

# 基于划痕实验激光重熔 Ni 基 WC 金属陶瓷 涂层强度分析

赵运才, 张佳茹, 林翔

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** **目的** 进一步提高以 45<sup>#</sup>钢为基体的等离子喷涂 Ni 基 WC 金属陶瓷涂层综合性能。**方法** 采用不同激光重熔工艺参数对涂层进行处理, 通过划痕实验测定涂层的内聚强度和与基体的结合强度, 前者由划痕实验中的锥形投影面积确定, 内聚强度与锥形投影面积成反比, 后者根据划痕仪反馈数据临界载荷  $L_c$  确定。**结果** 300 W 激光重熔后, 涂层锥形投影面积  $A$  为 101, 小于重熔前的 276, 即涂层内聚强度提高。激光重熔后的临界载荷  $L_c$  为 68 N, 大于重熔前的 45 N, 涂层与基体的结合强度增大。300、800、1200 W 激光功率下, 涂层锥形投影面积分别为 101.6、56.7、198.0, 临界强度分别为 68、77、41 N。激光功率达到 1500 W 时, 涂层脱落。即本试验数据中, 激光功率为 800 W 时, 涂层的内聚强度和结合强度最佳。**结论** 激光重熔等离子喷涂 Ni-WC 金属陶瓷涂层后, 涂层内聚强度和结合强度都有显著提高。不同的激光参数对涂层的性能有很大差别, 适当的参数范围可达到理想效果, 若激光功率参数取值过大, 涂层产生的残余应力大于内聚力时会导致涂层脱落, 反而降低涂层性能。

**关键词:** 激光重熔; 划痕实验; 内聚强度; 结合强度

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0157-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.026

## Strength Analysis of Scratch Test-based Laser Remelting Ni-based-WC Cermets Coating

ZHAO Yun-cai, ZHANG Jia-ru, LIN Xiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to further improve overall performance of plasma spraying Ni-based WC cermet coating on 45<sup>#</sup> steel substrate by treating the coating with different laser remelting process parameters. Cohesive strength of the coating and bonding strength with substrate were measured by conducting strength scratch test, the former was determined by cone projected area in the scratch test, the cohesive strength was inversely proportional to the cone projected area. The latter was determined based on critical load  $L_c$  in feedback data of scratch tester. After 300 W laser remelting, coating cone projected area  $A$  was 101 (less than 276 before remelting), cohesive strength of the coating has improved. After laser remelting, critical load  $L_c$  was 68 N, greater than 45 N before the remelting, bonding strength of the coating to substrate increased. The cone projected area was 101.6, 56.7 and 198.0 while critical strength was 68 N, 77 N and 41 N, respectively, at the laser power of 300 W, 800 W and

收稿日期: 2016-10-19; 修订日期: 2016-11-12

Received: 2016-10-19; Revised: 2016-11-12

基金项目: 国家自然科学基金 (51565017); 江西省教育厅科技计划项目 (GJJ14424)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(No.51565017); Jiangxi Provincial Department of Education Science and Technology Project(No.GJJ14424)

作者简介: 赵运才 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 表面工程、再制造工程、摩擦磨损与抗磨技术。

Biography: ZHAO Yun-cai (1964—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering, remanufacturing, anti-wear technology.

1200 W. The coating fell off at the laser power of 1500 W. Both cohesive strength and bonding strength of the coating improve significantly after laser remelting plasma sprayed Ni-WC cermet coating. In the test data, cohesive strength and bonding strength are the best at the laser power of 800 W. Performance of the coating varies greatly from different laser parameters, appropriate range of parameters can contribute to desired effect. Provided that the laser power parameter is too high, the coating falls off and coating performance decreases when residual stress produced by the coating is greater than cohesive force.

**KEY WORDS:** laser remelting; scratch test; cohesive strength; bond strength

在多种金属表面喷涂陶瓷涂层的热处理技术中, 等离子喷涂已发展为国内外最常用的喷涂技术, 但是涂层厚层状组织、高的孔隙率和裂纹、涂层和基体之间不牢固的机械结合, 使得涂层抗冲击性能差, 在重载、冲击和高应力工作条件下很容易脱落。针对这种情况, 国内外研究学者提出了多种解决途径, 其中激光重熔等离子喷涂涂层能有效改善涂层性能<sup>[1]</sup>。

激光重熔通过加热使原来是机械结合的涂层变为冶金结合的涂层, 并且熔化的涂层(自熔合金)与工件金属相互溶解或扩散, 形成更紧密的结合。喷涂层的激光重熔由于大功率激光束的高密度能量可在涂层一定深度处产生作用, 使孔隙率大大降低, 结合强度及表面光洁度大大改善。根据已有研究表明, 激光重熔涂层性能很大程度上依赖于激光参数<sup>[2]</sup>。涂层与基体之间的结合力以及涂层内部薄层(扁平颗粒)之间的内聚力, 即涂层的结合强度与内聚强度是涂层重要性能指标。前者决定涂层整体质量, 而后者反映涂层的摩擦学行为<sup>[3]</sup>。目前已有多种检测两种涂层强度的方法, 其中划痕试验法无需特殊试样的形状或制剂, 适用于硬度中等、厚度较薄的涂层<sup>[4]</sup>。此外, 划痕实验作为一种方便快捷的方法对于优化激光重熔参数很有用。涂层在划痕实验中通常存在两种损伤破坏形式: 一是锥形损伤出现在涂层表面, 用于表征涂层内聚强度; 二是出现在涂层与基体界面的裂纹、剥落等损伤, 作为评价涂层与基体的结合强度指标<sup>[5]</sup>。基于此,

本文通过划痕实验检测激光重熔等离子喷涂 Ni-WC 金属陶瓷涂层前后涂层结合力的改善情况, 以两种涂层结合力为性能指标优化激光重熔参数。

## 1 实验

### 1.1 涂层制备

基材为 45<sup>#</sup>钢。涂层材料为镍基碳化钨包覆型, 硬度 63, 化学成分 65%Ni60+20%WC, 规格 150/300 目(约为 15~53  $\mu\text{m}$ ), 粉末均成球形, 化学成分及性能见表 1。等离子喷涂涂层厚度为 250  $\mu\text{m}$ 。涂层与基体间的过渡层为镍包铝。

使用美国 TAFA 公司生产的 JP-8000 等离子喷涂系统, 对 45<sup>#</sup>钢表面喷涂陶瓷涂层。喷涂前, 对 45<sup>#</sup>钢基材进行表面预处理。首先用丙酮清洗表面油污等杂质, 为增强涂层与基体的结合力, 使用喷砂并打磨表面毛刺对涂层表面进行粗化。等离子喷涂工艺参数见表 2。将所制备的 Ni-WC 金属陶瓷涂层试样进行切割、镶样、截面、抛光等处理, 制成 10 mm×10 mm×10 mm 的标准试样, 并编号。等离子喷涂标准试样为 1 号试样。激光重熔设备采用南京先进激光技术研究院自主研发的万瓦级激光复合加工平台, 激光参数设置为: 光斑直径 2 mm, 间距 2 mm, 激光速度 60 mm/s。对功率为 300、800、1200 W 下激光重熔等离子喷涂涂层试样编号为 2 号、3 号、4 号试样。

表 1 试验用原始粉末化学成分及性能  
Tab.1 Chemical composition and properties of the original powder for test

wt. %

Item	C	Cr	B	Si	Fe	W	Ni
Spec	Min	1.00	10.00	2.80	3.10	18.00	Bal
	Max	1.50	13.00	3.30	3.60	23.00	
Test Value	1.13	12.55	3.06	3.52	8.58	21.50	Bal

表 2 喷涂工艺参数  
Tab.2 Spraying parameters

枪管规格 /mm	氧气压力 /kPa	氧气流量 (scfh)	煤油压力 /kPa	煤油流量 (gph)	喷涂距离 /mm	送粉速率 (g·min <sup>-1</sup> )	送粉气压力 /kPa	送粉气流量 (scfh)
100	1448	1850	1172	5.3	350	100	345	25

## 1.2 涂层划痕测试

划痕仪通过自动加载机构将连续载荷加至压头(金刚石压头)上,同时卡具试验台移动试样,使划针划过涂层表面,在此过程中综合运用声发射检测技术、摩擦力检测技术及计算机控制技术。划痕仪各传感器在压头行进形成划痕过程中反馈回的声发射信号、载荷变化量、摩擦力的变化量输入计算机,经 A/D 转换后将测量结果制成曲线图,划痕试验示意图 1 所示。

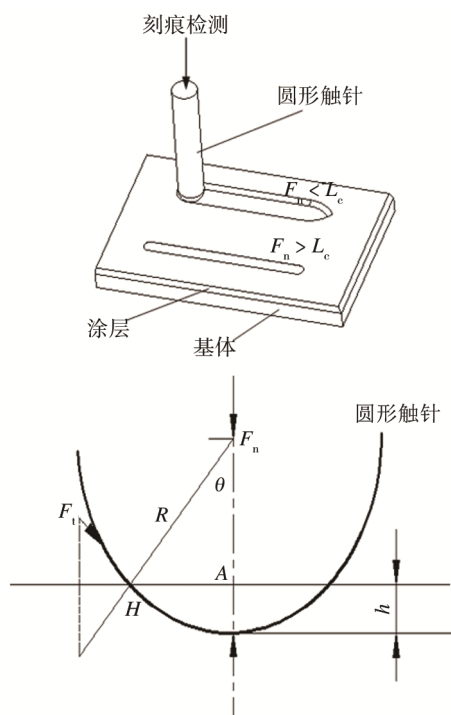


图 1 划痕试验示意图  
Fig.1 Scratch test schematic

内聚力测量是根据 Lopez 等<sup>[6]</sup>和 Nohava 等人<sup>[7]</sup>的研究,通过划痕试验方法,以恒定负荷施加在涂层的抛光横截面上进行的。其中锥形投影面积  $A$ ,如图 2 所示,与划痕负载呈单调关系,作为定性比较内聚强度大小的参数表征,面积越大则内聚强度相对越小。划痕仪在划痕测试过程中,用金刚石压头在涂层-基体组合体的涂层表面上滑动,来测定涂层与基体的结合强度。在此过程中,设备自动记录摩擦力、临界载荷、摩擦系数、压头穿透深度与剩余深度等参数。连续性地增加载荷  $F_n$ ,当达到一定值(即临界载荷值  $L_c$ )时,涂层开始从基体脆性剥离,此时划痕仪会产生高强度连续波动声发射信号,当连续波动信号出现明显跳跃时,此点的载荷即为涂层的临界载荷值<sup>[8]</sup>。

设计两组实验:第一组 1 号与 2 号进行激光重熔前后试样划痕实验对比,第二组 2 号、3 号、4 号进行不同参数激光重熔试样划痕实验对比。在每个试样涂层的抛光横截面上进行 3 次贯穿划痕,比较其阴影

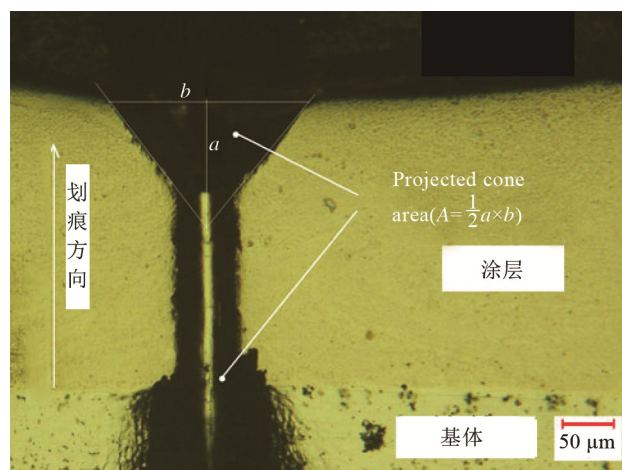


图 2 划痕内聚力测试  
Fig.2 Cohesion scratch test

面积平均值,定性确定涂层的内聚强度大小。其中划痕参数设为:恒定载荷 80 N,走距 3 mm,速度 30 mm/min。通过在每个试样的涂层表面加载线性增加的载荷,进行结合强度试验,比较涂层与基体的结合强度。划痕参数设为:线性载荷 0~100 N,划痕走距 5 mm,速度 30 mm/min。采用电子显微镜(SEM)对划痕表面形貌进行分析,对划痕仪划痕过程中记录的参数进行划痕力学分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 激光重熔前后涂层强度分析

内聚力测试等离子喷涂涂层与激光重熔后涂层划痕形貌 SEM 对比实验结果如图 3 所示。因为是对比实验,排除划痕实验形貌照片比例尺因素,实验测量结果如表 3 所示。根据三角形面积公式  $A = \frac{1}{2} a \cdot b$ ,1 号试样 3 组划痕实验锥形投影面积的平均值为 276.0,2 号试样锥形投影面积的平均值为 101.6。1 号试样锥形投影面积平均值远大于 2 号试样,由此可见,激光重熔后,涂层内聚强度明显提高。

根据划痕仪划痕光学显微镜(OM)形貌测试结合强度,如图 4 所示。

由图 4 可见,1 号试样表面较平整,但有微观裂纹,2 号试样表面形貌呈现凹凸不平的状态,未出现裂纹。这是因为激光重熔降低了涂层孔隙率,并提高了涂层颗粒间的内聚力,从而防止裂纹的扩展。载荷从 0 N 增加至 100 N 的过程中,早期阶段,划痕内部平整,随着  $F_n$  增大,划痕周围开始呈现细微裂纹,当达到某一载荷时,涂层开始出现块状脱落(此时载荷为临界载荷),且随着载荷的增加,划痕呈逐渐加深的趋势。不同的是,图 4a 出现划痕较早且划痕宽度较窄,图 4b 出现划痕较迟且划痕宽度较宽。根据

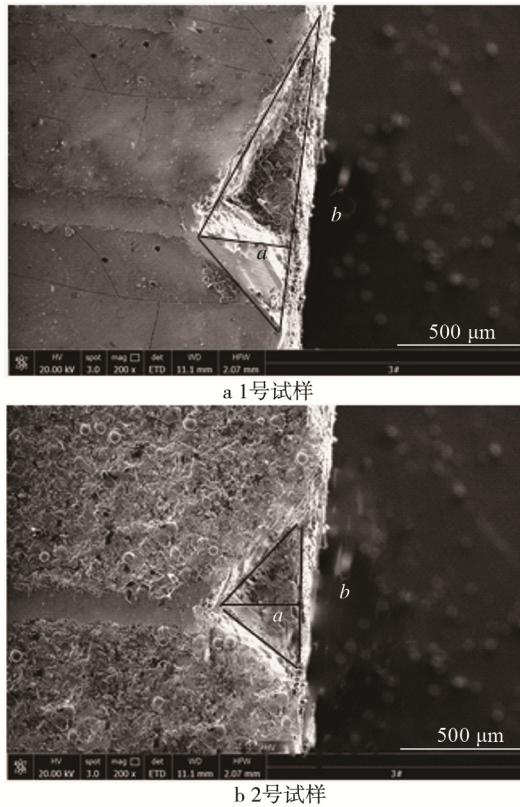


图3 SEM激光重熔前后涂层划痕锥形面积对比  
Fig.3 Scratch coating conical area before and after comparison SEM laser remelting

表3 1、2号试样锥形投影面积参数值  
Tab.3 Taper projected area of the parameter values of sample 1&2

试样	锥形投影宽度 <b>b</b>	锥形投影长度 <a< a=""></a<>	锥形投影面积 <i>A</i>	平均值
1号	46.2	12.0	277.2	276.0
	47.5	11.3	268.4	
	46.3	12.2	282.4	
2号	20.0	10.1	101	101.6
	19.8	10.3	102.0	
	19.6	10.4	101.9	

ATTAR 等<sup>[9]</sup>的推导公式(1),在临界载荷点,宽度越大,临界载荷  $L_c$  越大,可知图 4a 较图 4b 的临界载荷小。激光重熔后,涂层的结合强度得到提高。

$$L_c = \frac{d_c}{\mu_c v_f} (2t_f E_f W)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:  $\mu_c$  为临界载荷作用下摩擦因数;  $d_c$  为临界载荷作用下划痕深度;  $t_f$  为涂层厚度;  $E_f$  为涂层弹性模量;  $W$  为涂层-基体界面粘附能;  $v_f$  为泊松比。

图 5a、图 5b 分别对应 1 号、2 号试样数据,其中  $F_n$  为施加载荷,  $F_t$  为压头与涂层摩擦力。由图 5a 可知,划痕压头载荷 (0~60 N) 线性递增,划痕仪反馈的涂层摩擦力总体呈线性增加的趋势,当载荷增加到 45 N 时,摩擦力突然增大,此时压头深度已突破

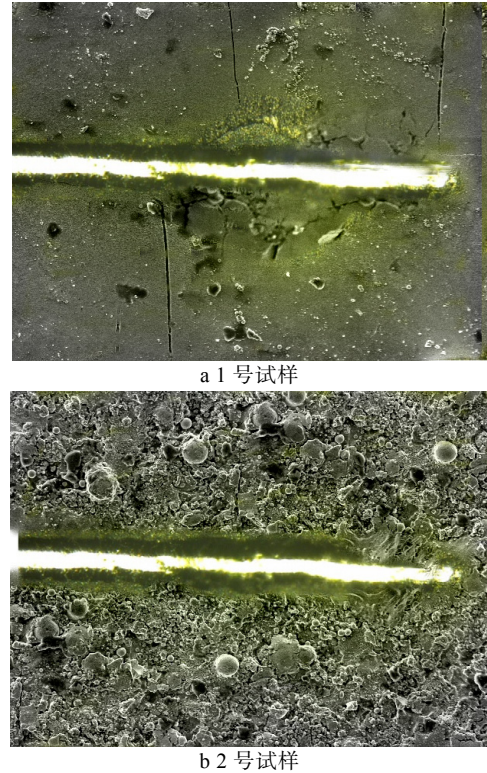


图4 激光重熔前后涂层划痕 OM 形貌对比  
Fig.4 OM scratch coating morphology before and after comparison of laser remelting

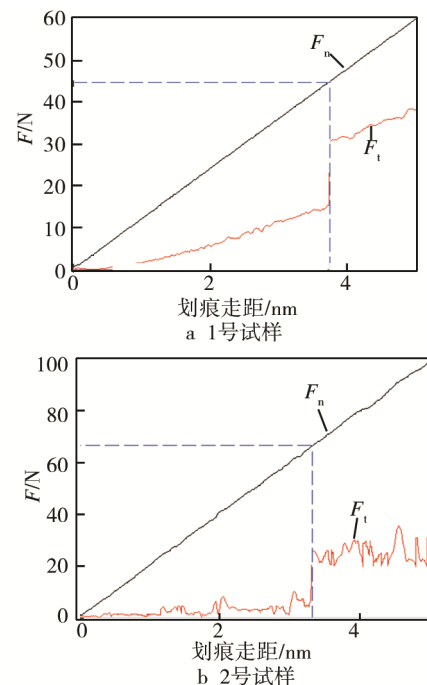


图5 激光重熔前后划痕仪载荷和摩擦力变化  
Fig.5 Scratch tester load and friction changes before and after laser remelting

涂层厚度,涂层开始脱落,摩擦力由低到高突然增大。将 1 号试样的临界载荷 (45 N) 作为判断等离子喷涂 Ni-WC 金属陶瓷涂层与基体结合强度的指标。由图 5b 可知,载荷达 68 N 时,摩擦力发生突变,说明此



时 2 号试样的临界载荷为 68 N。2 号试样的临界载荷比 1 号试样的大, 表明经激光重熔后涂层与基体间的结合力增大。图 5a 和图 5b 的摩擦都突然增大, 说明基体的摩擦力远大于涂层的摩擦力, 喷涂 Ni-WC 金属陶瓷涂层可改善基材 45<sup>#</sup>钢的耐磨性能。图 5a 的摩擦力较平滑, 图 5b 则呈现出锯齿形, 这是因为 2 号试样涂层的微观形貌呈现凹凸不平状(从图 4 可以看出), 其影响了划痕仪声发射信号对摩擦力数据的收集, 导致反馈回的摩擦力呈现不稳定状态, 侧面反映出激光重熔在提高涂层性能的同时, 也对其表面形貌造成了不良影响。

## 2.2 不同激光重熔参数涂层强度分析

采用与第一组实验相同的方法计算第二组实验的锥形面积, 实验测量结果得到 2 号、3 号、4 号试样的平均锥形面积分别为 101.6、56.7、198.0。由此可知, 800 W 激光功率重熔涂层的内聚强度最大, 1200 W 最小, 且 1200 W 激光功率重熔涂层的内聚强度仍稍高于重熔前。由图 6 可知, 划痕仪压头划破涂层锥形端口处皆呈现层状结构, 图 7 为端口放大图, 这与等离子喷涂多层涂层的沉积过程有关。根据 Choi 等人<sup>[11]</sup>的非线性脱层理论, 涂层的分层结构决定了其不均匀内聚力产生的不同配置的界面裂纹效率, 导致涂层脱落初期裂纹分层扩展。划

痕仪划破涂层消耗的能量为抵抗涂层内聚力(简化为抗拉强度与抗剪强度)所做的功。由消耗能量公式(2)可知, 在边缘分层的情况下, 能量消耗率  $G$  接近稳定状态, 这时独立裂纹的长度一旦达到几个层的厚度, 涂层整体脱落。但由于等离子喷涂分层结构每层的抗剪强度不同, 在整体脱落时呈现出参差不齐的边缘。

$$G = G_0 \left[ 1 - \left( \frac{b_0}{b} \right)^2 \right] \left[ 1 + 3 \left( \frac{b_0}{b} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中:  $G_0$  为破坏涂层每层所需的能量, 其与内聚力成正比;  $b_0$  为涂层破坏时的裂纹长度;  $2b$  为锥形端口长度。边缘分层断裂示意图如图 8 所示。

图 9a、b、c 分别对应 2 号、3 号、4 号试样的数据, 临界载荷分别为 68、77、41 N。由实验结果可得, 800 W 激光功率重熔涂层与基体的结合力最强, 300 W 次之, 且两涂层与基体的结合力都高于重熔前。1200 W 时, 涂层与基体的结合力低于重熔前。激光重熔实验中, 激光功率达到 1500 W 时, 涂层从基体直接脱落, 如图 10 所示。

图 10a 为过大的激光功率导致涂层失效脱落, 图 10b 为 600 W 功率下涂层的整体形貌, 涂层完好。本实验中, Ni-WC 金属陶瓷涂层与 45<sup>#</sup>钢基体材料在热膨胀系数上有很大差异, 且激光重熔加工过程是短时间加热后又迅速冷却, 大功率激光在扫描涂层过程中

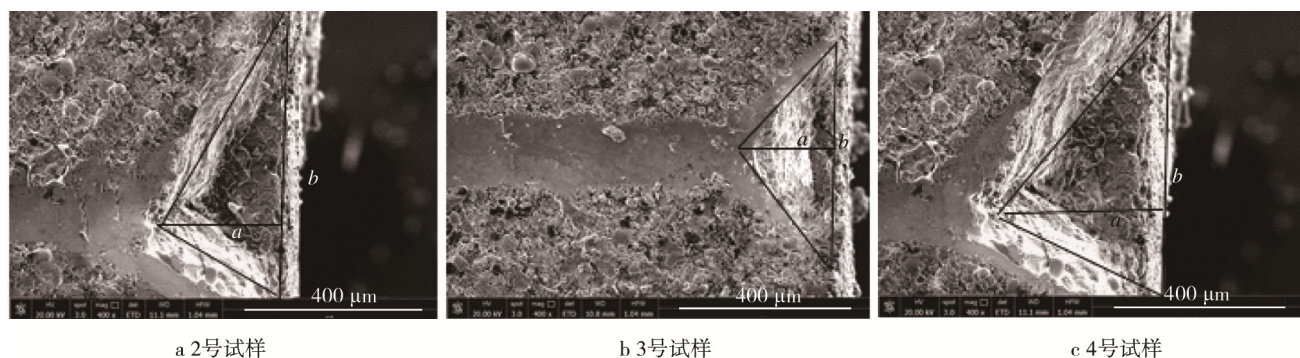


图 6 SEM 不同功率激光重熔划痕锥形面积对比

Fig.6 Comparison of remelting scratch cone areas of different power laser of SEM

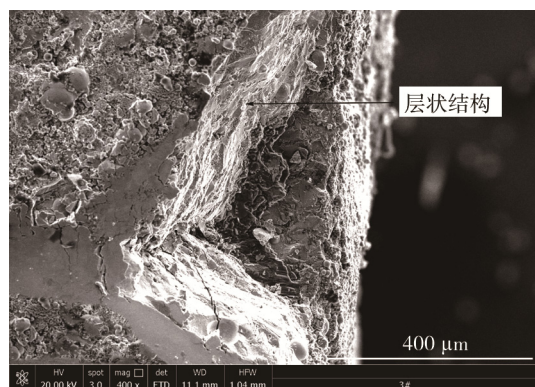


图 7 SEM 划痕层状断裂形貌

Fig.7 SEM scratch cone layered fracture morphology

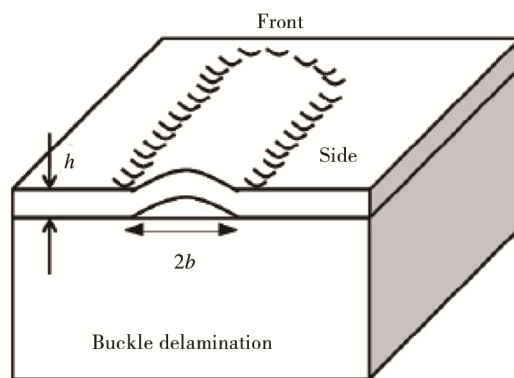


图 8 边缘分层断裂示意

Fig.8 Hierarchical schematic edge fracture

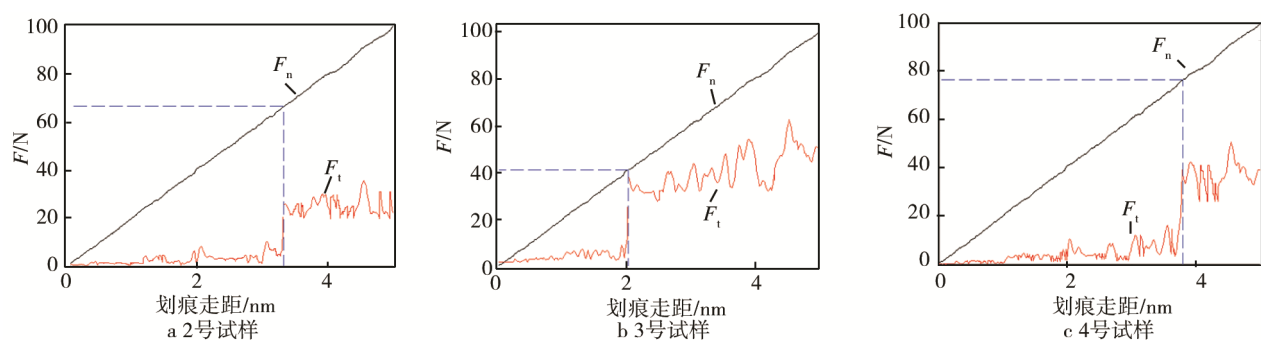
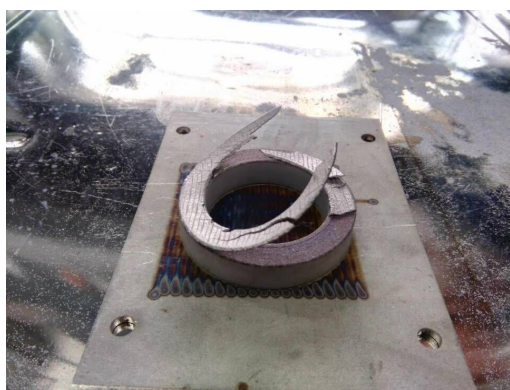


图9 3种不同激光重熔参数下划痕仪载荷和摩擦力变化

Fig.9 Scratch tester load and friction change of three different parameters of laser remelting



a 1500 W 激光功率涂层形貌



b 600 W 激光功率涂层形貌

图10 两种不同激光功率重熔涂层效果

Fig.10 Remelting coating effect of two different power laser

产生很大的残余拉应力。若激光功率过大,熔池寿命变短,温度梯度增大,气体来不及排出,裂纹敏感性随之增加。在残余拉应力与裂纹共同作用力大于涂层间的结合力时,涂层从基体脱落。由此可知,对等离子喷涂进行激光重熔二次热处理,其功率应选用合适的范围,超出一定范围反而降低涂层性能。

### 3 涂层强度与涂层整体质量探讨

图11为等离子喷涂 Ni-WC 涂层的典型表面和截面 SEM 形貌,从图 11a 中看出,等离子喷涂涂层表

面呈现明显的未熔球状颗粒、空洞和裂纹。从图 11b 可以看出,涂层与基体为典型的机械结合,界面间的裂纹明显,存在少量涂层剥离,涂层为典型的等离子喷涂层弯曲的层状叠加结构。图 12 为激光重熔 Ni-WC 涂层表面及截面的 SEM 形貌,可以看出,通过激光重熔,等离子喷涂涂层中的未熔融颗粒、空洞以及裂纹等缺陷得以消除,致密度提高。这是因为:等离子喷涂陶瓷涂层存在的孔隙及微裂纹,主要归因于部分喷涂粒子处于半熔状态,未能完全展平,未熔粒子以颗粒形式存在于涂层中,熔融粒子的体积收缩及熔融粒子冷却过程中析出气体等因素所致。涂层微裂纹的产生,还归因于陶瓷涂层的脆性,及陶瓷液滴冷凝收缩难以松弛而产生较大的拉应力。激光重熔处理使原等离子涂层发生重新熔化和结晶,涂层的组织结构发生根本变化。从图 12 可看出,重熔后,重熔层与基材无明显界面,涂层厚度的分布非常稳定,涂层与基材形成了优异的冶金结合,涂层的结合强度得到显著改善。

涂层的结合强度取决于多个因素,其中包括孔隙率和微裂纹<sup>[11]</sup>。划痕实验中,涂层内部的空隙、未熔颗粒及裂纹等缺陷作为潜在的裂纹源,在外力作用下诱导裂纹沿着划痕路径产生。随着载荷的增加,内部裂纹扩展延伸至涂层表面与界面处,高载荷下基体与涂层结合界面处的长裂纹导致涂层剥离脱落。这种破坏机制表明,等离子喷涂中存在的缺陷会降低涂层的结合强度。经激光重熔后,等离子喷涂涂层的缺陷得以消除,致密度提高,涂层内部结构的转变阻止了载荷增加过程中裂纹的传播方向。已有研究表明<sup>[12]</sup>,只有能承受一定塑性变形的基体才具有较高的临界载荷。Ni 金属颗粒塑性性能远大于 WC 陶瓷颗粒<sup>[13]</sup>,由于激光重熔后, Ni 颗粒的熔融率提高,涂层的组成相发生变化,结果增加了涂层的可塑性,此时裂纹前端发生塑性变形,涂层吸收能量并停止开裂。在划伤表面,由于涂层显微表面凹凸不平引起压头摩擦力不规则地波动,会压碎晶体进入涂层内部。激光重熔后,涂层内部孔隙等结构缺陷减少,保证了涂层分子



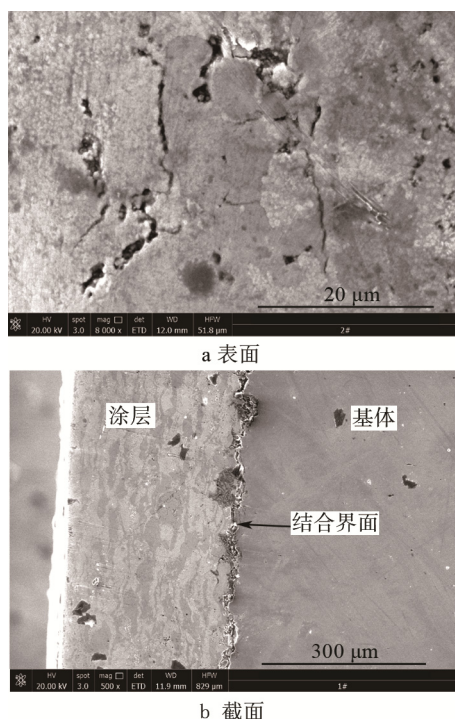


图 11 等离子喷涂涂层及结合界面 SEM 形貌

Fig.11 SEM morphology of plasma spray coating and bonding interface

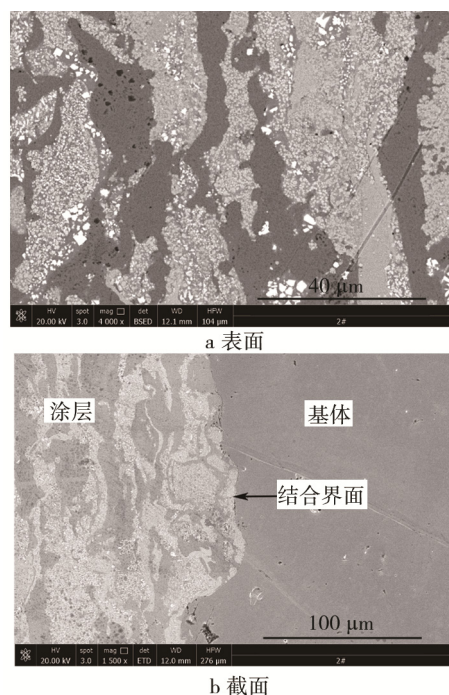


图 12 激光重熔涂层及结合界面 SEM 形貌

Fig.12 SEM morphology of laser remelting coating and bonding interface

之间的结合力, 在提高内聚力的同时增强了涂层耐开裂性质。同时金属 Ni 颗粒熔融率的提高起到了良好的润滑效果, 降低了涂层的摩擦系数。综上所述, 对于以机械结合为主要结合方式的热喷涂涂层, 涂层强度可间接反映涂层的整体质量。

## 4 结论

1) 激光重熔等离子喷涂 Ni-WC 金属陶瓷涂层, 涂层内聚强度和结合强度都有显著提高, 经此二次热加工后可获得较理想的涂层整体质量。不同的激光参数对涂层的性能有很大影响, 适当的参数范围内可达到理想效果, 若激光功率参数取值过大, 产生的涂层残余应力大于内聚力时会导致涂层脱落, 反而降低涂层性能。

2) 通过在陶瓷粉末中掺渗金属颗粒以修改碳化物涂层的化学组合物, 是提高涂层机械性能和功能性质的有效技术。划痕试验在测试涂层内聚强度和结合强度方面是一个相对容易和快速的方法, 实际应用中采用划痕对比试验, 可作为质量控制技术表征薄涂层凝聚的有效方法。

## 参考文献:

- [1] 王东生, 田宗军, 王松林, 等. 激光重熔等离子喷涂 WC 颗粒增强镍基涂层组织及高温磨损性[J]. 焊接学报, 2012, 33(11): 13—17.  
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, WANG Song-lin, et al. High Temperature Wear Behavior of WC Particles Reinforced Ni-based Plasma-sprayed Coating by Laser Remelting[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(11): 13—17.
- [2] 王东生, 田宗军, 屈光, 等. 工艺参数对激光重熔等离子喷涂 Ni 基 WC 复合涂层影响[J]. 应用激光, 2012, 32(5): 365—369.  
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, QU Guang, et al. Effect of Process Parameters on Plasma-sprayed Ni-based and WC Compositated Coatings by Laser Remelting[J]. Applied Laser, 2012, 32(5): 365—369.
- [3] ALEKSANDAR V, SAIOA A, GREGORY F. Evaluation of Adhesion/Cohesion Bond Strength of the Thick Plasma Spray Coatings by Scratch Testing on Coatings Cross-sections[J]. Tribology International, 2011, 44: 1281—1288.
- [4] LU P, XIAO X, LUKITSCH M, et al. Interface Characterizations of Diamond-coated Tools by Scratch Testing and Simulations[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206: 1860—1866.
- [5] HAWTHORNE H M, XIE Y. An attempt to Evaluate Cohesion in WC/Co/Cr Coatings by Controlled Scratching[J]. Meccanica, 2001, 36: 675—682.
- [6] LOPEZ E, BELTZUNG F, ZAMBELLI G. Measurement of Cohesion and Adhesion Strengths in Alumina Coatings Produced by Plasma Spraying[J]. Journal of Materials

- Science Letters, 1989, 8(3): 346—348.
- [7] NOHAVA J, BONFERRONI B, BOLELLI G. Interesting Aspects of Indentation and Scratch Methods for Characterization of Thermally-sprayed Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(4): 1127—1131.
- [8] 于鹤龙, 张伟, 郭永明, 等. 等离子喷涂镍基合金涂层内聚强度的截面划痕表征[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 570—577.
- YU He-long, ZHANG Wei, GUO Yong-ming, et al. Bond Behaviors Characterization of the Plasma Sprayed NiCrBSi Coatings by Scratch Testing on Coatings Cross Section[J]. Tribology, 2014, 34(5): 570—577.
- [9] ATTAR F, JOHANNESSON T. Adhesion Evaluation of Thin Ceramic Coatings on Tool Steel Using the Scratch Testing Technique[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 78(1/3): 87—102.
- [10] MARZANNA K, LUKSAZ B, MARTA R, et al. The Structure and Bond Strength of Composite Carbide Coatings (WC-Co+Ni) Deposited on Ductile Cast Iron by Thermal Spraying[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25: 502—509.
- [11] SUNG R C, HUTCHINSON B J W, EVANS B A G. Delamination of Multilayer Thermal Barrier Coatings[J]. Mechanics of Materials, 1999, 7: 431—447.
- [12] 陈响明, 易丹青, 李秀萍, 等. 硬质合金复合涂层的结合强度与失效机理[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(3): 464—470.
- CHEN Xiang-ming, YI Dan-qing, LI Xiu-ping, et al. Bonding Strength and Failure Mechanism of Cemented Carbide with Multilayer Coatings[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(3): 464—470.
- [13] GUPTA R N, DSA A K, NAGAHUNUMAIAH S H. Pulse Electro Codeposited Ni-WC Composite coating[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31: 42—47.