

[文章编号] 1004-0609(2000)05-0663-04

表面喷涂 Mo 和 WC 对 TiAl 基合金耐磨性的影响^①

欧阳鸿武, 李安湘, 贺跃辉, 黄伯云, 唐建成, 刘文胜

(中南工业大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

[摘要] 针对 TiAl 基合金排气门在 483Q 柴油发动机台架试验后杆部产生局部磨损的情况, 进行了 TiAl 基合金表面喷涂 Mo 和 WC 的摩擦磨损试验研究。结果表明: TiAl 基合金表面与 Mo 和 WC 涂层间的结合方式为机械咬合; TiAl 基合金表面喷涂 Mo 能显著提高其耐磨性, 磨损量减少 50%; 喷涂 WC 使硬度提高 30%, 但耐磨性下降, 磨损量上升 30%。

[关键词] 摩擦; 发动机; TiAl 基合金; 等离子喷涂

[中图分类号] TG174.442

[文献标识码] A

TiAl 基合金具有密度低、比强度高、高温力学性能和高温抗氧化性能好等优点, 是一种具有广泛应用前景的新型轻质高温结构材料^[1, 2]。将其用于制造汽车发动机的进/排气门, 有利于提高发动机的工作温度, 使热效率进一步提高; 可减轻气门近 50% 的质量, 从而有效降低气门的运动惯性, 有利于提高发动机高速性能; 同时能减轻气门对气门座的冲击, 相应减少对气门座的磨损, 有利于保持发动机的技术状况, 起到节能、减少废气污染和噪声的作用。简言之, 推广使用 TiAl 基合金发动机排气门符合现代汽车技术发展的需要^[3~7]。但从铸态层片状 TiAl 基合金发动机排气门在经历 483Q 柴油机发动机台架耐久性试验后出现杆部局部磨损和擦伤情况分析, 提高其局部耐磨性仍是推广应用 TiAl 基合金排气门过程中一个重要的研究内容。

根据减摩耐磨机理, 在金属表面喷涂软或硬涂层是提高其耐磨性的可行途径, 这方面的研究受到广泛重视, 并得到有效应用^[8~13]。为此开展了 TiAl 基合金试样表面喷涂软涂层 Mo 和硬涂层 WC 的耐磨性试验研究。

1 试验方法

根据磨损试验机对磨损试样的尺寸要求制备 TiAl 基合金磨损试样, 经表面喷砂处理后分别喷涂 Mo 和 WC 涂层, 测量表面硬度后在磨损试验机上

进行磨损试验, 之后对磨损表面进行扫描电镜分析。

1.1 TiAl 基合金试样制备

按 Ti-48Al-2Cr(摩尔分数, %)成分配比, 在真空磁悬炉中浇铸锭子, 脱模后采用 HIP 工艺(热等静压)消除孔洞, 然后根据磨损试验机对磨损试样的尺寸要求, 线切割成 12.4 mm × 12.4 mm × 19 mm 试样。

1.2 表面喷涂 Mo 和 WC 工艺

试样表面用丙酮清洗除油, 然后喷砂粗化, 为了增强涂层的粘结强度, 先在 TiAl 基合金试样表面喷涂约 0.1 mm 的 NiCrAlY 作为粘结底层。采用 PT 公司(PLASMA TECHNIK AG)生产的 R750-C 等离子喷涂设备及标准喷涂工艺参数喷涂 Mo 和 WC, 涂层厚度约为 0.5~0.7 mm。

1.3 磨损试验条件

磨损试验在 MHK500 型环块磨损试验机上进行, 摩擦环为淬火轴承钢, 硬度为 HRC 58~62, 直径为 49.24 mm。依据发动机运行时气门的摩擦条件选定试验载荷和转速分别为 100 N 和 1500 r/min。试验时, 先进行 5 min 无载荷磨合试验, 之后进行 25 min 磨损试验。

2 试验结果

2.1 试样宏观硬度

对试件表面硬度的测量结果表明: TiAl 基合金

① [基金项目] 国家“863”高技术基金资助项目(715-005-0040)
[作者简介] 欧阳鸿武(1964-), 男, 副教授, 博士。

[收稿日期] 1999-10-08; [修订日期] 2000-05-11

硬度为 HRC22~24, 喷涂 WC 使硬度提高到 HRC28~30, 而喷涂 Mo 硬度为 HRC20~21。

2.2 涂层 SEM 像

图 1 和图 2 为 Mo 和 WC 涂层与 TiAl 基合金机体结合情况的 SEM 照片。底层与基体为平滑咬合, 涂层通过底层与 TiAl 基合金结合, 涂层孔隙率为 10%~15%。

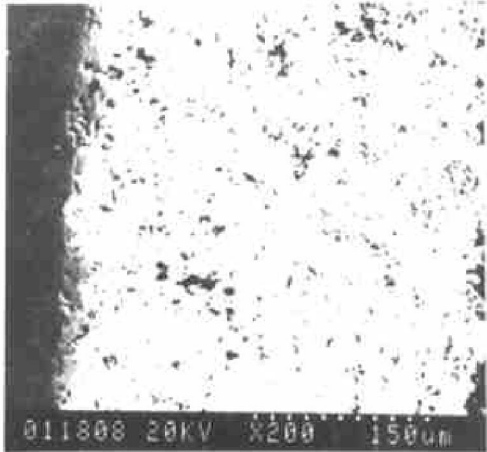


图 1 Mo 涂层与 TiAl 基合金基体结合情况
Fig. 1 Metallograph of Mo coating

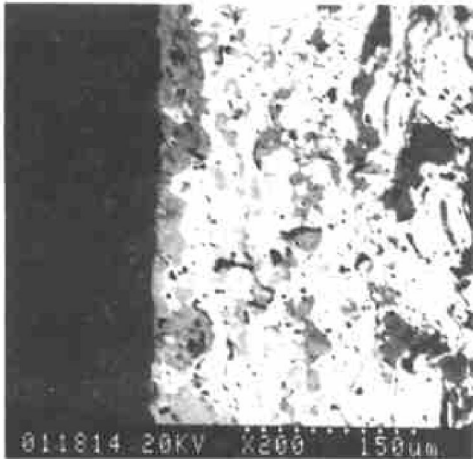


图 2 WC 涂层与 TiAl 基合金基体结合情况
Fig. 2 Metallograph of WC coating

2.3 磨损量和摩擦系数

磨损试验后, 分别测出 TiAl 基合金、Mo 和 WC 涂层的磨损量和相应的摩擦系数^[13], 结果列于表 1 中。TiAl 基合金摩擦系数最小, 但磨损量大致是 Mo 涂层的 2 倍; 尽管 Mo 涂层的摩擦系数最大, 但磨损量最小, 约为 WC 涂层磨损量的 1/3。

表 1 TiAl 基合金、Mo 和 WC 涂层的磨损量和相应的摩擦系数

Table 1 Wear mass loss and friction coefficient of TiAl-based alloy, Mo and WC coatings

Property	TiAl-based alloy	Mo coating	WC coating
Wear mass loss	1.508	0.715	2.001
Friction coefficient	0.361	0.501	0.456

2.4 磨损表面形貌 SEM 像

通过磨损试验后, 试样表面形貌的 SEM 扫描照片如图 3~5 所示。载荷和转速分别为 500 N 和 1000 r/min 条件下(更为苛刻)的 TiAl 基合金表面磨损形貌照片与图 5 基本一致。对图中整体和相应位置的成分扫描结果列于表 2 中。

3 试验结果分析

3.1 涂层的结合方式

Mo 和 WC 涂层与 TiAl 基合金表面的结合方式可从 SEM 和成分扫描结果中看出, 由于涂层与基体间没有发生元素渗透, 可以确定其结合方式为机械咬合。

3.2 磨损机理分析

从磨损表面形貌看出, 三者表面形貌有明显区别, 说明占主导地位的磨损机制并不相同。Mo 涂层磨损表面呈现明显的磨粒磨损特性, 从图 3(a)和(b)可看出 Mo 涂层磨损表面上出现刮痕和发生剧

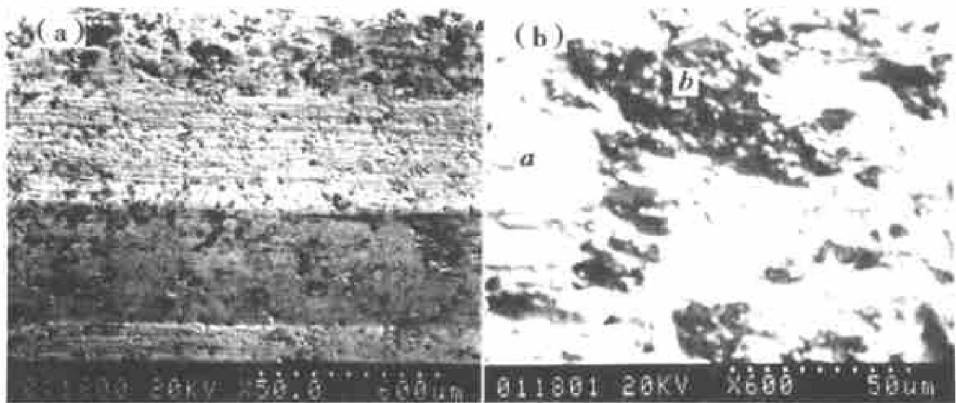


图 3 Mo 涂层表面磨损形貌

Fig. 3 SEM morphology of worn surfaces (a) and zoom (b) of Mo coating

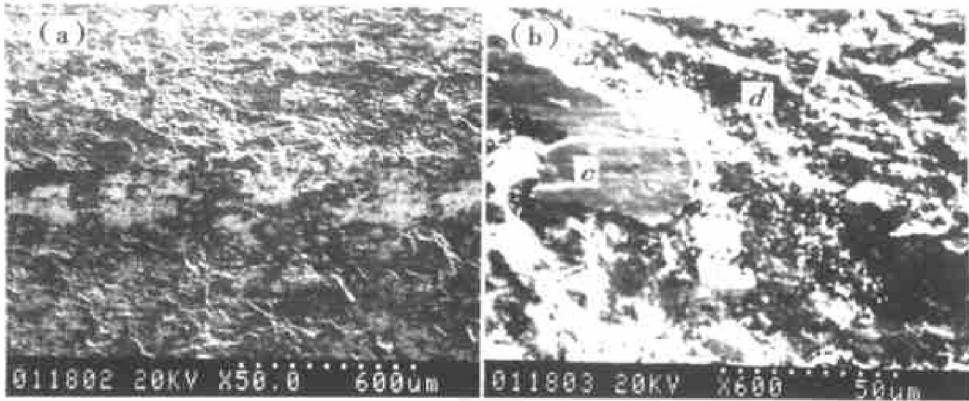


图 4 WC 涂层表面磨损形貌

Fig. 4 SEM morphology of worn surfaces (a) and zoom (b) of WC coating

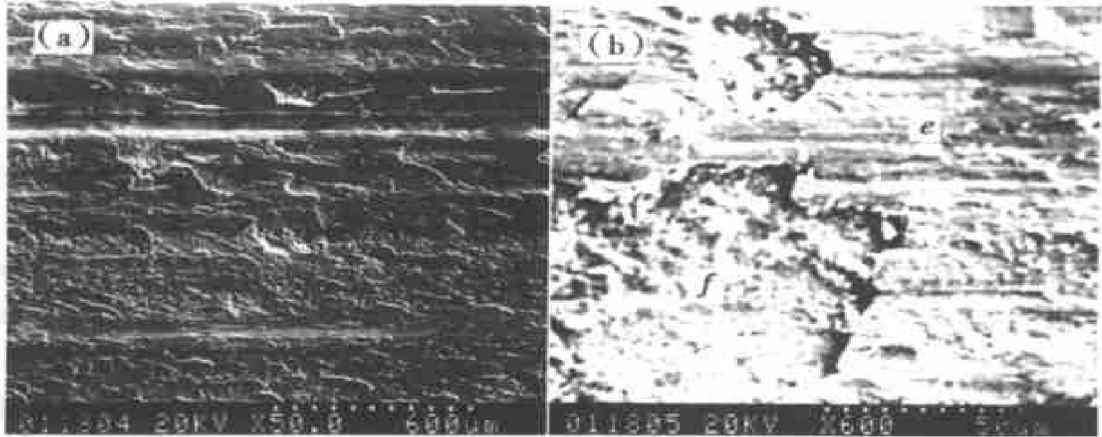


图 5 TiAl 基金合金表面磨损形貌

Fig. 5 SEM morphology of worn surfaces (a) and zoom (b) of TiAl based alloy

表 2 电子探针成分分析

Table 2 Composition analysis by electron probe (mole fraction, %)

Point	Ti	Al	Fe	W	Mo	Cr	Si	Ni
a			82.21		11.62	1.01	5.15	
b			3.04		93.61			
c			41.96	35.07				22.96
d			20.11	41.73				30.15
e	15.14	24.91	58.35			1.27		
f	31.79	43.0	22.20			1.33		

烈塑性变形的痕迹, 通过对图 3 中 *a* 点和 *b* 点进行电子探针微区分析可以发现两处分别富集 Fe 和 Mo 元素。这种表面不同区域元素成分的差异也体现了磨粒磨损和粘着磨损的特点, 从摩擦环上脱落的磨屑滞留在凹坑中, 既有材料因粘着而发生元素的集体转移, 又有明显犁沟。因此, 磨损是磨粒磨损和粘着磨损的综合作用, 但以磨粒磨损为主。

WC 涂层为脆性涂层, 其磨损表面有明显片状剥落和塑性变形特征, 如图 4 所示。电子探针微区分析表明其表面有 Fe 元素, 且不同区域 Fe 含量差别不明显, 数量较少, 说明粘着磨损很严重; 犁沟

已不明显, 说明磨粒磨损不是其主要磨损方式, 其磨损过程可能是由于外载荷造成 WC 表面接触应力, 导致裂纹扩展, 引起表层材料的剥落。剥落的 WC 碎片落入摩擦表面之间成为磨粒引起细的划痕, 所以疲劳磨损为主要机制。

TiAl 基金合金表面出现了明显犁沟, 同时也存在脆性剥落表面, 这取决于 TiAl 的硬度与冲击韧性。TiAl 较摩擦环块软, 虽有一定室温延性和冲击韧性, 但仍是脆性材料, 电子探针微区成分分析也发现不同区域的 Fe 含量差异明显(*e* 点的 Fe 含量比 *f* 点高出近 3 倍), 因此其磨损过程具有粘着磨损及磨料磨损的特点。表面犁皱是磨粒对 TiAl 表面切削挤压塑性变形的结果, 接触应力下 TiAl 的表面形成裂纹及裂纹扩展造成 TiAl 碎屑剥落成为磨粒, *e* 点富集 Fe 元素, 表明这一凸起是因粘着而转移的环块材料。在磨擦过程中, 摩擦环在高温下疲劳、熔化, 产生明显粘着磨损。对 TiAl 表面的磨损主要是磨粒磨损, 而对摩擦环而言主要是粘着磨损。

在摩擦实验中, WC 涂层之所以磨损最快, 是由于本身属于脆性涂层, 加上致密度不够, 内部孔

隙成为内部结构弱点,在摩擦过程中易发生破裂,逐渐因疲劳而崩落。崩落的碎片成为磨粒,压入表面产生裂纹,促进了 WC 涂层的剥落。虽然喷涂 WC 降低了 TiAl 基合金的耐磨性,但 TiAl 基合金表面喷涂 WC 能有效提高硬度,使其表面硬度由 HRC24 提高到 HRC 31。从摩擦实验结果来看 Mo 涂层是有效的耐磨损涂层,这与选用低硬度的耐磨材料和表面覆层有利于防止擦伤的结论是基本一致的^[14]。

[REFERENCES]

- [1] CHEN Jian(陈 健), HUANG Baiyun(黄伯云), HE Yuehui(贺跃辉), et al. TiAl 基合金汽车发动机阀门的开发 [J]. Materials Review(材料导报), 1998, 12 (3): 14- 16.
- [2] LIU Yong(刘 咏), HUANG Baiyun(黄伯云), OUYANG Hongwu(欧阳鸿武), et al. 粉末冶金 TiAl 基合金排气阀的制备和性能 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 2000, 10 (1): 59- 64.
- [3] Wojik K M. 2000 年后的汽车柴油机(I) [J]. Foreign Internal Combustion Engine(国外内燃机), 1998(5): 3 - 12.
- [4] Wojik K M. 2000 年后的汽车柴油机(II) [J]. Foreign Internal Combustion Engine(国外内燃机), 1998(6): 3 - 10.
- [5] GUO Zhidong(郭志东). 三菱公司缸内直喷汽油机的废气净化新技术 [J]. Foreign Internal Combustion Engine(国外内燃机), 1998(6): 58- 64.
- [6] WU Xuchu(吴旭初) and SHEN Wenjun(沈文君). 发动机气门材料应用及进展 [J]. Internal Combustion Engineering(内燃机工程), 1999(1): 33- 39.
- [7] WU Xuedong(乌学东), CHEN Haigang(陈海刚), WANG Dapu(王大璞), et al. WC/Ti 合金在水基润滑剂润滑下的摩擦磨损机理研究 [J]. Tribology(摩擦学学报), 1999, 19(3): 218- 223.
- [8] LIU Jingsheng(刘兢生) and LIU Zuomin(刘佐民). 高温对发动机气门磨损特性影响的试验研究 [J]. Internal Combustion Engineering(内燃机工程), 1994, 15 (4): 40- 45.
- [9] Lü Jirjun(吕晋军), OUYANG Jinlin(欧阳锦林), XUE Qunji(薛群基), et al. 某热发动机用阀体材料的研制及其性能 [J]. Tribology(摩擦学学报), 1997, 17(4): 367- 379.
- [10] LIU Zuomin(刘佐民) and LIU Jingsheng(刘兢生). 发动机气门——气门座强化磨损模拟试验机及其试验方法研究 [J]. Internal Combustion Engineering(内燃机工程), 1998, 19(2): 49- 53.
- [11] LIU Jingsheng(刘兢生) and LIU Zuomin(刘佐民). 磨损工况对气门-气门座摩擦磨损影响的研究 [J]. Tribology(摩擦学学报), 1994, 15(4): 43- 50.
- [12] ZHANG Mingzhe(张明哲), LIU Yongbing(刘勇兵) and YANG Xiaohong(杨晓红). 车用摩擦材料的摩擦学研究进展 [J]. Tribology(摩擦学学报), 1999, 19(4): 379- 384.
- [13] WANG Hengzhi(王恒志), XIA Zhiye(夏治业), WANG Xin(王 信), et al. 对 MM-200 型磨损试验机摩擦系数计算公式的修正 [J]. Tribology(摩擦学学报), 1999, 19(2): 173- 176.
- [14] GUI Changlin(桂长林). 影响内燃机活塞-缸套擦伤的因素及防擦伤的摩擦学设计 [J]. Tribology(摩擦学学报), 1998, 18(3): 283- 288.

Tribological performance of plasma-sprayed Mo and WC on TiAl based alloy surface

OUYANG Hongwu, LI Anxiang, HE Yuehui, HUANG Baiyun, TANG Jiancheng, LIU Wensheng
(State Key Laboratory for Powder Metallurgy,
Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] The tribological performance of plasma-sprayed Mo and WC on TiAl based alloy surface was studied to improve TiAl based alloy's antiwear properties. The results show that the wear mass loss decreases by 50% through the spray of Mo. The hardness of TiAl based alloy increases by 30% through the spray of WC, and the wear mass loss increases by 30%.

[Key words] friction; engine; TiAl based alloy; plasma-spray

(编辑 彭超群)