

# 盘形制动摩擦表面温升研究\*

庄光山 王成国 王海庆 李丽 孙毅

(山东大学材料科学与工程学院 济南 250061)

摘要: 对所研制的摩擦材料在 1:1 惯性制动试验台上进行停车制动试验过程中所表现出的温度特性进行了研究, 并从能量转化、传热、材料性能变化等几方面进行了分析。结果表明: 各制动初速度下的温度特性曲线均可分为无反应阶段、迅速升温阶段和温升缓慢变化阶段, 其中制动初速度为  $180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的温度特性曲线出现异常; 由于停车制动过程中能量转化的趋势逐渐变缓和制动结束阶段散热效果的相对增强, 使得第三阶段温度上升的趋势变缓甚至出现温度下降, 而闸片表面摩擦膜的出现是  $180 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的温度特性曲线出现异常的原因。

关键词: 制动 温度 摩擦

中图分类号: U260 TB332 TH117

## 0 前言

在研究摩擦材料的摩擦特性时, 摩擦面的温度变化是一个重要的指标。对合成摩擦材料来说, 温度的变化对材料的摩擦因数、磨耗量、磨损机理等都有重要的影响。对制动盘来说, 温度的变化则影响制动盘表面的热裂、磨损等使用性能。因此, 研究盘形制动摩擦表面的温度变化规律不仅具有重要的理论意义, 而且对研制高性能摩擦材料具有明显的指导作用。参考文献[1~5]通过提出一些假设, 如速度的线性变化、压力的均匀分布、厚度无限大、热量在两摩擦副间的分配固定、材料的热物理性能为常数、摩擦因数为常数和不考虑磨损等, 利用有限元分析的方法来分析研究摩擦副接触表面的热量分布、温度变化情况。

本文试图利用满足准高速客车盘形制动使用要求的碳纤维增强摩擦材料<sup>[6]</sup>, 通过分析其 1:1 制动动力试验的实测瞬时数据, 从基本的物理概念出发, 定性地分析在不同的表面正压力和不同的制动初速度下, 摩擦过程中摩擦表面的温度变化规律。

## 1 试验材料及设备

摩擦材料: 为自行研制, 是以水溶性改性酚醛树脂为胶粘剂, 碳纤维、金属纤维和矿物纤维为增强纤维, 硫酸钡、碳酸钙、铁粉等为填充剂, 经混合、模压和后处理而成。形状和尺寸与我国实际使用的客车盘形制动闸片一致。其各项物理性能指标如下:

抗压强度  $\sigma_{bc} = 45 \text{ MPa}$

压缩模量  $K = 1126 \text{ MPa}$

冲击韧度  $a_k = 5.6 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$

洛氏硬度  $(70 \pm 5) \text{ HRC}$

制动盘: 轴装整体式, 尺寸为  $\phi 640 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ , 材质为珠光体灰铸铁, 性能指标如下:

珠光体质量分数  $w \geq 90\%$

抗拉强度  $\sigma_b \geq 280 \text{ MPa}$

断后伸长率  $\delta \geq 1.0\%$

布氏硬度  $170 \sim 250 \text{ HB}$

比热容  $c = 0.49 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

热导率  $\lambda = 47.8 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$

热膨胀系数  $\alpha_t = 12.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

试验设备: 日本 TOYO DENKI SEII 公司 1:1 列车制动动力试验台, 型号: G6032M—A。

试验地点: 铁道部摩擦材料检测站。

## 2 试验内容

根据铁道部《盘形制动 1:1 制动动力试验台试验大纲》的要求, 在制动初速度分别为 60、90、120、140、160、180  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  进行一次停车紧急制动试验和常规制动试验。

模拟轴质量为 16.5 t。摩擦表面的温度通过放置在制动盘摩擦表面下 3 mm 处的热电偶测量。要求制动盘初始温度  $t \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 摩擦面最高温度  $t \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 紧急制动试验

试验条件: 闸片压力为 25.4 kN; 制动初速度分

\* 山东省重点基金资助项目(Z99F03)。20020403 收到初稿, 20020802 收到修改稿

别为 60、90、120、140、160、180 km·h<sup>-1</sup>。

图 1 是各个制动初速度下的瞬时温度与制动时间的关系曲线。

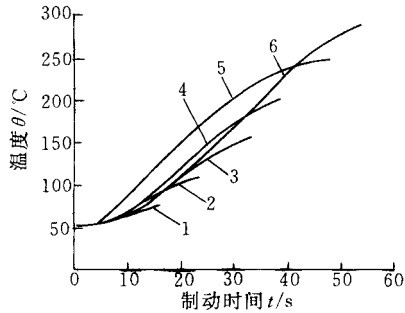


图 1 紧急制动试验的瞬时温度—制动时间关系曲线

- 1. 60 km·h<sup>-1</sup>    2. 90 km·h<sup>-1</sup>    3. 120 km·h<sup>-1</sup>
- 4. 140 km·h<sup>-1</sup>    5. 160 km·h<sup>-1</sup>    6. 180 km·h<sup>-1</sup>

从图 1 中可以看出：

(1) 各个制动初速度下的瞬时温度—制动时间曲线均可分为三个阶段，即：在制动开始后的大约 5s 内的无反应阶段，其间温度几乎不变；随后，随着制动时间的延长，温度近似呈线性迅速升高的迅速升温阶段；然后，温度升高的趋势又变缓的温度缓慢变化阶段。

(2) 制动初速度 ≤ 160 km·h<sup>-1</sup> 时，制动过程中某时刻的瞬时温升与制动初速度成正比；但当制动初速度为 180 km·h<sup>-1</sup> 时，除了临近制动终止的一段时间外，大部分时间其瞬时温升反常地低。

### 3.2 常规制动试验的温升情况

试验条件：闸片压力为 12.7 kN；制动初速度分别为 60、90、120、140、160、180 km·h<sup>-1</sup>。

图 2 是根据常规制动试验的瞬时数据，绘制的瞬时温度—制动时间曲线。

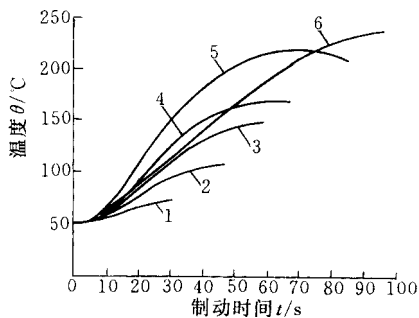


图 2 常规制动试验的瞬时温度—制动时间曲线

- 1. 60 km·h<sup>-1</sup>    2. 90 km·h<sup>-1</sup>    3. 120 km·h<sup>-1</sup>
- 4. 140 km·h<sup>-1</sup>    5. 160 km·h<sup>-1</sup>    6. 180 km·h<sup>-1</sup>

将图 2 与图 1 比较可以看出，在常规制动压力下，瞬时温度与制动时间的关系呈现更加明显的三个阶段，制动初速度越高，这个现象越明显。特别是当制动初速度为 160 km·h<sup>-1</sup> 时，在制动接近结束阶段，甚至出现了温度降低的现象。制动初速度为

180 km·h<sup>-1</sup> 的瞬时温度曲线同样呈现温度反常降低的现象。这说明本试验温度特性曲线的特征与所使用的制动压力的大小无关。

### 3.3 试验结果分析

对于图 1 和图 2 中第一阶段的曲线变化情况，可以从以下几个方面解释：一是制动液压缸给予制动盘与闸片接触的制动压力从零上升到设定值需要有一个 2~3 s 的上升时间，这段时间内摩擦力小，摩擦生热也少；二是由于本试验的测温部位在摩擦面下 3 mm 处，摩擦接触面的热量传到此处需要时间，而且热电偶本身也有个反应滞后的问题。下面主要讨论后两段曲线的变化原因。

就摩擦盘整体而言，其温度变化是由于制动过程中摩擦产生的热向制动盘内传导和制动盘内的热通过传导、对流和辐射等方式向周围物体和空间扩散的综合结果，即是制动盘内的热量积累的结果，可以表示为

$$\text{积累的热量} = \text{传入的热量} - \text{耗散的热量}$$

制动过程中，制动盘内热量积累的变化过程与其温度变化过程应该是一致的。当传入的热量大于耗散的热量时，制动盘温度就要升高，单位时间内，二者相差越大，摩擦盘温度升高的速度就越快。

传入制动盘的热量等于制动盘与闸片接触面摩擦产生的热量与该热量在制动盘与闸片之间的分配系数的乘积。假定该分配系数为定值，由于摩擦产生的热量是由试验装置的动能转化来的，因此分析停车制动过程中试验装置动能的变化情况可以反映传入制动盘的热量的变化情况。

首先绘制瞬时速度—制动时间曲线。

图 3 和图 4 分别是紧急制动试验和常规制动试验的瞬时速度与制动时间的关系曲线。

从图 3 和图 4 中可以看出，除制动开始后的 2~3 s 外，所研制的摩擦材料在各个制动初速度下、整个制动时间区间内都具有稳定的、近似均匀的减速特性，这对于实际使用时列车的操纵特性和乘坐

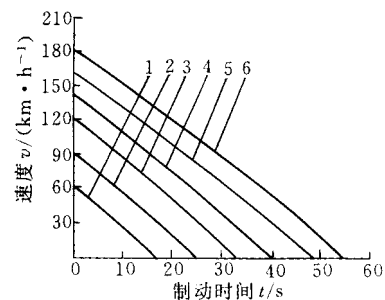


图 3 紧急制动试验的瞬时速度—制动时间曲线

- 1. 60 km·h<sup>-1</sup>    2. 90 km·h<sup>-1</sup>    3. 120 km·h<sup>-1</sup>
- 4. 140 km·h<sup>-1</sup>    5. 160 km·h<sup>-1</sup>    6. 180 km·h<sup>-1</sup>

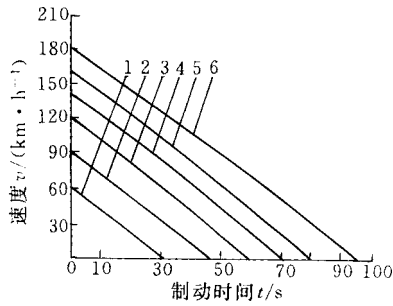


图4 常规制动试验的瞬时速度—制动时间曲线

- 1. 60 km · h<sup>-1</sup>      2. 90 km · h<sup>-1</sup>      3. 120 km · h<sup>-1</sup>
- 4. 140 km · h<sup>-1</sup>    5. 160 km · h<sup>-1</sup>    6. 180 km · h<sup>-1</sup>

的舒适性有利，并且，不同制动初速度下，其瞬时速度—制动时间曲线都可以用公式  $v(t) = kt + v_0$  来表示，式中  $k < 0$ ，即减速度。

由此式可推得：在制动时间内的任意时刻  $t$ ，试验台模拟装置的动能的变化

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_t^2 = \frac{-mk}{2}(kt^2 + 2v_0t)$$

以紧急制动试验的参数为例，绘出  $\Delta E$  与制动时间  $t$  的关系曲线，如图5所示。

由图5可以看出，160 km · h<sup>-1</sup> 以下，动能变化与制动时间的关系曲线与图1和图2中相应的温度曲线的分段变化规律是相符的。但不能解释图1和图2中180 km · h<sup>-1</sup> 温度特性曲线的异常变化。

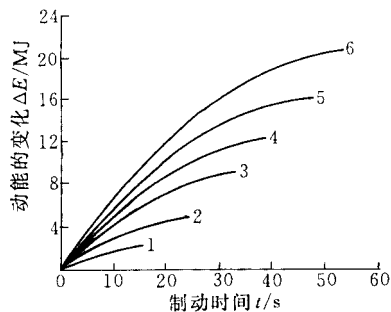


图5 试验装置的动能变化与制动时间的关系曲线

- 1. 60 km · h<sup>-1</sup>      2. 90 km · h<sup>-1</sup>      3. 120 km · h<sup>-1</sup>
- 4. 140 km · h<sup>-1</sup>    5. 160 km · h<sup>-1</sup>    6. 180 km · h<sup>-1</sup>

另一方面，从制动过程中的散热情况分析，散热形式包括传导、对流和辐射，在整个制动过程中，由摩擦表面高温区向制动盘内部低温区进行的传导散热在整个摩擦表面一直进行，而制动盘表面对流和辐射散热只是表面与闸片不接触的部位在不接触的时间内进行。此外还有制动盘中部散热风道进行的对流和辐射散热，只有当制动时间较长，温度梯度较高，摩擦表面的热量通过传导传至此处后才有散热效果，所以在高速下或低制动压力下的制动需要考虑此项散热。因此，制动过程中总的散热情况可以表示为

$\Sigma[K_{cd}(t_c + t_o)S_d + (q_{cv} + q_r) t_o(S_d - S_b)] +$   
[制动盘其余散热面通过传导、对流和辐射散失的热量]

式中  $K_{cd}$ ——传热系数(W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>)；其热量传输与温度梯度成正比

$q_{cv}$ ——对流热流量(W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>)；自然对流条件下，其热量传输正比于温差的5/4次方

$q_r$ ——辐射热流量(W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>)；其热量传输遵循温度4次方定律

$S_d$ ——制动盘表面摩擦面积(m<sup>2</sup>)

$S_b$ ——制动闸片摩擦表面面积(m<sup>2</sup>)

$t_c$ ——从制动过程中某一时刻开始，制动盘与闸片相对旋转一周过程中，制动盘表面单位面积的一个微区与闸片接触的时间(s)

$t_o$ ——从制动过程中某一时刻开始，制动盘与闸片相对旋转一周过程中，制动盘表面单位面积的一个微区与闸片不接触的时间(s)

下面分析  $t_c$  和  $t_o$  与制动时间之间的关系。

考察制动盘表面一个微区，该微区位于制动盘有效半径  $r_c$  的圆周上，则有

$$\int_t^{t+t_c} \frac{r_c}{r_w} (kt + v_0) dt = l$$

式中  $r_c$ ——制动盘有效半径(m)

$r_c = 0.245$  m

$r_w$ ——车轮半径(m)

$r_w = 0.4575$  m

$l$ —— $r_c$  圆周上摩擦片的弧长(m)

$v_0$ ——制动初速度(m · s<sup>-1</sup>)

由上式可得

$$t_c = -\left(t + \frac{v_0}{k}\right) - \sqrt{\left(t + \frac{v_0}{k}\right)^2 + \frac{2l}{k} \times \frac{r_w}{r_c}}$$

同样可推导出

$$t_o = \sqrt{\left(t + \frac{v_0}{k}\right)^2 + \frac{2l}{k} \times \frac{r_w}{r_c}} - \sqrt{\left(t + \frac{v_0}{k}\right)^2 + \frac{4\pi r_w}{k}}$$

图6是采用图3得到的  $k$  值代入上面两式绘制的  $t_c/t_o \sim t$  函数图像。

由图6可以看出，在各个制动初速度下， $t_c/t_o$  几乎相同，接近制动结束时， $t_c/t_o$  迅速减小。说明在制动临近结束阶段，向制动盘传入热量的作用减小，而由制动盘向外界散发热量的相对时间增加，效果增强。结合图5所显示的制动过程中动能转化随时间变化的规律以及各种散热方式的热流量与温

差的关系，可以定性地说明随着制动时间的延长、制动初速度的提高，制动盘温度随制动时间延长而上升的趋势在临近制动结束时将变缓，当散热作用大于热量输入的作用，甚至会出现下降。但是，很显然，从散热的角度同样不能解释图1和图2中180 km·h<sup>-1</sup>温度特性曲线的反常特征。

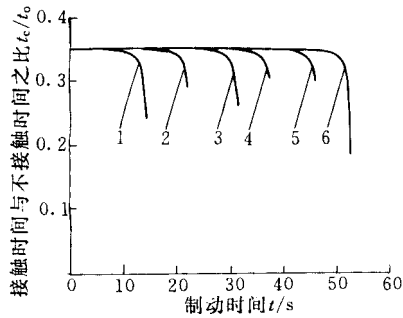


图6 t<sub>c</sub>/t<sub>0</sub>~t函数图像

- 1. 60 km·h<sup>-1</sup>      2. 90 km·h<sup>-1</sup>      3. 120 km·h<sup>-1</sup>
- 4. 140 km·h<sup>-1</sup>    5. 160 km·h<sup>-1</sup>    6. 180 km·h<sup>-1</sup>

以上的讨论中都没有涉及材料的物理性能在摩擦过程中的变化，也没有涉及材料的磨损，并因此假设摩擦热在制动盘与闸片之间的分配系数为定值，而实际情况并非如此。

图7表示的是不同制动初速度下闸片材料在一次停车紧急制动试验中的磨损量占总磨损量的比例与相应速度下单次制动的制动能量占总制动能量的比例。

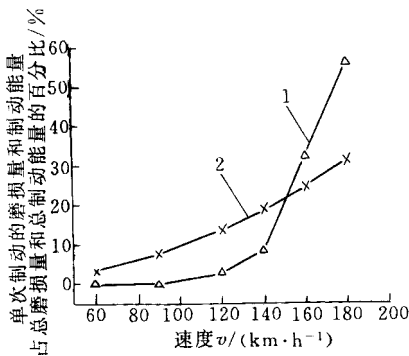


图7 不同制动初速度下一次停车紧急制动的磨损量占总磨损量的比例和相应的制动能量占总制动能量的比例

- 1. 磨损量的变化    2. 制动能量的变化

从图7中可以看出，制动初速度小于160 km·h<sup>-1</sup>时，闸片磨损量较小，其磨损量比例小于或略超过相应的制动能量比例；制动初速度为180 km·h<sup>-1</sup>时，相对磨损量有较大提高，并且其磨损量比例大大超过了相应的制动能量的比例。这说明制动初速度为180 km·h<sup>-1</sup>的一次停车制动过程中，摩擦表面的磨损机理发生了变化，试验中观察到闸片摩擦表面形

成明显的摩擦膜，因此实际上与制动盘配对的摩擦副材料已发生了改变，该膜具有与整体闸片材料不同的物理性能，如硬度、模量下降，与制动盘的贴合性提高，导热性提高等，而与其配合的制动盘材料则随着温度的提高，导热性下降，比热容增加<sup>[7]</sup>，从而改变了摩擦热在摩擦副间的分配系数，热量相对较多地由闸片材料吸收，从而使得反映制动盘温度变化的180 km·h<sup>-1</sup>温度特性曲线出现反常。之所以在该速度下出现反常，有可能与合成闸片材料中所使用的改性酚醛树脂的结构、耐热性等因素有关，作者在分析其他几个合成闸片材料(包括国外产品)时发现了同样的现象。

### 3.4 讨论测温方法带来的问题

摩擦试验中常用的测温方法有3种：一是使用热电偶、热电阻类测温元件，测温触点在某一压力作用下与摩擦表面滑动接触，该方法的特点是测温位置准确，但测温触点与摩擦表面的接触情况，如接触压力、表面粗糙度等因素对测温精度有较大影响，而且该方法只适合较低速度下的摩擦表面的温度测量。二是使用非接触式的红外测温装置，该方法消除了测温探头与摩擦表面接触对测温精度的影响，而且确实测量的是摩擦表面的温度，但由于红外测温技术本身的特点，其测量精度也不高；三是本试验中采用的方法，将热电偶放置在摩擦表面下，可以放置在制动盘里，也可放置在制动闸片中，由于铸铁制动盘的导热性远大于合成摩擦材料，所以一般将热电偶放置在制动盘里制动表面下3 mm处。该位置测得的并不是摩擦表面的真实温度，而是制动盘的体积温度<sup>[1]</sup>。从摩擦表面的受热和散热条件分析，摩擦表面的瞬时温度变化是一种脉冲式、阶梯式的上升过程，本试验中测温方法不能反映出这种温度的急剧变化过程，但通过分析瞬时摩擦温升数据，可以反映摩擦表面的温升总的变化规律。

## 4 结论

- (1) 一次停车制动过程中瞬时温度随制动时间的变化可分为三个阶段，即：起始的无反应阶段，随后的迅速升温阶段，和最后的温度缓慢变化阶段。
- (2) 制动过程中瞬时温度随制动时间变化的后两个阶段可以用制动过程中的能量变化规律和散热条件的改变给以定性解释。
- (3) 制动初速度为180 km·h<sup>-1</sup>时，闸片表面出现摩擦膜，导致热量在摩擦副间的分配系数改变，使得该速度下的温度特性曲线出现反常。

## 参 考 文 献

- 1 马保吉, 朱均. 摩擦制动器接触表面温度计算模型. 西安工业学院学报, 1999, 19(1): 35~39
- 2 易茂中, 冉丽萍. 制动盘温度的有限元计算与实验研究. 石油机械, 1998, 26(9): 15~18
- 3 吴萌岭. 准高速客车制动盘温度场及应力场的计算与分析(上). 铁道车辆, 1995, 33(9): 6~9
- 4 张学勇, 刘沃野, 王平, 等. 离合器摩擦片温升分析. 润滑与密封, 2000, (2): 18~19
- 5 蔡丹, 魏宸官, 宋文悦. 离合器片表面温度的测量与表面应力的计算. 车辆与动力技术, 2000, (4): 7~11
- 6 王海庆, 王成国, 庄光山, 等. 混杂纤维增强酚醛闸片在提速列车上的应用研究. 工程塑料应用, 2001, (12): 16~18
- 7 Saumweber E. 在各种行车工况下制动盘的温度计算. 若生宽治, 陈泽深 eds. 见: 国外高速列车译文集—暨有线提速车辆技术专集(内部资料)(七). 北京: 铁道部科学研究院车辆所《国外高速列车译文集》编委会, 1998: 378~387

STUDY ON TEMPERATURE RISE OF  
FRICTION SURFACE IN DISC-BRAKING*Zhuang Guangshan Wang Chengguo**Wang Haiqing Li Li Sun Yi**(Shandong University)*

**Abstract:** The temperature characteristics of the developed friction material showed in the parking brake test by friction & wear tester for railway rolling stocks are studied, and the analyses are given from the point of view of energy conversion, heat transmission and change of material nature. The results showed that all of the temperature characteristic curves under different initial braking speed can be divided into three stages, that is irresponsive stage, rapid temperature rise stage and slow temperature change stage, and the curve of  $180 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  showed abnormal change. The reason of abnormality of the third stage is that the rate of energy conversion during parking brake slowed down and at the same time the effect of heat dissipation enhanced relatively when the braking close to finished. The abnormality of the temperature characteristic curve at  $180 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  is attributed to the formation of friction film on the surface of brake pads.

**Key words:** Brake Temperature Friction

作者简介: 庄光山, 男, 1968 年出生, 博士研究生。目前主要从事纤维增强树脂基复合材料的应用研究。