

M 50 高速钢高温摩擦磨损特性的研究

刘 佐 民

(武汉汽车工业大学摩擦学研究所 武汉 430070)

摘要 通过磨损量和摩擦因数的在线测量及磨损表面形貌的微观分析,考察了 M 50 高速钢的高温摩擦磨损特性。结果表明:在温度高于 400 的条件下,由于摩擦热与环境温度的共同作用,使材料的接触界面保持半熔融状态,在滑动过程中于摩擦表面形成了一层“金属膜”,使摩擦因数明显降低,尤其在 600 高温下的摩擦因数和磨损率都几乎最低,而且都相当平稳。这是材料的磨损由微切削变成金属膜间对摩的结果,此时的磨损速率主要取决于表面膜的承载能力。

关键词 高温摩擦 高速钢 摩擦学特性 摩擦热

分类号 TG142.7

在 M 类高速钢中, M 50 高速钢是一种特殊类别,其中合金化元素的含量比标准高速钢中的低,故此红硬性较差,然而由于这种钢具有成本低、硬度适中和易于加工等特点,已在机械工业中广泛用于制造液压泵活塞、渣泵叶片和木材锯及模具等。90 年代以来, M 50 高速钢又进一步被用作透平发动机轴承和金属陶瓷的摩擦配对材料^[1,2]。随着工业应用范围的不断扩展,对 M 50 高速钢的改性研究及其与陶瓷材料配副时的摩擦磨损性能研究日益引起人们的重视,但是迄今却还很少见到其在高温下摩擦磨损特性研究的工作报道。事实上, M 50 高速钢的耐高温性能远比金属陶瓷的差,因此,考察这种钢的高温摩擦磨损特性,对其与金属陶瓷配副的工程应用具有重要意义。为了尽可能客观地反映 M 50 高速钢的高温摩擦磨损特性,使所得结论有助于进一步开拓其它 M 类高速钢的工业用途,作者采用的是摩擦因数和磨损速率的高温在线测量和磨损表面微观分析的研究方法。本文报道有关的主要研究成果。

1 试验部分

1.1 试验机

试验在热磨损销-盘试验机^[3]上进行,销和盘试样均被安装在高温炉的中央,炉温由计算机控制在室温到 600 的范围。磨损量采用电容传感器在线测量销与盘之间的高度改变值 Δh ,测量结果通过微处理机中的程序计算出磨损体积,每 5 min 打印出一次试验结果。摩擦力通过力传感器在线测量,同样是每 5 min 记录一次试验结果。

1.2 试验材料的组成与试件

试验材料是 M 50 高速钢,其金相组织中含碳化物和隐针马氏体,硬度为 HRC 59~ 60

1995-06-21 收到初稿,1996-11-19 收到修改稿

刘佐民 男,1947 年 9 月生,湖北省咸宁市人,1983 年在武汉汽车工业大学获工学硕士学位,1992 年赴英国进修 1 年,目前主要从事摩擦学理论与工业应用研究,发表论文 28 篇,现为武汉汽车工业大学教授

这种钢所含化学成分的质量分数(下同)组成为: C 0.840%, S 0.002%, Cr 4.140%, W < 0.005%, V 1.090%, Mo 4.220%, 余量为 Fe。上下试样材料均为 M 50 高速钢, 销(上试样)和盘(下试样)的尺寸分别为直径 5 mm, 长度 15 mm 和直径 55 mm, 厚度 5 mm。其中, 试样销的端部呈球状(其曲率半径 $R = 5 \text{ mm}$)。试样在经过磨削加工之后的表面粗糙度 R_a 值均处于 $0.24 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 的范围

1.3 试验条件与方法

试验是在温度 $100 \sim 600$, 相对滑动速度 0.1 m/s 和载荷 10 N 的条件下进行。试验前, 在光学显微镜下测量销试样球头的曲率半径, 并将其值输入微处理机中, 安装销试样使其与盘之间的距离控制在电容传感器的位移标定范围内, 所加载荷也控制在力传感器的标定范围内。试验后, 在带有计算机程序处理的光学显微镜下测量销端头的磨损体积, 并将实际测量值与对应的计算机在线输出终值进行比较, 二者的相关系数 $R^2 = 0.89$ 。

2 试验结果与分析

图1给出的是 M 50 高速钢自摩擦副在销-盘试验机上于不同温度条件下摩擦 3h 的平均摩擦因数和磨损体积的测量结果。可以看出: 当温度处于 $20 \sim 300$ 范围内时, 材料的磨损体积随温度的升高而明显增大, 而摩擦因数的增大甚微; 当温度高于 300 之后, 摩擦因数已经开始快速降低, 而磨损体积仍继续增大, 当温度上升到 400 时, 材料的磨损体积也开始急剧下降, 认为这种变化是材料在高温下摩擦磨损机理发生转变的结果。

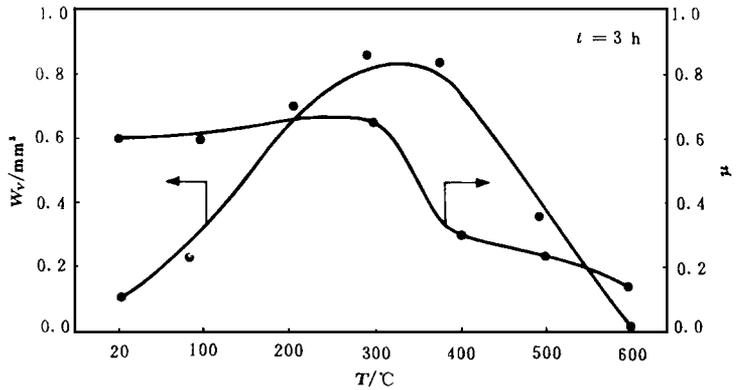


Fig 1 A average friction factor and wear volume of M 50 high-speed steel under different temperatures

图 1 M 50 高速钢在不同温度条件下的平均摩擦因数和体积磨损量

2.1 温度对摩擦的影响

图 2 给出的是在不同温度条件下 M 50 高速钢的摩擦因数随着滑动距离变化的关系曲线。由图可以看出: 在 100 时, 摩擦因数随着滑动距离的增加而上升, 直至滑动 960 m 时才开始稳定; 在 200 和 300 时, 虽然摩擦因数都很快趋向稳定, 但其值却都很高(分别约为 0.7 和 0.8); 当温度分别为 400 , 500 和 600 时, 摩擦因数都明显地低, 而且都很快进入稳定阶段, 尤其在 600 下的摩擦因数基本是始终最低, 而且摩擦因数的波动性很小并呈现出不断下降的趋势, 这表明 M 50 钢自摩擦副的高温摩擦性能优良, 由此可见界面温度直接影响着材料的摩擦阻力。

为了使试验结果尽可能反映温度对材料摩擦性能的影响, 试验中采用了比较低的滑动速度和法向载荷(见试验条件)。尽管如此, 金属摩擦副在滑动过程中的能量消耗仍然不可避免地使接触界面产生摩擦热, 界面温度 T_c 由体积(试验)温度 T_b 和最高瞬时闪温 $T_{\text{fm ax}}$ 所组成: T_c 。

$= T_b + T_{\text{finax}}$. 根据摩擦热计算模型^[4],

$$T_{\text{finax}} = \gamma_1 \mu_{\text{max}} (p v / \pi a k_1). \quad (1)$$

式中: μ_{max} 为摩擦因数峰值; v 为销-盘间的相对滑动速度 ($v = 0.1 \text{ m/s}$); p 为加在销-盘间的法向载荷 ($p = 10 \text{ N}$); k_1 为销材料的热导率; a 为球状销端的实际接触半径, 当弹性接触时

$$a = a_e = 0.91 (pR / E_r)^{1/3}, \quad (2)$$

塑性接触时

$$a = a_p = (p / \pi \alpha_y)^{1/3}. \quad (3)$$

式(2)中的 R 为球状销端的曲率半径 ($R = 5 \text{ mm}$), $E_r = E_1 / (1 - \nu^2)$, 此处的 E_1 和 ν 分别为销材料的弹性模量和泊松比, 式(3)中的 α_y 为销材料的屈服强度 ($\alpha_y = 6.01 \text{ kN/mm}^2$), 将

已知值分别代入式(2)和(3)可得 a_e 和 a_p ; $\gamma_1 = k_1 + 0.62k_2 (a \cdot v / D_2)^{1/2}$ 为热量进入销的热流系数, 这里 D_2 为盘材料的热散度 ($D_2 = 1.172 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)^[4], 将 k ($k_2 = k_1$), a 和 ν 值代入 γ_1 的表达式可得 $\gamma_1 = 0.70$ (弹性接触状态) 和 $\gamma_1 = 0.78$ (塑性接触状态). 将已知数据代入式

(1) 可以计算出 T_{finax} (见表1), 由于接触点处弹性接触和塑性接触的不确定性, 不同温度下的 T_{finax} 值均取其变化范围. 由表1列出的测定数据可以看出, 当试验(环境)温度为400

时, 由于摩擦热与环境温度的共同作用, 界面材料的最高温度已达到550. 这种温度恰好就是M50高速钢的高温回火温度^[5]. 在此温度条件下, 长时间的连续摩擦可以使界面微接触点材料的剪切强度下降. 除此以外, 由于用式(2)和(3)计算 a_e 和 a_p 值时所取的 R 值是以球状销端的宏观尺寸 ($R = 5 \text{ mm}$) 为曲率半径, 这明显比界面微凸体的实际接触半径 R_e 和 R_p 值大, 故此在界面微凸体处所产生的实际瞬时闪温 T_{finax} 远比表1列出的计算值高. 因此, 在摩擦界面上的某些微接触点处材料呈现出如图3(a)所示的熔融态, 而微合金

相组织则呈现出明显的晶粒塑性蠕变形态, 而且方向与试样的摩擦滑动方向一致[图3(b)]. 由于界面材料具有这种特征, 因而能够大幅度地降低摩擦过程中微接触点处的剪切阻力, 从而使摩擦因数大幅度下降(参见图2).

2.2 温度对磨损的影响

图4给出的是不同温度下M50高速钢磨损体积随滑动距离变化的关系曲线. 为了便于讨论, 将曲线的斜率记为 K_T (T 为试验温度). 对比图4所示曲线可以看出, 当试验温度分别为

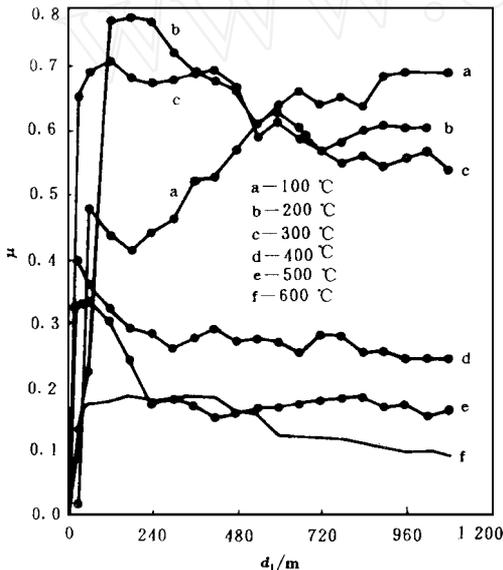


Fig 2 The friction factor of M50 high-speed steel as a function of the sliding distance (d_1) under different temperatures

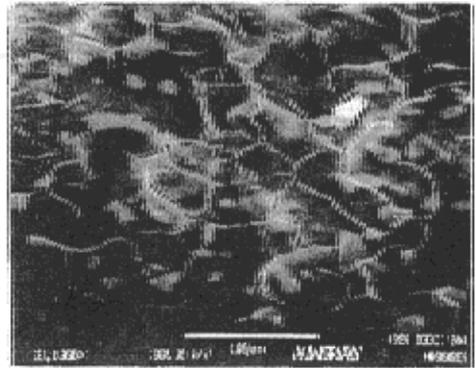
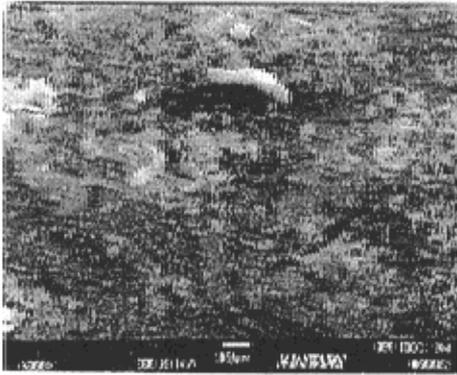
图2 不同温度下M50高速钢的摩擦因数随着滑动距离变化的关系曲线

100 , 200 , 300 时, $K_{100} < K_{200} < K_{300}$, 且在整个试验过程中磨损体积基本是滑动

表 1 在不同试验条件下销的界面温度

Table 1 Interface temperatures of pin under different conditions

$T_b /$	$k_1 / W \cdot m^{-1} K^{-1}$	μ_{max}	$T_{finax} /$	$T_c /$
20	43	0.60	56~ 150	76~ 170
100	43	0.70	66~ 176	166~ 276
200	42	0.80	76~ 205	276~ 405
300	40	0.71	72~ 191	372~ 491
400	36	0.42	47~ 151	447~ 551
500	35	0.35	41~ 108	541~ 608
600	33	0.19	23~ 62	623~ 662



(a) Microstructure of worn surface

(b) Magnification of figure 3(a)

Fig 3 SEM microstructure of worn surface of pin specimen under 400 testing temperature

图 3 在试验温度为 400 时销试样磨损表面微观组织的 SEM 照片

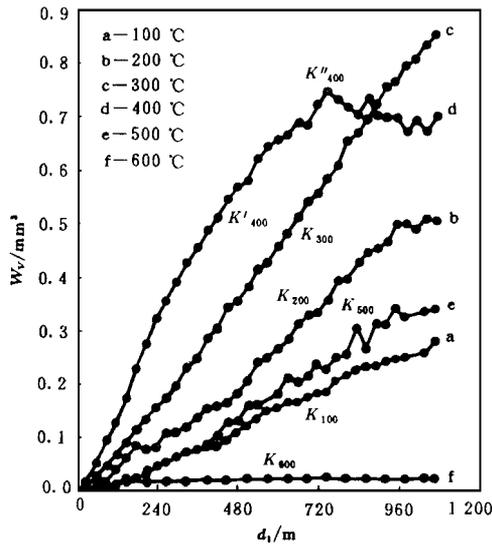


Fig 4 The wear volume of M 50 high-speed steel as a function of the sliding distance (d_1) under different temperatures

图 4 在几种不同温度条件下 M 50 高速钢的磨损体积随着滑动距离变化的关系曲线

距离的线性函数(即 K_T 值趋于常数);当试验温度为 400 时, K_{400} 明显由 K_{400} 和 K_{400} 两部分组成,其中 K_{400} 值近似为常数,即磨损体积随滑动距离的延长而近乎呈直线上升,而在滑动 750 m 之后,随着滑动距离的延长,磨损体积几乎不再增加(即 $K_{400} = 0$);当试验温度为 500 时,虽然 K_{500} 有所波动,但大体上是趋于常数,而且其值始终较低;当试验温度提高到 600 时,磨损体积一直很小且很稳定(即 $K_{600} = 0$).

根据以上所述的试验结果分析认为,只要将试验温度提高到足以使界面摩擦温度 T_c 达到 550 ,材料就处在高温回火状态.在这种情况下,高应力的微凸体接触和切向滑动就必然导致接触点处呈现熔融态.因为界面摩擦温度 T_c 是由 $T_{\max} + T_b$ 这两部分所组成,所以随着试验温度 T_b 的升高, T_c 与 T_b 间的差值减小(见表 1).由于这种现象的存在,当试样的体积(试验)温度 T_b 较低时,滑动过程中界面最高瞬时闪温 T_{\max} 将迅速扩散,致使接触点处被磨掉的微粒急剧冷却而形成微细的硬磨粒残留在磨痕上[如图 5(a)所示],结果材料就呈现出高摩擦磨损特征.当试验温度上升到足够高时,界面最高瞬时闪温不易扩散,被软化的材料在界面摩擦温度的作用下可以保持半熔融状态,并在相对滑动过程中粘着覆盖在磨痕表面而在摩擦表面上形成了金属膜[如图 5(b)所示],从而使金属的摩擦过程变成在“膜”间进行,因而材料呈现出低摩擦磨损特征.不言而喻,材料的高温低摩擦磨损特征有利于其应用在高温滑动副中.

应当指出, M 50 高速钢的上述特征是在其在高温条件下的磨损过程从金属表面微切削向金属膜间对磨转化的结果,因而明显受到法向载荷的影响.

图 6(a) 给出的是在 3 种载荷条件下的磨损体积-滑动距离曲线.可以看出:当载荷分别为 10 N 和 20 N 时,不仅磨损一直都很低,而且 2 条 W_v-d_1 曲线几乎重合;然而在载荷增加

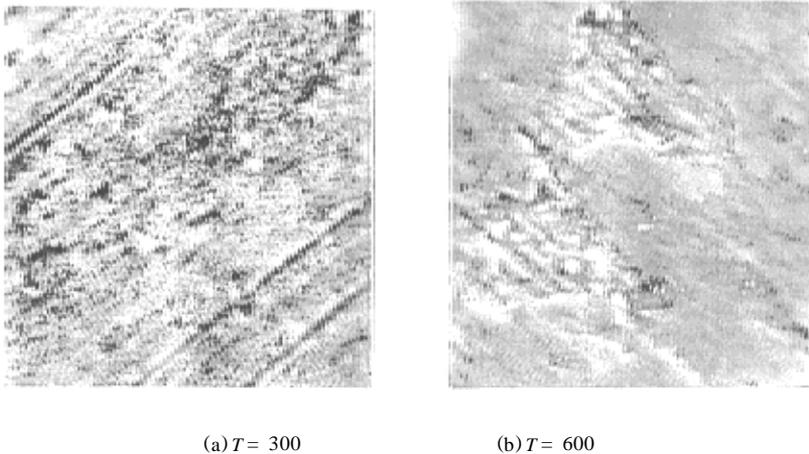


Fig 5 SEM photographs of worn surface topography (2 000 ×)

图 5 磨损表面形貌的 SEM 照片 (×2 000)

到 40 N 的条件下,磨损体积明显增大,而且随着滑动距离的延长,磨损曲线不断升高,在滑动到 1 000 m 时,磨损体积急剧增大.

根据上述试验结果分析认为,载荷对磨损的影响主要取决于表面膜的承载能力.为了改善 M 50 高速钢的高温摩擦磨损特性,在对其进行改性研究的过程中,重视抗高温摩擦磨损

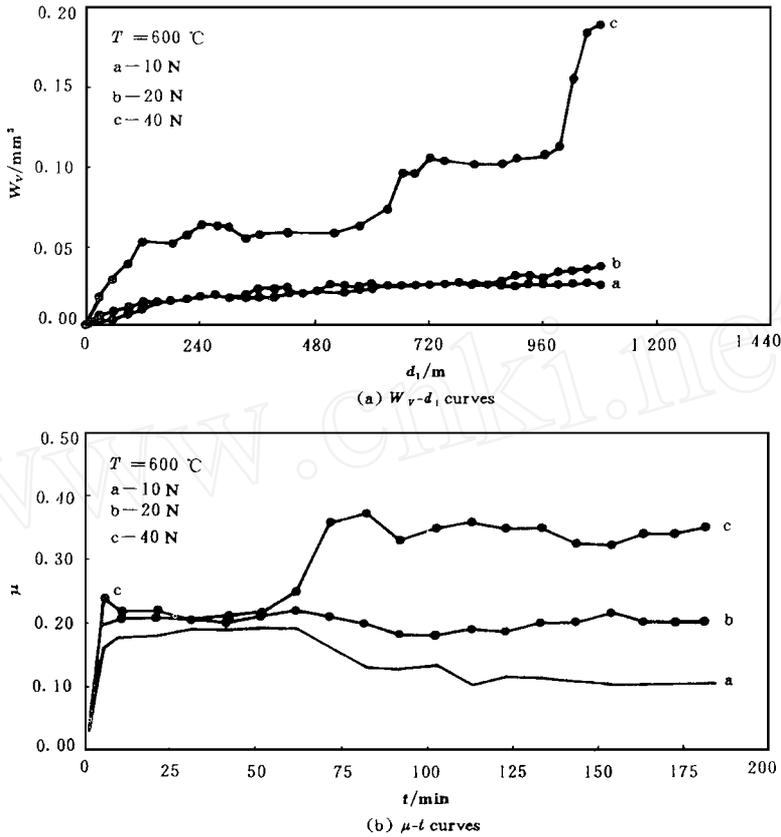


Fig 6 Test results of friction and wear of M 50 high-speed steel under different loadings

图 6 不同载荷下 M 50 高速钢的摩擦磨损试验结果

添加剂技术的研究是十分必要的^[3]。

3 结论

在给定的试验条件下, 温度对 M 50 高速钢自摩擦副的摩擦和磨损性能的影响相当复杂: 当试验温度处于 100~ 300 范围时, 材料的磨损率随着温度的上升而明显增大, 而摩擦因数的增大甚微, 基本保持在 0.64 左右; 当温度高于 400 时, M 50 高速钢的摩擦和磨损都明显减小, 主要原因是界面微接触点处材料发生软化熔融而在摩擦面上形成了一层金属膜, 使材料的磨损由微切削向金属膜间对磨转变。在这种情况下, 材料的磨损率主要取决于表面膜的承载能力。

致谢 本实验研究工作得到英国 Leeds 大学摩擦学研究所和 Childs T H C 教授的大力支持和帮助, 谨此一并致谢。

参 考 文 献

1 Childs T H C, M inaroglu A. Sliding friction and wear up to 600 of high speed steels and silicon nitrides for gas

- turbine bearings *Wear*, 1993, 162-164: 890~ 896
- 2 Nielsen B R, Torp B. Improvement of corrosion resistance of M 50 bearing steel by implantation with metal ions VII Metals/Tribology. North-Holland: Elsevier Science Publishers B V. 1991. 772~ 777
 - 3 Zuom in L, Childs T H C. The influence of TiC, CaF₂ and MnS additives on friction and lubrication of sintered high speed steels at elevated temperature *Wear*, 1996, 193: 31~ 37
 - 4 Rechar d S C, Ware O W. Friction heating calculations In: SAM Handbook Vol 18 1992 39~ 45
 - 5 SAM. Metals Handbook Vol 4 1981. 561~ 613

Friction and Wear Characteristics of M 50 High Speed Steel at Elevated Temperature

Liu Zuom in

(Wuhan Polytechnic University of Technology Wuhan 430070 China)

Abstract As an ideal material of manufacturing high temperature elements and matching metal for ceramic pairs, friction and wear characteristics of M 50 high speed steel at elevated temperature is very significant in engineering applications. The effect of high temperature (range from 100 to 600) on friction and wear of M 50 high speed steel, especially its friction and wear characteristics, have been investigated by measuring on line its friction factor and specific wear rate and microanalyzing method. The research results showed that the effects of temperature on friction and wear of M 50 high speed steel are significant, when the temperature reaching above 400 friction and wear mechanisms of material at contact interfaces have had a transition due to action of both friction heating and testing temperature, the curve of wear volume vs time presents a double rates and friction factor decrease largely. Frictional interface have presented some metal film while increasing testing temperature further, at the case, wear mechanism of the material have changed from microcutting to smearing and wear volume of the material mainly depends on bearing capacity of the surface film.

Key words friction at elevated temperature high speed steel tribological characteristic friction heat

Classifying number TQ 142.7