

等离子喷涂 CoCrW 涂层微动磨损特性的研究

A Study on Characteristics of Fretting Wear of Plasma Sprayed CoCrW Coating

徐向阳¹, 刘世参², 张振学², 徐滨士², 周仲荣³

(1 北京工业大学材料学院, 北京 100022; 2 全军装备维修表面工程研究中心, 北京 100072;

3 西南交通大学摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

XU Xiang-yang¹, LIU Shi-can², ZHANG Zhen-xue², XU Bin-shi², ZHOU Zhong-rong³

(1 Material Science and Engineering Institute,

Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China;

2 Surface Engineering Research Center for Equipment Maintenance of

P. L. A, Beijing 100072, China; 3 Tribology Research Institute,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

摘要: 对等离子喷涂 CoCrW 涂层的微动磨损特性进行了研究。结果表明, 等离子喷涂 CoCrW 涂层的微动磨损可分为开始、过渡和稳定三个阶段。开始阶段以粘着磨损为主; 过渡阶段以氧化磨损为主; 稳定阶段以疲劳磨损为主。等离子喷涂 CoCrW 涂层具有合适的硬度和良好的韧性, 从而具有比较好的耐微动磨损性能。

关键词: 等离子喷涂; CoCrW 涂层; 微动磨损

中图分类号: TB333 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 03-0003-04

Abstract: The characteristics of fretting wear of plasma sprayed CoCrW coating was investigated. The results show that the fretting wear of plasma sprayed CoCrW coating can be divided into three stages, which are respectively initial, transient and steady stages. The main fretting wear mechanism is respectively adhesion, oxidation and fatigue wear. The high fretting wear resistance of plasma sprayed CoCrW coating results from its moderate hardness and excellent toughness.

Key words: plasma spray; CoCrW coating; fretting wear

微动磨损是小位移往复运动条件下两个接触表面之间的磨损^[1,2], 在振动或交变应力的作用下都会发生。微动磨损不但降低设备或零件的工作性能和工作效率, 而且还降低设备的安全可靠性, 有时导致重大灾难事故的发生。

飞机发动机涡轮叶片工作时受到强烈的振动和交变应力作用, 两个互相接触的涡轮叶片叶冠阻尼面的微动磨损非常严重。磨损后叶冠间隙变大, 叶片振动增强, 有时导致叶片从根部应力集中处断裂, 严重影响飞行安全^[3]。

采用等离子喷涂 CoCrW 涂层减轻涡轮叶片叶冠阻尼面微动磨损, 具有良好的防磨效果, 应用于实际生产以后, 产生了显著的经济和社会效益。然而, 以前受试验条件的限制, 一直未对该涂层的微动磨损特性进行过研究。随着飞机发动机设计和制造技术的进步, 涡轮叶片的工作温度越来越高, 工作应力越来越大, 相应地, 对涡轮叶片叶冠阻尼面耐微动磨损性能

也提出了新的更高的要求。因此有必要对等离子喷涂 CoCrW 涂层的微动磨损性能和机理进行深入分析, 为采用新技术提高阻尼面涂层耐微动磨损的能力, 延长其使用寿命打下基础。

1 试验材料及方法

试验用基体材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。喷涂材料为 CoCrW 合金粉末, 粉末粒度- 200 ~ + 400 目, 化学成分见表 1。

表 1 CoCrW 合金粉末化学成分 (wt %)

Table 1 Chemical composition of CoCrW alloying powder (wt %)

C	Cr	W	Ni	Mn	Si	Fe	Co
0.7 ~ 0.9	24.0 ~ 26.0	7.2 ~ 8.2	9.5 ~ 11.5	0.5 ~ 1.0	0.5	2.0	Bal

喷涂前试样表面先用汽油和丙酮清洗, 然后用棕

刚玉喷砂。等离子喷涂设备为METCO7M系统。等离子喷涂工艺参数见表2。喷涂层厚度0.3mm。

表2 等离子喷涂工艺参数

Table 2 Processing parameters of plasma spraying

项 目	参 数
电压/V	65
电流/A	450
氩气流量/(L·min ⁻¹)	30
氩气压力/MPa	0.58
氢气流量/(L·min ⁻¹)	2.5
氢气压力/MPa	0.24
送粉速度/(g·min ⁻¹)	30
喷涂距离/mm	100

喷涂后,涂层先经过磨削和抛光,再用超声波清洗后进行微动磨损试验。微动磨损试验设备为法国Deltalab-Nene7电液伺服式微动磨损试验机^[4]。具体试验参数为:正压力 $F_n=200\text{N}$,位移幅 $D=\pm 60\mu\text{m}$,频率 $f=20\text{Hz}$,微动循环次数 $N=5\times 10^3, 10^4, 5\times 10^4$ 和 10^5 次。试验温度 26°C ,相对湿度 $60\pm 10\%$ 。摩擦对偶为GCr15钢球,直径 $\phi 40$,硬度HRC60,表面粗糙度 $R_a 0.04$ 。

微动磨损试验后用Talysurf6表面轮廓仪测量磨痕轮廓,通过计算确定磨损体积;用JSM-840扫描电镜观察磨损形貌;用TN-5500能谱仪分析涂层和磨痕成分;用PMG-Olympus光学金相显微镜分析涂层组织;用HMT-3显微硬度计测量涂层硬度。

2 试验结果

2.1 涂层基本性质

等离子喷涂CoCrW涂层的组织见图1。呈现比较典型的层状结构,孔隙和氧化物夹杂含量很少,涂层与基体结合良好。



图1 等离子喷涂CoCrW涂层组织(200×)

Fig. 1 Structure of plasma sprayed CoCrW coating (200×)

能谱分析结果表明,喷涂层化学成分与粉末成分基本相当,不同的是由于喷涂时的氧化,涂层中含有少量的氧。CoCrW喷涂层显微硬度沿涂层厚度方向的变化见图2。喷涂层最高硬度 $HV_{0.1541}$,最低硬度 $HV_{0.1439}$,平均硬度 $HV_{0.1473}$,相当于HRC48,与实际生产中等离子喷涂CoCrW涂层的结果相符^[3]。

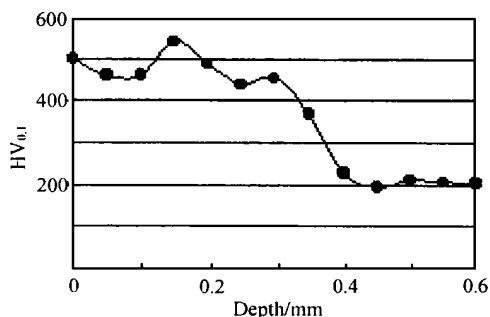


图2 CoCrW涂层显微硬度沿深度的变化

Fig. 2 Variation of microhardness of CoCrW coating with depth

XRD结果表明,喷涂层主要含有密排六方结构的Co基固溶体相,未检测出碳化物相,这与喷涂时碳的烧损和喷涂层冷却速度快有关^[5]。

2.2 涂层摩擦学性质

2.2.1 涂层摩擦系数的变化

在试验条件下,等离子喷涂CoCrW涂层摩擦系数随微动次数的变化见图3。随微动次数增加,CoCrW涂层的摩擦系数开始时迅速增加,微动1500次左右时,摩擦系数达到最大值,约为0.95,然后开始缓慢降低,微动约 10^4 次时基本稳定,约为0.85,此后始终在0.85左右波动。

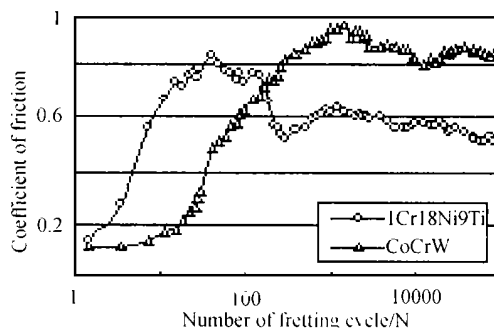


图3 CoCrW涂层和1Cr18Ni9Ti基体摩擦系数的变化

Fig. 3 Variation of coefficient of friction of CoCrW coating and 1Cr18Ni9Ti substrate

2.2.2 涂层磨损体积的变化

等离子喷涂CoCrW涂层的磨损体积随微动次数的变化见图4。总的来看,随微动次数增加磨损体积增

大,但不同阶段磨损率不同。开始的磨损率最大;微动 5×10^3 到 10^4 次之间,磨损体积略有减小,磨损率是负值;微动 10^4 到 5×10^4 次之间,磨损体积显著增加,磨损率又开始增大;微动 5×10^4 到 10^5 次之间,磨损体积增加不多,磨损率减小并趋于稳定。

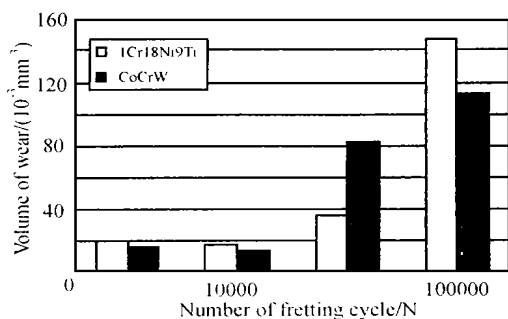


图4 CoCrW 涂层和 1Cr18Ni9Ti 基体
磨损体积随微动循环次数的变化

Fig. 4 Variation of volume of wear of CoCrW coating and 1Cr18Ni9Ti substrate with number of fretting cycle

2.2.3 涂层磨损形貌

图 5 是微动初期的磨痕表面形貌,其主要磨损特征为划痕;图 6 是微动 10^5 次时的氧化物磨屑的形貌,可见氧化物磨屑非常细小,其尺寸介于几十至几百纳米之间,一般在 $1 \mu\text{m}$ 以下;图 7 是清除掉覆盖在磨痕表面的氧化物磨屑层后,CoCrW 涂层表面微动 10^5 次时的磨损形貌,其特征是表面剥落后形成的浅坑。

此外,还对磨痕表面化学成分进行了能谱分析,发现微动磨损后,磨痕表面氧和铁的含量有明显增加。

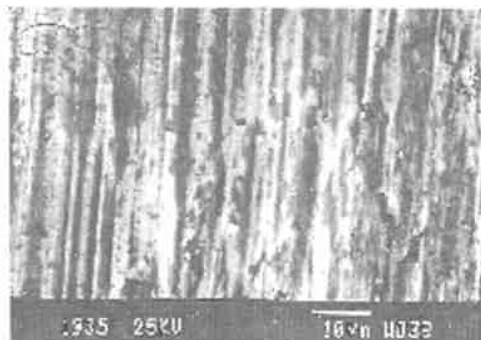


图5 开始阶段磨痕表面形貌

Fig. 5 Morphology of wear scar at initial steady

3 分析与讨论

从摩擦系数、磨损形貌和磨痕表面化学成分的变化来看,CoCrW 涂层在微动磨损的开始阶段主要发生粘着磨损。开始摩擦系数随微动次数的增加迅速达

到最大值,表明涂层表面原始氧化膜和污染物被清除,新鲜的涂层表面暴露出来,与摩擦对偶直接接触发生了强烈的粘着;微动初期磨痕表面的大量划痕(图 5)也是粘着磨损的特征^[6];能谱分析表明磨痕表面出现了一定浓度的铁元素,而铁元素只能来自于 GCr15,这也是粘着导致转移的结果。从整个磨损过程磨损体积的变化情况看,开始阶段 CoCrW 涂层的磨损率较大,这是因为 CoCrW 涂层的硬度比 GCr15 低,相对来讲,抗粘着磨损能力差。因此提高涂层的硬度,将有利于提高其在开始阶段抗微动磨损的能力。

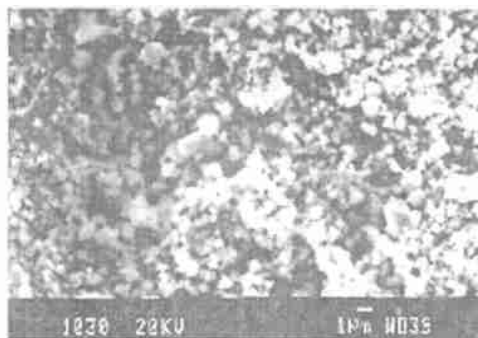


图6 稳定阶段氧化物磨屑的形貌

Fig. 6 Morphology of oxides wear debris at steady stage



图7 氧化物磨屑层下面 CoCrW 涂层的磨损形貌

Fig. 7 Wear morphology of CoCrW coating below wear debris layer

随着微动的进行,磨损表面氧含量迅速增加。对微动 5×10^3 次的磨痕表面测量的结果表明氧浓度已接近饱和,磨损表面已被一薄层氧化膜所覆盖。实际上,可以认为从微动开始氧化就同时发生,随着微动的进行,氧化程度逐渐加强,当氧化达到一定程度形成的氧化膜足以将接触副分开时,接触界面的摩擦磨损性质发生改变,粘着程度减轻,具体表现为摩擦系数达到最大值后开始下降,微动磨损进入氧化阶段。由于对磨件在氧化后的磨损表面持续不断地反复运动,对涂层表面产生犁削,局部剥落后形成氧化物磨屑。刚形成的磨屑尺寸较大,边界也不规则,从而对

表面有一定的磨粒磨损作用。对磨件的犁削和已剥落的磨屑的磨粒作用都导致新的磨屑的形成,如此反复进行下去,表面脱落的氧化物磨屑将越来越多。微动条件下特有的接触形式决定了磨屑难于逸出,它们在摩擦副的反复碾压下,尺寸和形状不断变化,最终成为尺寸非常细小的球形颗粒(图6)。由于最终的磨屑形状比较圆滑,而且大量的磨屑聚集成片状,运动比较困难,其磨粒磨损作用将逐渐减弱。过渡阶段可以认为是从摩擦系数下降开始,直至尺寸形状稳定的磨屑组成的氧化物磨屑层形成,摩擦系数趋于稳定结束。此阶段由于粘着磨损减轻和氧化导致增重,同时磨屑的产生与逸出尚未达到平衡,所以磨损体积减小,磨损率大大降低。氧化物磨屑的形成使摩擦系数和磨损率降低,因此对于减轻磨损是有利的。

稳定阶段磨损后的涂层表面出现浅坑(图7),表明该阶段 CoCrW 涂层是以疲劳磨损为主^[7]。从微动开始,涂层表面及一定深度范围内即在摩擦力的反复作用下发生剪切塑性变形。随着微动的不断进行,塑性变形不断积累,位错密度不断增加,最终将在接触应力最大的亚表层萌生疲劳裂纹。裂纹随微动循环次数的增加沿平行表面的方向不断扩展,最终导致涂层表面发生剥落形成磨屑和剥落坑。

因为微动磨损在稳定阶段以疲劳磨损为主,而疲劳裂纹又往往在材料内部的空洞和夹杂物等缺陷处首先形成^[8],由于等离子喷涂 CoCrW 涂层不可避免地存在这些缺陷,所以其疲劳裂纹的形核位置比较多,裂纹比较容易形成,所以在稳定阶段的初期,CoCrW 喷涂层的磨损体积较大,磨损率较高。而一旦疲劳裂纹的形核和扩展的整个过程变得稳定起来,由于韧性较高,具有一定的抵抗裂纹扩展的能力,CoCrW 喷涂层的磨损率降低。

摩擦系数是反映摩擦副之间接触行为的重要参数,其大小对材料的磨损必然有所影响,一般都希望通过降低摩擦系数来减轻磨损。抗微动磨损的涂层可分为抗磨和减摩两大类^[9],由于叶片叶冠的基本功能是通过起阻尼作用减轻振动,所以摩擦系数高有利,因此这里不宜采用减摩涂层。从试验结果看,稳定阶段 CoCrW 涂层具有比较高的摩擦系数,这对于保证叶片的阻尼作用是比较有利的。另外通过比较 CoCrW 涂层和 1Cr18Ni9Ti 基体的摩擦系数和磨损体积,可以发现摩擦系数大,未必耐磨性就差。因为影响涂层抗微动磨损能力的因素是多方面的,涂层材料的合适的机械性能应该是决定因素。对于同一涂层,如果在不同的外部条件下,具有不同的摩擦系数,则摩擦系数低时有利;对于不同涂层,由于其内在性能不同,即使在同一外部条件下,也不宜根据摩擦系

数的大小判断耐磨性的高低。在实际工作条件下,摩擦系数高还有可能降低微动振幅,从而减轻微动磨损。

4 结论

(1) 等离子喷涂 CoCrW 涂层的微动磨损分为开始、过渡和稳定三个阶段。开始阶段以粘着磨损为主;过渡阶段是作为第三体的氧化物磨屑层的形成过程;稳定阶段以疲劳磨损为主。

(2) 涂层硬度高,微动磨损的开始阶段耐磨性好;涂层硬度适中,疲劳强度和韧性高,稳定阶段耐磨性好。在微动磨损的稳定阶段,等离子喷涂 CoCrW 涂层具有比较好的耐磨性。

(3) 在微动磨损条件下,摩擦系数大,不一定耐磨性差。决定涂层抗微动磨损能力的主要因素是其内在性能。等离子喷涂 CoCrW 涂层具有较高的摩擦系数,这对于保证叶片叶冠的阻尼作用是有利的。

(4) 等离子喷涂层固有的孔隙和氧化物夹杂作为疲劳裂纹萌生的核心是限制喷涂层抗微动磨损能力提高的主要原因,应加以严格控制。

参考文献

- [1] 周仲荣,罗唯力,刘家浚.微动摩擦学的发展现状与趋势[J].摩擦学报,1997,13(3):272-280.
- [2] 李诗卓,董祥林.材料的冲蚀磨损与微动磨损[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [3] 孙相臣.微动损伤对航空发动机的危害与预防[J].飞行事故和失效分析,1994,(3):40-43.
- [4] Z R Zhou, L Vincent. Mixed fretting regime [J]. Wear, 1995, (181-183): 531-536.
- [5] 刘玉珍,桂业伟.司太立合金的性能及应用[J].机械工程材料,1992,(6):1-5,47.
- [6] 高彩桥.材料的粘着磨损和疲劳磨损.北京:机械工业出版社,1986.
- [7] N P Suh. An overview of the delamination theory of wear [J]. Wear, 1977, (44): 1-16.
- [8] 王光中等译.材料的疲劳(第二版).北京:国防工业出版社,1999.
- [9] 徐桂珍,周仲荣,刘家浚.表面改性技术在微动磨损中的应用[J].摩擦学报,1997,13(3):272-280.

基金项目:高能束流加工技术国防科技重点实验室预研基金资助项目(98JS50.2.1JB3501)

收稿日期:2000-03-03

作者简介:徐向阳(1964-),男,副教授,博士研究生,主要从事表面工程的研究.联系地址:北京工业大学材料学院功能材料研究室(100022).

本文编辑:杨雪