

## 等离子喷涂 WC 涂层磨损机理研究

童兆和 丁传贤 严东生

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

**摘要** 利用等离子技术制备 WC 涂层, 采用环块接触方式进行磨损试验, 主要依靠扫描电子显微镜和扫描电声显微镜对磨损表面进行观察。结果表明: 涂层磨损起因于表面裂纹, 其中径向裂纹的扩展控制着涂层磨损速率。

**关键词** 等离子喷涂, WC 涂层, 磨损, 磨损机理

### 1 引言

WC 涂层材料由于其自身的优良性能, 如表面硬度高、韧性好、与金属底材粘接强度高、导热系数大、抗热震性能好等特点<sup>[1]</sup>, 在机械、化工、纺织、航天航空等许多工业领域获得了广泛应用<sup>[2,3]</sup>。试验还初步表明, WC 涂层在液体火箭发动机涡轮泵密封件液氮温度内, 运行性能良好。在未来先进飞机发动机密封材料中, WC 涂层也表现出可观的潜力<sup>[4]</sup>。本文的目的在于了解该涂层在常温下磨损行为, 探索其磨损机理。

### 2 实验

采用等离子喷涂法制备 WC 涂层<sup>[5]</sup>。磨损试验在 MM-200 磨损试验机上进行, 对磨材

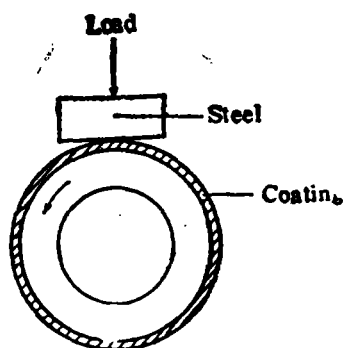


图1 轮块接触方式示意图  
Fig. 1 Schematic representation of block-on-ring geometry

料为 45 号钢。干摩擦试验在大气中进行, 润滑时采用缝纫机油, 加油速度为 2 滴/min, 负荷 200~1000N, 转速 200r/min。图 1 为磨损试验示意图。涂层磨损表面和亚表面形貌观察在扫描电子显微镜和扫描电声显微镜上进行。采用 EPMA-733 型电子探针扫描显微镜。扫描电声显微镜为本所研制, 工作频率范围 2~110kHz, 电子束能量 2~30kV, 束流最大为  $3 \times 10^{-7}$  A, 束调制电压小于 50V<sup>[6,7]</sup>。

1991年6月12日收到。本工作得到中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放实验室资助。

通讯联系人: 童兆和, 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050。

林惠令、乔海潮、翟建中、张叶方以及陈根林等同志在样品制备上给予了合作, 高建华、江福明同志在磨损形貌观察方面给予了帮助, 谨此一并致以衷心感谢。

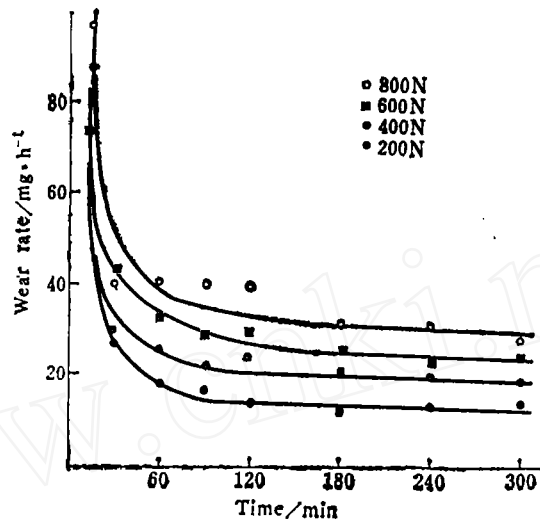


图2 干摩擦条件下 WC 涂层磨损曲线  
Fig. 2 Wear curves of WC coating in air

### 3 结果与讨论

#### 3.1 干摩擦条件下 WC 涂层的磨损

图2为不同负荷下 WC 涂层磨损曲线。从图中可以看出，涂层磨损可分为两个阶段：一为磨损起始阶段 ( $t < 15\text{min}$ )，在这一阶段中磨损率急剧下降；二为磨损稳定阶段，在这一阶段中磨损率几乎维持不变。从图中还可以看出磨损率随负荷增大而增大。进一步研究表明涂层磨损率与负荷有下列关系：

$$W \propto p^{0.01}$$

式中： $W$  为磨损率， $p$  为负荷。这一结果与涂层结构相关<sup>[9]</sup>。

图3为涂层磨损表面光学显微镜照片。从图中可以看出涂层磨损表面有磨痕和裂痕，磨痕在涂层磨损表面所占份量不多。

图4为涂层磨损表面和截面的电子显微镜照片。从图中可以看出纵向裂纹穿过 WC 颗粒，横向裂纹主要发生在涂层层间结合处，亦可称之为层间裂纹。由于层间结合处强度较低，裂纹易在此成核，生长，传播。这反映出涂层材料的特点。

图5为涂层未磨损区域与磨损区域进行比较的电子显微镜 (SEM) 和扫描电声显微镜 (SEAM) 照片。从 SEM 照片可以看出磨损区域和未磨损区域的区别在于有无纵向裂纹，从 SEAM 照片我们可以获得更多信息。首先，纵向裂纹垂直于磨损表面。其次，在磨损区域的亚表面分布着层间裂纹。另外，纵向裂纹与层间裂纹相互独立，亦即在纵向裂纹下面不一定分布有层间裂纹。

涂层磨损表面纵向裂纹与层间裂纹的产生与中间层<sup>[9]</sup>中存在的大量 WC 硬颗粒密切相关。这些硬颗粒来源于 WC 涂层表面，嵌入到对磨材料 45 号钢表面。这些硬颗粒反过来又作用于涂层本身；一方面在涂层表面产生磨痕；另一方面在涂层表面产生断裂，包括纵向断

裂和层间断裂。由于两个裂纹系统互相独立，涂层材料层间结合强度远小于涂层断裂强度，故而纵向裂纹扩展速度远小于层间裂纹扩展速度，纵向裂纹的扩展则成了涂层磨损的控制步骤。

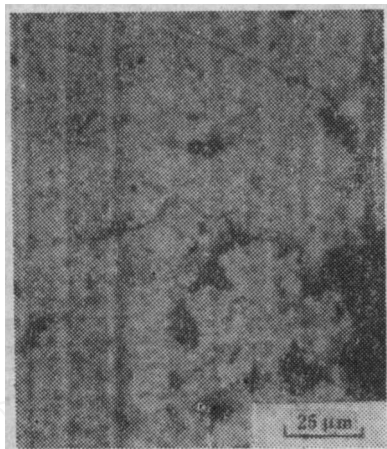


图3 WC 涂层磨损表面磨痕和断裂(光学显微镜照片)

Fig. 3 Wear track and cracking on WC worn surface (optical micrograph)

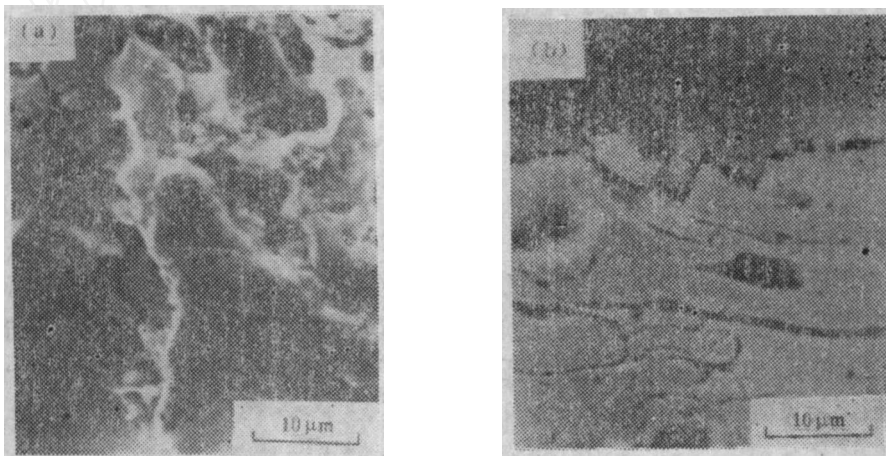


图4 WC 涂层磨损表面(a)和截面(b)SEM 形貌

Fig. 4 SEM micrographs of the worn surface (a) and cross section (b) of WC coating

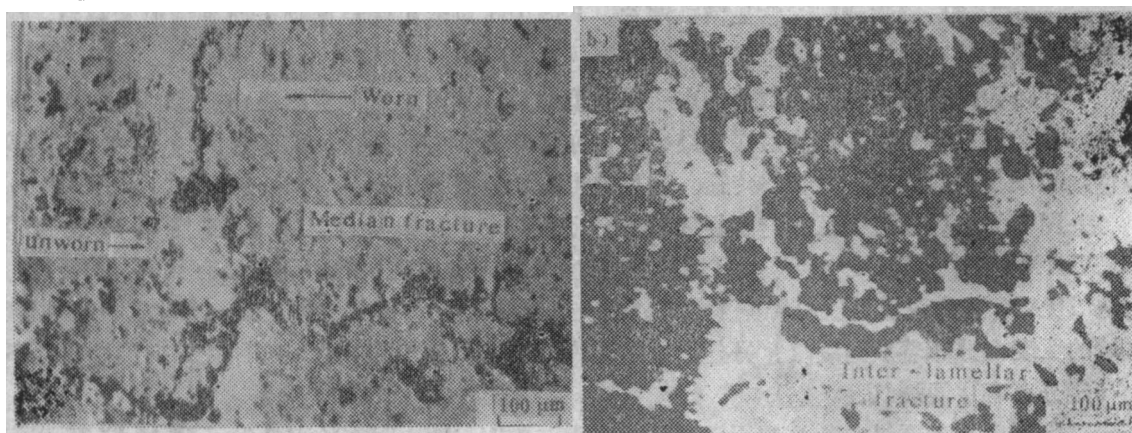


图5 (a) WC 涂层未磨损表面和磨损表面二次电子像形貌  
(b) 同区域电声像形貌( $f=34\text{kHz}$ )。

Fig. 5 (a) Secondary electron image of worn and unworn surface of WC coating, (b) SEAM image in the same area ( $f=34\text{kHz}$ )

### 3.2 润滑条件下 WC 涂层的磨损

图 6 为润滑条件下 WC 涂层的磨损曲线, 从图中可以看出: (1) WC 涂层磨损率随负荷增加而增加, 并且负荷越大, 增加幅度越大。(2) 在润滑条件下, 当负荷较小时, WC 涂层出现磨损率为负的情形, 这表明对磨材料已被粘附到涂层表面上。(3) 润滑条件下磨损率从起始阶段到稳定阶段变化范围远比干摩擦条件下为小。(4) 与干摩擦条件涂层稳定阶段磨损率相比较, 润滑时磨损率范围为  $-1 \sim 2 \text{ mg/h}$ ; 干摩擦时, 磨损率范围为  $20 \sim 35 \text{ mg/h}$ 。由此可见, 润滑剂的存在显著地降低涂层的磨损, 这主要是由于涂层表面形成金属粘附层起到了保护作用<sup>[4]</sup>。

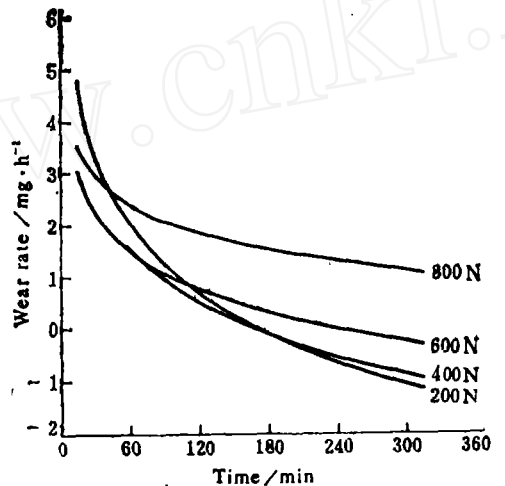
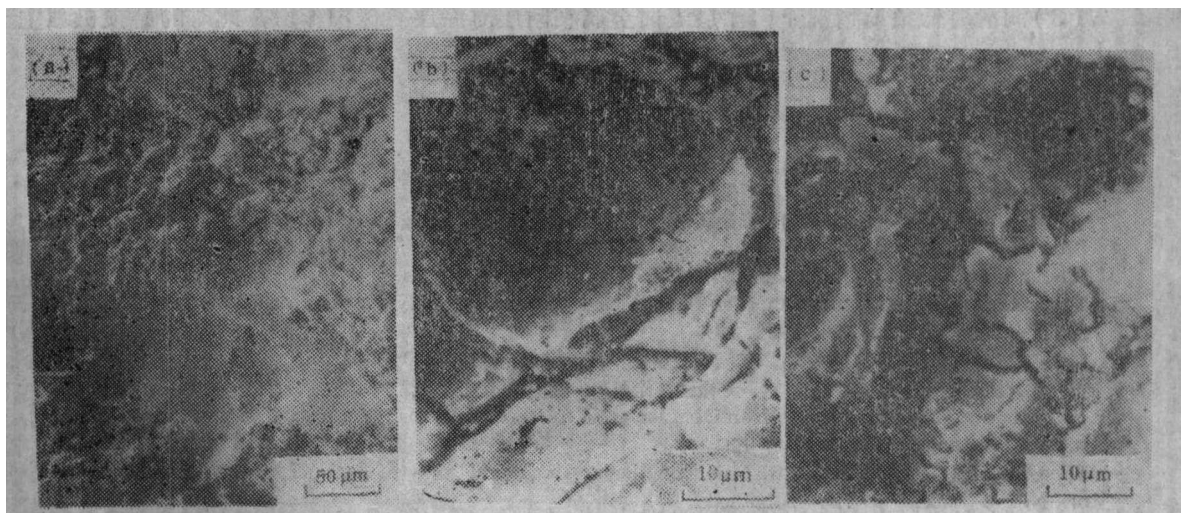


图 6 润滑条件下 WC 涂层磨损曲线  
Fig. 6 Wear curves of lubricated WC coating

图 7 为润滑条件下 WC 涂层磨损形貌。由于涂层中存在气孔, 磨损开始后便被金属 Fe 填入, 随之不断地有 Fe 被粘附到涂层表面, 所以一部分涂层被粘附层保护起来, 当粘附层被磨损去除时, 金属 Fe 与涂层的粘附力使得涂层产生大块剥落。这同样是由于涂层层间结合强度较低, 在切向力和法向力的不断作用下, 裂纹在层间成核、生长、传播, 最后被剥离



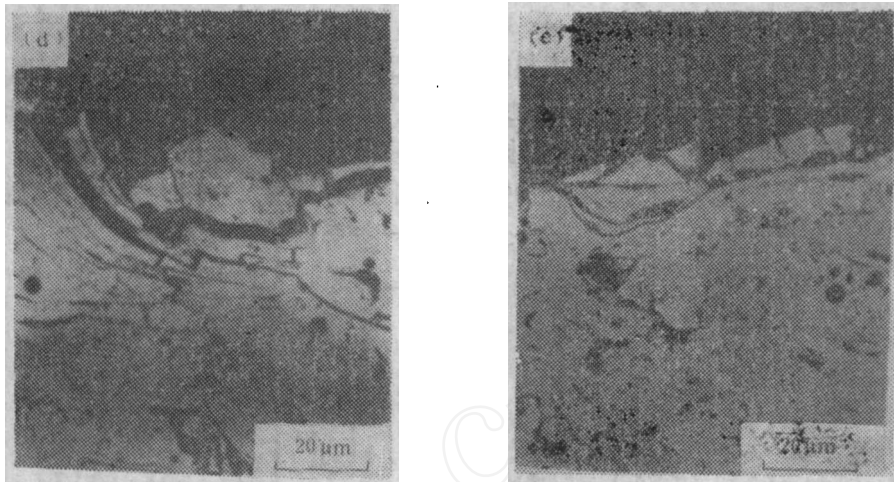


图7 润滑条件下 WC 涂层磨损表面剥落和断裂 SEM 形貌

Fig. 7 Flaking off and fracturing on worn surface of lubricated WC coating, SEM  
 (a) Flaking off under loading of 200N; (b) Flaking off and fracturing under loading of 600N; (c)  
 Fracturing under loading of 800N; (d) Flaking off on the cross-section under loading of 400N;  
 (e) Inter-lamellar fracturing and median fracturing on the cross-section under loading of 600N

表面。从图7可以看出，低负荷时，WC涂层整块地沿层间剥落；负荷600N时，涂层中可观察到纵向裂纹；800N时，纵向裂纹数目增多，涂层层块裂成许多小碎块。从图7d和7e也可以看出，低负荷时涂层磨损以层间剥落为主；高负荷时，层块裂成许多小碎块，加快了涂层的磨损。所以负荷越大，磨损增加越大。这与图6磨损曲线结果一致。

## 4 结论

(1) 干摩擦和润滑条件下 WC 涂层的磨损率随负荷增加而增加。干摩擦时 WC 涂层磨损率在 20~35mg/h 范围内，润滑时磨损率在 1~2mg/h 范围内。

(2) WC 涂层磨损起因于表面断裂，包括纵向断裂和层间断裂，其中纵向裂纹的扩展速率决定着涂层磨损速率。

(3) 润滑时低负荷情况下，涂层表面金属粘附层对涂层有保护作用，此时的磨损机理主要表现为层间剥离。

## 参 考 文 献

- 1 董兆和, 丁传贤. 等离子喷涂 WC 涂层. 全国热喷涂技术经验交流会论文集, 1990: 66
- 2 翟建中, 张叶方, 林惠令等. 氧化物耐磨涂层的性能与应用. 中国设备管理, 1989; 3: 31
- 3 翟建中, 张叶方, 林惠令等. 等离子喷涂氧化铝-氧化钛涂层性能. 热喷涂技术, 1987; 1: 8
- 4 Brown P E. In Loomis W R ed. New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surfaces Interactions, Noyers Publications, 1985: 771
- 5 Tong Zhaohe, Ding Chuanxian, Yan Dongsheng. International Symposium on Tribochemistry, Lanzhou, China, Aug. 25~28, 1989: 299
- 6 殷庆瑞, 唐震, 张惠静等. 扫描电声显微镜及其应用. 电子显微学报, 1990; 9: 53
- 7 董兆和, 江福明, 丁传贤等. 扫描电声显微镜在涂层缺陷检测中的应用. 无机材料学报, 1992; 7: 345
- 8 Tong Zhaohe, Ding Chuanxian, Yan Dongsheng. A fracture model for wear mechanism in plasma sprayed ceramic coatings. Wear, 1992; 155: 309
- 9 Tong Zhaohe, Ding Chuanxian, Yan Dongsheng. A chemical study of interfacial layer on worn surface of No. 45 steel, to be published

# STUDIES ON WEAR MECHANISMS OF PLASMA SPRAYED WC COATING

Tong Zhaohe

Ding Chuanxian

Yan Dongsheng

(Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences)

**ABSTRACT** WC coating was prepared using plasma spray technique and wear tests were conducted by the block-on-ring arrangement. Scanning electron microscope and scanning electron acoustic microscope were employed to examine the worn surface. The results show that wear of the coating is caused by surface cracking, and propagation of the radial cracks controls the wear process of WC coating.

**KEY WORDS** plasma spray, WC coating, wear, wear mechanism

Received: June 12, 1991.

Correspondent: Tong Zhaohe, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050.

## 第五届国际发动机用陶瓷材料和部件研讨会将在上海举行

第五届国际发动机用陶瓷材料和部件研讨会定于1994年5月29日至6月1日在中国上海举行。本次会议由中华人民共和国国家科委、国家自然科学基金委、中国科学院、中国硅酸盐学会和中国内燃机学会等五个单位赞助，由中国科学院上海硅酸盐研究所主办。会议的国际顾问委员由严东生、史绍熙学部委员和日本的齐斋进六教授共同担任主席。发动机用陶瓷材料和部件研讨会是国际上一个大型的、重要的系列性会议，自1983年以来已先后在日本、西德、美国和瑞典举行了四届。这次会议的讨论内容为：(1)材料与性能，包括相关研究、材料设计、单相陶瓷、复相陶瓷、纳米陶瓷、陶瓷复合材料、涂层、显微结构和性能研究等；(2)工艺与加工，包括低成本粉末合成、净制品尺寸成形、新烧结技术、廉价加工、高可靠性生产和连接技术等；(3)部件与试验，包括材料数据库、无损评价、寿命预测、部件设计方法、润滑和磨损、往复式发动机试验和燃气轮机试验等。会议除学术报告及海报展讲外，并设有展览会，展出各种先进结构陶瓷材料和部件以及装有陶瓷部件的先进热机及车辆等。会议的正式语言为英语。初步登记与论文摘要截止日期为1993年6月30日。凡欲参加会议及展览并索取第一轮通知者，可与中国科学院上海硅酸盐研究所符锡仁教授联系，通讯地址：上海 200050 定西路1295号。