

制动闸片摩擦界面演变过程研究

付 闯¹ 杨俊英² 高 飞³

(大连交通大学 连续挤压教育部工程研究中心 辽宁大连 116028)

摘要: 澄清制动闸片摩擦界面在制动过程中演变过程, 为制动闸片优化设计提供理论支持。本文针对于六边形、三角形和圆形闸片, 采用制动试验的方式, 基于 TM-I 型惯性缩比试验台, 在制动压力 1.0MPa, 制动速度 150km/h 条件下, 分析制动盘温度与闸片摩擦界面演变的关系。结果表明, 在高速制动条件下, 三种形状闸片峰值温度都出现在摩擦半径 $133 \pm 3\text{mm}$ 范围内; 闸片切入端出现大面积剥落坑, 导致金属颗粒及氧化物脱落, 在制动过程中, 一部分氧化物由于振动脱离制动, 一部分氧化物滞留在闸片与制动盘之间跟随制动, 在高温高压力的条件下, 滞留的氧化物进一步氧化, 黏着在闸片摩擦界面, 导致闸片切出端表面平整, 附着一层金属氧化膜。

关键词: 制动; 温度场; 摩擦磨损

引言:

列车盘式制动是制动盘与制动闸片相互摩擦, 将机械能转化为热能的过程。高速列车制动闸片在制动系统中是必不可少的制动元件, 在高压、高速度及进行紧急制动条件下, 闸片与制动盘相互接触^[1], 温度可达到 500°C 以上, 甚至在极特殊条件下, 瞬时温度可达到 1000°C 以上, 因此探究制动闸片在制动过程中, 影响制动盘温度场分布的因素和制动闸片摩擦面表面氧化程度与温度场之间的联系, 对制动闸片的制备及优化提供理论支持。

现阶段, 制动闸片的主要有铸铁闸片、树脂基闸片、铁基粉末冶金闸片、铜基粉末冶金闸片、碳碳复合材料闸片以及碳铜复合材料闸片^[2]等, 其中, 由于铜基粉末冶金材料的闸片拥有较好的综合性能及良好的稳定性, 国内外大量学者针对于铜基粉末冶金材料的闸片在闸片制备^[3]、成分组合^[4-8]及制动过程中制动盘温度演变^[9]等多角度探究闸片的制动性能。申长慧^[10]等利用试验的方法, 针对国内某磁悬浮列车粉末冶金材料的闸片, 在制动压力分别为 0.4、0.7、1.0 和 1.3MPa, 滑动速度 30km/h 的条件下, 采用单次持续滑动制动 3min 的方式, 试验后通过扫描电子显微镜 (SEM) 对闸片摩擦面观察, 结果表明, 闸片摩擦机制主要为磨粒磨损和剥层, 同时接触压力的增大会抑制磨粒磨损; Zhao^[11]等利用惯性制动试验的方法, 针对于 30CrSiMoVA 钢制动盘和 C/C-SiC 碳陶制动盘, 利用六边形的铜基粉末冶金闸片, 在制动 1.1MPa, 制动速度分别为 80、120、160、200、250、300、320、350 和 380km/h 的条件下, 基于 TM-I 型等效缩比模拟惯量试验台进行惯性制动试验, 试验后采用电子显微镜和扫描电子显微镜对闸片摩擦面进行观察, 结果发现, 与钢盘配副组的闸片在 80km/h 制动后表面不完整, 在 200km/h 制动后形成完整的摩擦

膜, 与碳陶配副组的闸片在 80km/h 制动后表面较完整, 在 200km/h 制动后表面出现犁沟, 剥落坑大小和数量均进一步增加, 同时在 380km/h 高速制动后, 碳陶配副组的闸片表现出更高的平均摩擦系数; 谢鑫林^[12]等利用制动试验的方法, 针对某商用 1:1 制动闸片, 在温度 -20°C , 制动压力 8~22kN, 制动速度 300km/h 条件下, 利用 1:1 制动力试验台进行惯性制动试验, 试验后对闸片表面进行观察, 发现, 在摩擦因数上升阶段摩擦界面以塑性变形和黏着磨损为主, 在摩擦因数稳定阶段, 闸片摩擦界面形成明显的氧化现象, 并形成了稳定的氧化物摩擦膜。这些工作揭示了影响闸片摩擦界面变化的因素, 然而, 对于制动过程中制动盘温度场与闸片摩擦界面的联系及闸片摩擦界面制动过程中演变的过程仍缺少研究, 而这方面的联系对闸片的设计及优化有重要意义。因此, 如果能够通过惯性制动试验的方式, 在不同制动工况条件下, 探究制动盘温度场分布与闸片摩擦界面的联系及明确闸片摩擦界面演变过程是极为必要的。

本文基于 TM-I 型惯性缩比试验台, 针对于六边形、三角形和圆形闸片, 在制动压力 1MPa, 制动速度为 150km/h 条件下, 测试制动盘温度场分布情况, 探究温度场分布对闸片摩擦界面的影响及明确闸片摩擦界面摩擦机理, 为制动闸片的设计提供参考。

1 试验材料及方法

图 1 为惯性制动试验示意图, 六边形、三角形和圆形闸片材料均为粉末冶金材料, 摩擦面积分别为 1800.09mm^2 , 1825.91mm^2 和 1809.56mm^2 , 闸片厚度均为 10mm, 三种形状的闸片平均摩擦半径均保持在 133mm 处, 制动盘材料为 4Cr5MoSiV, 制动盘外径为 320mm, 内径为 90mm, 厚度为 20mm。

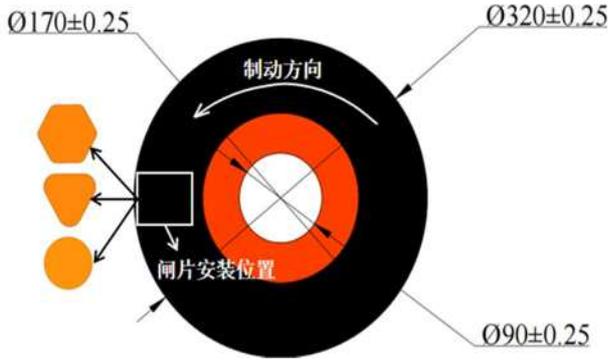


图 1 惯性制动试验示意图

图 2 为试验所用的 TM-1 型惯性缩比试验台示意图^[3], 针对于等面积的六边形、三角形和圆形闸片, 在制动压力 1MPa, 制动转动惯量 $46\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 制动速度为 150 条件下, 进行惯性制动试验, 每个速度进行三次重复试验, 正式试验前, 对闸片进行预磨, 直至摩擦面积达到 85% 以上, 每个速度待到制动盘温度冷却至 60°C , 再进行下一次试验; 采用 PYROVIEW 640L Compact 长波高像素红外热像仪对制动盘温度进行记录, 发射率设置为 0.16。试验结束后, 利用金相显微镜对三种形状的闸片摩擦界面进行观察。

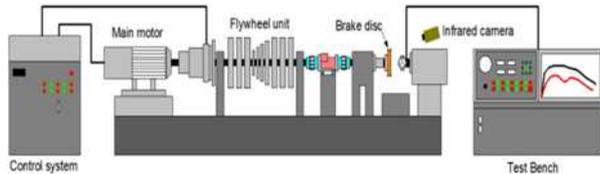


图 2 TM-1 型惯性缩比试验台示意图

2 结果分析与讨论

2.1 配对不同形状闸片的制动盘温度场变化

图 3 为制动压力 1.0MPa, 制动速度 150km/h 条件下, 配对不同形状闸片的制动盘制动 2s 和 10s 后温度场变化, 可见, 制动 2s, 六边形、三角形和圆形闸片制动盘表面最高温度分别为 149°C 、 139°C 和 156°C , 且最高温度集中在制动盘内侧, 在盘半径 160mm~148mm 和 113mm~107mm 区域, 三种形状闸片制动盘表面形成两条细窄温度带; 制动 10s, 六边形、三角形和圆形闸片制动盘表面最高温度分别由 149°C 增至 225°C 、由 139°C 增至 228°C 、由 156°C 增至 233°C , 盘面温度升高, 同时六边形闸片制动盘面在盘半径 155mm~145mm 区域形成 200°C ~ 225°C 的温度带, 在盘半径 111mm~106mm 区域形成 170°C ~ 180°C 的温度带, 三角形的在盘半径 157mm~155mm 区域形成 160°C ~ 188°C 的温度带, 在盘半径 126mm~106mm 区域形成 220°C ~ 228°C 的温度带, 圆形的在 159mm~156mm 区域形成 160°C ~ 188°C 的温度带, 在盘半径 118mm~111mm 区域形成 202°C ~ 233°C 的温度带。

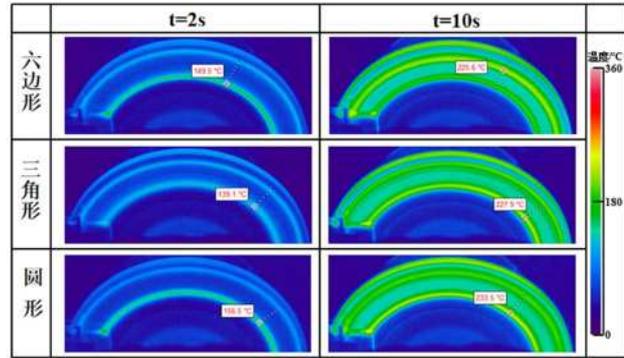


图 3 配对不同形状闸片的制动盘温度场

(150km/h, 制动 2s 和 10s)

图 4 为在制动压力 1.0MPa, 制动速度 150km/h 条件下, 制动 15s 和温度达到峰值时, 配对不同形状闸片的制动盘表面温度场变化, 可见, 制动 15s, 六边形、三角形和圆形闸片制动盘表面最高温度分别为 257°C 、 272°C 和 274°C , 六边形闸片制动盘面在盘半径 144mm~126mm 区域, 形成 235°C ~ 257°C 的宽温度带, 三角形的在 156mm~145mm 区域形成 240°C ~ 272°C 的细窄温度带, 圆形的在盘半径 130mm~122mm 区域形成 265°C ~ 274°C 的高温带; 峰值温度时刻, 六边形、三角形和圆形闸片制动盘表面温度分别由 257°C 增至 348°C , 由 272°C 增至 325°C , 由 274°C 增至 359°C , 三种形状制动盘表面中部都形成了明显的高温带。

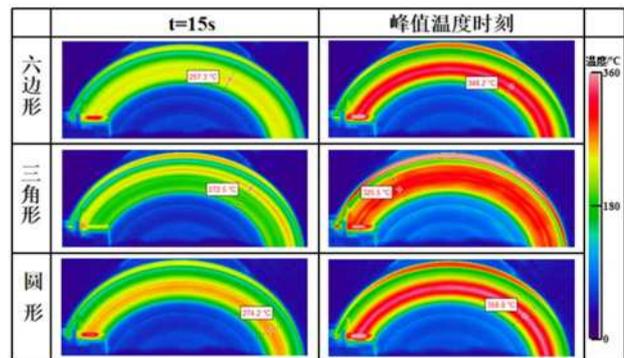


图 4 配对不同形状闸片的制动盘温度场

(150km/h, 制动 15s 和峰值温度时刻)

图 3~4 结果表明, 在高速条件下, 闸片形状对制动盘表面温度分布影响不大。其中, 制动速度 150km/h 条件下, 六边形、三角形和圆形闸片制动盘表面最高温度分别出现在盘半径 136mm、130mm 和 135mm 处, 最高温度分别为 348°C 、 325°C 和 358°C , 在高速条件下, 不同形状的闸片除最高温度有差别外, 基本都出现在摩擦半径 $133 \pm 3\text{mm}$ 范围内。同时, 在高速条件下, 由于制动盘中部温度高, 盘热膨胀增大, 冷却后制动盘中部的热变形程度要大于盘两侧的, 这就导致在进行下一次试验时制动盘两侧出现明显温度带, 随着制

动过程的进行,盘两侧温度高于中部,盘两侧的热变形大于盘中部,进行温度带逐渐向中部汇聚,形成一条温度带,最终盘面温度分布趋于一致。

2.2 闸片摩擦界面分析

图 5 为制动压力 1MPa, 制动速度 150km/h 条件下, 三种形状闸片制动后摩擦界面摩擦磨损情况, 经观察发现, 六边形闸片在盘半径 106mm~119.5mm 和 146.5mm~160mm 区域, 同时表面出现红橙色的金属氧化物, 出现大量犁沟, 表面较为平整, 在盘半径 119.5mm~146.5mm 区域, 表面出现大面积的剥落坑, 磨损严重; 三角形闸片在盘半径 106mm~119.5mm 和 146.5mm~160mm 区域, 表面磨损严重, 出现大量剥落坑及犁沟, 表面附着一层粉红色金属氧化物, 在 119.5mm~146.5mm 区域, 闸片表面剥落坑占比较大, 表面磨损严重; 圆形闸片在盘半径 106mm~119.5mm 和 146.5mm~160mm 区域, 表面犁沟占比较大, 表面出现红橙色金属氧化物, 闸片表面较为平整, 在 119.5mm~146.5mm 区域, 闸片表面剥落坑占比大于犁沟占比, 表面磨损严重。可见, 三种形状闸片两侧表面较为平整, 在摩擦半径范围, 磨损严重。

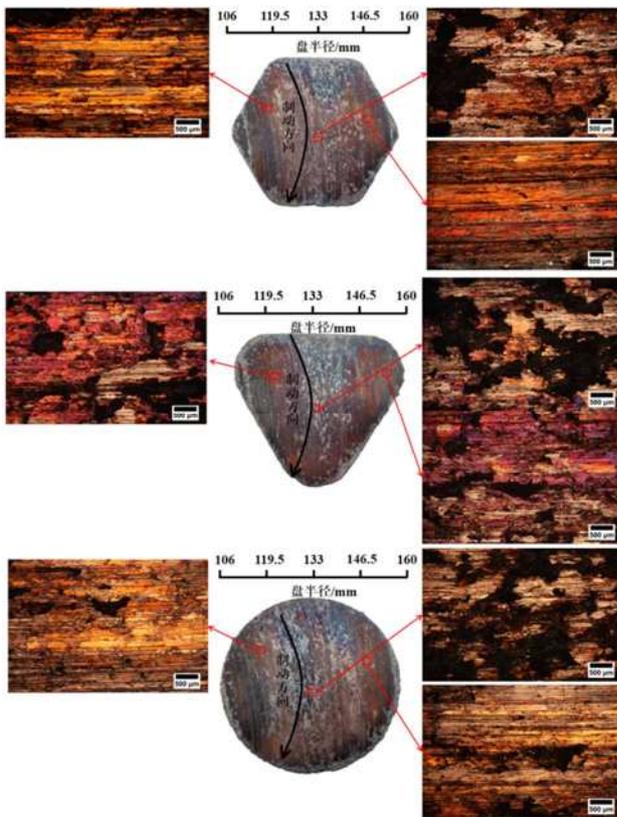


图 5 不同形状闸片制动后摩擦界面形貌 (150km/h)

根据图 5 可知, 盘面温度越高, 闸片氧化程度越大。结合制动盘温度场分布, 在制动前期, 由于制动盘的热变形, 导致闸片两侧

温度较高, 受到的压力较大, 进而导致闸片两侧氧化程度要高于闸片中部; 随着制动过程的进行, 闸片中部起主导作用, 闸片中部温度逐渐升高, 在高温高压力的条件下, 闸片中部容易发生热膨胀现象, 导致闸片中部有金属颗粒及部分金属氧化物脱落的现象, 致使闸片中部表面磨损严重。

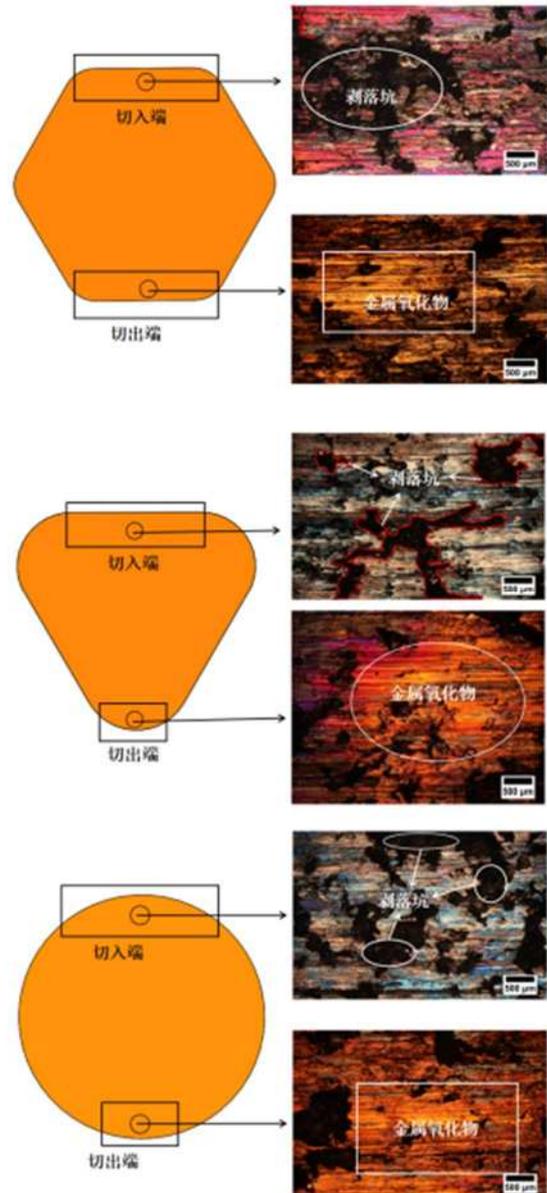


图 6 不同形状闸片切入端与切出端摩擦磨损情况

2.3 不同形状闸片切入端与切出端表面形貌分析

对制动压力 1.0MPa, 制动速度 150km/h 条件下的三种形状闸片切入端和切出端进行金相显微观察, 表面形貌如下图 6 所示。可见, 六边形闸片切入端出现大面的剥落坑, 表面出现硬质金属颗粒, 出现粉红色金属氧化物, 切出端出现红橙色金属氧化物, 表面较为完

整;三角形闸片切入端剥落坑占比小,犁沟现象明显,磨粒磨损严重,切出端表面形成明显的红橙色金属氧化物,表面较为平整;圆形闸片切入端剥落坑占比较大,表面氧化程度较低,出现蓝绿色金属氧化物,切入端表面磨损严重,切入端表面形成明显的红橙色金属氧化物,表面较为平整。

三种形状闸片切入端表面有金属氧化物的出现并有多条犁沟和大面积的剥落坑,说明切入端有较多的金属及第三体物质脱落;结束端三种形状闸片表面均有大面积的金属氧化物黏着在闸片表面。

根据图 6 可知,闸片结构对闸片切入端表面影响明显。不同形状闸片切入端由于其自身结构带来的差异导致在制动过程中受到的瞬时接触应力不同,进而导致闸片切入端表面的磨损程度存在差异,六边形闸片切入端相比于其他形状,表面形成大面积的剥落坑,说明六边形“横边”产生的瞬时接触应力最大。

2.4 闸片摩擦界面机理

图 7 为闸片摩擦界面摩擦机理图,根据三种闸片切入端和切出端制动后表面形貌,发现,切入端闸片表面出现大面积剥落坑,切出端表面较为平整,这说明闸片切入端脱落的物质一部分飞出表面,一部分滞留在其中,这就导致硬质颗粒金属跟随制动造成严重的磨损,随着制动过程的进行,闸片表面本身金属发生氧化,滞留的第三体进一步氧化粘着在闸片上形成的金属氧化膜。

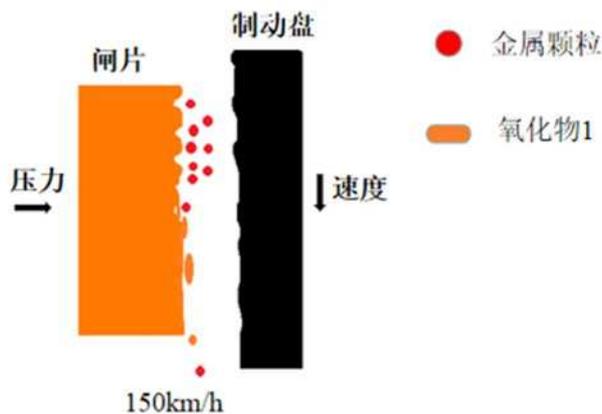


图 7 闸片摩擦界面摩擦机理示意图

3 总结

1.高速条件下,制动闸片形状对制动盘面峰值温度出现位置影响不大。在制动速度 150km/h、条件下,六边形、三角形和圆形闸片盘面最高温度都出现在摩擦半径 $133 \pm 3\text{mm}$ 范围内。

2.制动速度对闸片摩擦界面氧化程度影响显著。在 150km/h 条件下,三种形状的闸片摩擦界面形成红橙色金属氧化物。

3.在制动过程中,闸片切入端出现大量剥落坑,磨损严重,主要发生磨粒磨损,闸片切出端出现金属氧化物附着现象,主要发生黏着磨损。

参考文献

- [1]季助,严宏志.高速列车粉末冶金制动闸片的应用与研究[J].轨道交通材料,2023,2(04):1-7.
- [2]曲选辉,章林,吴佩芳等.现代轨道交通刹车材料的发展与应用[J].材料科学与工艺,2017,25(02):1-9.
- [3]孙海影,高文婧,陈华等.铜基刹车摩擦片的制备及性能研究[J].粉末冶金工业,2023,33(04):49-53.
- [4]赵运才,刘存宇,王慧鹏等. Al₂O₃ 增强粉末冶金铜基摩擦材料摩擦磨损性能研究[J].润滑与密封,2023,48(09):55-62.
- [5]郝文龙,刘英凯,刘建刚等.钴粉涂覆石墨对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J].金属材料与冶金工程,2023,51(03):3-8.
- [6]刘军锋,张鑫,上官宝等. SiO₂ 表面金属包覆处理对铜基粉末冶金材料制动摩擦磨损性能的影响[J].润滑与密封,2023,48(06):15-24.
- [7]刘英凯,郝文龙,刘建刚等. Ti₃SiC₂ 替代石墨对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J].润滑与密封,2023,48(06):61-65.
- [8]肖金坤,李天天,陈娟等.高速列车铜基摩擦材料的成分设计研究进展[J].材料导报,2023,37(23):149-159.
- [9]陈有洁,符蓉,杨俊英等.列车制动盘温度演变规律试验研究[J].中国铁道科学,2023,44(02):128-138.
- [10]申长慧,米雪,彭金方等.铜基粉末冶金刹车闸片磨损形貌演变研究[J].润滑与密封,2023,48(02):75-82.
- [11]Zhao S, Yan Q, Peng T, et al. The braking behaviors of Cu-Based powder metallurgy brake pads mated with C/C - SiC disk for high-speed train[J].Wear, 2020, 448-449.
- [12]谢鑫林,刘晓军,翟财周等.300 km/h 动车组制动闸片低温摩擦性能与微观形貌演变[J].轨道交通材料,2023,2(01):65-68.
- [13]周高伟,段军军,史月昆等.制动过程中闸片材料与制动盘温度关系试验研究[J].润滑与密封,2023,48(01):142-149.
- [14]唐斌,范志勇,项载毓等.高速列车制动摩擦块切入端特征对制动界面特性的影响[J].中国机械工程,2021,32(04):412-419.