

高铝铜合金粗粉超音速等离子喷涂层的边界润滑摩擦特性

杨效田¹, 王智平¹, 路 阳¹, 李 霞², 周晶晶¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州交通大学 化学与生物工程学院, 兰州 730070)

摘 要: 采用超音速等离子喷涂技术在 45#钢基体上制备高铝铜合金粗粉涂层, 对涂层进行边界润滑摩擦实验, 分析涂层的摩擦磨损特征及表面元素的质量损失。结果发现: 涂层的摩擦因数随外加载荷的增加呈逐渐下降趋势; 尽管磨损量随载荷的增大逐渐增加, 但磨损率呈下降趋势, 表明随外加载荷的增加涂层耐磨性能逐渐增强。涂层在中低载荷下以磨粒磨损为主, 当载荷达到高载荷 540 N 时, 涂层由磨粒磨损向疲劳磨损转变, 并在犁沟边缘发生疲劳磨损的同时表现出轻度的粘着磨损。边界润滑条件下, 涂层元素的质量磨损主要表现为 Cu 元素的损失, 磨粒磨损留下的犁沟为 O 元素进入摩擦界面提供通道, 使涂层表面形成微氧化膜。

关键词: 高铝铜合金; 粉体涂层; 超音速等离子; 摩擦; 磨损

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

Boundary lubrication tribological property of high-aluminium copper alloy coarse powders coating made by supersonic plasma spraying

YANG Xiao-tian¹, WANG Zhi-ping¹, LU Yang¹, LI Xia², ZHOU Jing-jing¹

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Chemical and Biological Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The high-aluminium copper alloy coarse powders coating was fabricated on 45# steel substrate by supersonic plasma spraying. The friction experiment was carried out in the boundary lubrication conditions, and then, the frictional and wear characteristics and the surface elements mass loss of the coating were analyzed. The results show that the friction coefficient of the coating has a gradual decline trend with the increase of the loads, although the wear loss gradually increases with the increase of the loads, the wear rate shows the downward trend, indicating that the wear-resisting performance of the coating is gradually strengthened with the increase of loads. The main wear mechanism of the coating is abrasive wear in the conditions of the low and middle loads, and then the mechanism transforms to fatigue wear when the load reaches 540 N. At the same time, fatigue wear of the coating not only happens in furrows edge, but also mild adhesion appears. In the boundary lubrication conditions, the wear mass loss of the coating elements mainly shows the loss of Cu element, and the furrows left by abrasive wear provide the channels for O element into friction interface, bringing about the tiny oxidation film on surface of the coating.

Key words: high-aluminium copper alloy; powder coating; supersonic plasma; friction; wear

超音速等离子喷涂是近年来兴起的热门研究课题, 其主要特点是借助超音速等离子体射流, 将入射

其中的粉体熔融并加速到音速以上(400~800 m/s)^[1]。其技术操作简单、成本低廉, 可用于制备高性能的金

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774040); 中俄国际合作交流项目(2009DFR50570)

收稿日期: 2011-11-08; 修订日期: 2012-03-05

通信作者: 杨效田, 副教授, 博士; 电话: 13919318192; E-mail: yangxt@lut.cn; yangxiaotian@sohu.com

属、合金、金属陶瓷和无氧化物金属涂层, 在机械装备制造和维护中具有广泛的应用前景^[1-4]。超音速等离子喷涂粉体的熔化状态和沿轴向的飞行速度是影响涂层质量的重要因素^[5]。由于粒子的飞行速度相对于传统等离子喷涂大幅提高, 所以涂层的致密性显著提高。依据超音速等离子喷涂研究经验, 超音速等离子最适合喷涂的粉体粒度一般为 5~45 μm , 课题组采用粒度小于 45 μm 的高铝铜合金细粉制备的超音速等离子喷涂层的结构致密, 为了提高粉体利用效率, 对粒度较粗的粉体进行超音速等离子涂敷研究具有更大的研究意义和实用价值。研究表明, 粒度在 52~106 μm 的粉体非常适合于制备等离子喷焊涂层, 所制备的涂层摩擦学性能优良^[6]。本文作者以该粒度的粗粉为研究对象, 研究超音速等离子喷涂制备的粗粉涂层的摩擦磨损性能。

1 实验

通过雾化法制取高铝铜合金粉体, 合金中 Al 的质量分数超过 Cu-Al 合金共析点(11.8%), 名义成分达到 14%。合金的成分如表 1 所列。

表 1 Cu-14Al-X 合金成分

Table 1 Composition of Cu-14Al-X alloy (mass fraction, %)

| Cu | Al | Mn | Fe | Co | Ni and else |
|-------|-------|---------|---------|---------|-------------|
| 70-80 | 12-16 | 0.8-2.0 | 2.0-4.0 | 0.5-2.5 | 0.8-2.6 |

制取的粉体形貌如图 1 所示。由图 1 可见, 所制备的粉体球形度较好。通过筛分, 选取粒度为 52~106 μm 的粗粉作为实验用材料, 采用上海大豪纳米材料喷涂有限公司生产的 DH-2080 型超音速等离子喷涂

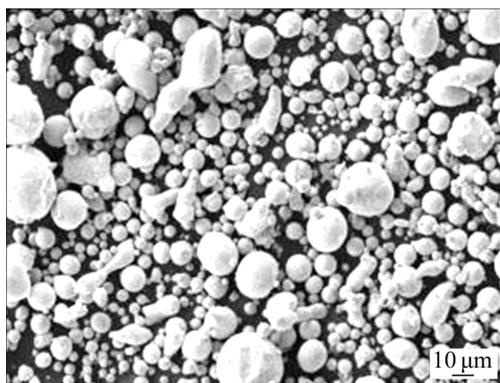


图 1 Cu-14Al-X 的粉末形貌

Fig. 1 Powder morphology of Cu-14Al-X

设备在 45#钢表面喷涂厚度为 1 mm 的涂层。喷涂工艺参数如下: 主气为氩气, 次气为氢气, 电压为 150 V, 电流为 315 A, 喷涂距离为 125 mm。氩气作为送粉载气, 送粉气压力为 0.8 MPa。

摩擦磨损实验在 MMW-1 万能摩擦磨损试验机上进行, 采用低速销盘式摩擦副。摩擦时, 对磨件 304 不锈钢下试样固定, 尺寸为 $d54 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 硬度为 201HV; 上试样为待测试样, 做圆周运动, 尺寸为 $d6 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$, 硬度为 387HV。摩擦副原理如图 2 所示。设定的摩擦时间和转速分别是 15 min 和 103 r/min。每次实验前分别将试样与对磨件用 900#水砂纸打磨并用丙酮清洗, 最终使其表面平均粗糙度为 0.1~0.2 μm 。采用边界润滑摩擦的方式研究超音速等离子喷涂层的摩擦磨损性能, 施加载荷分别为 100、200、300、420 和 540 N。润滑油选用 20#机油, 滴注速度为 20 滴/min。

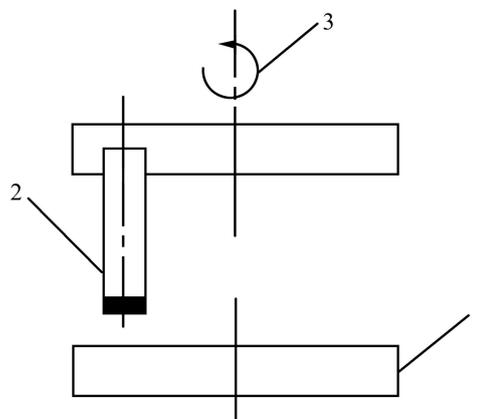


图 2 销盘式摩擦副示意图

Fig. 2 Sketch of pin-disc friction pair: 1—Fixed tray; 2—Rotating pin; 3—Direction of rotation

2 结果与分析

2.1 超音速等离子喷涂层组织及其相结构

图 3 所示为所制备粉体涂层表面的金相照片。由图 3 可以看出, 采用超音速等离子技术制备的涂层组织结构以团絮状凝聚的形式存在。对涂层表面元素含量作 EDS 面区域分析, 结果如表 2 所列。从表 2 可以看出, 所制备的元素含量符合实验设定的高铝铜合金材料要求。涂层组织结构相的 XRD 分析结果如图 4 所示。

依据 Cu-Al 合金相图, 结合 XRD 谱线可知, 涂层主要由 α 相、 β' 相、 γ_2 相和 K 相构成。其中: α 相是以 Cu 为基的固溶体组织, 强度较高且塑性较好,

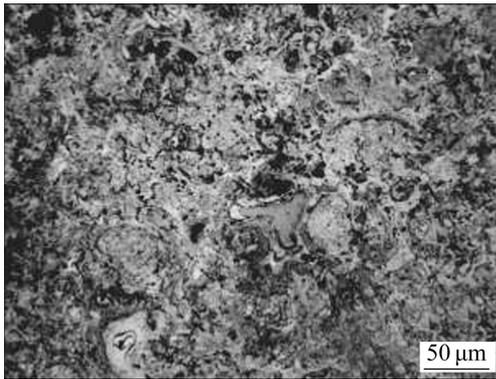


图3 超音速等离子喷涂涂层的金相照片

Fig. 3 Metallograph of coating made by supersonic plasma spraying

表2 涂层表面元素的质量分数

| Table 2 Mass fraction of surface element of coating (%) | | | | | | |
|---|-------|------|------|------|------|------|
| Cu | Al | Fe | Mn | Ni | Co | O |
| 79.14 | 12.41 | 4.19 | 1.05 | 1.38 | 0.78 | 1.04 |

β' 相是高温 β 相在快速冷却条件下来不及共析转变而形成的 β 相的同素异构体,该相是一种介稳态组织,类似于钢中的马氏体,具有较高的硬度;涂层中存在的 γ_2 相是以 Cu_9Al_4 化合物为基的固溶体,属于硬脆相。 γ_2 相的存在可显著提高合金的硬度,但很容易造成合金塑性的降低; K 相是Al与Fe和Ni等元素形成的金属间化合物,具有增加涂层强度和硬度的作用。可见,超音速等离子喷涂的高铝铜合金涂层是由塑性和强度较高的 α 相、硬度较高的 β' 相、 γ_2 相,以及强化相 K 组成,从理论上讲,这种软硬相间存在的结构形式有利于涂层摩擦磨损性能的提高。

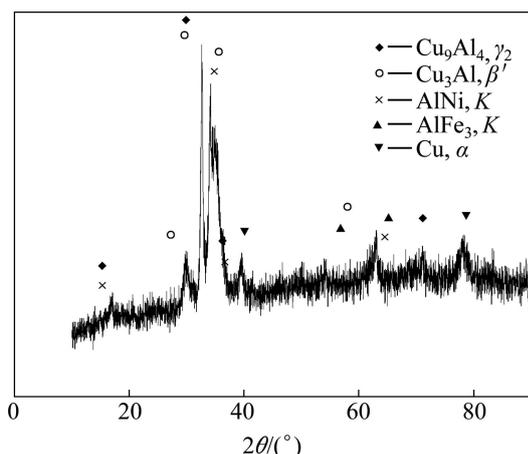


图4 超音速等离子喷涂涂层的 XRD 谱

Fig. 4 XRD pattern of supersonic plasma spraying coating

2.2 涂层在边界润滑条件下的耐磨性能

图5所示为涂层摩擦因数随施加载荷的变化关系。

由图5可以看出,涂层的摩擦因数随摩擦载荷增大呈逐渐下降趋势,在100 N较低载荷时,摩擦因数达到0.2012,而在200 N时,摩擦因数陡降为0.1009,降幅较大,其后摩擦因数随载荷的增加减少幅度逐渐减小,慢慢趋于平稳,这与常规等离子喷焊层性能明显不同^[6]。

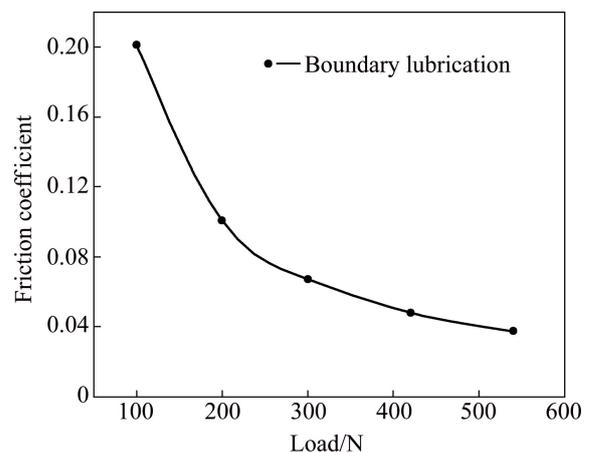


图5 超音速等离子喷涂涂层摩擦因数随载荷的变化

Fig. 5 Variation of friction coefficient with load of supersonic plasma spraying coating

依据边界摩擦学理论,边界润滑条件下的摩擦因数可以表示为^[7-8]

$$\mu_{BL} = \alpha_w \frac{\tau_s}{\bar{p}} + (1 - \alpha_w) \frac{\tau_l}{\bar{p}} + \mu_p \quad (1)$$

式中: $\alpha_w = A_m/A$, A_m 为固体接触面积, A 为真实接触面积; τ_s 和 τ_l 分别为固体和流体表面的剪切强度; \bar{p} 为平均压力; μ_p 为犁沟效应产生的摩擦因数。

可见,在边界润滑条件下,摩擦因数主要由3部分组成:由固体表面接触产生的式(1)中第一项摩擦因数(固-固摩擦因数),由液体和固体表面接触产生的式(1)中第二项摩擦因数(液-固摩擦因数),以及由犁沟效应产生的式(1)中第三项摩擦因数(犁沟因数)。

针对高铝青铜合金超音速等离子喷涂层整体摩擦因数随载荷变化趋势,结合涂层摩擦表面形貌(见图6),分析涂层在载荷由低到高过程中摩擦磨损的基本规律。结果表明,超音速等离子喷涂层组织在以 α 、 β' 复合相相间组成的基体相上弥散分布了硬度较高的 γ_2 和对涂层硬度具有强化作用的 K 相,在 K 相周围是贫Al富Cu的 α 固溶体相,这样的组织分布形式能使合

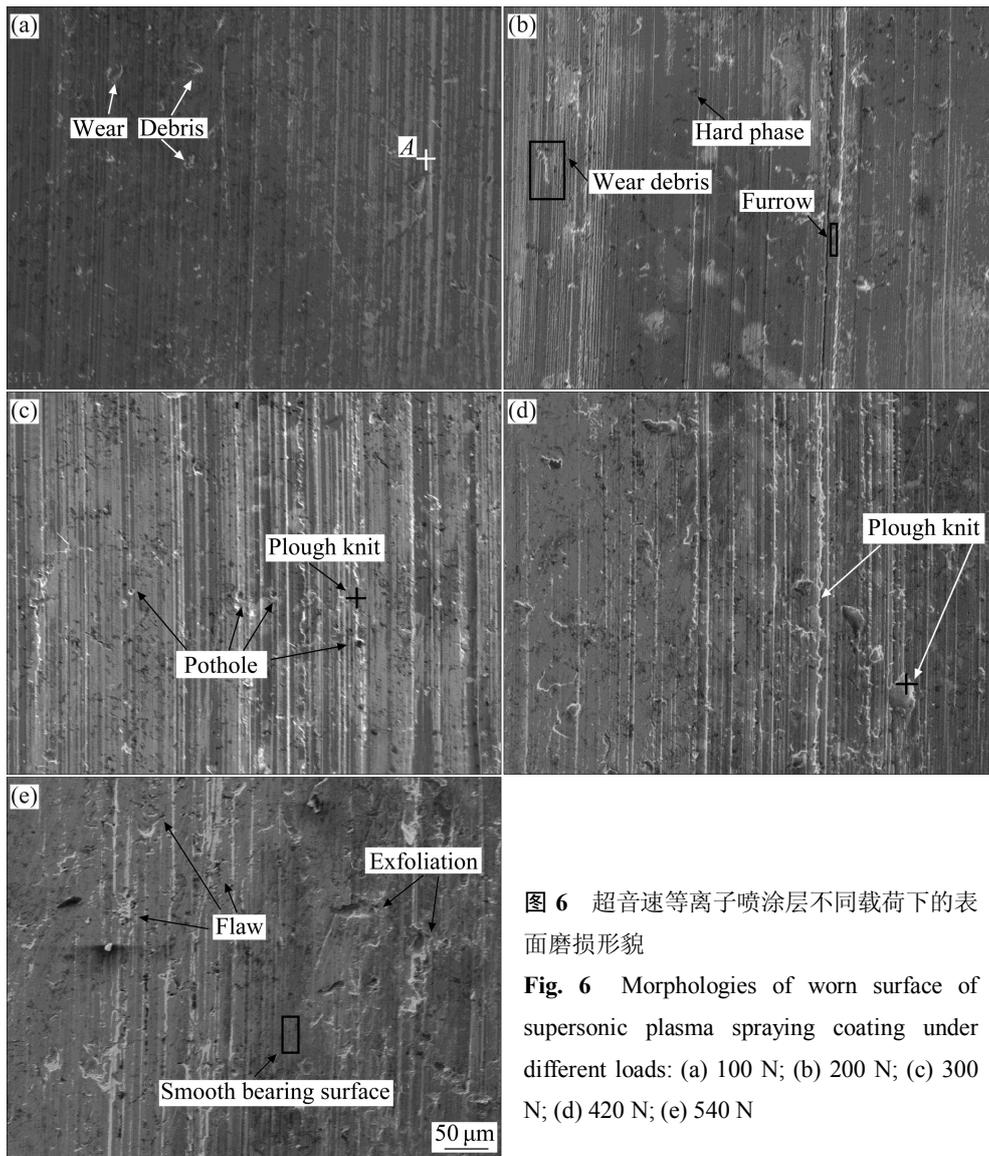


图 6 超音速等离子喷涂层不同载荷下的表面磨损形貌

Fig. 6 Morphologies of worn surface of supersonic plasma spraying coating under different loads: (a) 100 N; (b) 200 N; (c) 300 N; (d) 420 N; (e) 540 N

金涂层强度和塑性都得到很好的发挥, 综合性能大大提高。在低载荷情况下, 合金涂层中的软相组织变形量极小或基本未发生变形, 组织中的软、硬相基本保持在较平整的状态, 尽管有微量的大颗粒硬质相突出平面, 产生一定的犁沟磨损(如图 6(a)中 A 点所示), 但整体上对偶件摩擦面几乎全面积接触到喷涂层表面, 犁沟效应相对较小。同时, 较低载荷对摩擦表面接触面之间形成的油膜的破坏程度很小, 形成的油膜较厚, 油膜的黏度较高, 油膜形成的剪切力也较大, 在这种情况下, 影响摩擦因数的因素主要是由式(1)中固-固摩擦因数和液-固摩擦因数决定^[8], 在摩擦的过程中, 对偶件的相对滑动是克服油膜形成剪切力的过程和对涂层基体面轻微刮擦的过程, 摩擦表面相对平整, 但能看出轻微的刮擦痕迹, 因而低载荷下, 摩擦因数较大, 但磨损量较小(见图 7)。随着载荷增加到

200 N, 涂层表面出现深度较浅、宽度较窄的较多犁沟, 但相对于 100 N 时, 深度和宽度明显加大, 基体表面硬质颗粒相凸出更加明显, 在涂层表面留下微量细小磨屑(如图 6(b)中箭头所指), 而试样在磨损前后都经过超声波清洗, 磨屑痕迹的存在可能是因为在 200 N 载荷下, 合金组织中的软相发生弹塑性微变形, 同时脱落的部分磨屑在压磨力作用下加工硬化被压入软基体相中, 而最终保留到基体中形成残留物。在 200 N 载荷下, 摩擦表面温度升高, 润滑油黏度降低, 摩擦面润滑膜变薄, 油膜剪切力减小^[8], 式(1)中液-固摩擦因数迅速降低, 从而导致摩擦因数大幅减小, 由于油膜的隔离作用减小, 在较高压力下发生软基体相 α 相脱落的同时, 涂层表面受压发生塑性变形, 使颗粒较小的硬质相突露出基体平面, 而较大颗粒的硬质相组织脱落形成磨粒, 在涂层表面形成轻度的犁沟磨损,

这时, 涂层的质量损失主要有犁沟的切削质量损失和软基体相的脱落质量损失, 因而相对于 100 N 载荷, 200 N 载荷下磨损量大幅提高。随着载荷的进一步增大, 摩擦表面的温度进一步升高, 当接触表面的接触温度超过润滑油的临界温度时, 首次形成的润滑膜发生破裂, 同时伴随涂层表面大量的硬质相脱落, 形成凹坑(如图 6(c)所示), 这些凹坑具有储存润滑油的作用, 储存的润滑油在高压滑动过程中, 表现黏度较低, 油膜形成的剪切力较小, 从而在接触面之间形成超薄的二次保护膜层。该油膜层厚度较薄、黏度较低, 在对磨面滑动过程中对涂层起到滑移保护作用, 促使摩擦因数继续降低。由于硬质颗粒相的大量脱落, 摩擦质量损失继续增多, 相对于小载荷质量损失, 载荷质量损失幅度明显减小。如 300 N 时涂层照片所示, 这时涂层中形成比较密集、较宽和较深的犁沟, 磨粒磨损特征明显。高压对磨下, 运动磨粒的犁削或微切削作用将材料推向两边或前缘, 这样会在犁沟两侧或前缘产生隆起的犁皱(如图 6(c)和(d)箭头所指)。掀起的犁皱在涂层表面形成软金属涂层膜, 其间可储存微量的润滑油, 从而使载荷由本体硬金属材料承受, 剪切力产生于软金属犁皱层, 这有效降低了涂层的摩擦因数。在更高压力下, 犁皱产生再次变形, 形成塑性变形区, 法向载荷的作用再次压平塑性变形区, 经过反复的塑性变形使该区域加工硬化, 最后形成光滑的支撑面, 而硬化强度不高的区域(见图 6(e)中犁沟边缘附近), 发生和对磨件的粘结, 产生犁皱区域的裂纹和片状脱落, 因而高载荷下逐渐显现出疲劳磨损的特征。可见, 在适度的中、低压力下, 涂层的磨损主要呈磨粒磨损的特征。540 N 高压下磨损特征发生了向疲劳磨损特征的转变。

根据阿查德方程, 用单位行程及单位载荷下的磨损体积来表示磨损率^[9], 如式(2)所示:

$$\eta = \frac{9.8\Delta V}{FL} \quad (2)$$

式中: η 为磨损率, $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{mm})$; ΔV 为磨损体积 mm^3 ; F 为外加载荷, N; L 为摩擦总行程, mm。

根据式(2)得出不同载荷下涂层的磨损率曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 尽管随着载荷的增加, 涂层的质量损失逐渐增大, 但单位长度、单位载荷下涂层的磨损体积逐渐减小。这再次证明涂层在磨损的过程中表层合金发生塑性变形压缩, 涂层的致密度得到提高, 单位磨损质量的体积减小。这说明随着载荷的增加, 涂层的耐磨性能增强。

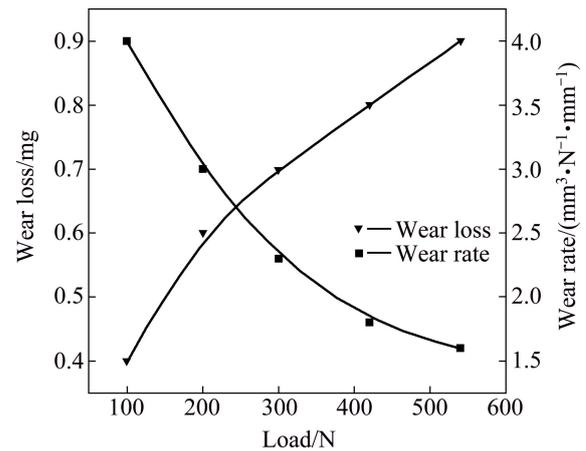


图 7 超音速等离子喷涂涂层磨损量和磨损率随载荷的变化
Fig. 7 Change of wear loss and wear rate with load of supersonic plasma spraying coating

2.3 润滑条件下涂层元素的磨损质量损失

为了进一步了解高铝铜合金的磨损原理, 分析了涂层主量元素在摩擦过程中的磨损情况。表 3 和 4 所列不同载荷下磨损表面光滑区域和犁沟边缘处主要元素的 EDS 分析结果。

对比表 2~4 可以看出, 不同载荷下, 无论涂层

表 3 摩擦后涂层表面光滑区元素含量

Table 3 Surface element contents of coating in smooth region after friction

| Load /N | Mass fraction/% | | | |
|---------|-----------------|-------|-------|------|
| | Fe | Cu | Al | O |
| 100 | 4.07 | 77.09 | 11.85 | 1.05 |
| 200 | 4.12 | 76.64 | 13.73 | 1.38 |
| 300 | 4.26 | 76.79 | 13.97 | 1.99 |
| 420 | 4.91 | 76.92 | 12.27 | 2.15 |
| 540 | 3.95 | 75.60 | 15.79 | 1.20 |

表 4 摩擦后涂层表面犁沟边缘处元素含量

Table 4 Surface element contents of coating in furrows edge after friction

| Load /N | Mass fraction/% | | | |
|---------|-----------------|-------|-------|------|
| | Fe | Cu | Al | O |
| 100 | 4.23 | 75.17 | 13.82 | 2.97 |
| 200 | 3.91 | 75.81 | 14.49 | 2.47 |
| 300 | 4.75 | 75.38 | 13.30 | 2.67 |
| 420 | 4.36 | 74.90 | 13.07 | 2.84 |
| 540 | 6.46 | 75.00 | 12.10 | 2.42 |

是光滑表面还是犁沟边缘, Cu 的质量分数都低于摩擦前涂层中 Cu 的质量分数, 但总体上光滑表面上 Cu 含量略高于犁沟边缘的 Cu 含量, 随着载荷的增加, 两个区域 Cu 元素含量基本都呈下降趋势。可见, 在磨损过程中, Cu 元素的质量损失比较严重, 而且随着载荷的增加, 这个趋势增大。两个区域 Al 元素含量随着载荷变化比较复杂, 在光滑区域, Al 元素含量随载荷的增加基本呈上升趋势, 在 540 N 时, Al 元素含量突增, 达到 15.79%, 可见, 随着载荷的增加, 涂层光滑区域 Al 元素的质量损失逐渐减小, 而犁沟边缘 Al 元素含量呈现下降趋势, 且都低于光滑区域的含量, 但总体含量都高于磨损前涂层中 Al 元素含量。可见, 磨损过程中主要发生 Cu 元素的损失。结合涂层磨损形貌照片认为, 在摩擦过程中, 涂层基体组织发生塑性变形的同时, 主要磨损脱落的是以 Cu 固溶体为基的 α 相软基体组织, α 相的大量脱落, 导致涂层 Cu 损失较多, 而涂层中 Al 元素含量整体高于磨损前涂层含量, 这可能与磨损后涂层 Cu 元素含量降低而导致 Al 元素相对含量增加有关。另一个原因可能是 Al 元素在摩擦过程中发生轻微氧化, 形成表面微氧化耐磨膜层, 降低了其磨损量^[10]。犁沟边缘 Cu 和 Al 的含量整体低于光滑区域的, 这可能是犁削的作用, 不仅使 α 相发生脱落, 其他相如 β' 相也可能发生脱落, 而其他微量元素形成的化合物保留下来, 造成整体 Cu 和 Al 的相对含量低于光滑表面的。两个区域 O 元素的含量分析表明, 犁沟边缘区域 O 元素含量明显高于光滑表面的, 可见, 犁沟留下的缝隙为 O 元素进入摩擦界面提供了通道, 使磨粒掀起的金属不同程度氧化, 这也一定程度降低了 Cu 和 Al 含量的测定值。当载荷达到 540 N 时, 犁沟边缘 Fe 含量较高, 达到 6.46%, 高于涂层原有 Fe 含量, 而光滑区域的 Fe 含量仅为 3.95%, 低于涂层原有 Fe 含量, 这可能是因为高压下光滑区域的富 Fe 硬质相脱落后部分不能及时排出摩擦界面, 在掀起的犁皱压延变形过程中被卷入犁皱中, 使 Fe 含量增加, 从该压力下 Al 含量相对较低(12.10%)来看, 该压力下 Fe 元素含量相对较高的原因还可能是疲劳的涂层(主要为犁沟边缘)与对磨件发生了轻度的粘着^[11-12], 使对磨件 304 钢的 Fe 元素发生了向疲劳层的扩散转移。这说明在 540 N 压力下, 涂层发生疲劳磨损的同时, 对磨件之间已经发生了轻度的粘着磨损。

由上述分析可见, 涂层在不同压力下的磨损质量损失主要表现为以 Cu 固溶体为基的 α 相的摩擦损失。犁沟留下的缝隙使犁沟边缘氧化相对严重, 微氧化膜在一定程度上对降低摩擦因数是有利的。在较高压力

下, 涂层在发生疲劳磨损的同时, 伴有微量的粘着磨损发生, 从而发生了对磨件之间元素的扩散转移。总体来看, 高铝铜合金超音速等离子喷涂层具有很好的耐磨性能, 并且随着压力的适度增加, 耐磨性能呈现增强的趋势。

3 结论

1) 采用超音速等离子喷涂方法在 45# 钢基体上制备的高铝铜合金粗粉涂层具有团聚状凝聚结构特征。涂层成分保持了原始粉体的成分含量, 涂层组织主要由软基体相 α 相、硬度较高的 β' 相、 γ_2 相以及硬质强化相 K 相组成。

2) 在边界润滑摩擦条件下, 低载荷时, 涂层摩擦因数随载荷增加下降幅度较大, 当载荷从 100 N 增加到 200 N 时, 摩擦因数由 0.201 2 陡降至 0.100 9, 其后摩擦因数随载荷的增加下降幅度逐渐减小并趋于平稳; 尽管涂层磨损量随着载荷增加呈现增大的趋势, 但涂层的磨损率随着载荷的增大逐渐下降, 涂层具有随外加载荷的增大耐磨性增强的特点; 磨损过程中, 涂层发生微量氧化, 这在一定程度上有利于摩擦因数的降低; 高载荷下摩擦时, 涂层发生了由磨粒磨损向疲劳磨损的转变, 疲劳层与对磨件呈轻微的粘着磨损特征, 发生了对磨件间元素的扩散转移。

3) 不同载荷下磨损后涂层表面的 Cu 含量均低于摩擦前涂层的 Cu 含量(79.14%), 说明涂层的质量损失主要是表面层 Cu 元素的磨损质量损失。

REFERENCES

- [1] 杨 晖, 潘少明. 超音速等离子喷涂 WC-12Co 涂层的结合机理[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 187-191.
YANG Hui, PAN Shao-ming. Bonding mechanism of WC-12Co coatings prepared by supersonic plasma spraying on 45 steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(3): 187-191.
- [2] LI Chang-qing, MA Shi-ning, YE Xiong-lin. Investigation on in-flight particle velocity in supersonic plasma spraying[J]. China Welding, 2005, 14(1): 80-84.
- [3] 付 翀, 蒋百灵, 王俊勃, 杨敏鸽, 杜志敏, 姜凤阳. 超音速等离子喷涂制备 AgSnO₂/Cu 复合电接触材料及其性能研究[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(2): 177-180.
FU Chong, JIANG Bai-ling, WANG Jun-bo, YANG Min-ge, DU Zhi-min, JIANG Feng-yang. Properties of AgSnO₂/Cu composite contact material prepared by supersonic plasma

- spraying[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2010, 26(2): 177-180.
- [4] 郭永明, 王海军, 谢兆钱, 李绪强. 超音速等离子制备 Al/Ni 涂层的性能特点[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(4): 69-72.
- GUO Yong-ming, WANG Hai-jun, XIE Zhao-qian, LI Xu-qiang. Characteristic of supersonic plasma spraying Al/Ni coatings[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(4): 69-72.
- [5] 陆欢, 王海军, 郭永明, 刘明, 傅耀宇. 超音速等离子喷涂参数对粒子速度和温度的影响[J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 19-23.
- LU Huan, WANG Hai-jun, GUO Yong-ming, LIU Ming, FU Yao-yu. The influence of supersonic plasma spray parameters on flying particles velocity and temperature[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(1): 19-23.
- [6] 李文生, 刘毅, 路阳, 王智平, 李亚斐. Cu₁₄Al_{4.5}FeNi 合金等离子涂层边界润滑摩擦磨损特[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(3): 221-227.
- LI Wen-sheng, LIU Yi, LU Yang, WANG Zhi-ping, LI Ya-fei. Tribological property of Cu₁₄Al_{4.5}FeNi bronze and its plasma sprayed coating[J]. Tribology, 2011, 31(3): 221-227.
- [7] KINGSBURY E. Parched elastic hydrodynamic lubrication film thickness measurement in the instrument ball bearing[J]. Tribol Trans, 1990, 33(1): 11-14.
- [8] 王秀飞, 黄启忠, 尹彩流, 谭瑞轩, 宁克焱, 吴才成. 铜基粉末冶金摩擦材料的湿式摩擦性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(3): 517-521.
- WANG Xiu-fei, HUANG Qi-zhong, YIN Cai-liu, TAN Rui-xuan, NING ke-yan, WU Cai-cheng. Wet friction properties of copper-based material via powder metallurgy[J]. J Cent South Univ: Science and Technology, 2008, 39(3): 517-521.
- [9] 林复生. 简明摩擦学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987: 225-226.
- LIN Fu-sheng. Concise tribology[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1987: 225-226.
- [10] 张振宇, 王智平, 梁补女, 苏义祥. NiCrBSiWCo 合金粉末喷熔层滑动磨损特性研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(6): 114-117.
- ZHANG Zhen-yu, WANG Zhi-ping, LIANG Bu-nü, SU Yi-xiang. Study on sliding wear properties of thermal sprayed NiCrBSiWCo coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(6): 114-117.
- [11] LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, LU Yang, JIN Yu-hua, YUAN Li-hua, WANG Fan. Mechanical and tribological properties of a novel aluminum bronze material for drawing dies[J]. Wear, 2006, 261(2): 155-163.
- [12] HEIDEA E V, STAMA E D, GIRAUD H, LOVATO G, AKDUT N, CLARYSSE F, CAENEN P, HEIKILLA I. Wear of aluminium bronze in sliding contact with lubricated stainless steel sheet material[J]. Wear, 2006, 261(1): 68-73.

(编辑 陈卫萍)