

不同温度下 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦学特性研究

Study on Tribological Characteristics of Fe-Al/Cr₃C₂
Composite Coating at Different Temperatures

刘晓明^{1,2}, 董俊慧¹, 徐润生³

(1 内蒙古工业大学, 呼和浩特 010051;

2 内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020;

3 内蒙古电力(集团)有限责任公司, 呼和浩特 010020)

LIU Xiao-ming^{1,2}, DONG Jun-hui¹, XU Run-sheng³

(1 Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2 Inner Mongolia Electric Power Science and Research Institute, Hohhot 010020,

China; 3 Inner Mongolia Electric Power(Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

摘要: 使用 THT 07-135 高温磨损实验机对不同温度下高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层进行滑动摩擦特性研究。运用扫描电镜及能谱仪对磨痕的形貌和不同区域的成分进行观察测试, 运用透射电镜对涂层内部硬质相的存在状态进行观察分析。结果表明: 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具有良好的抗摩擦磨损性能, 随着滑动距离的增加, 摩擦系数基本无波动; 涂层抗摩擦磨损性能出现区别于普通金属材料的反常现象: 随着温度的增加, 涂层的抗摩擦磨损性能逐渐增强, 至 550 达到最强。而后, 涂层的抗摩擦磨损性能随温度的增加而下降。硬质相的阻碍作用使得涂层具有较好的耐磨性, 剥层磨损是 Fe-Al/Cr₃C₂ 涂层磨损的主要机理, 基体相铁铝金属间化合物的高温反常屈服行为是涂层高温耐磨性异于普通金属材料的主要原因。

关键词: Fe-Al/Cr₃C₂; 复合涂层; 摩擦磨损

中图分类号: TG 174. 422 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011) 04-0080-04

Abstract: Using THT 07-135 high temperature machinery to analysis tribological properties of high velocity flame spraying (HVFS) Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating, wear scar images and composites in different region were analyzed by SEM and EDS, existing state of reinforcement were analyzed by TEM. The results show that coating has relatively better friction and wear resistance properties, friction coefficient changes little with the increasing of wear distance. Wear resistance performance of coating differs from normal metallic materials. With increasing in temperature, it increases firstly and reaches a peak at 550 , then decreases later. Hamper effect of reinforcements in coating makes the wear resistance performance of coating better. The predominant wear mechanism of the Fe-Al/Cr₃C₂ coatings is exfoliation. The mainly reason why the high-temperature wear resistance properties of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating differs from normal metallic materials is the yield strength of basic phase Fe-Al intermetallics in coating changing with high-temperature is unusually.

Key words: Fe-Al/Cr₃C₂; composite coating; friction and wear

铁铝金属间化合物合金具有优良的抗氧化和抗硫化性能, 多种介质中的抗腐蚀性和较高的高温强度, 密度低, 不含贵重合金元素, 成本较低, 是一种潜在的高温结构材料^[1]。然而该合金系的室温低塑性和低断裂抗力严重恶化了成形工艺性能, 限制了其工程应用^[2]。运用高速电弧喷涂方法, 可以制备出包含铁铝金属间化合物涂层^[3]。然而, 高速电弧喷涂方法制备铁铝金

属间化合物涂层只能选择粉芯丝材作为喷涂材料。受包覆率的影响, 粉芯丝材中增强相 Cr₃C₂ 的质量分数只能控制在 15% ~ 20% 之间, 不能充分发挥增强相的抗磨损作用。高速火焰喷涂 (High Velocity Flame Spraying, HVFS) 与高速电弧喷涂相比, 所用喷涂材料的成分不受包覆率的影响, 可以根据需要任意调配。因此, 高速火焰喷涂方法及喷涂材料的选用明显拓宽

了喷涂材料的研究范围;研究表明, Cr 是唯一可以大幅度提高铁铝金属间化合物室温性能的元素^[3], 大量 Cr₃C₂ 增强相的加入使得涂层的摩擦磨损性能发生异于普通金属材料的变化。

本工作运用高速火焰喷涂技术, 在结构材料上获得铁铝金属间化合物(包括 Fe₃Al 和 FeAl) 为基体相的复合涂层。研究了不同温度下, 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层与 Si₃N₄ 配副时的摩擦磨损特性, 并探讨涂层的摩擦磨损机理, 为该复合涂层的工业应用提供理论依据。

1 试样制备与实验方法

1.1 试样制备

所用基体材料为正火态的 20 钢, 喷涂材料为自主研发的 Fe-Al/Cr₃C₂ 喷涂粉材, 其主要成分(质量分数, 下同): 50% 碳化铬, 15% 铝, 加入少量 Ni 及稀土氧化物, 其余为铁。

高速火焰喷涂设备由 CP-5000 高速火焰喷枪及相应的氧-乙炔储送装置组成。喷涂参数: 氧气压力 0.8 MPa, 乙炔压力 1.1 MPa, 空气压力 0.4 MPa, 喷涂距离 300 mm。将 20 钢试样加工成 25 mm × 7.5 mm 的尺寸, 使用 250 μm 的棕刚玉砂粒在角度 45°、距离 200 mm 的条件下进行表面喷砂处理, 在基体的圆柱端面上进行高速火焰喷涂。喷涂后, 首先把试样未喷涂的圆柱端面进行磨削加工, 然后对涂层表面进行磨削加工; 最后把试样的最终尺寸加工成为 25 mm × 8.0 mm。

1.2 实验方法

高温摩擦磨损试验使用 THT07-135 型高温摩擦磨损试验机, 采用球-盘接触方式进行。上试样为 3 mm 的烧结 Si₃N₄ 球, 硬度 HV 为 1600。下试样为 25 mm × 8.0 mm 的圆柱体, 其中涂层厚度约为 0.5 mm。实验在大气和干摩擦的条件下进行, 空气相对湿度为 40%。实验温度分别为室温(25℃), 300, 450, 550, 650℃, 滑动速度为 0.8 m/s, 磨损半径 $r = 5$ mm, 载荷为 5 N, 滑行距离为 0.5 km。在实验之前, 试样用丙酮超声清洗; 固定了试样和对偶件后用酒精擦洗涂层与对偶件表面。

使用带有 EDS 的 Philips Quant200 型扫描电镜分析涂层的组织形貌及磨痕形貌; 运用日立 H800 型 TEM 对涂层进行精细结构分析。

2 结果与分析

研究表明^[1], 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂

层的主要元素组成有 Fe, Al, Cr, C, O, Ni 六种元素。主要相包括 FeAl, Fe₃Al 相及 Cr₃C₂ 相。增强相 Cr₃C₂ 均匀分布在以 FeAl, Fe₃Al 为基体相的涂层中。

2.1 高温摩擦试验结果

图 1 为 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在不同温度下的摩擦因数。普通碳钢在不同温度下的摩擦磨损开始阶段都存在跑合阶段^[4], 根据图 1 所示, 添加了 Cr₃C₂ 的涂层则没有跑合阶段。摩擦因数是材料表面形貌、接触形式以及载荷和滑动速度相互作用的结果。滑动表面间材料的弹-塑性变形、黏着以及硬微突体或硬粒子压入软表面产生的犁削作用, 将决定摩擦因数的大小。涂层中大量的碳化铬使得涂层的硬度很高, 基体相的硬度在摩擦磨损过程中起到非常关键的作用。常温条件下, 涂层表面相对较脆, Si₃N₄ 球易压入表面产生犁削作用, 摩擦形式应以犁削剥层摩擦为主; 温度逐渐升高时, 碳化铬在摩擦副的挤压下分解, 在摩擦的表面出现了游离的碳元素, 摩擦过程中起到了润滑的作用, 提高了涂层的摩擦因数。所以, 涂层的摩擦因数很快进入稳定阶段。从图 1 还可以看出, 涂层的摩擦因数先随温度的升高而增加, 550℃ 时达到最大值。而后, 涂层的摩擦因数开始下降。图 2 为 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在不同温度下的磨损率。可以看出, 随着实验温度的升高, 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层磨损率随温度的升高而下降, 表明涂层的高温抗磨损性能较好。550℃ 时, 涂层的磨损率最低。

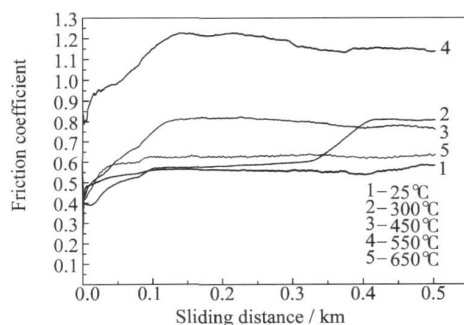


图 1 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在不同温度下的摩擦因数

Fig. 1 Friction coefficient of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating at different temperatures

2.2 高温摩擦试验分析

涂层的磨损率在 550℃ 时出现拐点, 因此, 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的最佳摩擦磨损工作温度选定在 550℃。从图 3 磨痕处扫描电镜可以看出: 室温条件下, 涂层的摩擦磨损形式主要是犁削磨损, 涂层磨痕处断裂情况严重; 550℃ 条件下, 涂层的摩擦磨损形式主要以黏着状态下的剥层磨损为主, 涂层磨痕

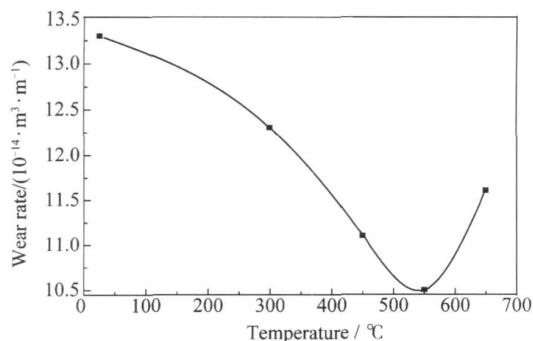


图2 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层在不同温度下的磨损率

Fig. 2 Wear rate of Fe-Al/Cr₃C₂ composite coating at different temperatures

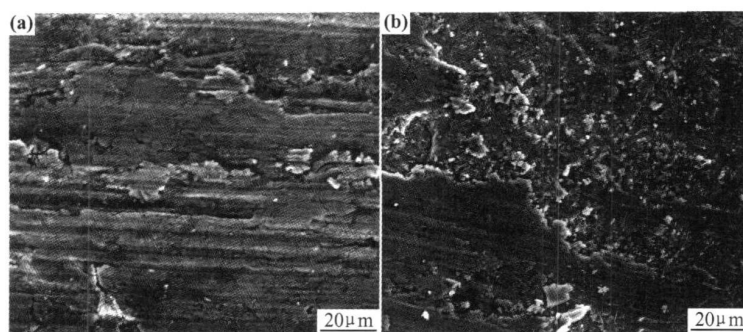


图3 Fe-Al/Cr₃C₂ 涂层磨痕的SEM照片 (a) 室温; (b) 550

Fig. 3 SEM images of Fe-Al/Cr₃C₂ coatings wear track (a) room temperature; (b) 550

研究表明, 屈服强度的峰值出现在 Fe₃Al 的 D0₃ 相至 B2 相转变温度 (T_c) 附近, 这与合金中的超点阵位错运动有关^[9]。由于反相畴界 (Anti Phase Boundary, APB) 随温度的升高而降低, 使超位错运动转变为不完整的超位错运动, 这种转变与在 T_c 附近部分有序出现的强度峰值相一致。

高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层中 Al 及 Cr 的含量较高, 随着温度的升高, 涂层中 Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 氧化膜的生成数量也逐渐增加。氧化膜的形成一方面阻止氧化的进一步深入, 使涂层磨痕处产生氧化钝化现象; 另一方面, Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 作为硬质点又分布在涂层中, 增加涂层硬度, 增加涂层的摩擦磨损性能。高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层中 Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 的存在形式及晶体学位相关系如图 4 所示。尺寸较小的 Al 熔滴在喷涂的过程中整体被氧化成 Al₂O₃ 熔滴。其中一部分在到达基体之前, 已经处于凝固状态, 到达基体后, 与基体发生碰撞而仍保持球状的 Al₂O₃。还有一部分 Al₂O₃ 熔滴在刚刚到达基体时仍然处于半熔融状态, 与基体发生碰撞产生了能量交换, 使得 Al₂O₃ 变扁, 图 4(a) 所示的条状分布在基体上。图 4(b)

光滑, 证明润滑良好。

高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层具备反常的摩擦磨损特性, 即涂层的磨损率随温度的增加磨损率下降, 至 550 达到最小值而后再开始增加。主要原因是基体相 Fe-Al 金属间化合物在高温条件下具有反常的屈服行为。金属和合金的屈服强度通常都随温度的升高而降低, 然而在有序合金中, 位错运动受到制约, 产生独特的形变特征, 出现反常的屈服行为^[5-8]。Fe₃Al 的屈服强度从 300 开始, 随温度的升高而增大, 在 550 左右达到峰值, 以后随温度升高而急剧下降。Fe₃Al 的反常屈服行为发生在 23% ~ 32% Al 的成分范围。

的 Cr₂O₃ 上面还析出一些物质, 在本照片上还不能确定出该物质为何物, 但是可以看出该物质非常细小, 能够达到纳米级别。Cr₂O₃ 的生成可以显著提高 Al₂O₃ 的蠕变性能, 细化 Al₂O₃ 晶粒, 减少 Al₂O₃ 膜由生长应力导致的开裂, 可以抑制氧化层的剥落, 促进 Al 的选择氧化, 可以使表面形成完整连续的 Al₂O₃ 氧化层。

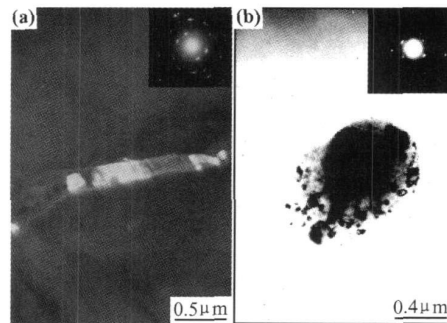


图4 Fe-Al/Cr₃C₂ 涂层中氧化物的存在形式及晶体学位相关系
(a) Al₂O₃; (b) Cr₂O₃

Fig. 4 The existence and crystallographic phase match of oxides in Fe-Al/Cr₃C₂ coating
(a) Al₂O₃; (b) Cr₂O₃

3 结论

(1) 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦磨损特性异于普通金属材料, 即随着温度的增加, 涂层的磨损率逐渐降低, 550 ℃ 磨损率达到最小值。在摩擦磨损状态下, 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的最佳使用温度为 550 ℃。

(2) 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的磨损: 常温条件下, 以犁削磨损为主; 高温条件下, 以黏着剥层磨损为主。

(3) 随着温度的增加, 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层表现出反常的摩擦磨损特性, 主要原因是涂层中基体相 Fe₃Al 具有高温反常屈服行为, 300~550 ℃ 时, Fe₃Al 屈服强度随温度的升高而增加, 550 ℃ 达到峰值, 而后又随着温度的增加而下降。

(4) 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层中生成了 Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 氧化物, 且随着温度的升高, Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 的数量逐渐增加并逐渐形成氧化膜。氧化膜的生成一方面阻止氧化向涂层内部深入; 另一方面, Al₂O₃ 及 Cr₂O₃ 作为增强相分布在涂层中, 进一步提高涂层的抗磨损能力。

参考文献

[1] 徐润生, 徐滨士, 马世宁, 等. 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂

层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 46- 49.

[2] 朱子新. 高速电弧喷涂 Fe-Al/WC 涂层形成机理及高温磨损特性 [D]. 天津: 天津大学, 2002.

[3] 徐维普. 高速电弧喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层高温性能研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2005.

[4] 徐润生, 徐滨士, 徐维普. 高速电弧喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层摩擦学特性[J]. 热加工工艺, 2005, (3): 1- 3.

[5] GUO L T, JIN O, YIN W M, et al. Discovery and study of anomalous yield strength peak in FeAl alloy[J]. Scripta Mater, 1993, 29: 783- 785.

[6] BAKER I, GAYDOS D J. Flow and fracture of Fe-Al[J]. Materials Science and Engineering, 1987, 96: 147- 158.

[7] BAKER I, MUNROE P R. Mechanical properties of FeAl[J]. International Materials Reviews, 1997, 42(5): 181- 205.

[8] SONG J H, HA T K, CHANG Y W. Anomalous temperature dependence of flow stress in a Fe₃Al alloy[J]. Scripta Mater, 2000, 42: 271- 276.

[9] STOLOFF N S, SIKKA V K. Physical metallurgy and processing of intermetallic compounds[C]. New York: Chapman and Hall, 1996. 351- 391.

收稿日期: 2010-01-12; 修订日期: 2011-01-20

作者简介: 刘晓明(1978), 男, 博士, 工程师, 从事热喷涂技术的研究与应用工作, 联系地址: 内蒙古呼和浩特市锡林南路 21 号内蒙古电力科学研究院 (010020), E-mail: lxm08@sohu.com

(上接第 65 页)

参考文献

[1] 隋福成, 陆华. 飞机起落架缓冲器数学模型研究[J]. 飞机设计, 2001, 21(2): 44- 51.

[2] 贾玉红, 武晓娟. 磁流变缓冲器在起落架上的应用[J]. 飞机设计, 2007, 27(2): 41- 45.

[3] 蔺越国, 程家林, 黎泽金, 等. 飞机支柱式起落架落震仿真及缓冲器优化设计[J]. 2007, 27(4): 26- 30.

[4] 刘小川, 马晓利, 孙侠生, 等. 基于响应面方法的多支柱起落架着陆缓冲性能优化[J]. 振动工程学报, 2010, 23(3): 305- 309.

[5] 唐有才, 刘振岗, 于德会, 等. 某型飞机前起落架自收起的故障研究[J]. 机床与液压, 2005, (4): 177- 178.

[6] GHIRINGHELLI G L. Testing of semiactive landing gear control for a general aviation aircraft[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(4): 606- 616.

[7] 刘晖, 顾宏斌, 吴东苏. 半主动控制起落架缓冲性能初步研究[J].

航空学报, 2006, 27(5): 865- 868.

[8] 顾宏斌, 刘晖, 吴东苏, 等. 现代起落架缓冲系统的发展[J]. 航空科学技术, 2008, (2): 36- 40.

[9] 李霞. 某型飞机主起落架缓冲系统性能分析研究[J]. 航空维修与工程, 2000, (6): 24- 31.

[10] 邵永起. 起落架弹性变形对结构强度的影响[J]. 飞机设计, 2001, (6): 38- 43.

[11] NED J LINDSLEY. A new tire model for aircraft landing gear dynamics [M]. Ohio: The University of Akron, 1999.

[12] 徐冬苓, 李玉忍. 飞机起落架数学模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 831- 833.

收稿日期: 2010-05-06; 修订日期: 2010-12-13

作者简介: 范金娟(1978), 女, 硕士, 高工, 主要从事非金属材料损伤与失效分析工作, 联系地址: 北京市 81 信箱 4 分箱(100095), E-mail: fanjinjuan621@163.com