

新型山地齿轨列车制动器性能分析

崔胤 吕常秀 徐红星 黄龙 刘春洋

(中铁合肥新型交通产业投资有限公司, 231699, 合肥)

摘要 [目的] 山地齿轨线路最大坡度可达 250‰。由于重力分量产生的下滑力远大于轮轨之间的最大摩擦力, 车辆在山地齿轨线路最大坡道上运行时, 仅靠常规的轮轨制动系统无法抑制车辆下滑。需要专用的齿轨制动装置, 利用齿轮齿条啮合方式对齿轨轮直接制动, 突破钢轮钢轨之间摩擦力限制, 为山地齿轨车辆在大坡道上运行时提供更大的制动力。对该新型制动器的性能进行分析, 有助于保证齿轨车辆运行安全。[方法] 分析了目前国内外齿轨列车专用齿轨制动系统的特点, 总结了现有齿轨制动装置的优缺点。根据齿轨转向架的空间和接口尺寸, 结合飞机制动器的特点, 设计了一种适用于超大坡道的多摩擦盘齿轨专用制动器, 介绍了该新型专用制动器的组成和性能。采用理论计算和有限元仿真方法分析了该新型制动器的性能和零部件强度, 以及三种最恶劣工况下制动器温度的变化情况。[结果及结论] 该新型制动器具有良好的制动性能, 在最恶劣工况下其最高温度低于制动器材料的承受极限。该新型制动器可满足齿轨列车在最大坡度(250‰)不同制动工况下的制动需求。

关键词 齿轨线路; 齿轨列车; 制动器; 大坡道

中图分类号 U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.059

Analysis on the Performance of New Mountain Gear Rail Train Brake

CUI Yin, LYU Changxiu, XU Hongxing, HUANG Long, LIU Chunyang

(China Railway Hefei New Communication Investment Co., Ltd., 231699, Hefei, China)

Abstract [Objective] The maximum slope of the mountain gear rail line can reach 250‰. As the sliding force generated by the component of the gravity is much greater than the maximum friction force between wheel and rail, relying solely on the conventional wheel and rail braking system can not restrain the vehicle sliding when the vehicle runs on the maximum slope of the mountain gear rail line. Special gear rail braking device, which uses the gear rack engagement mode to brake the gear rail wheel directly, is needed to break the friction limit between the steel wheel and rail and provide greater braking force for the mountain gear rail vehicle running on the big slope. Analysis of the new brake performance is helpful to ensure the safety

of the gear rail vehicle operation. [Method] The characteristics of the current special gear rail braking system for gear rail train in China and abroad are analyzed, and the advantages and disadvantages of the existing gear rail braking devices are summarized. According to the space and interface dimensions of the gear rail bogie, combined with the characteristics of the aircraft brake, a special brake for multi-friction disc gear rail on super large slope is designed, and its composition and performance are introduced. Theoretical calculation and finite element simulation are used to analyze the performance and component strength of the new brake, as well as its temperature changes under three worst working conditions. [Result & Conclusion] The new brake has good braking performance, and its highest temperature is lower than the bearing limit of the brake material in the worst working conditions. It can meet the braking requirements of the gear rail train under different braking conditions at maximum gradient (250‰).

Key words gear rail line; gear rail train; brake; large slope

适用于大坡度齿轨线路的齿轨列车, 不仅要在齿轨路段(最大坡度 250‰)具有较强的制动能力, 而且还要兼顾在普通轮轨线路(最大坡度为 40‰)上具有相应的摩擦制动能力, 因此齿轨列车上需要配备 2 套制动系统, 一套是直接作用于齿轨轮的齿轨制动系统, 另一套为常规的轮轨制动系统^[1-2]。齿轨列车的制动以电制动为主, 机械制动用于保障车辆安全。机械制动方式主要包括踏面制动、夹钳盘式制动及带式制动。普通轮轨制动一般采用踏面制动和夹钳盘式制动^[3-4]。目前国内外齿轨列车专用的齿轨制动一般采用带式制动^[5]。带式制动压力不均匀, 存在偏磨现象, 同时还存在制动轴受弯曲力较大、散热性能差及制动热容量低等问题。飞机制动器采用多摩擦片制动器, 具有制动力矩大、压力均匀及结构紧凑等特点^[6]。本文介绍的一种新型多摩擦片盘齿轨专用制动器。该制动器类似于飞机制动器, 可安装在齿轨驱动系统减速器的高速端, 可使齿轨驱动系统结构紧凑并获得更强的

制动力,可为后续齿轨车辆的广泛应用提供技术支持。

1 制动器设计参数

结合目前正在勘察设计的两个齿轨项目的线路特点进行分析。齿轨项目一的线路总长度约为92 km,其中常规的轮轨路段长度约为67 km,齿轨路段长度约为25 km;线路最大坡道为230‰,最大坡道长度为1 100 m,该坡道为齿轨制动器工作的最恶劣工况。齿轨项目二的线路总长度约为23 km,其中常规轮轨路段长度约为18 km,齿轨路段长度约为5 km;线路最大坡道为250‰,最大坡道长度为490 m,该坡道为齿轨制动器工作的最恶劣工况。

齿轨列车制动优先采用电制动,当电制动失效时由机械制动补充。齿轨路段机械制动采用常规的轮轨踏面制动并配合使用齿轨制动器提供制动力,在保证车轮不产生滑动现象的前提下,两种机械制动按1:1的比例分配制动力。根据上述两个齿轨项目中两种最恶劣的工况对制动力进行仿真分析,以确定齿轨制动器的设计参数。结果如表1所示。

表1 齿轨制动器设计参数

Tab.1 Design parameter of gear rail brake

| 工况 | 坡度/‰ | 制动力矩/(Nm) | 速度/(km/h) | 作用时间/s |
|---------|------|-----------|-----------|--------|
| 紧急制动 | 250 | 1 100 | 20 | 18.0 |
| 最大常用制动2 | 230 | 658 | 10 | 482.0 |
| 最大常用制动1 | 250 | 861 | 20 | 88.2 |

注:紧急制动工况—列车速度由20 km/h降至0 km/h,最大制动力矩为1 100 Nm,作用时间为18.0 s;最大常用制动1—列车速度由10 km/h降至0 km/h,最大制动力矩为658 Nm,作用时间为482.0 s;最大常用制动2—列车速度由20 km/h降至0 km/h,最大制动力矩为861 Nm,作用时间为88.2 s。

2 制动器设计方案

2.1 制动器组成

齿轨列车齿轨制动器安装在齿轮箱输入轴外侧,其安装图及结构图分别如图1和图2所示。该制动器由外壳、多片摩擦片、气缸、联轴器等组成。制动器外壳与齿轮箱外壳通过连接固定;联轴器与齿轮箱输入轴连接,随输入轴转动;摩擦动盘与联轴器连接通过键连接,随齿轮箱输入轴转动;摩擦静盘布置在摩擦动盘两侧,与制动器外壳连接通过

键连接;气缸外法兰与制动器外壳通过螺栓连接固定;气缸侧边通气孔与制动控制系统通过管路连接。

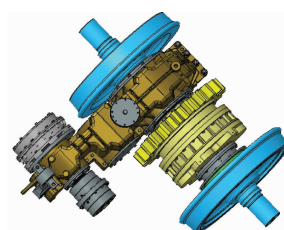


图1 齿轨制动器安装图

Fig.1 Gear rail brake installation

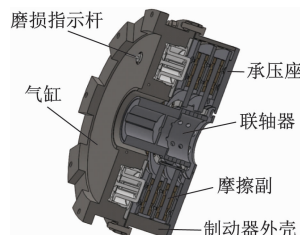


图2 齿轨制动器结构图

Fig.2 Gear rail brake structure

2.2 制动器摩擦组件

1) 摩擦动盘。采用高强度合金结构钢材料,经机加工制成,在摩擦动盘内圆周上加工有6个键槽,与联轴器上的键相配合。

2) 摩擦静盘。采用高强度合金结构钢材料作为骨架,用粉末冶金材料作为摩擦材料,在摩擦静盘骨架一面通过铆接粉末冶金摩擦片制成单面摩擦静盘和双面摩擦静盘。在摩擦静盘外圆周上加工有7个键槽,与制动器的外壳相配合。

3) 制动器外壳。采用高强度合金结构钢材料,经机加工制成,与摩擦静盘外键槽相配合,制动器外壳上开有多个散热孔。

4) 联轴器。采用高强度合金结构钢材料,经机加工制成。联轴器一端外圆上布置有6个导轨键,与动盘内键槽相配合。均匀分布的圆孔用于散热。联轴器内部设置有2个键槽,与齿轮箱高速轴相配合。

5) 承压座。采用高强度合金结构钢材料,经机加工制成。在外圆附近布置有7个螺栓孔,与制动器外壳通过螺栓固定连接。

2.3 制动扭矩

摩擦片的摩擦面外径为381 mm,内径为210 mm。该制动器有2个摩擦动盘,2个单面摩擦静盘,1个双面摩擦静盘,共4对摩擦面;气缸活塞直径为80 mm,活塞数量为6个,气压按0.6 MPa计算。则该制动器可输出制动扭矩为:

$$M_{sc} = \mu n P S r$$

式中:

M_{sc} ——制动扭矩;

P ——气压;

S ——活塞截面面积;

r ——摩擦半径;
 μ ——摩擦因数;
 n ——摩擦面对数。

根据设计, P 取 0.6 MPa, S 取 4 992 mm², r 取 295 mm, μ 取 0.3, n 取 4, 计算可得制动器输出制动扭矩为 3 206.7 Nm。齿轨列车紧急制动所需最大扭矩为 1 100.0 Nm, 因此该制动器输出制动扭矩的安全系数为 2.9。

3 仿真分析

3.1 静强度分析

采用三维软件有限元分析方法, 建立三维模型, 通过 Simulation 插件对所建三维模型进行有限元分析。施加最大推力和 1.5 倍的最大制动器扭矩对制动器各部件的强度进行仿真分析。

制动器外壳连接摩擦静盘, 是制动器的主要受力部件之一。制动器工作时, 外壳内的导轨键承受周向的力矩, 最大应力为 41.0 MPa, 如图 3 a) 所示; 联轴器与齿轮箱高速轴连接, 也是制动器的主要受力部件, 最大应力为 379.9 MPa, 位于键槽根部, 如图 3 b) 所示。摩擦动盘是制动器参与摩擦的关键受力部件之一。制动器工作时, 摩擦力矩通过摩擦动盘内键槽向联轴器传递, 经计算最大应力为 393.7 MPa, 位于键槽根部, 如图 3 c) 所示。摩擦力矩通过摩擦静盘外键槽向制动器外壳传递, 最大应力为 33.6 MPa, 位于键槽根部, 如图 3 d) 所示。承压座是制动器中的承压件, 承受由气缸传递过来的压紧力, 最大应力为 280.6 MPa, 位于承压座固定孔周边, 如图 3 e) 所示。上述部件的最大应力均小于高强度结构钢的屈服强度 835.0 MPa, 并具有一定的安全系数。气缸是制动器中的压力源, 通过气压作用使活塞伸出, 压紧摩擦盘, 最大应力为 6.5 MPa, 位于气缸螺栓孔处, 如图 3 f) 所示, 小于材料的屈服强度 248.0 MPa。静片钢背最大应力为 88.9 MPa, 位于铆钉孔周围, 如图 3 g) 所示, 小于材料的屈服强度 245.0 MPa。粉末冶金材料最大应力为 7.3 MPa, 位于材料铆钉孔周边, 如图 3 h) 所示, 小于材料的剪切强度 10.0 MPa。通过施加最大制动摩擦力, 计算得到摩擦块材料刹车时的最大热应力为 170.0 MPa, 如图 4 所示, 小于材料的许用应力 835.0 MPa。制动器的各零部件强度均满足设计需求且不会发生破坏。

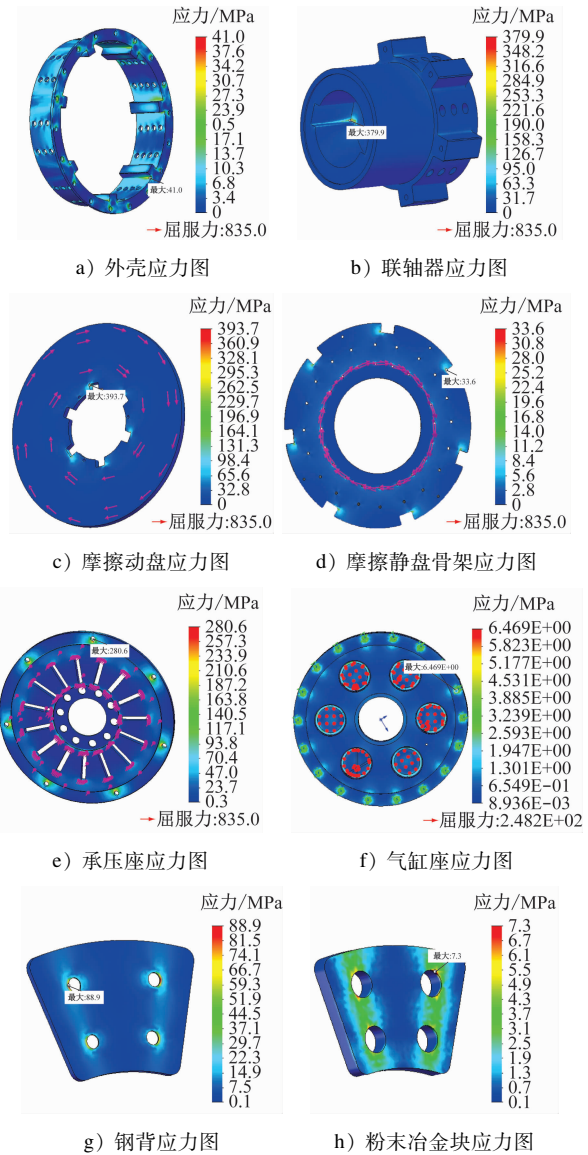


图3 制动器各部件应力云图

Fig. 3 Stress cloud map of gear rail brake parts

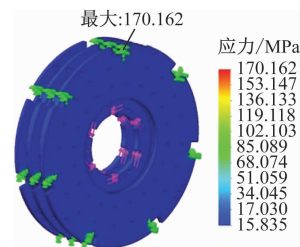


图4 制动盘最大热应力云图

Fig. 4 Cloud map of the maximum thermal stress of brake disc

3.2 刹车热分析

选取紧急制动、最大常用制动 1 和最大常用制动 2 这 3 种最严苛工况对齿轨制动器的温升进行仿真分析, 结果如表 2 所示。

表2 不同制动工况下制动器温度仿真计算结果

Tab.2 Simulated calculation results of the brake temperature under different braking conditions

| 工况 | 坡度/% | 体容温度/℃ | 主要部位 | 主要部位温度/℃ |
|---------|------|--------|--------|----------|
| 紧急制动 | 250 | 42.5 | 摩擦静盘 | 39.5 |
| | | | 摩擦动盘中径 | 45.5 |
| 最大常用制动1 | 230 | 569.8 | 摩擦静盘 | 529.9 |
| | | | 摩擦动盘中径 | 609.7 |
| 最大常用制动2 | 250 | 368.7 | 摩擦静盘 | 342.9 |
| | | | 摩擦动盘中径 | 394.5 |

仿真结果表明,三种工况下制动器最高温度均小于材料许用温度 800.0℃。在齿轨线路最大 250‰坡道的下坡路段实施紧急制动和最大常用制动时,制动器的温升都能满足性能需求;在齿轨线路 230‰坡道最大长下坡路段实施最大常用制动时,制动器的温升也能满足性能需求。

4 结语

为了解决超大坡道齿轨列车制动安全问题,设计了新型的多摩擦盘齿轨专用制动器。与带式制动齿轨制动器相比,该制动器具有更强的制动能力和良好的制动性能。

根据齿轨车辆转向架的空间和接口尺寸,设计了新型齿轨制动器各部件,并选取3种最严苛工况在实际线路上对制动器的静强度及刹车热进行了仿真分析。仿真结果表明:该制动器的制动性能能够满足最不利工况下齿轨车辆的制动需求;该制动器具有较大的安全系数,可为齿轨车辆提供更好的制动性能。该制动器能够解决既有带式制动的制动能力不足和故障率高等问题。

参考文献

[1] 四川省质量技术监督局. 山地(齿轨)轨道交通技术规范:

DB51/T 2542—2018[S]. 成都:四川省质量技术监督局, 2018:11-16.

Sichuan Provincial Bureau of Quality and technical supervision. Technical specification for mountainous (toothed) rail transit: DB51/T 2542—2018[S]. Chengdu: Sichuan Provincial Bureau of Quality and technical supervision, 2018:11-16.

[2] 陈喜红, 沈龙江, 廖志伟, 等. ZCA120 型齿轨动力转向架技术特征[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(6): 1.

CHEN Xihong, SHEN Longjiang, LIAO Zhiwei, et al. Technical characteristics of ZCA120 cog rail motor bogie[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2022, 45(6): 1.

[3] 冯帅. 对齿轨铁路在旅游观光铁路上的适用性分析[J]. 交通企业管理, 2015, 30(1): 66.

FENG Shuai. Analysis on the Applicability of rack railway in Tourism Railway[J]. Transportation Enterprise Management, 2015, 30(1): 66.

[4] 蔡向辉, 张乾, 贺天龙. 张家界七星山齿轨铁路轨道技术研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(7): 76.

CAI Xianghui, ZHANG Qian, HE Tianlong. Research on track technology of Qixing Mountain rack railway in Zhangjiajie[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(7): 76.

[5] 尚勤, 李廉枫, 涂旭. 国外齿轨铁路技术的发展及运用[J]. 机车电传动, 2019(2): 9.

SHANG Qin, LI Lianfeng, TU Xu. Development and application of foreign cog railways and rack vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(2): 9.

[6] 尚永锋, 孙琪, 钟飞龙. 高原机场飞机制动器热力学研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 65.

SHANG Yongfeng, SUN Qi, ZHONG Feilong. Thermodynamic study on aircraft brake in plateau airport[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(3): 65.

· 收稿日期:2024-03-20 修回日期:2024-04-25 出版日期:2024-09-10

Received:2024-03-20 Revised:2024-04-25 Published:2024-09-10

· 通信作者:崔胤,高级工程师,cuiyin@crhntc.com

· ©《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