文章编号:1005-0523(2012)06-0050-04

压剪型城轨弹性车轮分析研究

王 洋

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

摘要:为研究城轨车辆运行过程中轮轨接触温升对弹性车轮的影响,通过建立弹性车轮轮轨三维热接触耦合有限元模型,采用整体输入热流和对流换热的计算模型为基础的传热计算方法,分析车辆在设计时速100 km·h^{-1}运行和全滑制动、蠕滑制动、运行三种工况下对弹性车轮附近温度分布,结果表明弹性车轮在滚滑制动和长时间平稳运行过程中,弹性车轮各部件的平衡温度均在材料的许用温度范围内;当车辆在高速紧急制动全滑过程中,轮轨温度急速增加,将导致踏面磨损并加速车轮弹性元件老化。

关键词:弹性车轮;有限元法;传热分析

中图分类号:U121 **文献标志码:**A

弹性车轮在降低城市轨道交通车辆的运行噪音,减轻轮轨磨损,提高车辆运行稳定性等方面优于传统刚性车轮,将越来越多的被国内外城轨车辆采用。现代城轨车轮运行速度不断提升,车辆运行特别是全滑制动过程中,轮轨接触表面将产生大量的摩擦热,导致轮轨间出现热疲劳损伤。热应力使轮轨表面产生裂纹,造成轮轨表面损伤,制动过程产生的高温将加速车轮轮箍与轮心间橡胶的老化,降低橡胶的吸振、缓冲和降噪效果,因此,探索轮轨运行过程温升规律对研究弹性车轮的热损伤和疲劳损伤具有十分重要的意义。

车轮踏面和钢轨表面的热损伤是车辆运行过程中的常见问题,如图1所示。由于测量轮轨摩擦温升难度较大,因此有必要进行数值模拟,分析轮载、相对滑动速度和摩擦因子对轮轨摩擦温升的影响[1],早期的学者主要采用拉普拉斯变换法研究轮轨之间由于滑动引起的温升,计算模型采用大量简化假设,所得的解析解仅能定性的分析轮轨接触温升[2]。目前,针对制动过程中的热耦合计算,主要采用大型有限元商业软件进行计算[3-4],利用ANSYS、ABAQUS、MARC等建立了轮轨热力耦合分析的有限元模型,分析制动过程中制动盘瞬态温度场的分布规律,制动盘瞬时温度场的三维分布特征以及制动盘工作面的热循环历程。文献[5-6]分析了不同制动加载方式、制动工况和环境温度对制动盘瞬态温度场的影响以及制动过程中温度和应力的变化规律。通过数值模拟结果与1:1制动台

图1 车轮踏面擦伤照片
Fig.1 Photo of wheel tread scratch

收稿日期:2012-10-15

作者简介:王洋(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为轨道车辆弹性车轮。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

架试验结果进行比较,两者比较吻合,证明了数值计算的可靠性。

以德国ICE高速列车使用的压剪型橡胶弹性轮对为原型,建立轮轨三维模型,如图2所示,采用整体输入热流和对流换热的计算模型为基础的传热计算方法,分析车辆在设计时速100 km·h^{-1}运行和全滑制动过程中对弹性车轮附近温度分布。

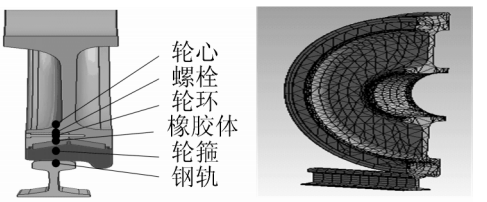

图2　压缩剪切型弹性车轮结构图及有限元网格
Fig.2　Compression-shear type elastic wheel structure and finite element mesh

1　轮轨传热数学模型

车轮在钢轨上滑动引起的轮轨接触导热微分方程[7]

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\lambda_{ij}\frac{\partial T}{\partial x_j}\right]+Q-\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=0 \tag{1}$$

式中:T 为轮轨材料的温度;ρ 为轮轨材料的密度;c 为轮轨材料的质量热容;λ_{ij} 为材料在各向的热导率;Q 为内热源项;x_i 为法向基量;x_j 为切向基量;t 为时间。

1)轮轨表面给定的初始温度

$$T=T(x_i,t) \tag{2}$$

此为第一类边界条件,温度边界条件可以时间和空间不同而发生变化。

2)假设轮轨间摩擦系数为 μ 和相对滑动速度 v_s 为常值,接触区摩擦热流密度

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{e}_n}=q(x_1,x_2)=\mu p(x_1,x_2)v_s \tag{3}$$

式中:λ 为热导率;$\boldsymbol{e}_n$ 为接触区单位法向矢量;$q(x_1,x_2)$ 为接触区法向热流分布;$p(x_1,x_2)$ 为接触区法向压力分布;此为第二类边界条件。

3)在边界上给定轮轨与空气对流换热的边界条件为第三类边界,该边界条件给定对流换热热流

$$q(x_1,x_2)=h(T-T_\infty) \tag{4}$$

式中:h 为表面对流换热系数;T_∞ 为环境温度。

4)当轮轨表面温度高于100 ℃时,辐射边界条件则不可忽略,表面的热辐射边界条件为

$$q(x_1,x_2)=\sigma\varepsilon(T^4-T_\infty^4) \tag{5}$$

式中:σ 为斯蒂芬–波尔兹曼常数;ε 为表面发射率。

2　载荷计算分析

2.1　车轮高速全滑制动工况

城铁轮轨载荷计算参数如表1所示:计算采用变比热容、热导率的参数化加载方式。

表1　城铁轮轨载荷计算参数表[8]

Tab.1　Urban rail load calculation parameters

转向架质量/kg	车体质量/kg	载客质量/kg	滑动速度/(km·h^{-1})	摩擦系数	滑行时间/s
75 00×2	24 000	25 000	80	0.25	0.005

计算结果表明:由于城轨车轮车体较轻,全滑工况下车轮轮箍最高温度为389 ℃,最高温度在轮箍材料的许用温度范围内,轮箍内部的橡胶弹性元件的温度已高达150 ℃,橡胶元件在工作过程中,当其温度超过70 ℃时,橡胶将提前老化,超过100 ℃时,粘接性发生破坏。橡胶弹性车轮的设计寿命须达到10万公里以上,且在寿命期间内不更换弹性车轮的橡胶元件,因此,城轨运行过程中应减少或避免高速工况下全滑行

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

制动。车轮高速全滑制动轮轨及弹性元件温度分布如图3所示。

列车在不同载荷下滑行后接触区温度的变化，载荷变化对车轮接触区峰值温度影响很大。相同工况下，计算列车载客质量分别为满载、半载、空载3种工况下，轮轨接触峰值温度分别为452，389，294 ℃。

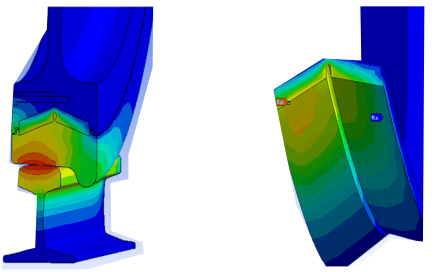

图3 车轮高速全滑制动轮轨及弹性元件温度分布
Fig.3 Temperature distribution of wheel and elastic element on full- speed slip brake

2.2 车轮盘式蠕滑制动工况

载荷增加和制动控制会使轮轨摩擦力增大，车轮发生全滑制动的工况较少，而发生蠕滑（滚划）制动的可能性最大，蠕滑制动是城轨车轮主要的制动工况。蠕滑制动时，由于滑动摩擦时间缩短，高温区可以有效扩散，有效降低轮轨接触峰值温度。

以下分析城轨车辆以设计时速100 km·h^{-1}制动条件下，滚滑200 m轮轨及弹性元件温度分布情况。

计算结果表面，城轨车辆采用滚滑制动条件下，轮轨的接触温度较低，且橡胶元件周向温度分布均匀，平均温度均低于设计温度70 ℃，满足弹性元件长时间工作的环境条件。

2.3 无制动运行工况

当城轨车辆处于无制动正常运行工况时，轮箍温度温度低且分布周向一致性好，图4，图5是车轮在设计时速100 km·h^{-1}匀速运行工况下的轮轨温度和弹性元件温度分布情况。

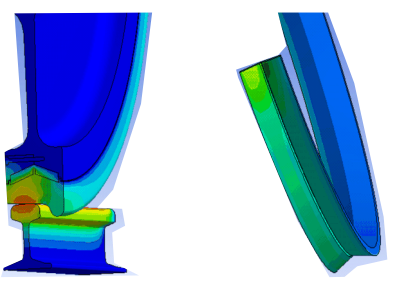

图4 车轮高速蠕滑制动轮轨及弹性元件温度分布
Fig.4 Temperature distribution of wheel and elastic element on high-speed creep brake

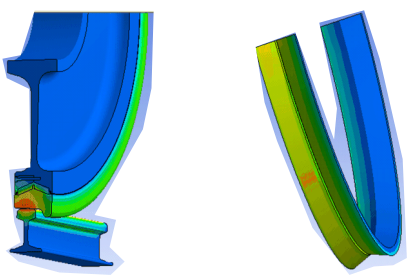

图5 车轮高速无制动运行轮轨及弹性元件温度分布
Fig.5 Temperature distribution of wheel and elastic element on high-speed running

当车辆处于无制动运行工况时，车轮周向温度低且分布均匀。弹性橡胶件温度处于最佳工作温度范围，满足城轨车轮长时间稳定运行的需求。该工况为热负荷最低的工作工况，分析结果表面，车轮运行在工况3不会出现热应力破坏和弹性橡胶结构热损伤。

3 结论

1）城轨车辆在全滑制动工况下，车辆在高载荷高速运行条件下，轮箍抱死滑行，轮轨接触温度将急剧增加，将导致车轮踏面磨损和弹性元件超温运行，降低弹性车轮的使用寿命。

2）城轨车辆处于蠕滑制动工况下，轮箍踏面与轨道滚滑均匀接触，踏面温度分布较为均匀，且弹性元件在设计温度内工作，满足城轨车轮正常制动的需求。

3）高速无制动运行工况是城轨车轮的主要运行工况，轮箍踏面温度峰值不明显，且踏面温度受速度影响较小，车轮内部弹性元件在最佳设计温度内工作，可以满足弹性车轮长时间寿命需求。

参考文献：

[1] 吴磊，温泽峰，金学松. 车轮全滑动轮轨摩擦温升三维有限元分析[J]. 机械工程学报，2008(3)：63-69.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] 王艺，陈辉，李明. 高速列车制动盘制动过程数值模拟设计与研究[J]. 机械，2008，35(3)：82-85.
[3] 赵海燕，张海泉，汤晓华. 快速列车制动热过程有限元分析[J]. 清华大学学报，2005，45(5)：588-592.
[4] 马思群，兆文忠，谢素明，等. 列车制动盘热机耦合过程的数值仿真[J]. 机械设计与制造，2003(4)：71-72.
[5] 卢奕志，刘永明. 车轮与曲线钢轨接触的有限元分析[J]. 华东交通大学学报，2011，28(5)：18-22.
[6] 苏航，季怀中，张永权. 高速列车车轮钢摩擦热致相变的计算机模拟[J]. 金属学报，2004(9)：909-914.
[7] 齐万明. 轮轨热接触耦合问题的有限元分析[D]. 大连：大连交通大学，2009：11-18.
[8] 冯大建. 地铁车转向架构架的疲劳强度分析[C]//上海：Altair 2010 HyperWorks技术大会论文集，2010：1-5.

The Analysis of Elastic Wheels on Compression-shear Urban Rails

Wang Yang

(The Urban Mass Transit & Railway Research Institute，Tongji University，Shanghai 201804，China)

Abstract：To explore the effects of wheel/rail contact temperature rise on elastic wheels in operation，this paper firstly established the elastic wheel/rail three- dimensional thermal contact coupling finite element model，then adopted the heat transfer calculation method on the basis of the overall input heat flux and convection heat transfer calculation model，and finally analyzed the temperature distribution nearby elastic wheels of the vehicles at the designed speed of 100 km/h under three conditions，such as in full slip brake，creep brake and operation. The results showed that in the skid brake and long time smooth running process，the equilibrium temperature of all parts of the elastic wheels is in allowable temperature range；when in the whole sliding process of emergency braking，wheel/rail temperature increased sharply，which would lead to tread wear and accelerate the wheel elastic element aging.

Key words：elastic wheel；finite element method；heat transfer analysis

(上接第39页)

A Study on the Target Mix Ratio of Warm Porous Mix Asphalt

Che Changwei，Chen Jingya，Chen Jun，Gao Xiaoyue

(College of Civil and Transportation Engineering，Hohai University，Nanjing 210098，China)

Abstract：This paper tries to study the target mix proportion of warm porous mix asphalt，taking the warm porous mix asphalt OGFC-13 in Changzhou as the experiment object. First，the Marshall method is adopted to determine the design graduation of OGFC-13 with 20% target porosity and the optimum asphalt content under the condition of hot-mix OGFC-13 design gradation. Then the relevant result is applied to mold the OGFC-13 Marshall specimens of 20% porosity under the warm mix condition. Finally the validity of the target mix proportion of the warm mix OGFC-13 is verified through Marshall stability test，Orenburg asphalt leakage test，Kentucky Fort flying test and rutting tests. According to data comparison between warm and hot mix asphalt，the study finds out whether the Marshall method of the hot mix asphalt is suitable for warm mix asphalt.

Key words：warm porous mix asphalt；mix proportion design；the best ratio of asphalt and aggregate；experimental verification

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net