

快速重载货物列车踏面制动试验与分析

应之丁¹, 朱建安¹, 林建平²

(1. 同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200092; 2. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对快速重载货物列车转向架基础制动方式, 对踏面制动热流密度和对流换热系数进行推导和应用, 重点分析车轮旋转周期内闸瓦摩擦生热和对流换热交替变化规律, 建立了全新的车轮制动过程瞬态温度场三维有限元模型. 在摩擦制动动力试验台上进行了制动试验并对模型进行了验证, 结果表明该模型能比较完整地反映实际工况. 利用该模型进行仿真计算, 可以了解各种要素对踏面制动过程的影响, 为发展快速重载货物列车的制动方式和制动技术提供了比较可信的理论分析.

关键词: 试验; 踏面制动; 温度场; 有限元; 热容量
中图分类号: U 260.35; U 270.33 **文献标识码:** A

Test and Analysis of Wheel Tread-braking for Fast-heavy-load Wagon

YING Zhiding¹, ZHU Jia'an¹, LIN Jianping²

(1. Institute of Railway & Urban Mass Transit Research, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the key parameters derivation of the heat flux density and thermal convection or transfer coefficient on tread-braking mode of fast-heavy-load wagon bogie, one distinctive three-dimensional finite element model of the transient temperature field in wheel braking process was developed to reveal a number of characteristics about the brake heat absorption and transmission in one wheel rotating cycle, and was confirmed through the friction brake power-test-bed for the tread-braking temperature verification test. The formulas first renovated the calculation model of wheel temperature field including local and overall of braking process. The temperature field simulation can be used further to learn the impact in the tread-braking process of various elements, and provide more reliable parameters and theoretical analysis for the development of heavy-load-fast wagon braking

mode and braking technology.

Key words: test; tread-braking; temperature field; finite element method; heat capacity

基础制动装置是快速重载货车转向架的关键部件之一. 三大件式转向架具有使用和维护成本低、线路适应性强的特点, 时速 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下的货车基本上采用低抗扭曲刚度的三大件式转向架, 时速 $120 \sim 160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的大多采用抗菱结构(斜拉杆)三大件式转向架. 保持和发展三大件式转向架是长期的技术方向之一. 但这种结构转向架难以实现双侧踏面制动和盘形制动, 基本采用单侧踏面制动.

踏面制动的负荷极限直接受制于车轮热容量大小. 在轮轨粘着条件允许范围内, 要提高单侧踏面制动能力, 除了改善基础制动装置效率, 主要方法就是增加闸瓦和踏面间的摩擦系数或提高闸瓦压力. 传统的制动热容量计算是根据制动热能量分配比例和容许温升作为判断标准. 现场试验表明, 热裂现象是制动功率限制的主要因素^[1]. 因此研究车轮踏面制动状态下轮瓦接触产生的热负荷和热量分布, 以及由此产生的热应力是基础. 本文从温度场的分析计算入手, 对车轮踏面制动状态下的热负荷和热量分布以及应力场进行预测, 为快速及高速货物列车制动技术指标和规程的制定提供依据.

1 踏面制动温度场模型构建与边界条件分析

车轮踏面制动温度场热量输入和热量传递比较复杂, 文献[2-5]等采用不同方法建立相关摩擦副

收稿日期: 2009-09-10

基金项目: 上海市科委科技攻关计划资助项目(061111009)

作者简介: 应之丁(1964—), 男, 副教授, 主要研究方向为机车车辆制动. E-mail: yingzhiding@126.com

温度场计算模型,以解决宏观温度场升温问题为核心,边界条件推导省略较多.本项研究是在这些成果基础上,提出制动过程中反映车轮瞬态热量吸收和传递变化特征的计算模型,分析车轮转动周期内温度场变化.

车轮呈轴对称结构,因此三维立体建模只需选取车轮的1/12建立模型,如图1所示.根据制动的实际情况,以热传导基本原理对计算模型做如下假设:①停车过程视为匀减速过程;②车辆动能按一定比例转化成热量并以热流的形式传入车轮踏面;③踏面沿周向均匀受热;④初始时刻,整个车轮区域温度相同.

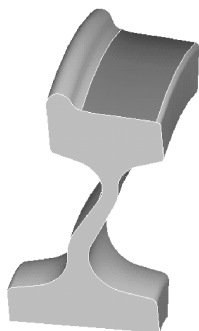


图1 车轮1/12三维立体模型

Fig.1 1/12 three-dimensional model of wheel

根据传热学理论^[6],对于无内热源的各向同性材料,其热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

其初始条件为

$$T(x, y, z) = T_0$$

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(t_w - t_f)$$

式中: T 为物体的瞬态温度; ρ 为材料密度; c 为材料比热容; λ 为材料导热系数; t 为过程进行时间; T_0 为物体的初始温度; q 为热流密度; h 为对流换热系数; t_w 为物体边界的温度; t_f 为流体介质的温度.

在软件ANSYS中,上述方程被转化为如下形式^[2]:

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (2)$$

式中: $[C(T)]$ 为比热容矩阵; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数; $[K(T)]$ 为传导矩阵; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q(T)\}$ 为节点热流率向量.

处于边界上的单元接受摩擦热流的输入并向车轮内部传热,热流密度 $q(t)$ 施加于闸瓦摩擦的踏面圆周区域内;车轮与空气的对流换热为最主要的散热途径,对流换热系数 $h(t)$ 施加于除两截面和轴孔面外所有的其他面.热辐射传递的热量可以忽略不计^[6-7].

车轮踏面制动的热流率 $Q(t)$ 为

$$Q(t) = -\frac{dE(t)}{dt} = mav_0 - ma^2 t \quad (3)$$

式中: $E(t)$ 为踏面制动分摊到1个车轮的动能; m 为1/2轴重; a 为减速度; v_0 为制动初速度.

比较牛顿冷却定律,式(3)乘以热量分配系数 η ^[3],再除以闸瓦在车轮上扫过的面积 A 即为传入车轮踏面的热流密度 $q(t)$

$$q(t) = \eta \frac{Q(t)}{A} \quad (4)$$

$$\eta = \left[1 + \frac{A_2}{A_1} \frac{\sqrt{\rho_2 c_{p2} K_2}}{\sqrt{\rho_1 c_{p1} K_1}} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: A_1, A_2 分别为车轮踏面和闸瓦摩擦面面积; ρ_1, ρ_2 分别为车轮和闸瓦材料的密度; c_{p1}, c_{p2} 分别为车轮和闸瓦材料的比定压热容; K_1, K_2 分别为车轮和闸瓦材料的导热系数.

依据文献^[6],可将踏面制动时车轮表面与周围空气间的热交换看成是圆柱扰流问题,得出对流换热系数 h 为

$$h = Nu\lambda/l_0 \quad (6)$$

式中: Nu 为努塞尔数; l_0 为壁面特征尺寸.

对于圆柱扰流问题,努塞尔数采用强制对流经验公式^[6]

$$Nu = f(Pr, Re) = \alpha Pr^{0.35} Re^n \quad (7)$$

式中: Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数;紊流状态下系数 α 取0.026;指数 n 取0.8.

因此,对流换热系数 h 最终可简化为与温度 T 、速度 v 和车轮直径 D 相关的方程式.

分析制动过程中闸瓦是静态热源,车轮是旋转热导体.闸瓦不均匀作用和热量先后输入及热传导累积使得车轮踏面温度不均匀,每周不均匀加热促使制动过程温差变大.

制动时车轮旋转1周的过程中,假设踏面某位置截面与闸瓦面摩擦接触时间起点为 t_i ,摩擦接触的时间间隔为 $t_i - t_{i+1}$ 、不摩擦的时间间隔($t_{i+1} - t_{i+2}$),即 $t_i \rightarrow t_{i+1} \rightarrow t_{i+2}$ 为旋转一周的时间.摩擦时有热流输入,摩擦面与空气不进行对流换热;不摩擦时无热流输入,摩擦面与空气进行对流换热,即让摩

擦热流输入和空气对流换热交替进行.

热流的间歇输入由下式确定:

$$k_i = \frac{1}{4} \left(\frac{|t - t_i|}{t - t_i} + 1 \right) \left(\frac{|t_{i+1} - t|}{t_{i+1} - t} + 1 \right),$$

$$i = 1, 3, 5 \dots \quad (8)$$

以构造方波函数 $\sum k_i$ 模拟热流的间歇输入.

$$\sum k_i = \begin{cases} 1, & t = (t_i, t_{i+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases},$$

$$\text{且 } \sum (1 - k_i) = \begin{cases} 1, & t = (t_{i+1}, t_{i+2}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

计算时如果步长恰好取在 t_i 处,则 k_i 式中分母为零,为解决此问题,需要在分式上下同时加上极小量(如 10^{-5}),作为旋转车轮踏面与闸瓦开始接触时的过渡时间,这与实际工况相近,较好地解决了交替计算间歇热流输入和空气对流换热的时间区域内有限差分的划分问题.

将构造方波函数 $\sum k_i$ 乘以热流密度,可得间歇输入热流密度

$$q'(t) = q(t) \sum k_i = \begin{cases} q(t), & t = (t_i, t_{i+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

与此相对应, $\sum (1 - k_i)$ 乘以对流换热系数可得间隙空气对流换热系数

$$h'(t) = h(t) \sum (1 - k_i) = \begin{cases} h(t), & t = (t_{i+1}, t_{i+2}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

高速时,摩擦时间相对于整个制动时间来说很小,仿真计算时步长要取得足够小(10^{-3} s),否则载荷的施加会发生偏差.

求解过程从初始温度场开始,进行步进积分.瞬态温度场问题的求解特点是:在空间域内用有限单元网格划分,而在时间区域内则用有限差分网格划分,其实质是一种有限单元和有限差分的混合解法.

2 踏面制动试验与温度场仿真分析

研制了 1:1 摩擦制动动力试验台,该试验台可真实模拟 25 t 轴重重载货车惯性能量,可控制风机模拟对流风速,通过在圆弧形喷水管上分布针孔统一喷水到车轮轮缘侧面以精确控制车轮每次试验的初始温度.在车轮踏面上方安装 S12 红外测温仪,测量车轮旋转时踏面各点经过该处时的温度,具体结构如图 2 所示.

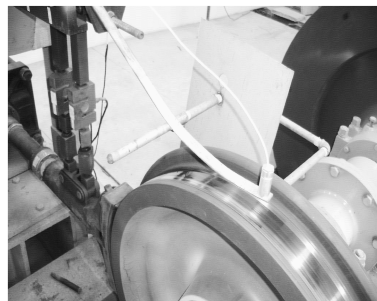


图2 车轮踏面制动温度测试装置

Fig.2 Temperature testing devices of wheel tread-braking

当慢转车轮踏面达到规定温度后,车轮分别进行正反旋转,达到 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 初速后实施紧急制动,模拟车速强对流空气中的热交换.随着列车巨大能量转化为热能,车轮表面温度快速上升达到最大值后开始下降.

试验中车轮正反旋转,因此温度传感器所测温度分别是踏面即将进入闸瓦摩擦面和离开闸瓦摩擦面的温度,等效车轮踏面与闸瓦摩擦后起始、旋转一周后进入闸瓦的温度.多次反复试验,正反旋转规律性强、温度数据集中.

选取制动过程车轮踏面温度最高点附近位置,测试系统对每组正反旋转试验数据进行计算,得出车轮制动过程踏面温度试验曲线,与计算机仿真模拟的温度曲线吻合程度相当高(图3).因此该模型在模拟最高温度和温度变化趋势方面比较真实地反映了试验情况.由图3可见:①呈上拱形两曲线说明摩擦制动产生的热量集中传递到车轮表面,引起车轮温度快速上升到 220°C 左右,制动急剧减速后输入热量减少,与散热达到平衡直至热量输入小于散热量,车轮温度下降到停车时的 147°C 左右,显示了车轮制动过程热量吸收和传递的变化特征.②两温度试验曲线出现类似高频波动的情况.在每周车轮旋转过程中,闸瓦不均匀作用和热量先后输入及热传导累积使得车轮踏面温度不均匀,导致制动过程车轮踏面温差变大.③曲线滞后现象说明试验与模拟计算的温度点不完全重合.

旋转车轮踏面周表面和车轮辋侧面温度值显示,在紧急制动过程中,大部分热量集中在表面区域,使踏面温度急剧升高,周表面和侧面温差与仿真计算相似.内部温度分布依据仿真模型计算.图4给出了踏面达到最高温度时和制动结束时的温度场分布情况.

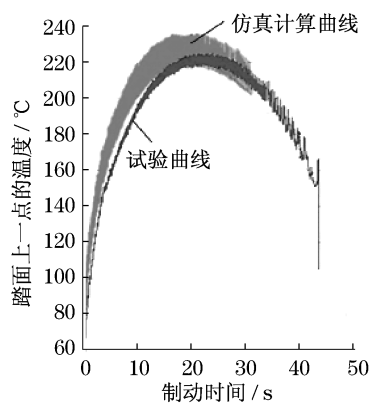


图3 仿真计算结果与试验结果比较

Fig.3 Result comparison between the experiment and simulation

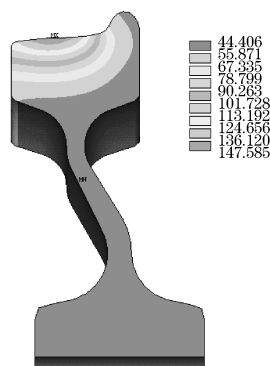


图4 制动结束时的温度场分布(单位:°C)

Fig.4 Temperature field distribution at the end of the braking(unit:°C)

3 利用温度场模型进行踏面制动应用分析

建立的比较符合实际的制动闸瓦过程的车轮摩擦热吸收传递温度场模型,可以模拟重载货物列车实施各种初速的紧急制动,进行制动摩擦副、车轮应用过程的技术分析,可以得到不同材料的闸瓦物性参数、车轮材质结构、制动方式和频率等要素,在形成不同热量分配和对流换热的边界条件时,对制动过程闸瓦作用车轮温度场分布和极值的影响,以优化这些参数的选取。

车轮材料的密度 ρ 、比热容 c 和导热系数 λ ,均为温度的函数^[5]。分别改变某一参数,考察其对制动过程踏面温度场的影响。模拟计算所得曲线见图5、6。

由图5可知,在热量分配比例为100%、无对流换热边界条件下,车轮材料比热容 c 和导热系数 λ 的高低直接影响车轮温度场温度的上升或下降,可

为材料选型方案中对最高温度指标控制提供参考。由图6可知,在原有材料属性不变,热量分配系数 η 和对流换热系数 h 的选择影响温度场分布形状和数值大小,相当于比较不同摩擦副材料和结构以及安装方式对车轮温度场的影响。进一步计算车轮踏面热应力可评估所配对摩擦副的制动热容量。

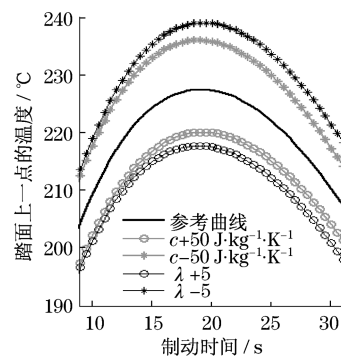


图5 车轮材料属性对温度变化的影响

Fig.5 Effect of wheel material properties on temperature change

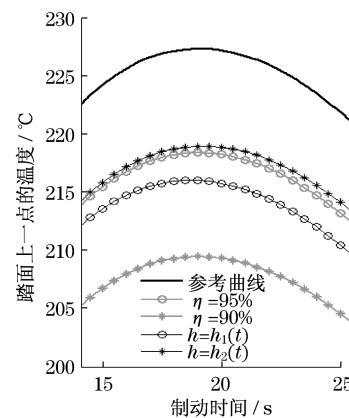


图6 热量分配系数与对流换热系数对温度变化的影响

Fig.6 Effect of heat distribution and thermal convection or transfer on temperature

通过关键的车轮瞬态温度场仿真模型计算,得到了各种要素对踏面制动过程的影响,可进一步从热容量角度提出基础制动的基本参数和结构要求。

4 结语

(1) 对货车车轮踏面制动过程热流密度和对流换热系数求解公式进行了推算和论证,根据试验过程闸瓦瞬态作用和整体车轮制动过程中热量吸收和传递的变化特征,以及车轮踏面制动过程温度场分布和变化过程,建立了三维有限元计算模型。温度场分布和温度变化规律的仿真计算结果与试验结果比较吻合。

(下转第1396页)