

# 高速列车碳陶制动盘制动性能对比研究

徐忠宣<sup>1</sup>, 单昌胜<sup>2</sup>, 梁海泉<sup>3</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 科技发展部, 山东 青岛 266111;

2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804;

3. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 针对碳陶制动盘在全制动工况下制动能力不明的问题, 提出了一种基于匹配参数表征的制动盘制动性能对比分析方法。分别考虑以制动减速度为特征的动力学性能, 和以盘面最大温升累积为特征的热力学性能, 建立适用于多种线路工况的碳陶制动盘制动性能仿真分析模型。仿真实验结果表明, 在设定工况下碳陶制动盘的紧急制动距离最高可达 6726 m, 盘面最高温度可达 941.4 °C; 在紧急制动模式下实施制动, 盘体温升速率明显提升, 对高速列车制动单元的安全性产生威胁。

**关键词:** 碳陶制动盘; 制动性能; 制动距离; 盘面最大温升

中图分类号: U271.91

文章编号: 1000-0682(2024)02-0080-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.014

## Comparative study on braking performance of carbon ceramic brake disks for high-speed railway

XU Zhongxuan<sup>1</sup>, SHAN Changsheng<sup>2</sup>, LIANG Haiquan<sup>3</sup>

(1. Science Development Department, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Shandong Qingdao 266111, China;

2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of unknown braking ability of carbon ceramic brake discs under full braking conditions, this paper proposes a comparative analysis method of braking performance of discs based on matching parameter characterization. The kinetic performance characterized by braking deceleration and the thermodynamic performance characterized by the accumulation of the maximum temperature rise of the disc surface are considered respectively, and the simulation and analysis model of the braking performance of carbon ceramic brake discs applicable to a variety of line conditions is established. Simulation results show that in the set working conditions of carbon ceramic brake disc emergency braking distance up to 6726 m, the maximum temperature of the disc surface up to 941.4 °C. In the emergency braking mode to implement braking, the disc body temperature rise rate is significantly increased, the threat to the safety of high-speed train braking unit.

**Keywords:** carbon-ceramic brake disk; braking performance; braking distance; maximum temperature of the disk

## 0 引言

由碳陶(C/SiC)材料制成的制动盘相对于铸钢

制动盘具有轻质、耐高温腐蚀、摩擦因数大而稳定等优点, 在高速列车的制动过程中具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。制动盘在工况下实施制动时的动力学特征和热力学特征是反映其制动性能的重要指标, 动力学特征包括制动减速度、制动距离等参数, 热力学特征包括最高温度、温升速率等参数, 综合考虑上述参数间的交互作用, 可以有效验证碳陶制动盘与高速列车制动系统的匹配适应性。

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3703805)

第一作者: 徐忠宣(1982—), 男, 山东青岛人, 本科, 高级工程师, 研究方向为机械设计及及其自动化。

传统制动盘的两类力学特征已受到了学者们的广泛关注,其相关研究所使用的方法论、仿真测试结论等对研究碳陶制动盘制动性能具有参考价值。邵林、章阳等<sup>[2-3]</sup>通过对高速列车减速度标准值进行线下延拓,并基于制动盘热负荷优化列车平均制动减速度,从而推算了适用于 400 km/h 高速列车紧急制动距离的标准值;Bao Jiusheng 等<sup>[4]</sup>研究发现,制动盘在升温过程可能导致摩擦副磨损增加、制动效率下降和制动盘热疲劳开裂,在高温( $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ )条件下盘体损伤概率急剧增大;农万华<sup>[5]</sup>等完成了锻钢摩擦副 1:1 制动试验台试验,并使用有限元分析技术研究影响盘面温度的影响因素,推断出制动速度和压力是盘面形成高温区的主要原因。孙梦洁<sup>[6]</sup>采用了 ADINA 软件数值模拟和列车缩比试验相结合的方法研究了制动盘摩擦系数影响盘面温度的规律,得出温度与摩擦系数正相关,且制动初速度、制动压力越大,摩擦系数对盘温度影响程度越大。

该文针对全制动工况下碳陶制动盘制动能力不明的问题,提出了一种基于匹配参数表征的碳陶制动盘制动性能对比分析方法。该方法分别采用受制

动减速度控制的制动距离计算模型,和能量折算法仿真热输入的制动盘热量计算模型,合理考虑相关参数,分别对比研究了 5 种制动工况下碳陶制动盘的制动减速度、制动距离和盘面最大温升等参数,并以此 3 类参数的数值特征为基准分析碳陶制动盘的制动性能,为研究碳陶制动盘能否适用于高速列车各种现实制动场景提供了参考价值。

## 1 碳陶制动盘有限元模型建立

高速动车组列车因其速度非常快,在制动时常采用复合制动方式,但当有紧急情况发生时,高速动车组的轴装盘式制动器将发挥着举足轻重的作用。取某型号高速动车组拖车碳陶(C/SiC)制动盘为研究对象,制动盘材料结构及热力学参数见表 1 和表 2,制动盘三维简化模型如图 1 所示。由于制动盘是轴对称结构,为节省计算时间,提高计算效率,取制动盘的 1/4 结构建立有限元分析模型,并设置为结构对称边界条件,单元类型选用五面体单元,有限元模型共计包含 314 124 个节点和 69 022 个单元,如图 2 所示。

表 1 轴装碳陶制动盘材料结构参数

参数	车轮直径/mm	制动盘内径/mm	制动盘外径/mm	制动盘厚度/mm	密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa	冲击韧性/( $\text{kJ}/\text{m}^2$ )
数值	920	360	640	80	2.3	$6 \times 10^4$	0.3	$\geq 250$	$\geq 150$	$\geq 25$

表 2 轴装碳陶制动盘热力学参数

参数	数值	说明	参数	温度条件/℃	数值
热膨胀系数/(1/K)	$2.5 \times 10^{-6}$	平行于摩擦面方向	比热容/(J/kg · ℃)	100	800
	$5.0 \times 10^{-6}$	垂直于摩擦面方向		300	1300
热导率/(W/m · ℃)	85	平行于摩擦面方向		500	1550
	45	垂直于摩擦面方向		700	1700
				900	1600

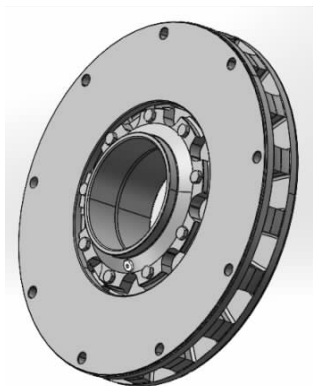


图 1 碳陶制动盘三维模型

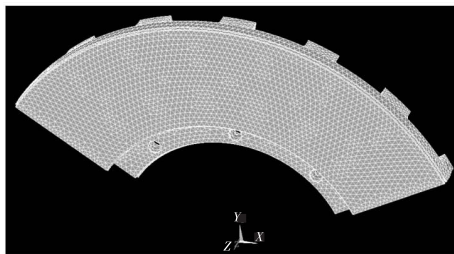


图 2 碳陶制动盘的 1/4 有限元模型

## 2 制动性能参数输入边界

### 2.1 线路制动工况的输入

制动盘的制动能力分析需要在限定的列车制动工况下进行。结合 Haiquan Liang 等<sup>[7]</sup>总结的能有

效表达线路制动工况参数,该文将考虑以制动初速度、线路坡度和列车制动模式 3 种参数为组合的制动工况。其中制动初速度取值为 200 ~ 400 km/h;线路坡度为 +10‰(上坡)和 0(无坡);制动模式包括紧急制动 EB、紧急制动 EP 和最大常用制动模式,列车在 3 种制动模式下具有不同的制动控制方案,各模式下的单元制动缸输出压强数值变化规律如图 3 所示。为针对性地对比分析多种制动工况下碳陶制动盘的制动性能,选取由此类参数组成的 5 种典型制动工况为该对比研究的工况,工况编号及参数设置如表 3 所示。

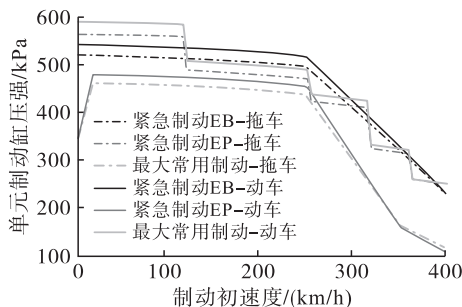


图3 制动缸压强变化图

表3 制动工况参数的选取

制动工况 编号	模拟线路 坡度/‰	制动模式	制动初速度 /(km/h)
A	+10	紧急制动 EB	
B		紧急制动 EP	200, 250,
C		紧急制动 EB	300, 350,
D	0	紧急制动 EP	380, 400
E		最大常用制动	

## 2.2 制动盘动力载荷输入

减速度是评价列车制动能力的关键参数,它影响了列车的整体制动距离,以及制动盘的热输入量,在仿真计算时应确定列车减速度的变化数值。简化列车制动过程中沿制动方向上的受力,主要包括阻力  $W$  和制动力  $F_B$ ,如图 4 所示,二者叠加作用在车体上,为列车提供制动减速度,减速度计算式如式(1)所示:

$$a = \frac{W + F_B}{M + J_z \cdot M_0} \quad (1)$$

式中:  $M$  为列车的质量;  $M_0$  为列车的空车质量;

$J_z$  为列车惯性换算系数,动拖车均取 0.06,式(1)的分母部分表示为消除制动惯性而取的列车换算质量。

列车在制动时所受的阻力被划分为以空气阻力为主的基本阻力,和以加算坡度千分数  $i$  表示的附加阻力,如式(2)所示:

$$W = W_{\text{基}} + W_{\text{附加}} = (A + Bv + Cv^2) \cdot G + i \cdot G \quad (2)$$

式中:  $G$  为列车所受的重力;  $A, B$  和  $C$  分别为与列车型号相关的阻力系数,如 CR400AF 型号列车分别取 0.35,  $2.4 \times 10^{-3}$  和  $1.03 \times 10^{-4}$ <sup>[8]</sup>;在该研究中,因为线路工况仅考虑线路坡度,因此附加阻力仅为坡道产生的阻力,  $i$  也即表示线路坡度千分数。

列车可供制动力由空气制动力(制动夹钳单元提供)和电制动力构成,如式(3)所示:

$$F_B = F_{B\text{空}} + F_{B\text{电}} = \sum_{i=1}^8 \mu n_i K_i \frac{r_i}{R} + \sum_{j=1}^{16} F_{ele} \quad (3)$$

式中:以 8 编组动车组为例,  $i$  为车厢号;  $n_i$  为  $i$  号车厢配备的摩擦副数目;  $r_i$  和  $R$  分别为摩擦半径和车轮半径;  $\mu$  为碳陶摩擦副的平均摩擦系数,依据试验台架测试的经验数据,列车采用紧急制动 EB 模式时  $\mu$  取 0.362,采用紧急制动 EP 模式时  $\mu$  取 0.348,采用最大常用制动模式时  $\mu$  取 0.324;  $K_i$  为  $i$  号车厢的制动压力;  $F_{ele}$  为单根动车车轴提供的电制动力,为突出反应制动盘的制动能力,模拟过程中不施加电制动力。

## 2.3 制动盘热载荷输入

盘面最高温度是反映碳陶制动盘在一次制动过程中安全性的重要参数。能量折算法被认为是快速仿真计算制动盘盘面峰值温度的仿真方法<sup>[9]</sup>,该方法假设热流输入在摩擦面上的分布与摩擦半径有关。使用等距分割法将盘面沿制动半径分割成数量不等的摩擦环,并假设同一摩擦环上的热流输入密度相等,以此估算制动盘盘面上的热流输入。摩擦环划分数量越多,仿真计算越精确,仿真实验的对象为 1/4 碳陶制动盘,并将摩擦面均分为 10 个摩擦环,如图 5 所示。

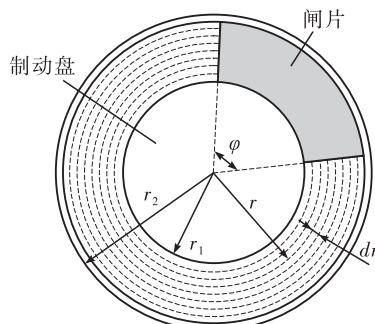


图5 制动盘环形微分示意图

根据摩擦副在径向的摩擦接触长度,计算制动盘表面的热流密度为:

$$q(t) = \sum_{i=1}^{10} \eta \frac{ma\varphi(v_0 + at) \cdot r_i}{\pi n A_{pad}(r_1 + r_2)} \quad (4)$$

基于式(4),结合式(1)及列车轴重和制动初速度等数据可以计算各微元摩擦环上分配的热流密度,施加于制动盘表面。

在列车制动过程中,制动盘与周围空气域发生强制对流换热,根据经验公式<sup>[10]</sup>,对制动盘盘面、周面和散热筋结构建立不同的热对流模型,分别为式(5)~式(7):

$$h_{c1} = \begin{cases} 0.883 Re^{0.5} Pr^{0.3} \frac{\lambda_a}{L} & Re \leq 5 \times 10^5 \\ 0.124 (Re^{0.3} - 2.3 \times 10^4) Pr^{0.3} \frac{\lambda_a}{L} & Re > 5 \times 10^5 \end{cases} \quad (5)$$

$$h_{c2} = C Re^n \frac{\lambda_a}{L} \quad (6)$$

$$h_{c3} = C Re^n Pr^{0.3} \frac{\lambda_a}{L} \quad (7)$$

式中: $h_{c1}$ 、 $h_{c2}$ 和 $h_{c3}$ 分别为制动盘盘面、周面和散热筋的对流换热系数; $Pr$ 为普朗特数; $\lambda_a$ 为空气的导热系数; $L$ 为特征长度; $Re$ 为雷诺数; $C$ 和 $n$ 为与雷诺数相关的参数,可通过传热学表<sup>[11]</sup>得到。

### 3 碳陶制动盘多工况下制动性能分析

#### 3.1 碳陶制动盘动力学参数分析

由式(1)计算出各线路制动工况下碳陶制动盘的制动减速度,得出如表4和图6所示的减速度数据。根据图6中A和C组、B和D组减速度对比分析,可以看出坡度的存在并不影响减速度的变化趋势,且上坡的存在会提升列车的减速度数值。由式(2)和式(3)可知,同一制动模式下制动盘可供制动力数值不变,而坡度的增大增加了列车阻力,从而使得制动盘减速度数值阶跃增加。

表4 列车减速度计算值

列车速度 /(km/h)	制动减速度数值/(m/s <sup>2</sup> )				
	制动工况 A	制动工况 B	制动工况 C	制动工况 D	制动工况 E
200	1.295	1.230	1.199	1.136	1.047
250	1.295	1.230	1.201	1.138	1.047
300	1.080	1.104	1.004	1.023	0.724
350	0.865	0.864	0.805	0.802	0.400
380	0.736	0.718	0.686	0.667	0.340
400	0.650	0.718	0.606	0.668	0.303

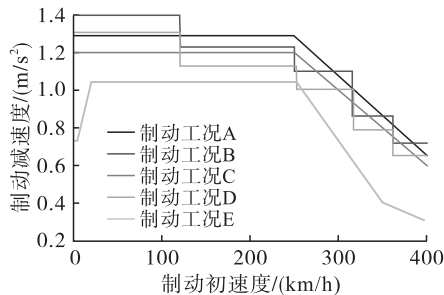


图6 碳陶制动盘各制动工况下的减速度曲线

由制动盘减速度曲线继而可以求出制动距离,

如表5和图7所示。根据速度350 km/h中国标准动车组技术条件要求,列车在制动初速度为350 km/h条件下实施紧急制动,制动距离须 $\leq 6500$  m。由图7中的曲线对比可以得出,配备碳陶制动盘的列车紧急制动距离均在安全阈值规定的范围内,且线路坡度对制动距离的影响不大,在制动初速度为300 km/h及以下时几乎无影响;紧急制动模式下,碳陶制动盘的制动距离与制动初速度呈近似线性增长关系,而最大常用制动模式下,二者呈近似指数增长关系。

表5 列车制动距离计算值

制动初速度 /(km/h)	制动距离计算值/m				
	制动工况 A	制动工况 B	制动工况 C	制动工况 D	制动工况 E
200	1244.4	1250.6	1336.7	1346.6	1516.9
250	1927.9	1968.1	2072.2	2121.6	2356.2
300	2826.9	2931.4	3043.1	3162.8	3584.3
350	4133.1	4290.3	4448.6	4630.1	5905.1
380	5197.2	5397.7	5590.8	5821.6	8192.3
400	6070.5	6239.4	6527.3	6726.3	10 063.0



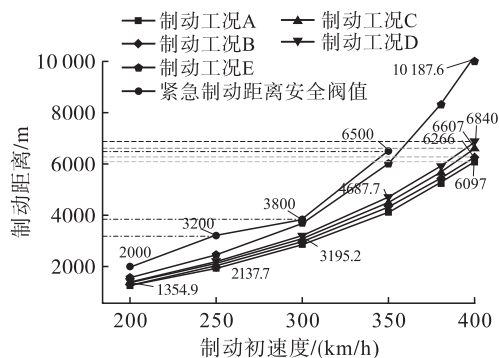
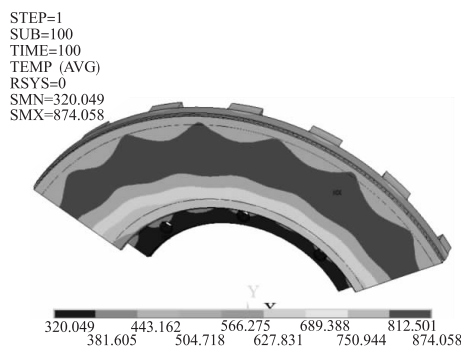


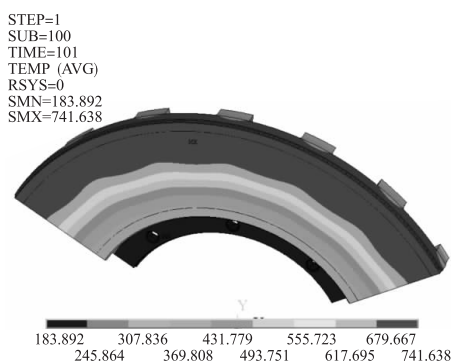
图7 碳陶制动盘各制动工况下制动距离曲线

### 3.2 碳陶制动盘热性能参数分析

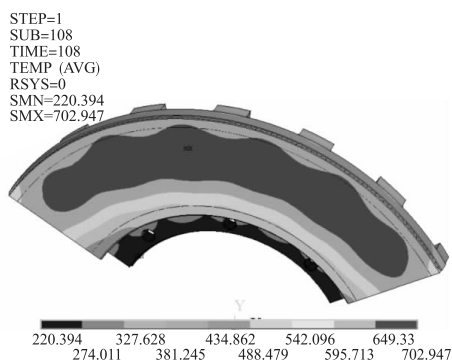
基于表3设定的5种制动工况,制动初速度取400 km/h,使用能量折算法预估计算碳陶制动盘在制动时的盘面最高温度。使用仿真软件对制动过程进行模拟计算,得到图8所示的各制动工况下制动盘在制动结束时刻温度分布云图。



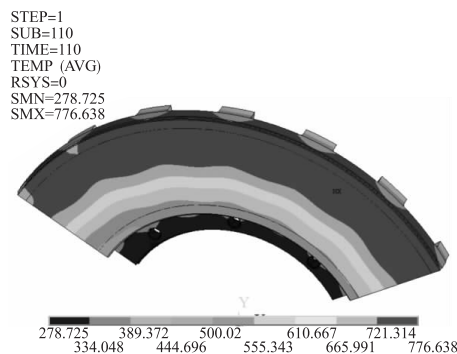
(a) 制动工况A



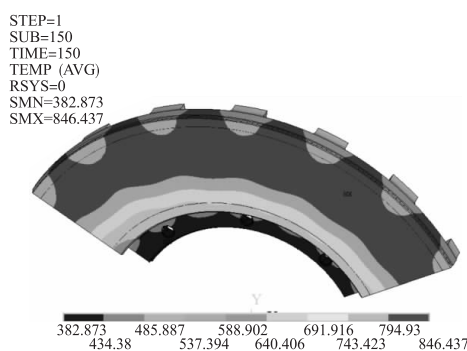
(b) 制动工况B



(c) 制动工况C



(d) 制动工况D



(e) 制动工况E

图8 各制动工况下碳陶制动盘温度云图

由于碳陶制动盘制动过程中盘面最高温度的位置是变化的,为降低此规律给温升极限仿真带来的影响,故依据图9在碳陶制动盘高温带区域选取3个节点,取3个节点温度的平均值,作为盘面温度的最高点位置的温度数值。温度平均值随制动时间变化的关系如图10所示。

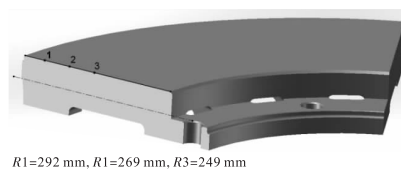


图9 制动盘盘面节点选取

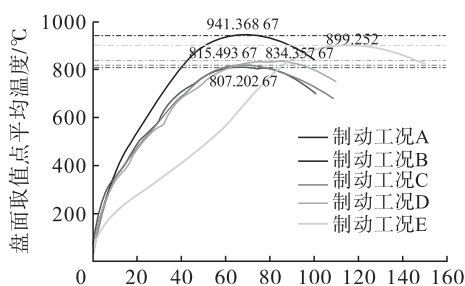


图10 制动盘温度仿真结果图

分析温度变化曲线,对比制动工况A,B,C和D可知,碳陶制动盘在制动工况A下的盘面最大温度达到941.4℃,比制动工况D条件下的最高温度高出107℃;制动工况B,C和D条件下的盘面最高温

度接近,且温升速率一致,其中制动工况 A、B 和 C 条件下碳陶制动盘均在制动时间为 65 s 时达到最高温度,制动工况 D 则在制动时间为 83 s 时达到最高温度。制动工况 E 对应的列车制动模式为最大常用制动,该条件下碳陶制动盘于 113 s 时达到峰值温度 899.3 °C。

列车在 4 种紧急制动工况下制动,碳陶制动盘盘面最高温度可达 941.4 °C,其极易使盘体因热疲劳而产生热裂纹,减少使用寿命;同时,巨幅热流使车下制动装置和转向架温度升高,增加了行车安全的风险。因此,列车在经历一次紧急制动后,应及时评估碳陶制动盘、制动缸及转向架的使用寿命。

#### 4 结论

针对设置的 5 种制动工况,分别计算各工况下列车的制动距离,由于系统具有稳定及高数值的制动减速度,使用碳陶制动盘可以大幅降低列车的制动距离,在制动初速度为 350 km/h 及紧急制动 EP 模式下,列车的最大制动距离为 4630.1 m,远小于规定的最高 6500 m 的距离限值。

使用能量折算法仿真计算得到的盘面温升极限数值与实际测试结果比较相符。在设定的 5 种制动工况下,制动盘盘面的最高温度随制动坡度的增加而减小,不同制动模式下制动盘温升规律有所差别,温度极限值出现的时机也有所不同。

#### 参考文献:

- [1] 张梦航,段俊杰,王晶晶. 碳纤维增韧陶瓷基摩擦材料的研究现状、挑战与展望[J]. 硅酸盐学报,2021,49(9):1878-1897.
- [2] 邵林,杨欣,郭奇宗. 时速 400 km 动车组紧急制动距离标准设计研究[J]. 铁道机车车辆,2021,41(5):144-148.
- [3] 章阳,吕宝佳,金哲. 高速动车组制动距离及制动减速度参数研究[J]. 铁道机车车辆,2020,40(03):11-16.
- [4] BAO Jiusheng, LIU Jing, YIN Yan, et al. Characterization and experiments on the friction catastrophe behaviors of brake material during emergency braking[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 55(2):55-62.
- [5] 农万华,熊启纯,韩晓明,等. 列车制动盘表面温度分布演变的研究[J]. 机械,2021,48(8):46-51.
- [6] 孙梦洁. 摩擦系数对制动盘温度的影响[D]. 大连:大连交通大学,2020.
- [7] LIANG Haiquan, SHAN Changsheng, WANG Xueping, et al. Matching Analysis of Carbon - Ceramic Brake Discs for High - Speed Trains[J]. Applied Science, 2023, 13(7):4532.
- [8] 薛应花,丁军君,王利军,等. 面向川藏铁路的机车车辆运行基本阻力研究[J]. 机车电传动,2021(3):67-72.
- [9] 左建勇,王雪萍,周苏芬,等. 动车组制动盘热仿真方法适用性研究[J]. 中国铁道科学,2022,43(5):78-86.
- [10] ALNAQI A A, BARTON D C, BROOKS P C. Reduced Scale Thermal Characterization of Automotive Disc Brake[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:658-668.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006:173.
- [12] 王静,王海亮,向茂生,等. 基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J]. 仪器仪表学报,2012,33(07):1460-1468.
- [13] LI Y, YOUNG Y T. Subpixel edge detection and estimation with a line scan camera[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1987, 35(1):105-112.
- [14] TABATABAI A J, MITCHELL O R. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1984, PAMI-6(2):188-201.
- [15] NALWA V S, BINFORD T O. On detecting edges. [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):699-714.
- [7] 张洪,周益华,吴静静. 基于改进 Canny 和异常轮廓点搜索的密封圈毛刺检测系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(10):126-130.
- [8] 陈浩,黄勋,赵志明. 一种基于改进 Sobel 算子的苹果图像边缘提取算法的研究[J]. 天津农业科学,2020,26(09):51-55.
- [9] ZHOU R, LIU D. Quantum image edge extraction based on improved sobel operator[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2019, 58(9).
- [10] 王春普,文怀兴,王俊杰. 基于机器视觉的大枣表面缺陷检测[J]. 食品与机械,2019,35(07):168-171.
- [11] 张棋,贾方秀,殷婷婷. 基于改进 Sobel 算法的实时图像边缘检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(02):101-104+108.

(上接第 43 页)