

载荷和温度对 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层摩擦磨损性能的影响

刘晓明¹, 高云鹏¹, 闫侯霞²

(1.内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020;
2.内蒙古能源发电金山热电有限公司, 呼和浩特 010106)

摘要:目的 研究不同载荷、不同温度下 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦磨损特性, 为不同工况条件下应用该涂层实施抗摩擦磨损治理提供理论依据。方法 采用 THT07-135 高温摩擦磨损试验机对 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦磨损特性进行测试, 载荷分别选用 3、5、7 N, 温度选择 25、300、450、550、600 °C, 利用配有 EDAX 能谱仪的扫描电镜观察涂层磨痕表面形貌并进行元素分析, 利用透射电镜对涂层的精细结构进行分析。结果 同一温度下, 涂层的摩擦因数随着载荷的增加而降低, 磨损量随着载荷的增加而升高, 载荷对磨损量的影响随温度的增加逐渐降低。载荷一定时, 涂层的摩擦因数先增加后逐渐降低, 450 °C 时涂层的摩擦因数最高; 涂层的磨损量整体呈下降的趋势, 450 °C 时涂层的磨损量最大。温度较低时, 涂层磨损主要以脆性断裂的剥层磨损为主; 温度升高至 450 °C, 涂层磨损主要是脆性断裂、塑性变形以及少量粘着磨损; 550 °C 以上时, 涂层磨损主要是粘着磨损、塑性变形磨损。结论 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具有较好的抗高温摩擦磨损性能, 氧化物的增加以及铁铝金属间化合物高温时, B3 相与 D0₃ 相之间的转变提高了涂层的抗高温摩擦磨损性能。

关键词: Fe-Al/Cr₃C₂; 复合涂层; 载荷; 温度; 摩擦磨损

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)11-0055-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.008

Effects of Load and Temperature on the Frictional Wear Resistance of Fe-Al/Cr₃C₂ Composite Coating

LIU Xiao-ming¹, GAO Yun-peng¹, YAN Hou-xia²

(1.Inner Mongolia Electric Power Science and Research Institute, Hohhot 010020, China;
2.Inner Mongolia Energy Power Jinshan Thermal Power Co., Ltd., Hohhot 010106, China)

ABSTRACT: The work aims to study frictional wear resistance of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating under different load and temperature in order to provide theoretical basis for resolving frictional wear problems by using Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating under different operation conditions. The frictional wear resistance of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating was tested by using THT07-135 high-temperature friction-abrasion testing machine at 3 N, 5 N, 7 N load and room temperature (25 °C), 300 °C,

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-05-03

Received: 2016-04-06; Revised: 2016-05-03

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司 2014 年第 1 批科技项目(201401032)

Fund: Supported by 2014 First Batch and Technology Project of Inner Mongolia Electric(Group)Co., Ltd(201401032)

作者简介: 刘晓明(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统微/纳米涂层材料的研发、涂层制备及应用研究工作。

Biography: LIU Xiao-ming(1978—), Male, Ph.D., Senior engineer, Research focus: development of micro/nano coating material research for electric power system, coating preparation and application study.

450 °C, 550 °C, 600 °C respectively. Wear scar images and composite in different regions were analyzed by SEM with EDAX. Microstructures were analyzed by TEM. Friction coefficient of coating decreased and wear loss of the coating increased as the load increased. Effects of the load to wear loss reduced gradually as the temperature increased. Under the same load, friction coefficient of the coating first increased and then decreased. Friction coefficient was the maximum at 450 °C. Overall, wear loss of the coating showed a downtrend and was the minimum at 450 °C. At lower temperature, the main wear mechanism was delamination wear caused by brittle fracture. When the temperature was up to 450 °C, the main mechanisms were brittle fracture, plastic deformation and little adhesive wear. When the temperature was higher than 550 °C, the main mechanisms were adhesive wear and plastic deformation. The Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating has better high-temperature frictional wear resistance. Transformation between B3 phase and D03 phase improves the high-temperature frictional wear resistance of the coating as the oxides increase and substrate Fe-Al intermetallics is at high temperature.

KEY WORDS: Fe-Al/Cr₃C₂; composite coating; load; temperature; frictional wear

Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层中以 Fe-Al 作为基质相, 以 Cr₃C₂ 作为增强相, 包含稀土氧化物及金属间化合物 Fe-Al 及 Fe₃Al^[1-4]。与 Ni 基涂层相比, Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层不含贵金属因而价格低廉^[5-10]。研究表明, Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层随温度的不同表现出不同的冲蚀特性, 基体相铁铝金属间化合物具有高温反常屈服行为^[11-17]。与其他同类涂层相比, Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具有较低的孔隙率、较高的显微硬度和较高的结合强度等基本性能, 同时又具备较好的抗冲蚀性能以及抗摩擦磨损性能, 是治理火电站包括轴在内的常温易损部件以及包括受热面管道在内的高温易损部件磨损问题的理想材料^[18]。Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层喷涂在易损部件上, 便和易损部件在相同的工况下运行。轴的运行温度在室温下, 受热面管道因其所处锅炉位置的不同而不同: 省煤器受热面管道运行温度一般为 300 °C, 水冷壁受热面管道运行温度一般为 450 °C, 再热器、过热器受热面管道运行温度一般为 550 °C, 部分区域因超温可能会达到 600 °C。除运行温度不同外, 载荷也是影响涂层抗磨损性能的关键因素。因此, 研究 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在不同载荷、不同温度条件下的抗摩擦磨损机理具有重要的理论意义, 对指导该涂层对火电站易损部件实施治理具有重要的实际意义。

1 试验

1.1 材料

试验材料主要由基体材料和喷涂材料构成。基

体材料选择 20[#]钢, 经过正火处理。喷涂材料由不同喷涂粉末按一定的质量分数比例配置而成, 包括 45%Cr₃C₂、15%Al、5%Ni 及少量稀土 CeO₂, 其余为 Fe, 粉末粒径均控制在 50 ~ 150 μm。

采用高速火焰喷涂方法, 喷涂设备由三部分组成: CP-5000 型高速火焰喷枪, 氧气和乙炔气体的储存和输送装置, 压缩空气净化、储存输送装置。喷涂的工艺参数为: 乙炔压力 1.1 MPa, 氧气压力 0.8 MPa, 压缩空气压力 0.4 MPa, 喷涂距离控制在 300 mm 左右。

首先将基体材料 20[#]钢加工成 $\phi 25$ mm \times 7.5 mm 的圆柱型试样, 对将要喷涂的端面进行喷砂糙化处理: 选择粒径为 250 μm 的棕刚玉砂粒, 喷砂角度为 45°, 喷砂距离为 200 mm。喷砂糙化结束后, 立刻对经过处理的端面实施高速火焰喷涂, 喷涂后利用磨床对端面进行加工处理。经过加工后的试样尺寸为 $\phi 25$ mm \times 8.0 mm。

1.2 方法

在 THT07-135 型高温摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验, 摩擦副的接触形式为球-盘式。摩擦副的上试样采用经过烧结的 Si₃N₄ 球, 规格为 $\phi 3$ mm, 硬度为 1600HV。摩擦副的下试样为带有涂层的 $\phi 25$ mm \times 8.0 mm 圆柱体, 其中涂层厚度约为 0.5 mm。试验环境中的空气相对湿度为 40%, 介质条件为大气和干摩擦, 试验载荷选择 3、5、7 N, 试验温度选择 25、300、450、550、600 °C, 摩擦磨损半径为 5 mm, 滑动速度选择 0.8 m/s, 滑行距离选择 0.5 km。试验进行之前, 分别用丙酮和酒精对试样的表面进行清理。首先将试样放在超声波清

洗仪中,用丙酮对摩擦磨损表面进行清洗。然后将试样和对偶件固定,再用酒精清洗涂层以及与 Si₃N₄ 球表面。涂层磨损量 W_L ($\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) 用来表征相同摩擦路程、不同载荷下的抗磨损能力,通过计算磨痕面积进行计算得到,磨痕截面积利用表面轮廓仪测量得到。

利用配备 EDAX 的 Philips Quant200 型扫描电镜分析涂层的磨痕形貌及不同磨损区域的元素组成。利用日立 H800 型 TEM 对涂层基质相进行精细结构分析。

2 结果与讨论

2.1 涂层的摩擦磨损结果

图 1 显示了不同温度、不同载荷条件下 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层摩擦因数随滑动距离的变化情况。从图 1 可以看出,涂层在最初摩擦磨损阶段,摩擦因数逐渐升高,在滑动距离经过 0.2 km 的“跑和阶段”后,摩擦因数趋于稳定,摩擦过程进入稳定状态。进入稳定摩擦状态的 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层,温度相同时,涂层的摩擦因数随着载荷的增加呈现出减小的变化趋势。在载荷一定的情况下,涂层的摩擦因数随着温度的增加逐渐升高,450 °C 时达到最大值,然后随着温度的增加逐渐降低。计算各状态稳定摩擦因数的平均值,绘制出稳定状态下平均摩擦因数如图 2 所示,更加直观地显示出不同温度、不同载荷状态下摩擦因数的变化规律。

Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在不同温度、不同载荷下的磨损量如图 3 所示。从图 3 可以看出,涂层的磨损量随着温度的增加呈现整体下降的趋势,450 °C 时涂层的磨损量最低,而后随着温度的增加略有增加。温度相同时,磨损量随着载荷的增加而增加。载荷对涂层磨损量的影响随着温度的增加而逐渐减小,450 °C 时涂层的载荷对磨损量的变化影响达到最小。

2.2 载荷的影响

在给定的干摩擦试验条件下, Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦因数随着载荷的增加逐渐降低,磨损量随着载荷的增加逐渐增加,载荷对涂层摩擦磨损性能的影响取决于摩擦因数、实际接触面积的共同作用,见式 (1):

$$\mu = (S \cdot A_r) / P \quad (1)$$

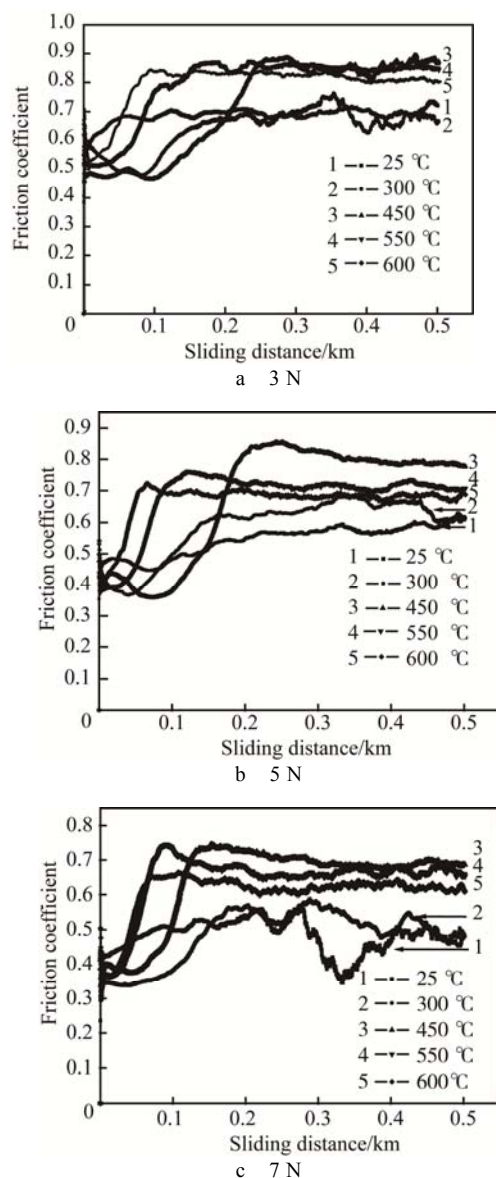


图 1 不同载荷、不同温度条件下涂层摩擦因数随摩擦距离的变化情况

Fig.1 Variation of friction coefficient of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating with different load at different temperature

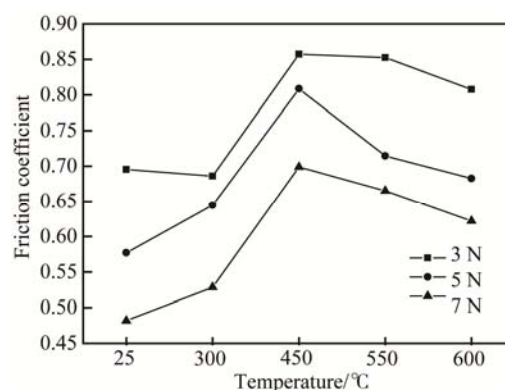


图 2 不同温度下摩擦因数随载荷的变化情况

Fig.2 Variation of friction coefficient with load at different temperatures

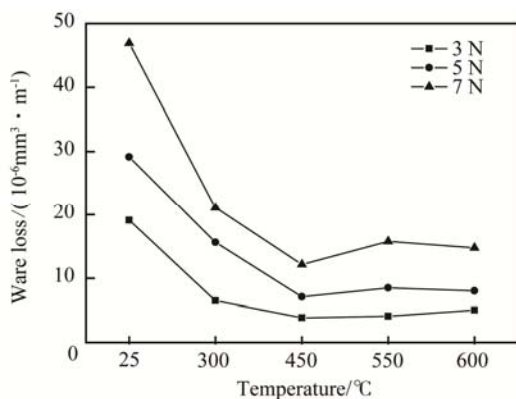


图3 不同温度下磨损量随载荷的变化情况

Fig.3 Variation of ware loss with load at different temperatures

式中： μ 为摩擦因数； P 为法向载荷； S 为材料的剪切强度； A_r 为实际接触面积。

当载荷 P 增加时，实际接触面积 A_r 也增加。由于采用 Si_3N_4 球与 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 复合涂层的球-盘式磨损形式，接触表面处于弹性或粘弹性状态， A_r 的增加速度小于载荷 P 的增加速度，因此，摩擦因数随载荷的增加而减小。 $\text{Fe-Al/Cr}_3\text{C}_2$ 复合涂层的磨损量是通过磨损体积减小来计算的，在球-盘式磨损形式受实际接触面积 A_r 影响，具有相同的变化趋势，因此涂层的磨损量随实际接触面积 A_r 因载荷的增加而增加。

图4—6分别为室温（25℃）、300、600℃时载荷分别为3、5、7 N的磨痕表面形貌照片，从图中可以看出，同一温度下，载荷较低时（3 N，如图4a、5a、6a所示），涂层表面比较光滑，几乎看不见剥落坑或数量非常少；当载荷增加至5 N时（图4b、5b、6b所示），沿滑动平行方面出现比较明显的沟槽，表面载荷增加带来实际接触面积的增加，进而导致涂层剥层磨损的加剧；当载荷增加至较大的7 N时（图4c、5c、6c所示），磨损表面沿滑动方向的沟槽更深，出现大面积涂层剥落产生的凹坑，在垂直滑动方向出现许多裂纹，裂纹的产生进一步加速磨损的进行。

2.3 温度的影响

载荷相同时，涂层的磨损情况因温度不同其磨损机理不同。当温度较低（25℃，图4）时，涂层的磨痕表面比较粗糙，磨痕处的变形较小，主要表现为犁削导致涂层沿孔隙、裂纹和新的凹坑边缘断裂，涂层的磨痕处表现出明显的脆性断裂特征，因

此，室温下涂层的主要磨损机理为脆性断裂磨损。当温度提高至450℃（如图5）时，磨痕处的表面比室温下的光滑，沟槽数量明显减小，这是因为随着温度的升高，在剪切力作用下，涂层产生了塑性变形。同时，在磨痕表面出现了少量粘着磨损的痕迹。因此，450℃涂层的主要磨损机理为脆性断裂、塑性变形以及少量粘着磨损。当温度提高至600℃时，涂层表面的粘着磨损状态比较突出，粘着带来磨痕表面剥落坑增大，表面塑性变形加剧，涂层出现比较明显的氧化，因此，600℃涂层的主要磨损机理为粘着磨损、塑性变形以及氧化。300℃和550℃时，涂层的磨损情况与室温（25℃）和600℃相近，磨痕表面状态如图7所示。从图7磨痕处的扫描电镜图片可以看出，300℃时，涂层磨痕处的

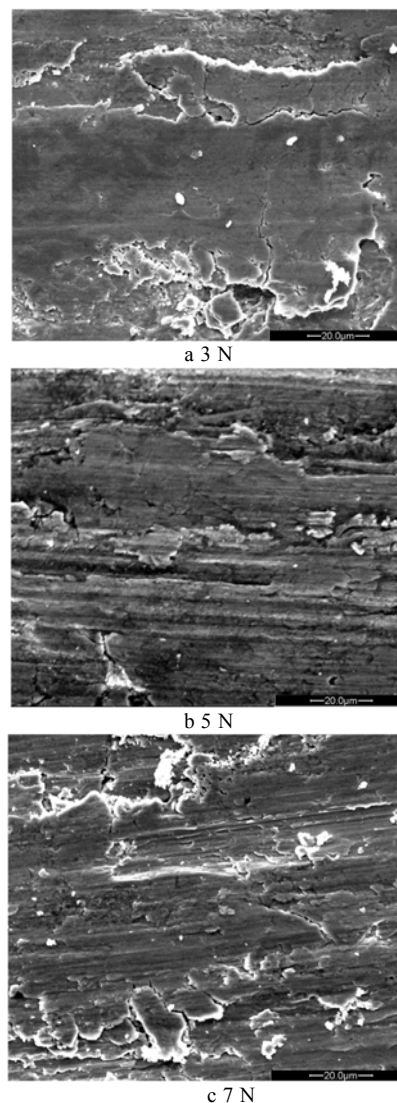


图4 300℃时涂层在不同载荷下的磨损形貌

Fig.4 Worn morphologies of coating under different load at 300 °C

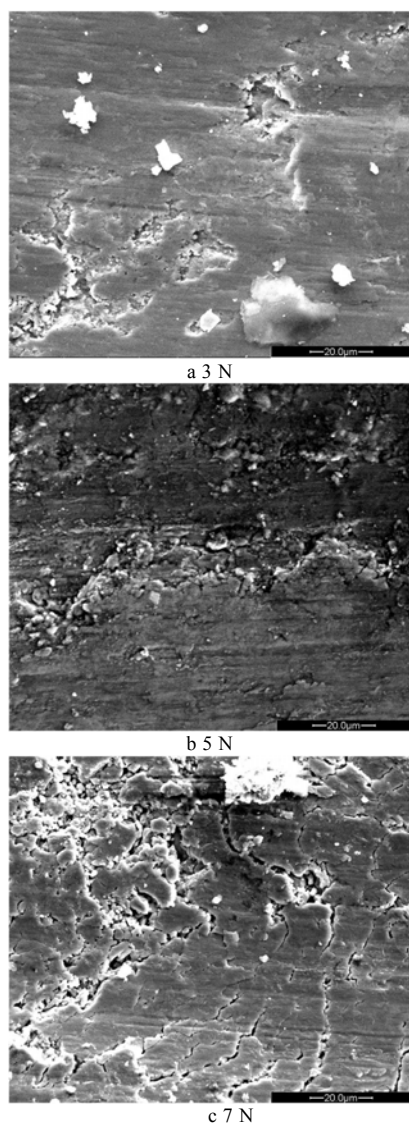


图 5 450 °C 时涂层在不同载荷下的磨损形貌
Fig.5 Worn morphologies of coating under different load at 450 °C

断裂情况严重,涂层的摩擦磨损形式主要以犁削磨损为主。EDAX 分析表明,a1 的氧化程度显著低于 a2,原因是涂层断裂后,a1 处产生了剥层磨损。550 °C 条件下,涂层的摩擦磨损形式主要以粘着磨损、塑性变形磨损为主,涂层磨痕光滑。EDAX 分析表明,b1 和 b2 处的氧化程度较高,高温条件下氧化物的产生使涂层润滑更好。

Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦磨损特性与铸造均质材料不同,呈现出涂层的磨损量随着温度的增加反而下降的反常趋势,当温度达到 450 °C 时,涂层的磨损量达到最小值,而后随着温度的增加略有增加。Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具有典型的层片状结构,孔隙、微裂纹、氧化物夹杂分布在涂层的层片中间构成缺陷。这些缺陷的存在降低了涂层的内聚

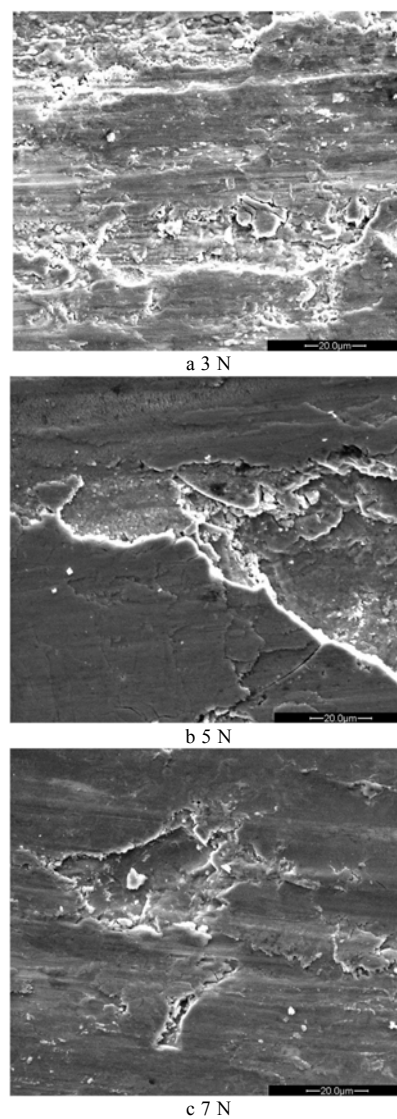


图 6 600 °C 时涂层在不同载荷下的磨损形貌
Fig.6 Worn morphologies of coating under different load at 600 °C

强度,在滑动摩擦磨损过程中,涂层在外力的作用下产生剥层磨损。新裸露的涂层在高温条件下会发生氧化,磨损表面形成了氧化物保护层,致使涂层的滑动摩擦因数降低。磨损-氧化的交互作用使涂层表面结构和状态发生相应变化,从而使涂层的高温摩擦磨损机理变得复杂。

金属间化合物 FeAl、Fe₃Al 作为 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的基质相,其常温条件下未加载荷时的微观结构和电子衍射花样,如图 8 所示。FeAl、Fe₃Al 高温条件下的反常屈服行为,导致涂层的高温摩擦磨损特性异于普通材料。普通金属和合金的屈服强度都随温度的升高而降低,然而 Fe₃Al 作为金属间化合物是一种有序合金,导致其在高温条件下产生位错运动时会受到制约,从而表现出相对普通材料

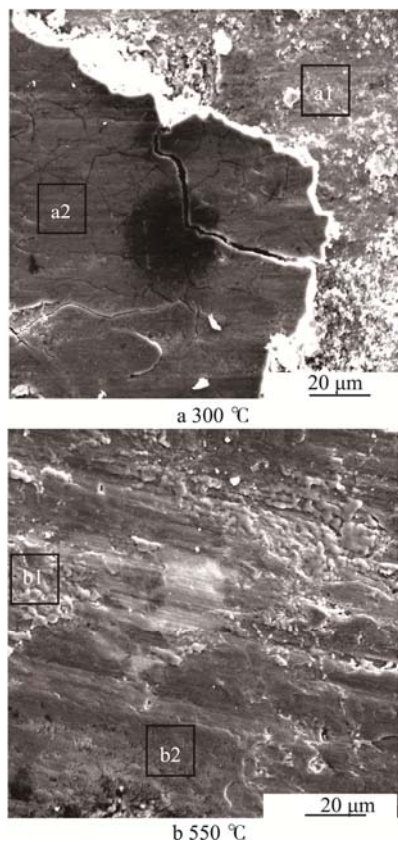


图 7 Fe-Al/Cr₃C₂ 涂层磨痕的 SEM 照片
Fig.7 SEM images of Fe-Al/Cr₃C₂ coatings wear track

表 1 涂层表面的 EDAX 能谱

Tab.1 EDAX results of surface on coatings wear track at%

| Area | C | O | Ce | Al | Cr | Fe | Ni |
|------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|
| a1 | 25.12 | 33.31 | 1.92 | 15.1 | 7.06 | 17.5 | 0 |
| a2 | 21.35 | 45.27 | 1.44 | 13.67 | 7.21 | 10.51 | 0.54 |
| b1 | 5.04 | 63.68 | 0.68 | 1.51 | 5.25 | 23.61 | 0.23 |
| b2 | 3.79 | 62.86 | 2.07 | 7.95 | 9.34 | 13.43 | 0.55 |

不同的形变特征,即反常的屈服行为。当温度低于 300 °C 时,Fe₃Al 的屈服强度与普通材料一样,随着温度的升高而降低。当温度超过 300 °C 时,屈服强度随温度的升高而增加。当温度达到 550 °C 时,屈服强度达到高温条件时的最高值。温度超过 550 °C 后,屈服强度又随温度的增加而急剧下降。Fe₃Al 的反常屈服存在如下行为机理:当 Al 含量在 23%~32% (质量分数) 时,合金中超点阵位错运行使合金组织发生变化,从而引起力学性能变化。从 Fe₃Al 相图可以得出,合金从 B2 相向 DO₃ 相转变温度恰处在 550 °C 附近,此时屈服强度达到最大值,原因可以用合金中的位错运动和有序点交互作用来解释。温度越高,Fe₃Al 合金的有序度越低,超位错运动越困难,屈服强度越高。550 °C 时,有

序度降为 0,屈服强度达到最高值,而后屈服强度随温度的升高而降低,是单根位错与部分有序点阵交互作用的结果。

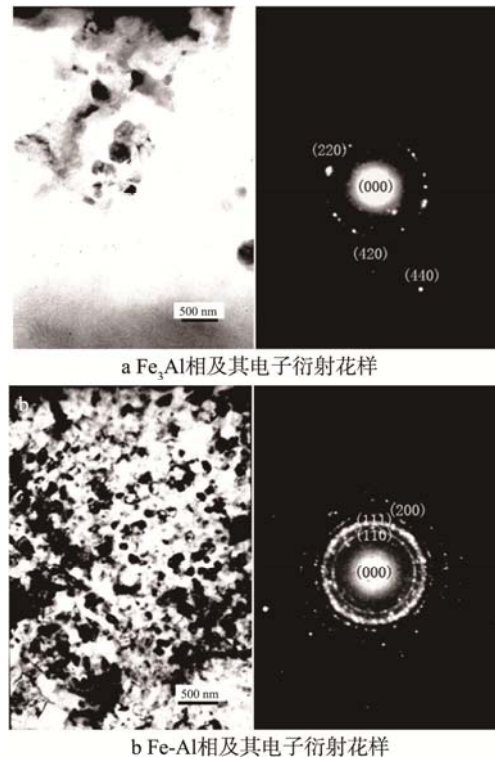


图 8 透射电镜物相分析结果
Fig.8 TEM micrographs revealing phases: a) Fe₃Al phase and its diffraction pattern corresponding; b) Fe-Al phase and its diffraction pattern corresponding

3 结论

1) 当温度保持不变时,Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦因数随着载荷的增加而降低,磨损量随着载荷的增加而升高,载荷对涂层磨损量的影响随着温度的增加呈下降趋势。当载荷恒定时,涂层的摩擦因数随着温度的升高呈现整体升高的变化趋势,450 °C 时涂层的摩擦因数最大,然后略有下降。涂层的磨损量随温度的升高呈现整体下降的趋势,450 °C 时涂层的磨损量最小,然后略有上升。

2) 常温条件以及温度相对较低 (300 °C) 时,涂层的磨损以脆性断裂所导致的剥层磨损为主;450 °C 时,涂层的磨损以脆性断裂、塑性变形为主,并存在少量粘着磨损;当温度增加至 550 °C 以上,涂层的磨损以粘着磨损加塑性变形为主。

3) 随着温度的升高,涂层氧化物的数量逐渐增加,氧化的存在使涂层的摩擦因数得到改变,降低

了载荷增加带来涂层磨损量增加的程度。高温时, 基质相 Fe₃Al、Fe-Al 在 B3 相与 D0₃ 相之间的转变使涂层在 450 °C 时的摩擦磨损性能优于其他温度。

参考文献

- [1] 郭建亭, 周兰章, 李谷松. 高温结构金属间化合物及其强化机理[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(1): 1—34.
GUO Jian-ting, ZHOU Lan-zhang, LI Gu-song. High Temperature Structural Intermetallics and Their Strengthening-Softening Mechanisms[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(1): 1—34.
- [2] CHEN Shan-jun, CHEN Yan, TANG Yong-jian, et al. Synthesis and Characterization of FeAl Nanoparticles by Flow-Levitation Method[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 845—850.
- [3] LI Rui-di, YUAN Tie-chui, LIU Xiao-jun, et al. Enhanced Atomic Diffusion of Fe-Al Diffusion Couple During Spark Plasma Sintering[J]. Scripta materialia, 2016, 110: 105—108.
- [4] MIN Ting, GAO Yi-min, CHEN Li, et al. Mesoscale Investigation of Reaction-Diffusion and Structure Evolution During Fe-Al Inhibition Layer Formation in Hot-Dip Galvanizing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 370—380.
- [5] 曹玉霞, 杜令忠, 张伟刚, 等. hBN 含量对等离子喷涂 NiCr/Cr₃C₂-hBN 复合涂层力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2016 (6): 163—166.
CAO Yu-xia, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang, et al. Effect of hBN Content on Mechanical Properties of Plasma-Sprayed NiCr/Cr₃C₂-hBN Composite Coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2016(6): 163—166.
- [6] 运广涛, 李其连, 程旭东. MCrAlY 涂层在航空发动机热端部件上的应用[J]. 热喷涂技术, 2015 (2): 6—11.
YUN Guang-tao, LI Qi-lian, CHEN Xu-dong. The Application of MCrAlY Coatings on Aeroengine Hot-section Components[J]. Thermal Spray Technology, 2015 (2): 6—11.
- [7] 徐海峰, 肖金坤, 张嘎, 等. 热喷涂 NiCrBSi 基耐磨涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 109—117
XU Hai-feng, XIAO Jin-kun, ZHANG Ga, et al. Progress of Thermal Sprayed NiCrBSi Based Wear-resistant Coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 103—108.
- [8] 陈元迪. 基于纳米 MoS₂ 的复合电刷镀层的抗黏着磨损性能[J]. 材料保护, 2016, 49(4): 26—28.
CHEN Yuan-di. Adhesive Wear Resistance of Brush Plated Coatings Based on Nano MoS₂ Composite Coating Solution[J]. Materials Protection, 2016, 49(4): 26—28.
- [9] 饶湖常, 戴品强, 陈鼎宁, 等. 碳含量对 FeCoCr-NiMnC_x 高熵合金显微组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 40(8): 76—80.
RAO Hu-chang, DAI Pin-qiang, CHENG Ding-ning, et al. Effects of Carbon Content on Microstructure and Properties of FeCoCrNiMnC_x High-entropy Alloys[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 40(8): 76—80.
- [10] LIU S, GAO M C, LIAW P K, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Al_xCrFeNiTi_{0.25}Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015(619): 610—615.
- [11] HSU C, YEH J, CHEN S, et al. Wear Resistance and High-temperature Compression Strength of fcc CuCo-NiCrAl_{0.5}F Alloy with Boron Addition[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004, 35(5): 1465—1469.
- [12] 庞佑霞, 许焰, 张昊, 等. 微/纳米复合涂层的抗冲蚀磨损性能[J]. 材料工程, 2013(9): 60—63.
PANG You-xia, XU Yan, ZHANG Hao, et al. Erosion Resistance of Micro/Nano Composite Coating [J]. Journal of Materials Engineering, 2013(9): 60—63.
- [13] DU Ling-zhong, HUANG Chuan-bing, ZHANG Wei-gang, et al. Preparation and Wear Performance of NiCr/Cr₃C₂-NiCr/hBN Plasma Sprayed Composite Coating[J]. Surface and Coating Technology, 2011, 205: 3722—3728.
- [14] CAO Yu-xia, DU Ling-zhong, HUANG Chan-bing, et al. Wear Behavior of Sintered Hexagonal Boron Nitride under Atmosphere and Water Vapor Ambiences[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 10195—10200.
- [15] 曹玉霞, 黄传兵, 杜令忠, 等. hBN 含量对 NiCr/Cr₃C₂-hBN 复合涂层抗热震性能和氧化性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 17—22.
CAO Yu-xia, HUANG Chuan-bing, DU Ling-zhong, et al. Effects of hBN Content on Thermal Shock Resistance and Oxidation Properties of NiCr/Cr₃C₂-hBN Composite Coatings[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(3): 17—22.
- [16] KANT R, PRAKASH U, AGARWALA V, et al. Wear Behaviour of an FeAl Intermetallic Alloy Containing Carbon and Titanium[J]. Intermetallics, 2015, 61: 21—26.
- [17] SANTANACH J G, ESTOURNES C, WEIBEL A, et al. Mechanical and Tribological Properties of Fe/Cr-FeAl₂O₄-Al₂O₃ Nano/Micro Hybrid Composites Prepared by Spark Plasma Sintering[J]. Scripta Materialia, 2011, 64(8): 777—780.
- [18] 刘晓明, 高云鹏, 闫侯霞, 等. 3 种表面技术在轴磨损修复中的应用研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 103—109.
LIU Xiao-ming, GAO Yun-peng, YAN Hou-xia, et al. Application Research Review on Three Kinds of Surface Technology in Repairing of Worn-out Axles[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 103—109.