

## 城市轨道交通车辆制动盘散热筋设计及有限元分析\*

邬娜<sup>1</sup> 宋浩<sup>1</sup> 杨建伟<sup>1</sup> 吴春光<sup>2</sup> 王承旭<sup>3</sup>

(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院, 100044, 北京; 2. 中国人民解放军第五七一五工厂, 471003, 洛阳; 3. 北京市地铁运营有限公司机电分公司, 100043, 北京)

**摘要** [目的] 目前,城市轨道交通车辆的制动盘散热性能有待提升,因此,有必要研究新型散热筋的优化设计方案。[方法] 采用有限元分析的数值模拟方法,通过计算机辅助设计软件,建立新型散热筋的制动盘三维模型。提出不同散热筋设计方案,利用有限元分析技术对不同散热筋设计方案进行热分析模拟。通过比较不同散热筋设计在轴装制动盘和轮装制动盘上的热传导效率和散热路径,评估不同散热筋制动盘的散热能力。[结果及结论] 轮装直板式散热筋和轴装圆柱式散热筋设计方案均显著优化了散热路径,提升了热量从热源向外部冷却介质的转移效率。散热筋的循环对称设计有效降低了制动盘生产过程的复杂性,同时最大限度地减少了对车轴等相关部件的损伤,能够为列车的安全可靠运行提供保障。

**关键词** 城市轨道交通; 车辆; 制动盘; 散热筋; 有限元分析

**中图分类号** U270.35

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2025.05.049

### Design and Finite Element Analysis of Brake Disc Heat Dissipation Rib for Urban Rail Transit Vehicle

WU Na<sup>1</sup>, SONG Hao<sup>1</sup>, YANG Jianwei<sup>1</sup>, WU Chunguang<sup>2</sup>, WANG Chengxu<sup>3</sup>

(1. School of Electromechanical and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 100044, Beijing, China; 2. Chinese People's Liberation Army 5715 Factory, 471003, Luoyang, China; 3. Beijing Metro Operation Co., Ltd., Electromechanical Company, 100043, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] At present, the heat dissipation performance of brake discs for urban rail transit vehicles needs to be improved. Therefore, it is necessary to study the optimization design scheme for a new type of heat dissipation ribs. [Method] By adopting the numerical simulation method of finite element analysis, a three-dimensional brake disc model with new type heat dissipation ribs is established through com-

puter-aided design software. Different design schemes for heat dissipation ribs are proposed, and the thermal analysis simulation for these schemes is conducted by the finite element analysis technology. In terms of heat conduction efficiency and heat dissipation paths on axle-mounted brake discs and on wheel-mounted ones, different heat dissipation rib designs are compared, and the heat dissipation capacities of the brake discs with different heat dissipation ribs are evaluated. [Result & Conclusion] Both the design schemes of the wheel-mounted straight-plate heat dissipation ribs and the axle-mounted cylindrical heat dissipation ribs significantly optimize the heat dissipation paths, improving the transfer efficiency of heat from the heat source to the external cooling medium. The cyclic symmetric design of the heat dissipation ribs effectively reduces the complexity of the brake disc production process, and minimizes damages simultaneously to the relevant components such as the axles, therefore can provide a guarantee for the safe and reliable train operation.

**Key words** urban rail transit; vehicle; brake disc; heat dissipation rib; finite element analysis

随着高速动车组的不断提速,列车的制动能力迎来了更为严格的要求<sup>[1]</sup>。制动盘在制动过程中产生的热量会对材料造成损伤积累,进而影响铁路的运营安全。文献[2]提出了3种散热筋模型,在列车运行速度为350 km/h的高铁上进行数值模拟,证实其在散热方面的优异性能。文献[3]通过对泪滴状肋制动盘的模拟,证实了对流换热系数和盘面温度的变化情况是决定制动盘散热性能的重要因素。散热筋正常制动时的散热状态直接影响了空气流的流向和流场,进而会降低换热效率。本文采用数值模拟方法,以某型号城市轨道交通(以下简称“城轨”)车辆(本文的城轨车辆特指动车)的轮装制动盘、轴装制动盘为例,利用SolidWorks软件建立三维实体模型,并进行热力学分析。本文研究可

\* 国家自然科学基金项目(52272385,52305090);北京市自然科学基金项目(L211007)

为解决制动盘散热问题提供工程经验和理论基础。

## 1 城轨车辆制动盘设计

### 1.1 制动盘材料性能及选择

制动盘材料决定了车辆的制动性能,是城轨车辆制动过程的关键零部件。

通过将钢铁制造的制动板与熔铸铁板结合在一起,形成牢固的制动部件,其摩擦因数可以抵御外界的环境变化影响,如制动初始速率、气压、水分等,从而使得制动盘更加耐久与耐用<sup>[4]</sup>。本文的制动盘材质采用 AISI1020 钢,将冷轧处理材料作为仿真城轨车辆的制动盘材料。

### 1.2 制动盘相关参数选择及计算

#### 1.2.1 轮装制动盘

对城轨车辆制动工况进行模拟试验,轮装制动工况下的参数如表 1 所示。不同温度下,制动盘材料的相关参数如表 2 所示。

表 1 轮装制动工况下的参数

Tab.1 Parameters under wheel-mounted braking conditions

参数	取值
制动初速度/(km/h)	300
平均加速度/(m/s <sup>2</sup> )	0.6
紧急制动减速度/(m/s <sup>2</sup> )	1.3
轴重/t	14
制动盘外径/mm	561
制动盘内径/mm	333
制动盘厚度/mm	50
闸片摩擦半径/mm	310
环境温度/℃	20

表 2 不同温度下制动盘材料的相关参数

Tab.2 Relevant parameters of the brake disc material at different temperatures

温度/℃	弹性模量/(N/m <sup>2</sup> )	泊松比	膨胀系数	导热系数	比热容/(J/(kg·K))
100	1.49	0.25	11.99	47.04	520
200	1.49	0.25	12.47	47.04	520
300	1.49	0.25	12.95	45.36	520
400	1.49	0.25	13.27	43.26	520
500	1.49	0.25	13.50	40.70	520

根据能量守恒定律,列车运行过程中的动能大部分转化为热能,假设能量转换率为 90%,则热流密度  $Q$  可以表示为:

$$Q = 0.9W = 0.9m(v_0^2 - v_1^2)/(2n) \quad (1)$$

式中:

$W$ ——列车动能,单位 J;

$m$ ——列车轴重,单位 kg;

$v_0$ ——列车制动的初速度,单位 m/s;

$v_1$ ——列车制动的末速度,单位 m/s;

$n$ ——每根车轴上实际参与摩擦的面数,单位面。

由于每根车轴装配体包含 2 个制动盘,而每个盘体与 2 个闸片发生摩擦,故  $n=4$ 。

设  $S$  为参与摩擦的制动盘面积,即闸片在制动盘上划过的圆环面积,则有<sup>[5]</sup>:

$$S = \pi(R^2 - r^2) \quad (2)$$

式中:

$R, r$ ——闸片与盘面摩擦环形区域的外径和内径。

根据平面散热传热学理论,对流换热系数  $\alpha$  可以表示为<sup>[6]</sup>:

$$\alpha = 0.664\lambda Re^n Pr^{\frac{1}{3}}/L \quad (3)$$

式中:

$Pr$ ——普朗特数;

$\lambda$ ——空气导热系数,单位 W/(m·K);

$Re$ ——雷诺数;

$L$ ——壁面长度,单位 m。

轮装制动盘对流换热系数计算结果为:直板式散热筋的对流换热系数为 42.34 W/(m<sup>2</sup>·K);圆柱形散热筋的对流换热系数为 43.82 W/(m<sup>2</sup>·K)。

制动夹钳单元的静态传动效率是指,在制动工况下,制动夹钳对轮盘进行加紧,进而产生制动力矩。本文分析的是制动夹钳的夹紧力。静态传动效率  $\eta$  及闸瓦推力计算值  $K_{cal}$  可以表示为:

$$\eta = K_{cal}/K_{act} \quad (4)$$

$$K_{cal} = FS_1\gamma \quad (5)$$

式中:

$F$ ——制动缸压力;

$S_1$ ——活塞作用有效面积;

$\gamma$ ——制动倍率;

$K_{act}$ ——闸瓦推力实测值。

#### 1.2.2 轴装制动盘

轴装制动盘的分析工况为,动车组在运行速度为 300 km/h 下的制动情况,设置制动盘和制动闸片的初始温度为 20 ℃,制动减速度为 -1.3 m/s<sup>2</sup>。制

动盘参数尺寸为:外径为 640 mm,内径为 350 mm,厚度为 80 mm。

由此可以知道,轴装制动盘的对流换热系数计算结果为:直板式散热筋的对流换热系数为  $134.97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;圆柱形散热筋的对流换热系数为  $128.04 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

## 2 制动盘模型建立及仿真分析

### 2.1 制动盘模型设计建模

以某型号城轨车辆数据为例,建立不同制动盘三维模型,其示意图如图 1 所示。

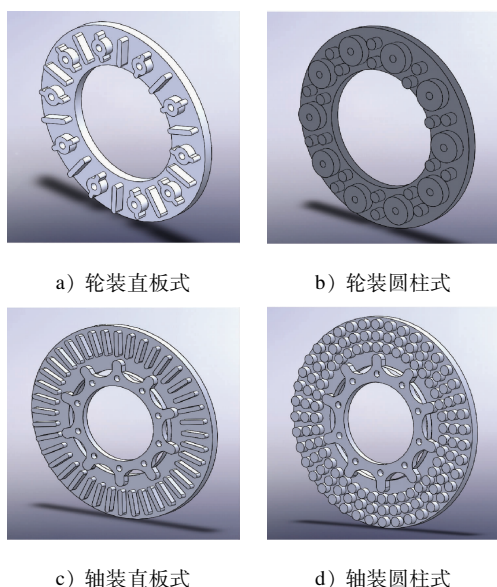


图 1 不同制动盘三维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of different brake discs 3D models

在 SolidWorks 软件平台进行实体建模后,需要对所建模型进行装配,轮装制动盘需要将制动盘安装在车轮两侧,而轴装制动盘需要把两片模型合并,配合成为一个装配体。制动盘装配模型示意图如图 2 所示。

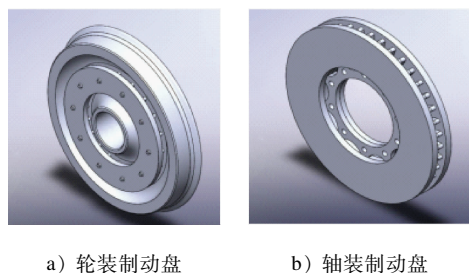


图 2 制动盘装配模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of brake disc assembly models

### 2.2 轮装制动盘分析

#### 2.2.1 轮装制动盘热力分析

不同散热筋的轮装制动盘制动热力温度场分布云图如图 3 所示。由图 3 可知:制动盘散热筋底部所承受的热力温度较小,主要热力温度发生在制动盘散热筋上,最大热力温度点出现在制动盘散热筋处;在最大热力温度点处的温度仍符合材料要求。

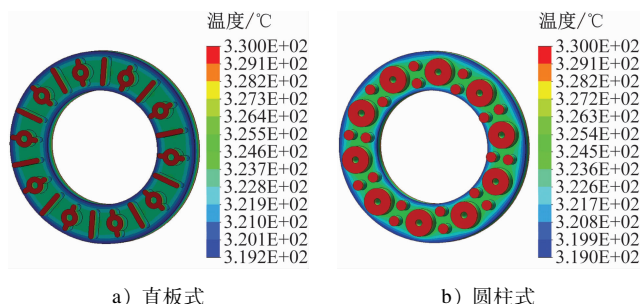


图 3 不同散热筋的轮装制动盘制动热力温度场分布云图

Fig. 3 Cloud diagram of the brake thermal force temperature field distribution of the wheel-mounted brake disc with different heat dissipation ribs

#### 2.2.2 轮装制动盘制动热应力分析

不同散热筋的轮装制动盘制动热应力分布云图如图 4 所示。制动盘表面应力值虽然不高,但等效应力最大值则位于散热筋上,圆盘表面应力分布较均匀,其热应力最大值小于材料许用强度;圆柱式散热筋制动盘由于其优异的导热性和蓄热能力,吸收热量较多,其表面热应力上升较快,且温度较高。由于热导性能呈梯度变化,制动时的圆盘表面热流被快速传导至圆盘内部,制动后圆柱式散热筋制动盘内部的热量积累较多,且由速度载荷引起了应力集中现象,这两者均导致了圆柱式散热筋制动盘的热应力高于直板式散热筋制动盘的热应力。

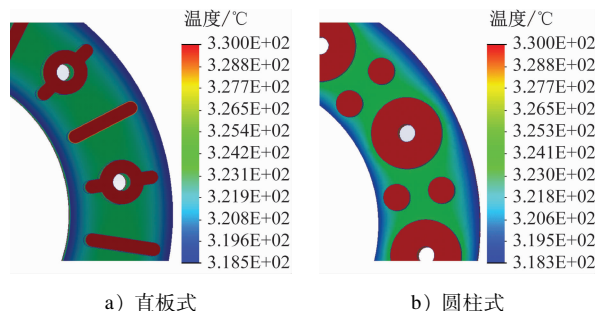


图 4 不同散热筋的轮装制动盘制动热应力分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of the brake thermal stress distribution of the wheel-mounted brake disc with different heat dissipation ribs



### 2.2.3 轮装制动盘传热路径分析

不同散热筋的轮装制动盘制动温度分布云图如图 5 所示。制动时,制动盘所产生的热量沿着轮装制动盘外盘周向均匀分布,其所产生的热量由外而内发散,由制动盘的摩擦面向散热筋面传递,然后传向车轮辐板及紧固件。

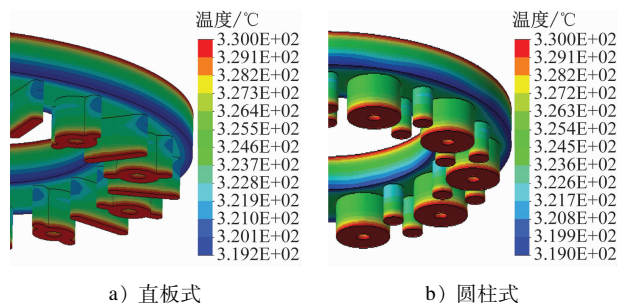


图 5 不同散热筋的轮装制动盘制动温度分布云图

Fig. 5 Cloud diagram of the brake temperature distribution of the wheel-mounted brake disc with different heat dissipation ribs

### 2.3 轴装制动盘分析

#### 2.3.1 轴装制动盘热应力分析

不同散热筋的轴装制动盘制动时的热应力分布云图如图 6 所示。城轨车辆轴装制动盘散热筋所承受的热力较小,主要热力发生在制动盘上,最大热力点也出现在制动盘处。制动盘表面的等效热应力最大值位于制动盘面上,其热应力最大值小于材料许用强度。从不同散热筋的制动盘制动热力分布图中可以看出,直板式散热筋渗透温度更高,内侧板已经出现了部分红色高温分布块,而圆柱式散热筋则没有红色高温分布块,所以圆柱式散热筋的散热效果优于直板式散热筋。

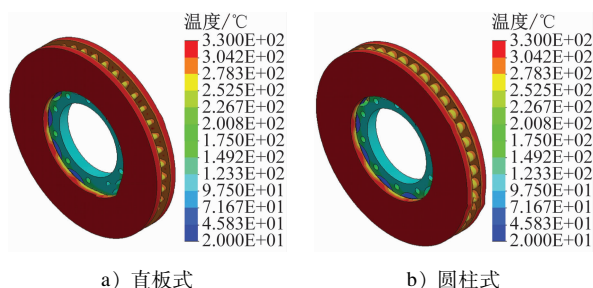


图 6 不同散热筋的轴装制动盘制动时的热应力分布云图

Fig. 6 Cloud diagram of the thermal stress distribution of the axle-mounted brake disc with different heat dissipation ribs during braking

#### 2.3.2 轴装制动盘传热路径分析

极高的温度容易造成制动盘机械损耗、接触不

良等问题<sup>[7]</sup>,因此选取制动盘上部分节点对制动盘进行热力特性验证分析。不同散热筋的轴装制动盘径向传热路径温度分布云图如图 7 所示。当制动盘接触到有效摩擦面时,会产生明显的热力集中现象,而这种热力集中现象的产生范围主要集中在制动盘外围,从而导致制动盘温度有所降低。

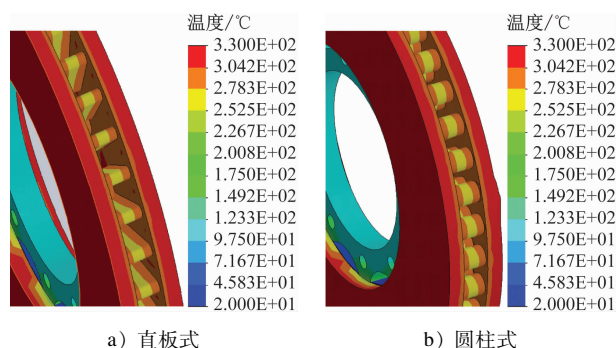


图 7 不同散热筋的轴装制动盘径向传热路径温度分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of the temperature distribution of the radial heat transfer path of the axle-mounted brake disc with different heat dissipation ribs

不同散热筋的轴装制动盘轴向传热路径温度分布云图如图 8 所示。温度在制动过程中有所上升,分析其原因可能为:由于热传递作用,温度逐渐上升;紧急制动时间较短且制动盘轴向厚度较大,导致高温区域温度上升较快;然而,随着温差的减小,热传递引起的温度升高明显减缓,而接触面处的热传递温度响应则较为缓慢。制动盘温度沿轴向的分布特性为:制动盘轴向节点温度较低,盘毂结构主要起到增加通风通道、提高散热效率的作用;轴向上,热量传递到制动盘中层的速度较慢,对仿真温度结果影响较小。

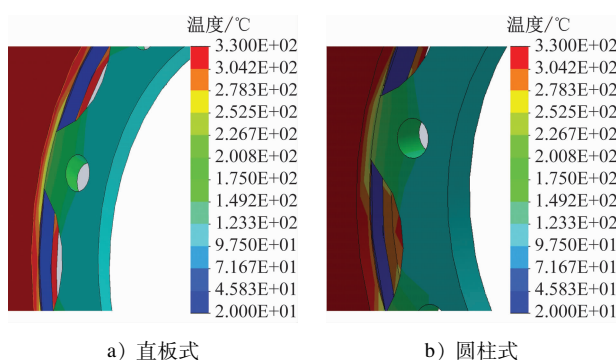


图 8 不同散热筋的轴装制动盘轴向传热路径温度分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of the temperature distribution of the axial heat transfer path of the axle-mounted brake disc with different heat dissipation ribs

不同散热筋的轴装制动盘周向传热路径温度分布云图如图9所示。由图9可知:周向上,温度变化明显小于其他两个方向;制动过程中的温度场分布梯度变化明显,且梯度分布均匀。分析可能导致这一现象的原因为制动时期,制动盘转速较快,强摩擦热流剧烈,温度集中现象明显,而随着制动过程的进行,热量通过空气与固体表面进行接触和流动,并通过热传递在制动盘内部进行扩散,有效改善了局部温度的集中现象<sup>[8]</sup>。

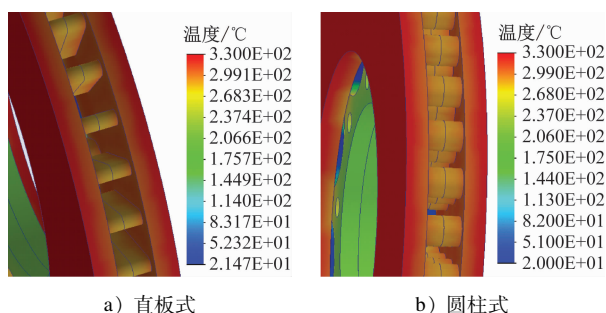


图9 不同散热筋的轴装制动盘周向传热路径温度分布云图  
Fig.9 Cloud diagram of the temperature distribution of the circumferential heat transfer path of the axle-mounted brake disc with different heat dissipation ribs

### 3 结语

本文通过建立城轨车辆轮装制动盘、轴装制动盘的有限元分析模型,研究了不同散热筋对制动盘散热的影响,主要获得以下结论:

1) 从热力分析结果来看,轮装制动盘使用直板式散热筋远比圆柱式散热筋的散热性能好;轴装制动盘使用圆柱式散热筋远比直板式散热筋的散热性能好。

2) 车辆制动时,更低温度的制动盘拥有更优秀的制动性能,根据本文的数据研究结果及热力分析结果可知,所设计的直板式轮装制动盘、圆柱式轴装制动盘的散热性能均优于传统制动盘,并能够安全运行,完成制动任务,不会出现过热现象。本文所设计的制动盘不仅优化了制动盘散热性能,还有助于提高城轨车辆制动时的可靠性。

### 参考文献

- [1] 乔磊, 马军, 张嘉鹭. 高速动车组盘式制动装置制动盘温度场仿真分析与研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(12): 1956.

- QIAO Lei, MA Jun, ZHANG Jialu. Simulation on brake disc temperature field of disc brake device for high speed EMU[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(12): 1956.
- [2] 金文伟, 钱坤才, 王常川, 等. 时速350 km动车组轴装制动盘的设计及优化[J]. 机车车辆工艺, 2020(5): 4.
- JIN Wenwei, QIAN Kuncai, WANG Changchuan, et al. Design and optimization of axle-mounted brake disk for 350km/h EMUs[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2020(5): 4.
- [3] 李浩生. 泪滴状肋制动盘传热特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- LI Haosheng. Study on heat transfer characteristics of teardrop rib brake disc[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.
- [4] 丁思源, 马蕾, 石含波, 等. 低温环境对高速列车制动盘材料疲劳裂纹扩展性能影响研究[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1082.
- DING Siyuan, MA Lei, SHI Hanbo, et al. Study on influence of low temperature environment on fatigue crack growth performance of high-speed railway brake disc material[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1082.
- [5] 方明刚, 冯昆, 金文伟, 等. 一种新型铁路客车制动盘的开发[J]. 机车车辆工艺, 2021(1): 14.
- FANG Minggang, FENG Kun, JIN Wenwei, et al. Development of a new brake disk for railway passenger wagons[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2021(1): 14.
- [6] 吴志豪, 吴兵. 地铁列车轴装制动盘热力耦合仿真分析[J]. 机械强度, 2023, 45(1): 190.
- WU Zhihao, WU Bing. Thermal-mechanical coupling simulation analysis of axle-mounted brake disc of the subway train[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1): 190.
- [7] 左建勇, 刘家良, 胡果, 等. 基于瞬态温升仿真的列车制动盘结构研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(9): 13.
- ZUO Jianyong, LIU Jialiang, HU Guo, et al. Analysis on the structural parameters of train brake disc based on transient temperature simulation[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(9): 13.
- [8] 刘静娟, 刘莹, 康光林, 等. 高速列车通风式制动盘的散热特性分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6): 937.
- LIU Jingjuan, LIU Ying, KANG Guanglin, et al. Analysis of heat dissipation performance for ventilated brake disc in high speed train[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(6): 937.

· 收稿日期:2024-06-29 修回日期:2024-07-29 出版日期:2025-05-10

Received:2024-06-29 Revised:2024-07-29 Published:2025-05-10

· 通信作者: 郭娜, 讲师, wuna@bucea.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license