● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.04.019

汽车制动鼓的成型工艺与失效分析研究现状及进展

雷 宇[1],张忠明[1],王嘉河[1],胡 博[2],徐春杰[1]
(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048;2. 中国船舶重工集团公司 第十二研究所,陕西 兴平 713102)

摘 要:制动鼓是商用车的关键部件,对于车辆的安全行驶有着至关重要的作用。制动鼓的健全性、致密度及显微组织均匀性均影响制动效果。主要从制动鼓材质、成型方式、铸造方法及铸造工艺等方面总结了制动鼓的发展现状;分析了制动鼓的失效形式及失效原因,并介绍了在制动鼓的疲劳寿命预测方面的研究进展。

关键词:制动鼓;铸造工艺;失效;疲劳寿命预测
中图分类号:TG250 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)04-0320-04

Research Status and Progress of Forming Technology and Failure Analysis of Automobile Brake Drum

LEI Yu[1], ZHANG Zhongming[1], WANG Jiahe[1], HU Bo[2], XU Chunjie[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. CSIC No. 12 Research Institute, Xingping 713102, China)

Abstract: Brake drum is a key component of commercial vehicle, which plays a vital role in the safe running of the vehicle. The soundness, density and microstructure uniformity of the brake drum all affect the braking effect. The development status of brake drum was summarized from the aspects of brake drum material, molding way, casting method and casting technology. The failure modes and reasons of brake drums were analyzed, and the research progress in fatigue life prediction of brake drums was reviewed.

Key words: drum brake; foundry technology; failure analysis; fatigue life prediction

作为汽车的关键部件,制动器的制动效果及可靠性对于车辆的安全行驶起到决定性作用。鼓式制动器具有制动力矩大、结构简单以及价格低廉等优势,在汽车特别是商用车上得到了广泛应用。鼓式制动器一般由制动鼓、制动蹄以及驱动制动蹄动作的制动轮缸组成。

在车辆行驶过程中,制动鼓随着车轮一起旋转;车辆制动时,制动蹄在制动轮缸的推动下动作并挤压制动鼓的内表面,通过摩擦产生的力矩阻止车轮转动从而起到制动的目的。制动鼓在车辆制动过程中承受着巨大的载荷和磨损摩擦作用,使得其温度急剧升高。因而,制动鼓服役于强摩擦、高热负荷、交替冷热作用等复杂工况下,易产生疲劳裂纹[1]。

商用车特别是重型商用车要求制动鼓具有高的力学性能以及良好的导热性能、耐热疲劳性能、耐磨性能及阻尼性能。作为商用车的关键安保部件,制动鼓对铸件的健全性、致密度及显微组织均匀性均有很高要求[2]。随着汽车行业的发展,货车经常于高速重载环境中行驶,并在山区、高原环境下频繁制动,对汽车的制动系统特别是制动鼓的性能提出了更高的要求。本文从材质、成型方式、铸造工艺、铸造方法等方面综述了制动鼓的发展现状,分析了制动鼓的失效形式及失效原因,并介绍了在制动鼓的疲劳寿命预测方面的研究进展。

1 制动鼓的主要材质

灰铸铁具有热导率高、减震性能好、耐磨性好等特点,因而传统制动鼓材质主要采用灰铁。目前,货车制动鼓常用材质为 HT200 和 HT250[2-3]。普通灰铁

收稿日期:2021-02-23
基金项目:陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202010700098);西安理工大学研究生教育教学改革研究项目(20200901)
作者简介:雷 宇(1995—),陕西渭南人,硕士生.研究方向:合金组织控制与性能优化.电话:15667079261,Email:1446089920@qq.com
通讯作者:张忠明(1967—),甘肃庆阳人,教授.研究方向:合金组织控制与性能优化.电话:029-82312361,Email:zmzhang@xaut.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制动鼓存在热疲劳强度较低、使用寿命短、可靠性差等不足,难以满足车辆轻量化和节能减排新形势下对汽车制动鼓的高要求[3]。为提高制动鼓的性能，可在灰铁中加入一定量的 Ni、Mo、Cu、Cr、V 等合金化元素,改善制动鼓的强度、硬度、耐磨性和耐热性。

球墨铸铁综合性能优于灰铸铁,且具有良好的耐磨和减磨性能。与传统灰铸铁相比，采用 QT450-10 球墨铸铁作为制动鼓材料,制动鼓壁厚可以减小 35%,重量可减轻 30%以上,更适应汽车零部件的减重要求[4]。然而也有报导指出球墨铸铁摩擦系数小,用其制造的制动鼓容易变形、制动性能差,因而球墨铸铁并不适合用作制动鼓材料[2]。

蠕墨铸铁具有优良的耐热疲劳性能、耐磨性能和高温力学性能,强度高于高强度灰铸铁,抗龟裂能力优于灰铸铁，导热性接近灰铸铁但优于球铁；虽然蠕墨铸铁的阻尼性比灰铸铁稍差，但综合比较，蠕墨铸铁比灰铸铁更适合用作制动鼓材料,是生产卡车制动鼓的最佳材料[2]。广西玉柴机器配件制造有限公司已经批量生产出了强度高于 500 MPa,屈服强度高于 350 MPa 的高强度蠕墨铸铁制动鼓[3]。为了促进和扩大蠕墨铸铁制动鼓的应用,需要在控制成本的前提下，准确控制蠕墨铸铁的蠕化率,确保蠕墨铸铁制动鼓性能的稳定性[2,5]。

2　制动鼓的成型方式及结构优化

2.1　制动鼓的成型

从制动鼓的结构来看,其成型方式主要有整体铸造式和组合式两类。整体铸造式制动鼓通过铸造获得制动鼓毛坯后再经一定的机加工成形。整体式铸造的制动鼓虽然质量较大,但热容量大,具有结构简单、加工方便等特点,在中、重型汽车上应用较多。

组合式制动鼓部件由不同的材质分别制成,然后通过组合成形。组合式制动鼓有钢板与铸铁组合、轻合金与铸铁组合等多种方式。如钢板与铸铁组合式的制动鼓,其鼓盘由钢板冲压制成;而轻合金与铸铁组合式的制动鼓是在轻合金制动鼓内衬入铸铁衬圈而制成[6-7]。宋军等人采用旋压成型低碳钢板制动鼓外壳,通过在其内离心浇铸 HT250 灰铸铁金属液进行了重型汽车用灰铸铁 / 碳钢双金属制动鼓的复合成型研究工作[7]。但组合式制动鼓生产工艺复杂、造价高,且由于不同材质的热膨胀系数差异容易产生界面结合不良等问题。

2.2　制动鼓的结构优化

对机械部件进行结构优化设计，可对构件起到提质、减重、降噪等作用[8]。为了降低制动时制动鼓的摩擦生热、改善应力分布、提高使用性能、延长使用寿命,除了前述的选择合适的合金成分、组织与成型方法外,还可通过改进制动鼓的设计、优化制动鼓的结构来达到目的。一方面,可对制动鼓外圆进行加强，如通过在制动鼓外圆增加钢箍提高制动鼓的抗开裂能力;另一方面,可增大制动鼓散热面积,提高对流换热效率,实现快速散热。如可在制动鼓上开设散热孔、表面设置沟槽和散热肋等[7-9]。

3　制动鼓的铸造方法

铸铁制动鼓的铸造方法主要有普通粘土砂型铸造和铁型覆膜砂铸造。此外,也有采用离心铸造和消失模铸造等生产制动鼓的报道。

普通粘土砂型铸造作为目前制动鼓的主要生产工艺,具有生产效率高、生产成本低、适应性强等优点;缺点是影响铸件质量的因素较多、生产控制难度大,且废品率较高[10-11]。

铁型覆膜砂铸造是在金属型铸造和砂型铸造相结合的基础上发展起来的一种铸造方法，兼有二者的优点。铁型覆膜砂铸造有利于实现小冒口或无冒口补缩,可明显减少砂眼和缩孔等缺陷;铸件质量高、加工余量小、废品率较低,且造型材料用量少[11-12]。广西玉柴机器配件制造有限公司采用半自动铁型覆砂生产线批量生产出了高强度蠕墨铸铁制动鼓[3]。

离心铸造具有补缩效果好、铸件组织致密、力学性能高等优点,是铸铁管和缸套等的主流铸造方法,也在双金属制动鼓的生产中显示出了其优越性。宋军和张朝阳等人利用旋压成型的低碳钢板制动鼓外壳，通过多工位离心铸造系统生产了重型汽车用灰铸铁 / 碳钢双金属制动鼓[7]。

消失模铸造被誉为绿色铸造技术，具有铸件尺寸精度高、加工余量小等优点,已逐渐成为生产汽车铸件的重要成形工艺。黄朋朋和芦刚等人指出消失模铸造也特别适合于汽车制动鼓的铸造[13]。他们针对某公司生产的汽车制动鼓球墨铸铁件，通过数值模拟对 1 模 4 件的底部注入式消失模铸造工艺方案进行优化,提高了铸件的合格率。

4　制动鼓的铸造工艺

对于普通粘土砂型铸造、铁型覆膜砂铸造和消失模铸造而言，制动鼓的铸造工艺特别是浇注系统的设计是否合理将直接影响铸件的质量。根据制动

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

鼓铸造时内浇道在铸件上的位置不同,制动鼓的铸造工艺主要有顶注式、底注式和中注式3类。

4.1 顶注式

制动鼓铸造在早期大多采用顶注式工艺,造型时制动鼓碗口朝下;直浇道和横浇道都很短,具有浇注系统简约、充型均匀、用砂量少、工艺出品率高等特点[10]。广西玉柴机器配件制造有限公司利用铁型覆砂生产线,采用顶注的半封闭式浇注系统、一箱一件的布局方式生产蠕墨铸铁制动鼓;分四个内浇口进水,每个内浇口设置集渣、补缩冒口各一个,并在直浇道放置过滤网,成功生产出了蠕化率高于50%的高强度蠕墨铸铁制动鼓[3]。顶注式工艺生产制动鼓时容易形成砂眼、冲砂、气孔等缺陷,需要采取适当措施避免缺陷的产生[4]。

4.2 底注式

底注式工艺适用于手工造型,通常采用制动鼓碗口朝上的形式,重要工作面位于下型。采用封闭式浇注系统,铸型排气性和挡渣效果好。但底注式工艺生产制动鼓时,上砂箱带有较大砂胎,造型工艺复杂,易出现掉砂、夹砂等缺陷,因而在普通砂型铸造中已很少使用[4,10]。消失模铸造具有浇注系统开设灵活、简便的优点,可避免普通砂型铸造底注式工艺的不足。已有利用底注式浇注系统的消失模铸造生产出汽车制动鼓铸件的相关报道[13]。

4.3 中注式

中注式工艺是目前普遍采用的制动鼓生产工艺,通常采用碗口朝下的形式。在分型面的凸轮外部边缘侧开设两个内浇道,在碗口的中心位置和法兰安装面的一侧设置排气孔,充型平稳,可以减轻冲砂现象和避免气孔缺陷的产生[4,10]。驻马店中集华骏铸造有限公司利用KW3511静压湿砂造型生产线,采用扁平内浇道式浇注系统,在内浇道对面设置渣气冒口用于集渣排气,在法兰顶部和加强带位置设置热冒口进行补缩,一箱2件成功批量生产出了无缩松缩孔、质量达到客户要求的HT250重型卡车制动鼓[14]。

近年来,模拟仿真技术在铸造生产中的应用日益广泛。通过数值模拟不仅可预测铸造缺陷的种类、大小及分布,还可利用模拟结果对铸造工艺进行有针对性的改进和优化[8]。实践证明,铸造模拟仿真技术同样对优化制动鼓铸造工艺、提高制动鼓铸件质量可起到积极作用[13-14]。

5 制动鼓失效分析及疲劳寿命预测

车辆行驶过程中,制动器制动性能的稳定性及制动效果对于车辆的安全行驶起到决定性作用。统计结果表明,频繁制动导致的制动鼓温度升高、制动效能下降甚至失效,是重载货车在山区公路坡道行驶时易发生重特大事故的主要原因[15-16]。因而,对车辆行驶时的制动鼓温度进行检测与分析、预测制动鼓失效位置、分析其失效原因并进行疲劳寿命预测对于车辆安全行驶非常重要。

5.1 制动鼓失效分析

在鼓式制动器制动过程中,车辆的动能通过摩擦生热的形式转换为热能,因此伴随着较高的温度梯度和应力变化。由于温度场、应力场的耦合作用,这种复杂的载荷状态常常引起制动鼓的热疲劳失效。制动鼓的失效形式主要为龟裂、开裂、掉底和磨损[17]。据统计,在灰铸铁制动鼓早期失效中,制动鼓开裂+龟裂占90.86%,掉底占5.16%,其它约占4%[2]。

(1)龟裂与开裂　在高温重载工况下,制动鼓的开裂是鼓式制动器的主要失效形式[18]。车辆制动时,制动蹄与制动鼓摩擦生热使制动鼓表面温度迅速上升。在紧急制动和重复制动时,摩擦生热使制动鼓产生的不均匀变形造成摩擦力与拉应力相互耦合,使得制动鼓易于产生疲劳裂纹;特别是当重复制动时,制动鼓容易因高温与大应力集中在同一位置,更易导致产生热疲劳裂纹,即龟裂[15]。龟裂在应力的作用下继续扩展,最终导致制动鼓开裂[19]。

在山区公路坡道行驶的重载货车需要频繁制动,通常需要对制动鼓进行水冷降温,因而造成制动鼓淋水开裂失效时有发生。这是因为在反复的加热–激冷过程中,制动鼓内形成了较大的内应力;当内应力大于断裂强度时,就会在制动鼓内萌生裂纹并扩展,导致开裂失效[20]。

(2)掉底与磨损　掉底是指制动鼓在没有龟裂出现的情况下直接开裂失效。掉底的原因一是由于制动鼓材料强度不足,二是制动时受到扭转力影响而在制动鼓法兰层部位出现裂纹导致[21]。孙继宇等人研究了单驱动桥鼓式制动器在持续制动工况下应力场和温度场对制动鼓的耦合作用[15]。结果表明高温和大应力是制动鼓产生不均匀热变形的原因,会造成制动器制动效率降低和制动鼓裂缝产生;在持续制动时,制动鼓外表面加强筋下端所受应力最大,并在制动鼓内表面靠近法兰端处形成大应力集中区,造成制动鼓从法兰端断裂,产生掉底。

在车辆制动时,制动鼓一直承受着巨大的载荷和磨损摩擦的作用。当制动鼓磨损过大或产生非正常磨损时,均会导致制动效果下降,严重时导致制动鼓失效[22]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5.2　制动鼓疲劳寿命预测

制动鼓的龟裂与开裂是鼓式制动器的主要失效形式。作为重型商用车的关键安全部件,研究制动鼓的疲劳寿命并对其进行预测具有重要的工程意义。陈立辉等人研究了高原环境连续下坡路段制动鼓温升规律,通过引入海拔高度修正系数,构建了适合高原环境连续下坡路段制动鼓温度预测模型,满足了大型货车在不同海拔高度的制动器温度预测需求[15]。王志新等人针对重载货车在长距离大下坡路段行驶事故频发的问题,建立了制动鼓温升模型,不仅可用于计算车辆行驶过程中的制动鼓温度,还可预测制动鼓效能失效位置[16]。上述研究结果不仅为鼓式制动器的疲劳寿命预测方法提供了制动器温度预测模型,也为长大、连续下坡路段辅助减速车道和避险车道的设置提供了理论依据。

王晓颖和桂良进等人针对重型卡车鼓式制动器,建立了制动器热机耦合模型和制动鼓的高温疲劳模型,提出了鼓式制动器的疲劳寿命预测方法,并通过数值模拟和试验验证研究了制动器的开裂失效[18]。疲劳寿命预测结果与试验结果均表明,在加速疲劳工况下,受周向应力的影响,制动鼓的最危险位置出现在制动鼓开口处[18]。他们所提出的疲劳寿命预测方法能够满足工程中制动器失效行为预测的使用需要,也为鼓式制动器的优化设计奠定了基础。

6　结束语

受节能减排政策与新能源车应用的推动,汽车轻量化是大势所趋,也是未来的发展方向。目前,汽车制动鼓的材质主要以 HT200 和 HT250 为主,由于灰铁的固有不足,难以满足轻量化和节能减排新形势下对汽车制动鼓的高要求,迫切需要开发新型的轻量化、长寿命和高可靠性的制动鼓。为此,一方面可从制动鼓的结构设计优化方面入手,另一方面可通过改善制动鼓的材质与成型方法、优化铸造方法和铸造工艺,以提高制动鼓的性能。可以预见,结构优化设计、铸造工艺优化模拟、特种铸造技术以及蠕墨铸铁、复合双金属等在制动鼓上的应用,必将对制动鼓铸件的提质减重起到极大的促进作用。

参考文献:

[1] 李洪. GB/T 34422-2017《汽车用制动盘》国家标准解读[J]. 铸造,2020,69(3):306-310.

[2] 万仁芳. 对蠕墨铸铁制动鼓的再认识 [J]. 现代铸铁,2019(6):26-29.

[3] 商崇元,晏祥志,杨佳,等. 一种高强度蠕墨铸铁制动鼓的开发[J]. 中国铸造装备与技术,2020,55(5):36-39.

[4] 乔晓爱,张保杰. 制动鼓铸造工艺性分析[J]. 铸造设备与工艺,2009(3):13-15.

[5] 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.

[6] 朱新生. 双金属汽车制动鼓铸造工艺[J]. 中国铸造装备与技术,1996(5):29-30.

[7] 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.

[8] 杜庚艺,张忠明,雷宇,等. 减速机箱体的结构优化设计与铸造工艺优化模拟[J]. 铸造技术,2019,40(10):1071-1075.

[9] 孙继宇, 张晓东. 鼓式制动器不同工况下热-应力耦合分析[J]. 中国农机化学报,2020,41(1):109-119.

[10] 邱文. 汽车制动鼓的铸造工艺分析与生产 [J]. 现代制造技术与装备,2017(2):127-128.

[11] 张亮, 黄怀忠. 铁型覆砂铸造灰铸铁制动鼓的生产控制 [J]. 铸造,2011,60(7):707-709.

[12] 杨群收, 王明志, 钟雪磊. 用铁模覆砂工艺生产 HT250 制动鼓[J]. 金属加工(热加工),2013(21):78-80.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 陈立辉, 郭忠印. 高原环境连续下坡路段制动鼓温度预测模型[J]. 北京工业大学学报,2020,46(7):772-781.

[16] 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.

[17] 周彬,张振华,王欢锐. 浅谈国内重卡制动鼓失效的原因[J]. 汽车实用技术,2014(9):10-12.

[18] 王晓颖,范子杰,边疆,等. 鼓式制动器疲劳寿命预测[J]. 清华大学学报(自然科学版),2021,61(1):21-27.

[19] 丁厚福,李先芬,祖方遒,等. 低合金铸铁汽车制动鼓的失效分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2004,27(9):983-986.

[20] 陶世波. 某载货汽车制动鼓开裂分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(B11):146-148.

[21] 韩梅招. 汽车制动鼓失效原因分析及防止措施 [J]. 南方农机,2017,48(13):131-132.

[22] 苏勇,叶天汉,陈翌庆,等. 汽车制动鼓的失效分析[J]. 铸造技术,2004,24(5):349-350.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 **2021** 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52–64　国外发行号:M855　国内定价:25 元/本　海外定价:25 美元/本

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net