

铸铁滑动摩擦副表面温度对其磨损机制的影响

王成彪 符党替

(中国地质大学探工系 北京 100083)

温诗铸

(清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要 在铸铁摩擦副油润滑和线接触的滑动条件下,测定了试样摩擦磨损表面层的温度及其温度分布梯度,考察了表面层的相变特点、组织结构和形貌特征,并且分析了温度对磨损机制转化的影响。可以将摩擦磨损表面的热效应分为 3 个区:弱热效应区(对应于塑性流动磨损区)、热效应区(对应于氧化磨损区)和强热效应区(对应于严重磨损区)。在临界载荷前,表面层的 γ 相含量增加,但到临界载荷时,由于表面层的剥落, γ 相的含量明显减少。摩擦磨损表面的强热效应是导致表面层塑性流动、 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变、 γ 相含量增大、氧化物膜破裂、粘着和擦伤发生的重要原因。

关键词 铸铁 油润滑 温度效应 相变 磨损机制

分类号 TG143.9

摩擦热对滑动摩擦磨损行为有重要影响,有人提出了摩擦表面闪温的计算公式^[1,2],或通过实测的方法估算表面温度^[3]。除表面温度外,影响磨损的还有温度梯度、材料的热学性能和润滑条件等。高温和温度梯度可导致摩擦表面与润滑介质相互作用的变化,致使润滑状态和表面层的相组成发生变化。因此,无论是研究润滑状态的转化,还是研究磨损机制的转化,都要研究摩擦过程中温度的作用。作者通过对摩擦表面平均温度的测量计算,及对磨损表面形貌、表层组织和相结构的考察分析,探讨了表面温度对相变及磨损机制转化的影响。

1 试验部分

摩擦磨损试验在线接触销-盘式试验机上进行^[4]。销试样的材料是 CrMo-Cu-Fe 四元合金(A);盘试样的材料有 4 种:硼铸铁(B)、灰铸铁(B₁)、球墨铸铁(B₂)和蠕墨铸铁(B₃)。试样材料的化学成分、显微组织及其硬度等见文献[5]。以纯 20# 机械油单循环润滑,所有摩擦副均在 120 N 下磨合 3 min,然后在阶梯式加载过程中测得润滑状态转化图。

表面温度的测量系由 3 根埋入销试样的热电偶进行动态测定(见图 1 所示)。用电容式测位仪动态测量销试样磨损之后的位移量,并且以此确定第 1 热电偶距磨损表面的动态距

1996-02-13 收到初稿,1997-09-17 收到修改稿/本文通讯联系人王成彪

王成彪 男,1955 年 7 月生,陕西省人,工学博士,目前主要从事机械工程专业教学和磨损机理及表面强化工艺技术的科研工作,发表论文 20 余篇,现为中国地质大学工程技术学院探工系教授

符党替 男,1958 年 9 月生,陕西省人,现为中国地质大学工程技术学院机械工程专业博士生,主要从事薄膜技术研究

温诗铸 男,1932 年 11 月生,江西省人,目前主要从事纳米技术、流体润滑及磨损机理研究,发表论文 200 余篇,专著 4 部,现为清华大学精密仪器与机械学系教授、博士生导师

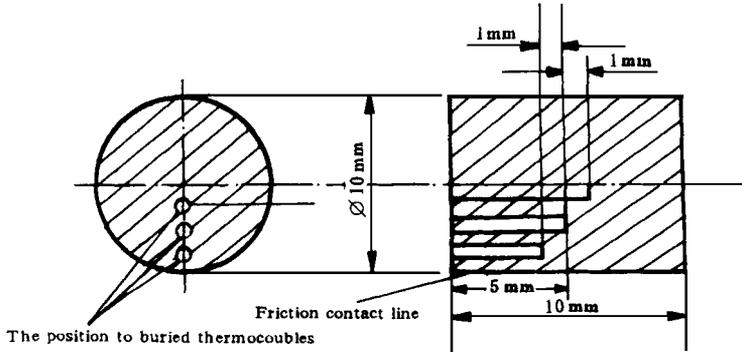


Fig 1 The deaft of method to buried themocouple in the pin specimen
图 1 销试样中热电偶的埋入方式

离和磨损表面面积 磨损表面的相组成用 D/M_{ax-RB} 型 X 射线衍射仪 (40 kV, 80 mA, 铜靶, 扫描角 $30^\circ \sim 140^\circ$ 和 $39^\circ \sim 48^\circ$) 进行分析 对销试样垂直或平行于磨损表面切片, 经机械研磨, 离子减薄后, 用 H-800 型透射电子显微镜 (TEM) 进行组织结构分析, 用 CSM 950 型扫描电子显微镜 (SEM) 进行表面形貌分析

2 试验结果与分析

2.1 摩擦温度的测量结果

在速度分别为 1 m/s , 2 m/s 和 3 m/s , 以及载荷分别为 990 N , 1530 N , 2340 N 的条件下, 试样销沿径向的摩擦温度分布如图 2 所示 表面温度 T_b (图 2 中的 0 位处) 是由 3 个沿销半径方向的测点温度外推二次插值得出的 由图可见, T_b 以及温度梯度都是随着滑动速度和载荷的增大而增大 图 3 给出的是试样 A 与 B ($R_a = 0.07 \mu\text{m}$) 对摩过程中的润滑状态转化图^[5], 表明了 3 次转化线上的 T_b 值 转化线上括弧中的温度是根据文献[2]报道的闪温公式计算得出的数据 几种不同材料配副都表明, T_b 在 220°C 以下时, 润滑状态处于部分弹流 I 区和边界润滑 II 区^[5], 润滑状态的转化对滑动速度的敏感性低, 主导磨损机制的是塑性流动磨损^[4] 作者称这段温度的影响为弱热效应 T_b 在 $220 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间时, 润滑状态处于边界润滑 II 区, 对速度和载荷的变化比较敏感, 磨损表面层的温度梯度也较大, 主导磨损机制是氧化磨损^[6], 称为热效应区 T_b 在 300°C 以上时, 润滑状态处于干摩擦 III 区, 对载荷和滑动速度的变化都非常敏感, 温度梯度很大, 表层的组织结构也发生了变化^[7], 而且磨损严重, 称为强热效应区

2.2 表面层的相变分析结果

图 4 给出的是在同一滑动速度 (2 m/s) 下由热效应区向强热效应区过渡接近于临界载荷时, 3 种销试样磨损表面奥氏体 (γ) 相对含量的 X 射线衍射 (XRD) 分析结果 由图可以看出, 随着载荷的增大, γ 体的衍射峰升高, 在临界载荷之前达到最高, 而在临界载荷时又降低 大量的样品分析表明, 在不同的滑动速度下均有类似的结果, 而且滑动速度越高, γ 体的衍射峰在临界载荷时的下降越明显^[6].

2.3 表面层结构

图 5 是临界载荷前磨损表面白层组织的典型 TEM 照片 (试样 B₁, 2340 N), 可见呈针

状和板条状马氏体(M)组织 图 6 是临界载荷前磨损表面白层结构的 TEM 分析结果(试样 B₁, 2 070 N), 电子衍射分析表明有 γ 体存在 图 7 是临界载荷时销试样 A 磨损表面层剖面的 SEM 照片, 明显可以看出表面层中有裂纹存在, 而且在次表面层发生了片状脱落

2.4 磨损表面形貌

图 8 所示为临界载荷时盘试样磨损表面典型形貌的 SEM 照片, 可见已经形成了“搓板”状形貌(a)和表面材料的堆积(b), 这些都是在强热效应下, 润滑状态发生第 3 次转化时, 磨损表面材料发生塑性撕裂和粘着转移的普遍特征

3 讨论

研究表明, 在油润滑的试验条

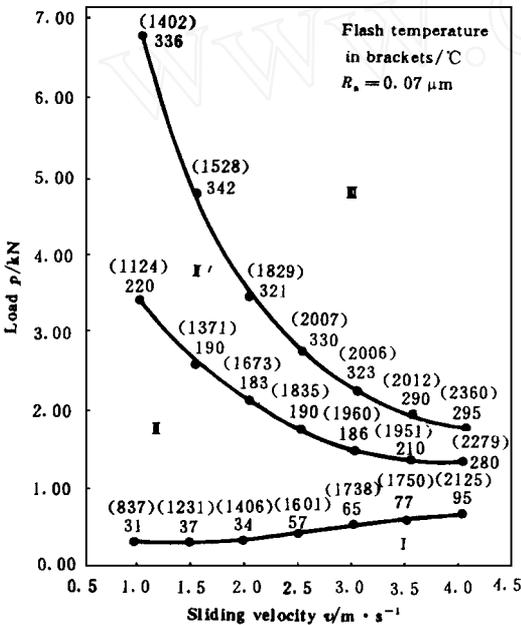


Fig 3 The surface temperature measured values and surface flash temperature calculated values (in brackets) for A-B friction pair at lubricating state transformation^[2]

图 3 A-B 摩擦副在润滑状态转化时的表面温度测量值和表面闪温(括弧中)计算值^[2]

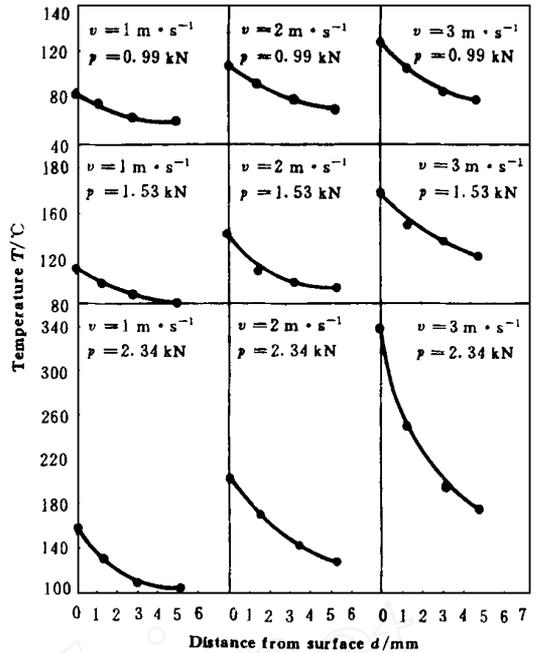


Fig 2 The distribution curves of the friction temperature in the pin specimen along the line of its radius

图 2 在不同的滑动速度和载荷条件下沿销试样半径方向的摩擦温度分布曲线

件下, 一旦在摩擦表面形成了完整的润滑油膜就不会再发生擦伤^[3], 而润滑油膜的破裂和擦伤的发生都应当归因于表面摩擦热^[8-10]和闪温高于临界值^[11].

研究表明, 载荷和滑动速度都是对摩擦表面温度和温度分布梯度产生影响的重要因素 由图 2 所示可见, 载荷和/或速度的增大, 都会引起摩擦表面温度升高和温度分布梯度增大 应当指出的是, 在本试验中测得的温度只反映了摩擦表面的平均温度和温度升降的趋势, 而实际接触微区的局部温度可以高于材料的熔点 工况监测对润滑油的分析结果表明, 在各个润滑区都有由熔融机制形成的球形磨粒存在, 其粒度和数量均随载荷或速度的增大而增大 图 3 括弧中给出的数据是用 L im 等^[2]的闪温公式并结合本试验条件选定参数计算的闪温值, 与在摩擦表面

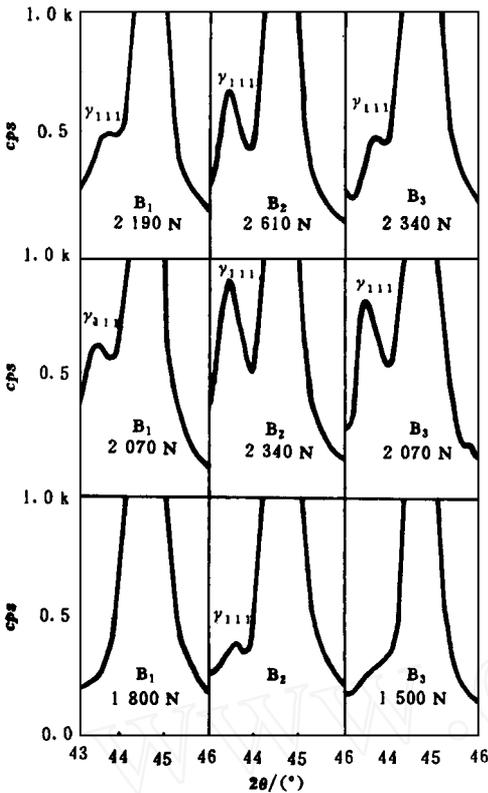


Fig 4 XRD spectra show n change of γ phase content in worn surfaces before critical loads with test materials ($v = 2 \text{ m/s}$)
 图 4 在临界载荷前试验材料磨损表面 γ 体含量变化的 XRD 谱 (滑动速度 2 m/s)

时, 由于石墨不断溶入 γ 体内而在原石墨处留下微孔, 而且温度越高, 溶入 γ 体内的石墨越多, 微孔越多, 但在冷却过程中, 由于从 γ 体中析出的石墨很少回到原孔, 从而造成了表面层的内应力增大, 致使白层中或白层与基体间裂纹的萌生与扩展。此外, 在强热效应和摩擦力的反复作用下, 摩擦表面层还会发生塑性流动。由图 7 所示明显可见, 白层塑性流动形成了层片状结构, 在层面之间可能残存着氧化物或摩擦聚合物, 从而形成了弱结合面或裂纹源。这种层片状结构的抗疲劳和抗拉能力都差, 容易发生层状剥落, 如图 7(b) 所示。表层塑性流动也是造成表面氧化物膜破裂的原因之一。

研究表明, 氧化物膜破裂和边界润滑失效都与临界载荷之前大量 γ 体的生成有关^[6]。据

观察到的熔融特征和熔融球的分析结果基本吻合。闪温产生的热量的积累和散发, 可以从平均温度和温度梯度的变化中得到反映, 表现为不同的热效应, 并且与磨损机制有很好的对应性。弱热效应区为边界润滑状态, 磨损机制以局部塑性流动为主^[4]。热效应区也为边界润滑状态, 但磨损机制却以轻微氧化磨损为主^[6]。强热效应区为干摩擦状态, 在此区域内表层组织发生了明显的变化, 出现了严重磨损^[5], 这是由多种磨损机制共同作用的结果。

摩擦副表层的显微组织随着摩擦温升而变化, 当温度超过相变点时, 有 γ 体形成。在随后的冷却过程中, 由于表面层受应力、变形和局部温升的反复作用, 在 γ 体向 M 体转变之后, 依然还有大量的残余 γ 体存在。由图 4 所示可以看出, 无论是哪一种材料, 在临界载荷前, 磨损表面的 γ 体含量都明显增大, 但最终在摩擦表面层都形成了组织和性能均不同于基体材料的白层。图 5 和 6 给出的 TEM 分析证明, 白层是由 M 体、 γ 体和碳化物组成的混合层。

材料的耐磨性能与它的原始组织结构有关, 也与摩擦表面层形成的新组织结构及性能有关。在高载荷条件下, 由于接触表面受到强热效应的作用, 某些接触微区的温度可能反复升高到相变温度范围而不断发生 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变。升温

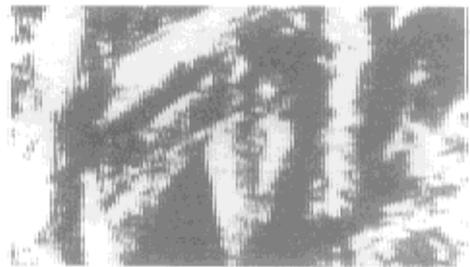


Fig 5 TEM micrograph of the white-etching layer microstructure on worn surface before critical load ($120\,000 \times$)
 图 5 在临界载荷之前磨损表面白层显微组织典型的 TEM 照片 ($\times 120\,000$)

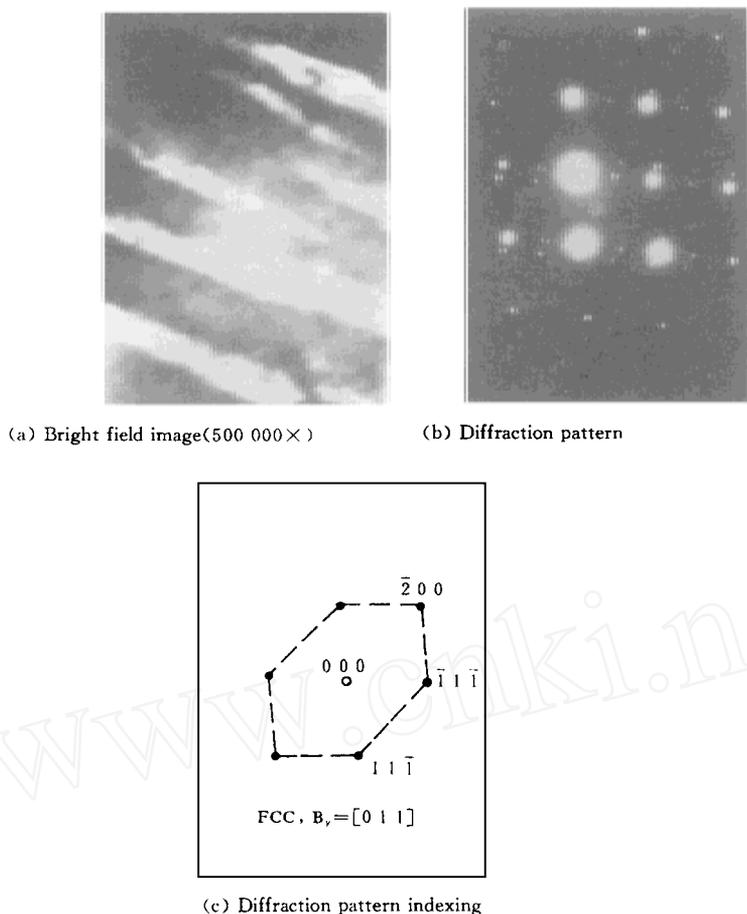


Fig 6 TEM micrographs of white-etching layer on worn surface before critical load and analysis results of electron diffraction

图 6 临界载荷前磨损表面白层的 TEM 照片和电子衍射分析结果

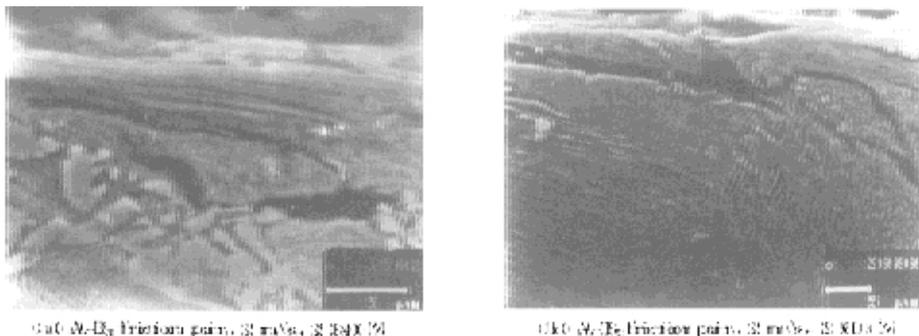


Fig 7 SEM micrographs of metallographic sections of the worn surface layers of pin specimen A at critical load

图 7 临界载荷时销试样 A 磨损表面层金相剖面的 SEM 照片

文献[13, 14]报道, γ 体的面心立方晶格结构具有促进粘着的作用^[12, 13]. 粘着的发生, 造成了表面层材料的转移堆积[见图8(b)所示], 摩擦因数迅速升高^[5], 明显加快了表面层中裂纹

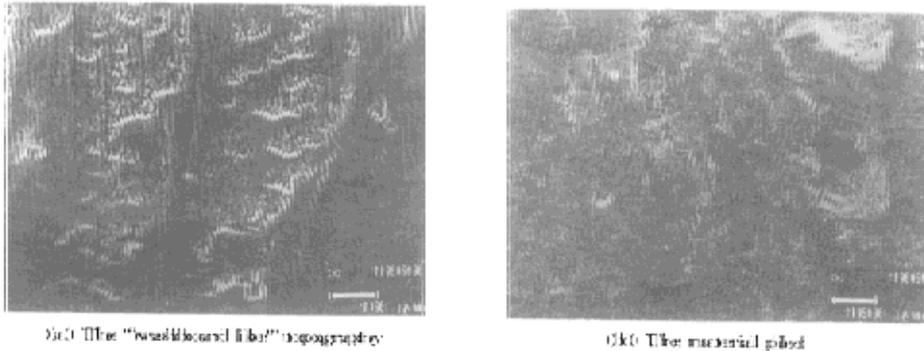


Fig 8 Scanning electron micrographs of the worn surfaces of disk specimens

图 8 盘试样磨损表面的 SEM 照片

的扩展, 加剧了塑性流动和氧化物膜的破裂, 从而造成了严重的粘着剥层磨损. 在临界载荷时, γ 体的含量急剧减少, 这可能与表面层的大量剥落有关.

4 结论

- a 摩擦温度的作用可以分为弱热效应区(对应于局部塑性流动磨损区)、热效应区(对应于氧化磨损区)和强热效应区(对应于严重磨损区).
- b 不同材料的磨损表面在接近临界载荷时, γ 体的含量都明显增大, 而到临界载荷时又都明显减少, 这与表面层的粘着剥层磨损有关.
- c 摩擦表面的强热效应是造成表面层塑性流动、 γ 相变、氧化物膜破裂、粘着和擦伤的重要原因.

参 考 文 献

- 1 Archard J F. The temperature of rubbing surfaces. *Wear*, 1958/1959, 2: 438~ 455
- 2 Lin S C, Ashby M F. Wear mechanism maps. *Acta Metall*, 1987, 35: 1~ 24
- 3 温诗铸. 摩擦学原理. 北京: 清华大学出版社, 1990. 293
- 4 王成彪, 温诗铸. 铸铁材料在边界润滑条件下形成薄片状磨屑的塑性流动机制. *摩擦学学报*, 1992, 12(3): 203~ 211
- 5 王成彪, 温诗铸. 铸铁滑动摩擦副润滑状态转化之部分影响因素的考察. *摩擦学学报*, 1993, 13(4): 297~ 305
- 6 王成彪, 温诗铸. 铸铁滑动摩擦副边界润滑表面膜的考察. *摩擦学学报*, 1995, 15(4): 333~ 340
- 7 Wang C B, Wen S Z. Behavior of cast iron surface layers in transition from mild to severe sliding wear under lubricated condition. *Lubrication Engineering*, 1994, 50(10): 780~ 784
- 8 Czichos H. Failure criteria in thin film lubrication- the concept of a failure surface. *Tribology*, 1974, 7: 14~ 20
- 9 Begelinger A, DeGee A W J. On the mechanism of lubrication film failure in sliding concentrated steel contacts. *Trans ASME (JOLT)*, 1976, 98: 575~ 580
- 10 Durkee D B. An examination of a possible mode of scuffing failure in simple sliding. *Wear*, 1980, 59: 223~ 230
- 11 Chandrasekaran S. Studies on the boundary lubrication regime in a four-ball machine. *Wear*, 1985, 105: 145~ 152
- 12 Sikorski M E. Correlation of coefficient of adhesion with various physical and mechanical properties of metals. *J Basic Engineering (ASME)*, 1963, 85: 279~ 285

- 13 Buckley D H, Tohnson R L. The influence of crystal structure and some properties of hexagonal metals on friction and adhesion *Wear*, 1968, 11: 405~ 419

Influence of the Surface Temperature of Cast Iron Pairs on Wear Mechanisms in Lubricated Sliding Wear

Wang Chengbiao Fu Dangti

*(Department of Exploration Engineering China University of Geosciences
Beijing 100083 China)*

Wen Shizhu

(National Tribology Laboratory Tsinghua University Beijing 100084 China)

Abstract The temperature and its distribution gradient in friction surface layers was measured in the lubricated sliding of cast iron in linear contact. The phase change and microstructure of the worn surface layers and the microtopography of the worn surface were investigated. The relationship between the temperature effect and wear mechanisms was analyzed. The temperature effect of the friction-wear surface could be divided into the region of weak thermal effect (the region of plastic flow), the region of thermal effect (the region of oxidation wear) and the region of strong thermal effect (the severe wear region). Before the critical load, the relative content of γ phase in the worn surface layers increased. It decreased considerably at the critical load because of the breakage of the surface layers. The strong thermal effect of friction-wear surface was one of main reasons that caused plastic flow, γ phase change, increase of γ phase content, breakage of the oxidation film, and adhesion and scuffing.

Key words cast iron oil lubrication temperature effect phase change wear mechanism

Classifying number TG143.9