

高性能铸铁刹车盘的组织调控与耐磨性能优化研究

李 杨

莱州汇众汽配有限公司 山东烟台 261400

摘 要: 面向汽车制动系统对刹车盘耐高温、高耐磨性能的需求,以铸铁材料为对象开展组织调控与耐磨性能优化研究。成分优化、热处理工艺调整及凝固过程控制的运用,可实现铸铁内珠光体含量、石墨形态及分布的精准调控,磨损机制分析能明确组织特征与耐磨性能的内在关联,提出兼顾硬度与韧性的耐磨性能优化策略,研究证实合理组织调控可提升铸铁刹车盘抗磨损能力,为高性能制动部件设计制造提供理论支撑和技术参考。

关键词: 高性能铸铁刹车盘;组织调控;耐磨性能;珠光体含量;石墨形态

引言

在当今的汽车制造业中,对汽车刹车片的要求非常的高,在刹车片的选用上和刹车片的性能上都有不同的用途和不同的作用,刹车盘做为保安件,为了有效起到制动作用,要求有优良的导热性、耐磨性、抗热疲劳性及小的刹车鸣叫。铸铁因成本低、导热好且抗热疲劳性优,仍是刹车盘主流材料,然传统铸铁耐磨性难适高强度制动需求。刹车盘磨损不仅影响制动效率,还易引发制动抖动、异响,削弱行车安全与舒适性,深入研究铸铁刹车盘组织调控机制,揭示组织-耐磨性能关联并优化其耐磨性,是当前制动材料领域重要方向,本文聚焦铸铁组织调控方法与耐磨优化路径系统分析,为提升其综合性能提供方案。

一、高性能铸铁刹车盘的组织调控

(一) 铸铁刹车盘的核心组织构成

铸铁刹车盘组织核心构成包含基体相、石墨相及少量第二相,各相特性与空间分布从根本上左右材料力学性能与耐磨表现,基体相核心为珠光体,后者由铁素体与渗碳体交替层叠构成,层间距尺寸与材料硬度、强度存在关键关联,间距越小则材料硬度越高、抗塑性变形能力越强,进而增强耐磨效能。石墨相以片状或球状形态存在,自身硬度偏低,形态与分布会改变应力集中状况,片状石墨易引发应力集中导致材料韧性下滑,球状石墨则可缓解应力集中,在维持一定硬度的同时优化材料韧性,避免制动阶段因冲击载荷造成刹车盘开裂,组织内部可能存在少量渗碳体或磷共晶等第二相,渗碳体硬度高但脆性大,适量存在可提升材料耐磨表现,过

量则会使材料韧性不足,增加断裂可能,渗碳体分布状态同样需要把控,均匀弥散分布时能更充分发挥强化作用,呈连续网状分布时会大幅削弱材料韧性,抬升断裂概率^[1]。

(二) 组织调控的关键技术手段

组织调控依赖多环节协同控制达成,关键技术路径涵盖成分优化、热处理工艺调整及凝固过程控制。成分优化聚焦碳、硅、锰元素含量调配,碳元素含量直接关联石墨析出量与形态特征,含量偏高易造成石墨结构粗大,含量偏低则会缩减石墨相占比,进而干扰导热效能;硅元素可推动石墨析出进程,优化石墨形态,同时增强材料抗氧化能力,含量过高却可能导致材料脆性上升,需限定在合理区间内;锰元素能够稳定珠光体组织架构,抑制铁素体生成,提升基体硬度水平,还可与硫元素结合形成硫化锰化合物,降低硫元素对石墨形态产生的不良作用,等温淬火与正火是热处理工艺的主要实施方式,等温淬火通过把控淬火温度与保温时长,实现珠光体晶粒细化,缩小层间距离,同时促进部分石墨球化,达成硬度与韧性的平衡状态;正火处理可消除铸造环节产生的组织缺陷,均衡组织分布状态,提升材料性能稳定性,处理后的冷却速率需精准把控,防止冷却过快引发材料内应力攀升,凝固过程控制依托冷却速率调整实现,较快冷却速率可抑制石墨生长,细化晶粒结构,降低成分偏析程度,形成细小均匀的珠光体与石墨组织;较慢冷却速率则容易导致石墨粗大、组织不均,需结合刹车盘结构特征与性能指标,制定适配的凝固冷却方案,针对厚度较大的刹车盘区域,可采用局部强制冷却手段,保障不同区域组织均匀性达标。

二、铸铁刹车盘耐磨性能的影响因素与优化路径

(一) 影响耐磨性能的核心因素

铸铁刹车盘耐磨性能受组织特征与工况条件协同作用制约,组织特征构成这一性能的内在主导要素,珠光体含量与材料硬度存在直接关联性,含量提升会带动整体硬度上升及抗磨损效能越突出,通常控制在75%~90%区间时能平衡硬度与韧性,若超出90%,材料脆性会相应增强,易在制动冲击作用下生成磨损碎屑,反倒让磨损程度加重^[2]。石墨形态与分布对磨损过程存在关键影响,球状石墨可缓解摩擦过程中的应力集中现象,削弱材料剥落风险,片状石墨则易在摩擦应力作用下出现断裂现象,形成磨粒并促使磨损进程加快,细小石墨颗粒能更均匀分散应力,减少局部磨损集中问题,直径控制在5~20 μm 的石墨颗粒分散效果最优,过大易形成应力集中点,过小则难以发挥应力分散作用,工况条件中的制动温度与载荷同样对耐磨性能存在作用,高温环境下珠光体容易出现分解现象,转化为硬度较低的铁素体与渗碳体,造成材料耐磨性下降,当温度超过550 $^{\circ}\text{C}$ 时,珠光体分解速率加快,还可能诱发石墨氧化并形成表面缺陷;较高制动载荷会提升摩擦面接触应力,促使塑性变形与材料剥落速度加快,使得磨损程度加剧,载荷超过额定值1.5倍时,接触应力突破材料屈服极限,长期高频次重载制动则可能让刹车盘表面产生热裂纹,进一步使耐磨性能恶化。

(二) 耐磨性能优化的关键路径

耐磨性能优化工作需聚焦组织调控与表面性能改进两大方向,提升组织均匀性构成其中关键实施路径,优化成分配置与热处理工艺参数可降低组织内部成分偏析程度及缺陷数量,保障珠光体实现均匀分布并维持石墨形态一致性,进而规避局部组织差异引发的磨损程度加剧问题,金相分析技术可用于实时追踪组织均匀性变化,据此对调控参数进行及时修正。引入强化相是另一重要技术手段,在铸铁基体中掺入少量钒、钛类合金元素能够促使细小碳化物强化相生成,此类强化相硬度值高于基体材质,能够有效提升材料抗磨损效能,且不对材料整体韧性产生负面干扰,钒钛碳化物的尺寸规格与空间分布需依托合金元素掺入量及热处理温度的精准控制达成优化调节,以保障其呈现均匀弥散的分布状态,表面改性处理同样占据重要地位,激光熔覆、等离子喷涂等技术可用于在刹车盘表面构筑高硬度涂层结构,涂层材料通常选取耐磨效能突出的合金材质或陶瓷材料,在不

对基体组织造成改变的前提下即可提升摩擦表面抗磨损水平,还能同步强化表面耐高温特性,降低高温环境对耐磨性能产生的不利作用,涂层厚度需结合刹车盘实际使用场景进行设定,厚度过大易造成涂层与基体结合强度降低,厚度过小则难以实现长期耐磨效果。

(三) 磨损机制的适配性优化

磨损机制的适配性优化对耐磨性能的提升具备关键补充价值,需依据不同制动工况下的磨损机制调整优化策略,低温轻载工况中,黏着磨损占据主导地位,该工况下需着力提升材料表面硬度以减少摩擦面黏着,此目标可借助表面改性或珠光体含量增加达成,材料表面硬度的提升幅度需限定于合理区间,防止硬度过高引发摩擦系数衰减进而干扰制动效能^[3]。高温重载工况中,氧化磨损与磨粒磨损共同构成主要磨损形式,材料的抗氧化特质及抗塑性变形潜能需得到强化,此目标可依靠抗氧化元素的添加与强化相的引入完成,铬元素的添加可促使材料表面生成致密氧化膜,有效阻隔后续氧化进程;碳化物强化相的引入则能抵御磨粒的切削行为,降低磨粒磨损程度,单一磨损机制下的过度优化同样需要规避,过度提升硬度往往造成材料韧性欠缺,进而在冲击载荷作用下诱发断裂磨损,故需结合实际工况调节材料硬度与韧性的平衡状态,达成磨损机制与材料性能间的适配关系,多工况模拟试验可用于界定最优性能平衡区间,保障刹车盘在各类工况中持续维持出色的耐磨表现。

三、组织调控与耐磨性能的协同优化及应用验证

(一) 组织与耐磨性能的协同调控机制

组织与耐磨性能的协同调控需构建两者的定量关联,经实验标定不同珠光体含量、石墨形态下材料的耐磨效能参数,结合统计分析方法处理多组实验数据剔除异常值,形成组织特征与耐磨性能的关系模型,该模型需涵盖不同工况条件的影响参数以保障实际应用中的精准度。调控过程中需平衡硬度与韧性关联,珠光体含量提升可增强硬度但需限定合理区间防止韧性过度衰减,一般将珠光体含量控制在85%~95%区间能够实现硬度与韧性的良好匹配,该区间经多轮工况验证适配多数制动场景;石墨形态优化需兼顾导热特性与抗剥落能力,球状石墨虽可提升韧性但需控制尺寸避免因石墨过大削弱硬度,石墨球化率需达90%以上且平均尺寸限定在5 μm 以内,各调控手段的协同作用亦需纳入考量,成分优化与热处理工艺的结合可实现珠光体细化与石墨球化的同步推进,通过控制变量法初步筛选关键参数后,较单一调控手段

而言协同调控能更高效提升耐磨效能，可依托正交试验设计方法标定各调控手段的最优组合参数以最大化协同效应。

(二) 性能验证与评价方法

性能验证凭借模拟工况测试与微观分析联动方式开展，台架试验作为核心验证手段，需结合行业标准GB/T XXXX划定关键参数阈值，搭建制动模拟平台模拟实际行车中的制动速度、载荷及温度条件，对优化后刹车盘开展长周期制动考核，采集磨损量、摩擦系数波动及制动稳定性数据，以此评估耐磨性能与制动效能，需复现不同路况制动场景，像城市道路每分钟3-5次的频繁制动、高速公路 $\geq 0.8g$ 减速度的紧急制动，保障验证结果覆盖实际使用场景^[4]。微观分析环节利用扫描电子显微镜观测磨损后表面形貌，重点查看表面犁沟深度、剥落区域面积占比，对比未优化样品的表面损伤程度，分析磨损痕迹与片状/颗粒状磨损产物判断磨损机制是否契合预期，验证优化策略有效性，还可通过能谱分析技术检测磨损产物成分，追踪铁、碳、氧及合金元素钒钛的含量变化，明确磨损过程中元素迁移规律以进一步完善优化策略，力学性能测试需参考汽车制动部件性能规范Q/XXX，采用布氏硬度计测定材料硬度、通过夏比冲击试验评估韧性，确保满足刹车盘力学性能要求，防止因耐磨性能优化导致其他性能衰减，需覆盖常温、200℃、400℃、600℃多梯度温度条件，监测不同温度下性能变化，比如400℃时硬度保留率需 $\geq 85\%$ ，以此复现刹车盘在不同工作温度区间的性能特征。

(三) 工程应用的适配性调整

工程应用的适配性调校需结合实际生产场景与使用需求，批量生产环节需优化调控工艺的操作可行性与经济性，成分优化环节需纳入合金元素成本考量，结合现有供应链采购成本波动情况，钒钛类合金元素成本相对较高，需依托试验确定最低有效添加量，在保障性基础上控制成本投入；热处理工艺需适配工业化生产效率标准，同时兼容现有生产线设备参数，如调整加热速率适配现有炉体功率，通过缩短保温时长或简化流程提升生产效率^[5]。针对不同车型制动需求开展定制化调

控，乘用车刹车盘侧重耐磨性能与舒适性的平衡，需适度提升韧性以降低制动异响；商用车刹车盘需承载更大载荷，应对频繁重载启停场景，需优先强化硬度与抗磨能力以延长服役寿命，长期使用验证环节同样具备关键意义，需跟踪优化后刹车盘实际应用情况，记录其服役周期、故障发生频次，同步记录刹车片磨损量与刹车盘配合间隙变化，依据实际应用数据进一步调校调控参数，保障优化后刹车盘契合工程应用长期需求，该验证需覆盖高温高湿沿海、低温干燥内陆等多类气候区域，分析温度、湿度等环境因子对刹车盘性能的作用，完善适配性调校方案。

结语

本文聚焦高性能铸铁刹车盘的组织调控与耐磨性能优化开展研究，厘清铸铁核心组织的构成特征与调控路径，揭示组织因素对耐磨性能的作用机制，构建组织与耐磨性能的协同优化方案。研究证实，成分优化、热处理工艺调整及表面改性等手段能够实现铸铁组织的精准调控，进而提升刹车盘的耐磨性能，兼顾材料力学性能与制动稳定性，此研究为高性能铸铁刹车盘的设计制造提供理论支撑，后续可深化新型合金元素与先进调控工艺的探索，助力铸铁制动材料性能持续升级，适配汽车工业发展对制动系统提出的更高标准。

参考文献

- [1] 黄亚芳, 张琛, 张利敏. 汽车高碳刹车盘的生产工艺研究[J]. 模具制造, 2025, 25(06): 132-134.
- [2] 罗杨, 杨家财, 罗丽. 汽车刹车盘叠箱浇注铸造工艺优化设计[J]. 铸造设备与工艺, 2023, (04): 29-31.
- [3] 丁金根, 方继根, 严超, 等. 智能刹车片的设计与特性分析[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(04): 30-33.
- [4] 赵忠魁, 李钊, 王春轩, 等. 采用废高碳钢生生产灰铸铁刹车盘的研究与实践[J]. 铸造, 2021, 70(10): 1239-1243.
- [5] 马骏腾. 汽车刹车系统机械故障及维护措施研究[J]. 时代汽车, 2021, (18): 191-192.