铸件试棒≥280 MPa	制动面
	本体 260~350 MPa	(GB/T 228-2010)
铸件硬度	187~241 HBS 5/750	制动面

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织观察和分析

未服役制动鼓试样工作面的金相组织如图1所示。由图1可知,未服役试样工作面的组织主要为珠光体与石墨,其中基体组织主要为细片状珠光体,含量高于94%,石墨均为A型片状石墨,且分布较为均匀。制动鼓未服役试样的基体组织和石墨形态均符合HT250制动鼓材质组织要求。

制动鼓服役失效试样的工作面和侧面金相组织分别如图2和图3所示。对比服役失效与未服役制动鼓试样工作面的金相组织(图1~2)可知,石墨形态出现了明显变化。相比失效前,石墨片变得更为粗大。此外,失效试样工作面出现了多处裂纹,并且主要出现在石墨与珠光体基体的界面处,如图2(b)所示。对于失效试样的侧面组织,与未失效试样相比,石墨形态相未发生明显变化,且并未观察到明显的裂纹,如图3所示。工作面裂纹萌生的主要原因是石墨与珠光体基体热膨胀系数相差较大,刹车过程中不断的冷热交替,加上石墨尖端应力集中系数较大,导致石墨与珠光体基体间产生微小裂纹,微小裂纹在后续的刹车过程中进一步扩展,最终可能引起制动鼓失效。重型卡车制动能量大,制动鼓摩擦区域壁厚方向所存在的温度梯引起热应力。在制动鼓内侧摩擦区域的疲劳裂纹高发位置的周向应力与轴向应力中,热应力占据了主要部分,制动鼓的冷热交替易

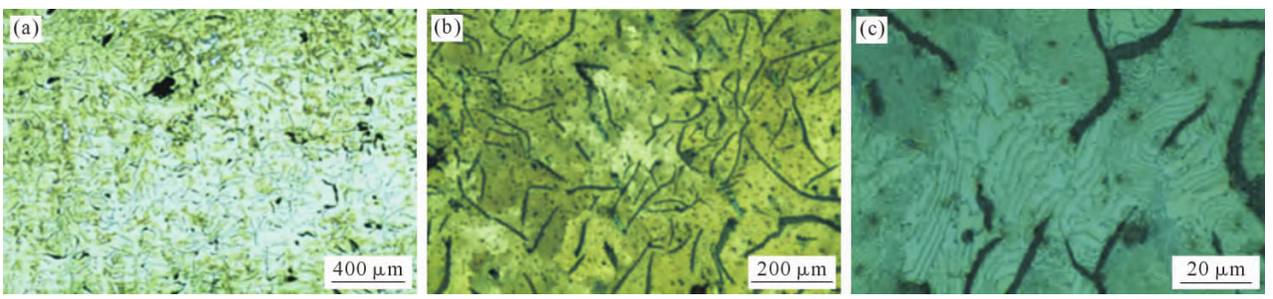

图1 未服役制动鼓试样金相组织照片:(a) 低倍,(b) 低倍,(c) 高倍
Fig.1 Metallographic images of the original brake drum sample: (a) low magnification, (b) low magnification, (c) high magnification

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

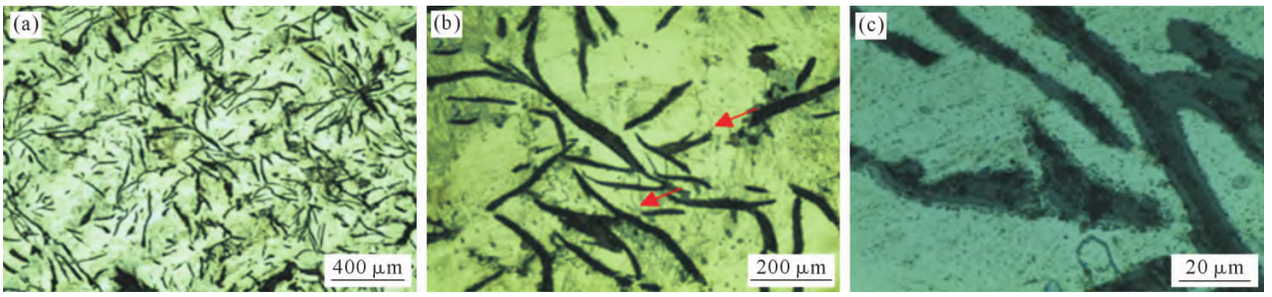

图 2 服役失效制动鼓试样工作面金相组织照片:(a) 低倍,(b) 低倍,(c) 高倍

Fig.2 Metallographic images of the working surface for the brake drum sample after failure: (a) low magnification, (b) low magnification, (c) high magnification

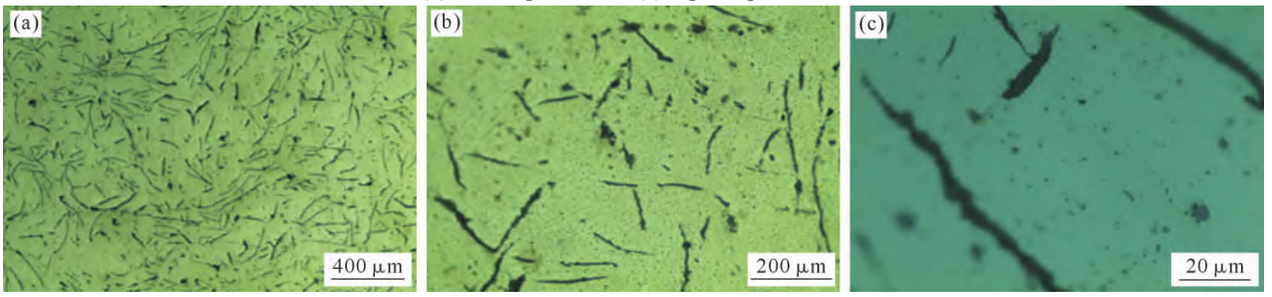

图 3 服役失效制动鼓试样侧面金相组织:(a) 低倍,(b) 低倍,(c) 高倍[1]

Fig.3 Metallographic images of the side surface for the brake drum sample after failure: (a) low magnification, (b) low magnification, (c) high magnification[1]

导致制动鼓疲劳失效产生[12]。

为进一步研究石墨与基体间的结合情况以及失效前后基体组织的变化，利用 SEM 对试样组织进行观察,其结果如图 4 所示。由图 4(a)可观察到,未服役试样片状石墨与基体结合紧密,而且珠光体基体组织呈片层交替构成的团簇状,片层分部均匀细小,具有良好的形态,如图 4(b~c)所示。在服役失效制动鼓试样的工作面,石墨与基体的界面处生成了灰色相,如图 4(d)所示。能谱分析结果表明,该灰色相成分主要由铁和氧组成,表明灰色相应该是铁的氧化物。生成氧化物的原因可能是石墨与基体界面易于萌生为裂纹(图 2(b)),为氧气提供了扩散通道,从而生成了铁的氧化物。由于铁氧化物的生成,石墨与基体的界面变得粗糙不均。此外,珠光体基体组织的片状形态发生退化,推测应是珠光体中的碳析出,向石墨中扩散,导致渗碳体分解[13];而且珠光体片层间距变得更致密,片层结构较失效前也变得不清晰,如图 4(e)所示。相比之下,失效后制动鼓的侧面组织未发生明显变化,如图 4(f~g)所示。

2.2 显微硬度分析

服役过程中试样的微观组织发生变化,导致试样失效前后的力学性能也会有所差别,因此本文对服役失效制动鼓和未服役制动鼓的硬度进行了分析,结果如图 5~6 所示。图 5 是对服役失效制动鼓试样的测量结果,图 5(a)是失效试样侧面的宏观图,其中黄色箭头方向代表维氏硬度的测量方向,每两个测量点间距为 1 mm,硬度结果如图 5(c)所示。图 5(b)是服役失效试样的工作面宏观图,黄色箭头代表维氏硬度的测量方向,每两个测量点的间距也为 1 mm,硬度结果如图 5(d)所示。根据硬度的折线图可知,试样硬度值出现了较大幅度的波动,该波动在工作面表现更为明显。

未服役试样的硬度结果如图 6 所示，图 6(a~b)分别是未服役试样不同表面的宏观图，黄色箭头代表硬度的测量方向，其每两个测量点的间距也为 1 mm,统计结果分别如图 6(c~d)所示。由测量结果可知，未服役的制动鼓铸件的维氏硬度值分布在 250~350 HV0.1 之间,且硬度分布比较均匀,没有出现较大波动,表明其内部组织分布比较均匀,与图 1 的金相结果保持一致。失效后,制动鼓试样的硬度值增大，接近断裂部分和裂纹附近处的硬度值明显增加。此外,服役失效后制动鼓工作面的硬度比侧面硬度也更高。这主要是因为,相比制动鼓侧面，制动鼓工作面承受了刹车过程中更为剧烈的高温-激冷变化,导致工作面的珠光体片层间距变得更为致密,如图 4(e)和(g)所示,从而表现出更高的硬度值。

3 结论

(1)未服役制动鼓试样组织和基本性能符合要求。服役失效试样组织中出现了石墨粗化的现象,应是珠光体中渗碳体分解所形成的碳扩散所致。服役失效后试样的工作面上石墨与基体界面处生成了铁的灰色氧化物相，且不断地冷热交替使得石墨与基

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

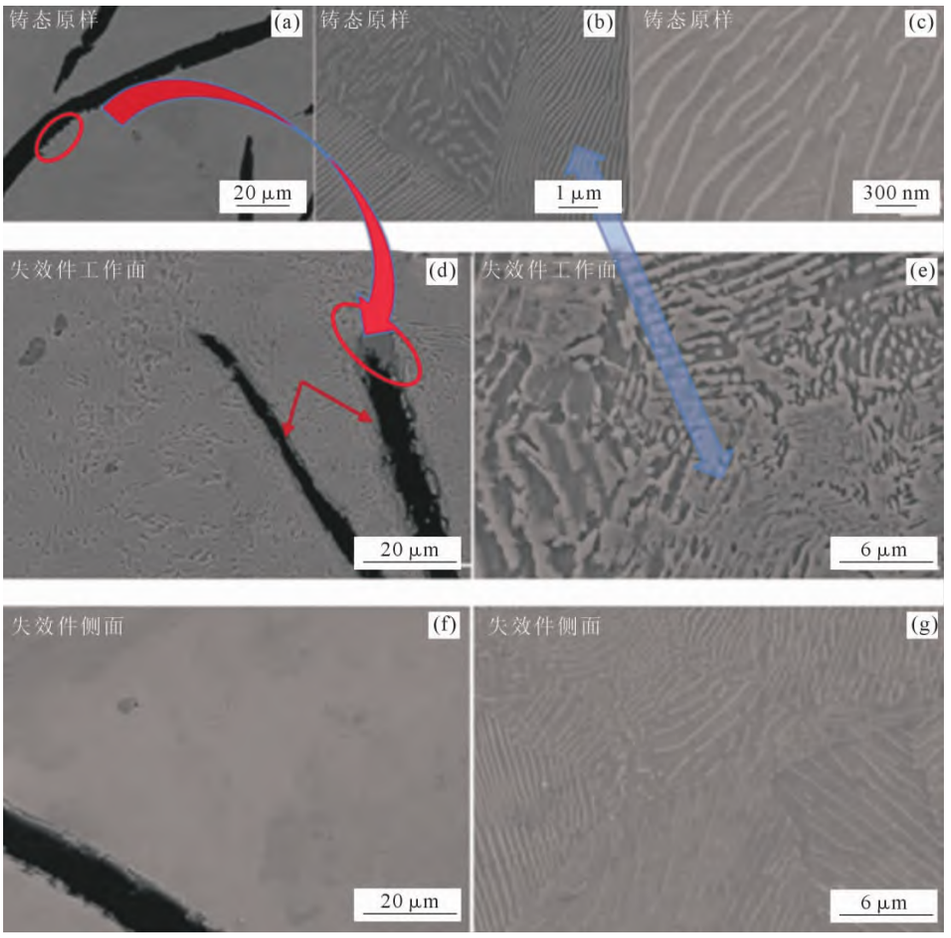

图 4 未服役和失效制动鼓试样 SEM 形貌图: (a~c) 铸态试样,(d~e) 失效制动试样工作面,(f~g) 失效制动试样侧面

Fig.4 SEM observations of original and failed brake drum samples: (a~c) as-cast sample, (d~e) working surface of the sample after failure, (f~g) side surface of the sample after failure

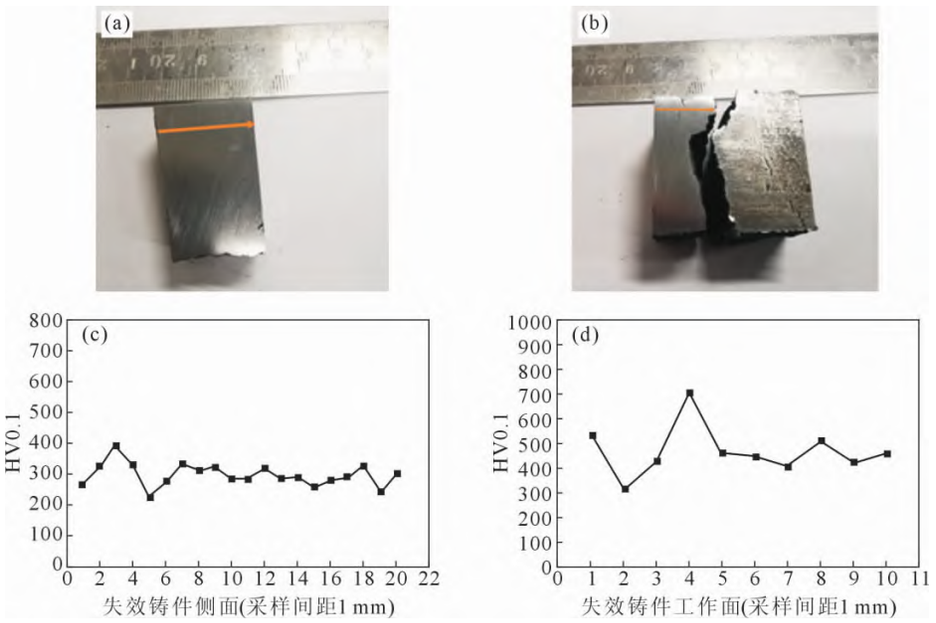

图 5 服役失效制动鼓试样硬度:(a) 侧面宏观图,(b) 工作面宏观图,(c) 侧面硬度,(d) 工作面硬度

Fig.5 Variation in hardness for the brake drum samples after failure: (a) side surface, (b) working surface, (c) hardness of the side surface, (d) hardness of the working surface

体界面处产生裂纹,是导致制动鼓最终失效断裂的主要原因。

(2)制动鼓试样在失效后整体硬度有所提高,且制动鼓工作面比侧面硬度值更高。这主要是因为制动鼓工作面承受了更为剧烈的温度变化，使珠光体片层间距更为致密,导致硬度值大幅提高。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

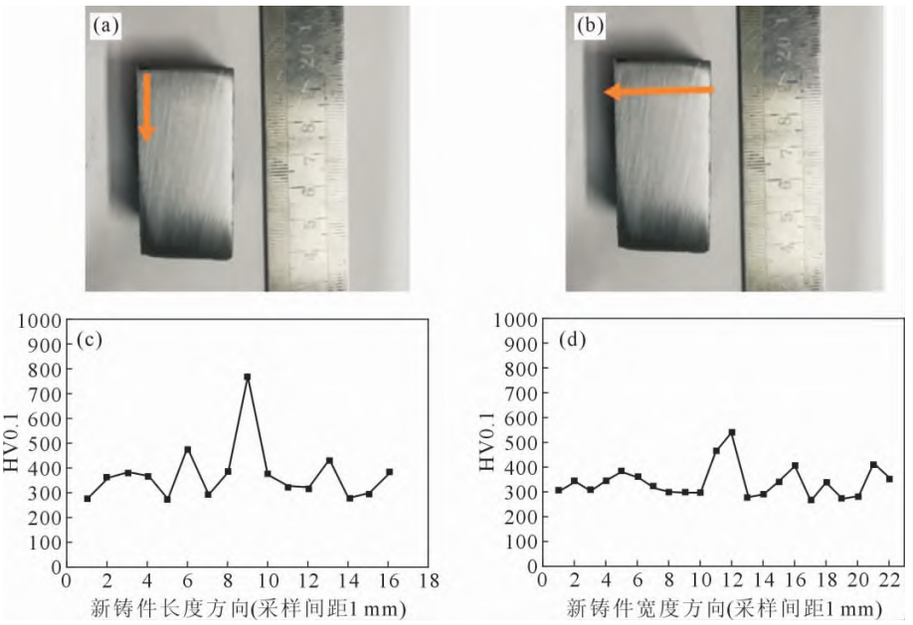

图 6 未服役制动鼓试样硬度：(a~b) 铸态试样表面，(c) 沿长度方向硬度，(d) 沿宽度方向硬度

Fig.6 Variation in hardness for the original brake drum sample: (a~b) surface of the as-cast sample, (c) hardness along the length direction, (d) hardness along the width direction

参考文献：

[1] 雷宇，张忠明，王嘉河，等. 汽车制动鼓的成型工艺与失效分析研究现状及进展[J]. 铸造技术，2021, 42(4): 320-323.
LEI Y, ZHANG Z M, WANG J H, et al. Research status and progress of forming technology and failure analysis of automobile brake drum[J]. Foundry Technology, 2021, 42(4): 320-323.

[2] 王志新，余强，史培龙，等. 重载货车坡道行驶制动鼓温升模型研究[J]. 工业仪表与自动化装置，2019(5): 3-6.
WANG Z X, YU Q, SHI P L, et al. Research on temperature rise model of brake drum on ramp of heavy-duty truck[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2019(5): 3-6.

[3] 刘惟信. 汽车设计[M]. 北京：清华大学出版社，2001.
LIU W X. Automobile design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[4] 吴迎学. 汽车鼓式制动器的模糊优化设计[J]. 中南林学院学报，2000, 20(4): 66-71.
WU Y X. Fuzzy optimal design for drum-fashioned brakes of truck [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2000, 20(4): 66-71.

[5] 宋军. 重型汽车双金属制动鼓的“旋压成型与离心浇铸”复合成型技术研究[D]. 镇江：江苏大学，2017.
SONG J. Composite molding technology research on heavy duty truck dual-metal brake drum based on “spin forming and centrifugal casting”[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[6] 秦鹏鹏，张俊涛，李建. 铸造 CAE 在灰铸铁制动鼓工艺改进中的应用[J]. 铸造技术，2018, 39(12): 2776-2778.
QIN P P, ZHANG J T, LI J. Application of casting CAE in process improvement of gray cast iron brake drum[J]. Foundry Technology, 2018, 39(12): 2776-2778.

[7] 黄朋朋，芦刚，严青松，等. 基于 ProCAST 的汽车制动鼓消失模铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39(8): 889-892.
HUANG P P, LU G, YAN Q S, et al. Optimization of lost-foam casting process of automobile brake hub based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(8): 889-892.

[8] 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.
YANG Y X. Study on the preparation and properties of a new compacted graphite iron used in brake drum[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[9] 万仁芳. 对蠕墨铸铁制动鼓的再认识[J]. 现代铸铁，2019, 39(6): 26-29.
WAN R F. Re-understanding of vermicular graphite iron brake drum[J]. Modern Cast Iron, 2019, 39(6): 26-29.

[10] GOO B, LIM C. Thermal fatigue of cast iron brake disk materials [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2012, 26(6): 1719-1724.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法[S]. 北京：中国标准出版社，2010.
State General Administration of the People's Republic of China for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, Standardization Administration. GB/T 228.1-2010 Metallic materials-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[12] 龙恺. 重型卡车紧急制动制动鼓有限元分析及裂纹扩展模拟[D]. 秦皇岛：燕山大学，2013.
LONG K. Finite element analysis on urgent automobile brake of heavy-duty truck brake drum and simulation of crack propagation [D]. Qinhuangdao:Yanshan University, 2013.

[13] 李梦楠. 蠕墨铸铁耐磨性和抗热疲劳性能的研究[D]. 长春：吉林大学，2016.
LI M N. Study on wear resistance and thermal fatigue resistance of compacted graphite iron[D]. Changchun: Jilin University, 2016.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net