

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.02.002

高温环境下超声滚压工艺参数与 涂层表面性能的相关性

章仕磊, 赵运才, 张峻, 何杨, 王鑫, 王喜茂, 刘存宇

(江西理工大学机电工程学院, 江西赣州 341000)

摘要:在45#钢基体表面等离子喷涂得到Fe基WC涂层,将喷涂后的试样进行磨削加工,探究不同加工参数下超声滚压对Fe基WC涂层表面性能的变化。利用正交试验研究在不同的超声滚压(USRP)加工参数下,强化处理后Fe基WC涂层粗糙度的变化,明确各加工参数对表面粗糙度影响的显著性。采用三维白光干涉形貌仪、SEM等手段分析Fe基WC涂层的表面粗糙度、截面组织形貌、显微硬度和残余应力。结果表明,工艺参数对粗糙度影响的程度顺序为:温度>主轴转速>静压力>下压量。在温度为650℃、主轴转速为125 r/min、静压力为0.5 MPa、下压量为0.25 mm的工艺参数下,高温超声滚压(HT+USRP)处理后Fe基WC涂层表面粗糙度 R_a 由原本磨削的1.298 μm 和常温超声滚压(NT+USRP)的0.658 μm 降至0.211 μm ;在温度为650℃、主轴转速为125 r/min、静压力为0.4 MPa、下压量为0.25 mm的工艺参数下,涂层表面发生塑性变形,晶粒细化,显微硬度由原本磨削后未超声滚压(Untreated)的588.3 HV和NT+USRP的712.5 HV升至1058.8 HV。NT+USRP后的残余压应力为-359.7 MPa,HT+USRP后降至-308.2 MPa,但HT+USRP后试样的残余压应力层深度能达到800 μm 。HT+USRP工艺明显改善了Fe基WC涂层表面性能质量,其中温度对工艺的影响最为显著。

关键词:超声滚压;Fe基WC涂层;显微硬度;残余应力

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2023)02-0007-08

Correlation between Ultrasonic Rolling Process Parameters and Surface Properties of Coating at High Temperature

ZHANG Shilei, ZHAO Yuncai, ZHANG Jun, HE Yang, WANG Xin, WANG Ximao, LIU Cunyu

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

Abstract: To obtain Fe-based WC coating by plasma spraying on the surface of 45# steel matrix, and then grind the sprayed samples to explore the changes of the surface properties of Fe-based WC coating by ultrasonic rolling under different processing parameters. The roughness of Fe-based WC coating was studied by orthogonal test under different ultrasonic rolling(USRP) processing parameters, and the significant influence of processing parameters on surface roughness was determined. The surface roughness, cross-section morphology, microhardness and residual stress of Fe-based WC coating were analyzed by using three-dimensional white light interferometer and scanning electron microscope (SEM). Results show that the order of influence of process parameters on roughness is temperature>spindle speed>static pressure>lower pressure. Under the process parameters of 650℃, 125 r/min

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51965032)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51965032)

作者简介: 章仕磊(1997—),男,硕士研究生,研究方向:表面工程,机械优化设计。

通信作者: 赵运才(1964—),男,博士,研究方向:表面工程,机械优化设计。

引用格式: 章仕磊,赵运才,张峻,等. 高温环境下超声滚压工艺参数与涂层表面性能的相关性[J]. 有色金属工程,2023,13(2):7-14.

ZHANG Shilei, ZHAO Yuncai, ZHANG Jun, et al. Correlation between Ultrasonic Rolling Process Parameters and Surface Properties of Coating at High Temperature[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(2): 7-14.

spindle speed, 0.5 MPa static pressure and 0.25 mm downward pressure, after high temperature ultrasonic rolling (HT+USRP) treatment, the surface roughness R_a of Fe-based WC coating decreased from 1.298 μm in original grinding and 0.658 μm in normal temperature ultrasonic rolling (NT+USRP) to 0.211 μm . When the temperature is 650 $^{\circ}\text{C}$, the spindle speed is 125 r/min, the static pressure is 0.4 MPa, and the downward pressure is 0.25 mm, the coating surface has plastic deformation and grain refinement. The microhardness, untreated, rises to 1 058.8 HV from 588.3 HV before grinding or 712.5 HV before NT+USRP. After NT+USRP, the compressive residual stress is -359.7 MPa, which decreases to -308.2 MPa after HT+USRP, but the depth of the compressive residual stress layer can reach 800 μm after HT+USRP. The HT+USRP process can significantly improve the surface properties of Fe-based WC coating, and the temperature shows the most significant effect on the process.

Key words: ultrasonic surface rolling process; Fe-based WC coating; microhardness; residual stress

等离子喷涂技术拥有高速度、高温、高稳定性等优点,所制成的涂层质量高、性能好^[1-2],但是等离子喷涂涂层存在许多孔隙、裂纹和粗大的层状结构,导致涂层结合强度不高、致密性较差,影响正常服役。因此,进行后处理就显得尤为重要,常见的表面后处理技术有激光重熔^[3]、激光烧结^[4]、激光冲击^[5]、喷丸^[6]、热等静压^[7]、超声滚压^[8]等。其中超声滚压强化是一种新兴的表面强化技术,利用静压力和超声振动的相互作用,使材料表层发生塑性变形,形成变形层^[9]。相比于其他后处理技术具有绿色环保节能、操作简便、效率高等优点。该工序采用“削峰填谷”的方式降低了粗糙度、改善表面组织形貌的完整性和材料的致密性,通过塑性变形方式细化了晶粒尺度,同时还引入了残余压应力,控制了裂纹的萌生与延伸^[10-11]。

文中出现的未超声滚压、超声滚压、常温超声滚压、高温辅助超声滚压工艺分别用 Untreated、USRP、NT+USRP、HT+USRP 表示。相较于 NT+USRP,引入温度场进行 USRP 可以进一步提升高强度、低塑性材料的塑性变形和晶粒细化效果。YIN 等^[12]通过 USRP 处理后,对 Inconel690 合金表面在室温和 300 $^{\circ}\text{C}$ 温度下进行微动磨损试验时发现,当在室温下进行微动磨损试验时,表面会出现许多裂纹和磨损碎屑,当在 300 $^{\circ}\text{C}$ 下磨损时,磨损面会形成氧化层,在磨损件和基体之间起到了缓冲的作用,辅以温度场的磨损程度远小于在室温下的磨损程度。何扬等^[13]在研究 HT+USRP 下主轴转速对涂层组织结构和性能的影响时,发现辅以温度场能够改善涂层组织结构,减少涂层的气孔和裂纹,使涂层内部的孔隙率降低,同时还提升了涂层的显微硬度和表面残余压应力。李刚^[14]对热处理前后 HIP Ti-6Al-4V 材料经 NT+USRP 和表面 HT+USRP 进行研究,发现温度加热到 140 $^{\circ}\text{C}$ 辅助超声滚压的

热处理材料硬度最大,为 511 HV,相较于 NT+USRP 材料(457 HV)提高了 11.8%。温度到达 160 $^{\circ}\text{C}$ 时,辅助的超声滚压的未热处理材料硬化层深度最大,为 250 μm 。表面残余应力随着温度的增加不断减小,温度场的加入更好的改善了晶粒细化和应变强化。据统计,前人的研究基本上是在基体上直接进行 USRP 或温度辅助超声滚压(T+USRP),在基体表面覆有涂层再进行 USRP 强化处理的相关报道很少。

本文在试样基材表面上进行等离子喷涂,再引入温度场对其进行 USRP 强化处理。分析温度、静压力、主轴转速及下压量对加工后试样表面粗糙度的影响,同时对 Untreated、NT+USRP、HT+USRP 后试样的截面组织形貌、表面显微硬度和表层残余应力进行了分析,可为金属陶瓷涂层的后处理强化技术借鉴参考。

1 试验

1.1 试验材料与试样制备

试验的基材选用的是 45 $\#$ 钢,利用车床将其加工成圆环状,尺寸如图 1 所示,高为 10 mm,外径为 54 mm,内径为 38 mm。在 45 $\#$ 钢圆环的表面上进行等离子喷涂,喷涂材料选用的是 Fe40 和 Ni60+15%WC 两种粉末,粉末按照一定比例均匀混合在一起,喷涂材料的化学成分如表 1 所示。

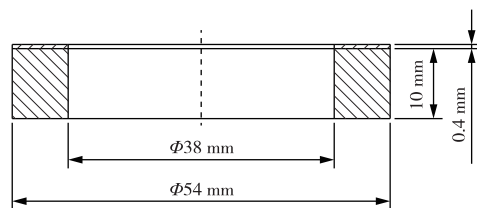


图 1 圆环试样

Fig. 1 Ring sample

表1 热喷涂材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of spray material

/%

Samples	Cr	B	Si	C	Fe	Ni
Fe40	16.4	2.1	1.9	<0.5	Bal.	8.9
Ni60	17.5	3.8	4.0	0.88	8.8	Bal.

涂层制备前依次使用丙酮、无水乙醇、去离子水对 45# 钢圆环进行超声清洗,以便去除基体表面残留的杂质和灰尘,用氮气风干后进行喷砂粗化,目的是为了是使涂层和基体接触更充分,增强两者间的结

合力。采用进口的 JP-8000 型等离子喷涂系统在 45# 钢圆环表面先喷涂 Ni/Al 层,再喷涂 0.4 mm 厚的 Fe 基 WC 涂层,等离子喷涂工艺参数如表 2 所示。

表2 等离子喷涂工艺参数

Table 2 Plasma spraying process parameters

Barrel specification/ cm	Oxygen flow/ (L · min ⁻¹)	Powder air flow/ (L · min ⁻¹)	Powder feeding pressure/MPa	Powder feeding rate/(g · min ⁻¹)	Spraying distance/mm
10	800	12.0	0.35	80	300

将喷涂后的试样进行磨削加工后,采用感应加热设备 A1-518 型人工智能温度控制器及辅助感应加热等模块化系统装置对等离子喷涂后的圆环试样进行加热处理,待加工到指定温度时,立刻将其装夹到 C616-10 车床上,然后采用表面强化装置进行 USRP 表面强化处理。保持加工频率为 25 kHz、振幅为 6 μ m、进给速度为 0.2 min/r、滚压次数 3 次等参数不变。USRP 后,通过线切割将圆环试样切割成 10 mm×9 mm×6 mm 的块状试样,随后在 YM-2A 型金相试样磨抛机上依次使用 500#、1000#、1500#、2000# 砂纸和抛光布进行打磨抛光,直至镜面为止。使用无水乙醇和去离子水超声清洗,再用硝酸乙醇腐蚀试样横截面 10 s,快速清洗后用氮气风干,最后将试样进行真空封装。

1.2 检测方法

采用三维白光干涉形貌仪测定试样涂层表面粗

糙度 S_a 、 S_q 、 S_z 值。采用场发射扫描电子显微镜 (ZEISS Sigma, SEM) 进行微观组织形貌观察和元素分析。采用 X 射线衍射仪 (XRD, Empyrean 型) 对涂层进行残余应力测定。使用 SHYCHVT-5Z 型维氏硬度计对金属陶瓷涂层表面进行测量,施加载荷为 2 N,持续时间为 10 s。

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度的正交试验设计

为了试验结果能达到最佳效果,并减小试验的工作量,采用正交试验的方法进行参数优化。本次 USRP 正交试验中,主要的研究对象为试样温度、初始静压力、主轴转速及下压量。表 3 为 4 因素 4 水平的试验方案,表中温度、静压力、主轴转速及下压量的各水平数值都可改变单因素得到^[15]。

表3 USRP 参数的因素与水平

Table 3 Factors and levels of ultrasonic rolling parameters

Factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A Temperature/°C	250	450	650	850
B Static pressure/MPa	0.2	0.3	0.4	0.5
C Spindle speed/(r · min ⁻¹)	125	180	250	355
D Press amount/mm	0.15	0.20	0.25	0.30

表 4 为正交试验的方案及其相关计算,为了分析工艺参数和涂层表面粗糙度的相关性,列出了涂层经 USRP 后表面粗糙度和极差 (R)、方差计算的结果,各数据均由试验和计算得出。其中, K_i 为因素所有水平对应粗糙度之和的平均值,本试验为四水平; R 为极差; P_i 为因素所有水平对应粗糙度之和; W 为粗糙度的平方和; Q 为

粗糙度的平方平均数; S_t 为总离差平方和; S_e 为试验误差。从极差分析结果中可以看出,工艺参数对粗糙度影响的程度顺序为: 主轴转速 > 温度 > 静压力 > 下压量。表 4 中的方差计算不够说明各试验因素对粗糙度的影响,因此表 5 还继续对粗糙度的方差进行了分析,采用 F 检验值。当 $F_i > F_{0.1}(3, 6) = 3.29$ 时,可以判断该因素对最

终粗糙度的影响较大,用“**”表示;当 $F_i < F_{0.1}(3,6) = 3.29$ 时,可以判断该因素对最终粗糙度的影响不大,用“*”表示。根据数据分析可以发现,对于表面粗糙度来说,不同的因素对粗

糙度的影响各不相同,工艺参数对粗糙度影响的程度顺序为:温度>主轴转速>静压力>下压量。虽然极差与方差的分析结果有区别,但整体影响方向性是一致的。

表 4 正交试验方案和极差、方差计算结果

Table 4 Orthogonal test scheme and calculation results of range and variance

No.	A Temperature/℃	B Static pressure/MPa	C Spindle speed/(r · min ⁻¹)	D Press amount/mm	Surface roughness/μm
1	250	0.2	125	0.15	0.325
2	250	0.3	180	0.20	0.555
3	250	0.4	250	0.25	0.351
4	250	0.5	355	0.30	0.498
5	450	0.2	180	0.25	0.405
6	450	0.3	125	0.30	0.283
7	450	0.4	355	0.15	0.381
8	450	0.5	250	0.20	0.525
9	650	0.2	250	0.30	0.484
10	650	0.3	355	0.25	0.569
11	650	0.4	125	0.20	0.161
12	650	0.5	180	0.15	0.225
13	850	0.2	355	0.20	0.495
14	850	0.3	250	0.15	0.588
15	850	0.4	180	0.30	0.397
16	850	0.5	125	0.25	0.296
K_1	0.432	0.427	0.266	0.379	$R = k_{\max} - k_{\min}$ $P = x_1 + \dots + x_{16}$ $q = \frac{1}{16} P^2$ $W = \sum_{i=1}^{16} x_i^2$ $S_t = W - q$
K_2	0.398	0.498	0.395	0.434	
K_3	0.359	0.322	0.487	0.405	
K_4	0.444	0.386	0.485	0.415	
R	0.16	0.105	0.221	0.104	
P_1	1.729	1.709	1.065	1.519	
P_2	1.594	1.995	1.582	1.736	
P_3	1.439	1.290	1.948	1.621	
P_4	1.776	1.544	1.943	1.662	
Q	2.868	2.737	2.801	2.677	
S_t	0.197	0.066	0.130	0.006 7	

表 5 表面粗糙度的方差分析表

Table 5 Analysis of variance of surface roughness

Factors	Sum of squares of deviations(S_t)	Degree of freedom	Mean square	F	Significance
A	0.197	3	0.065	29.402	**
C	0.130	3	0.043	19.402	**
B	0.066	3	0.022	9.85	**
S_e	0.006 7	3	0.002 2		

2.2 加工工艺参数对表面粗糙度的影响

利用正交试验对表面粗糙度分析可知,对表面粗糙度影响较大的两个因素是温度和主轴转速,下面将这两个因素在 USRP 过程中对表面粗糙度的作用规律进行分析。

2.2.1 温度对表面粗糙度的影响

加工工艺参数应当在合适的范围内选择,考虑到加工后试样的表面粗糙度、硬度的综合效果,并结合上述正交单因素试验,选择主轴转速为 125 r/min、

静压力为 0.4 MPa 和下压量为 0.20 mm。图 2 为 USRP 前后试样的表面粗糙度 R_a 变化规律,试验的试样中 Untreated、NT+USRP 和 (250、450、650、850 ℃) HT+USRP 的表面粗糙度值 R_a 分别为 1.306、0.712 和 0.452、0.268、0.162、0.608 μm,可以明显观察出 Untreated 和 NT+USRP 的试样粗糙度要比 HT+USRP 后的试样大许多,HT+USRP 的粗糙度随温度的增大呈现先减小后增大的趋势,粗糙度能达到的最小值是 0.162 μm,此时最

佳辅助温度为 650 ℃。相较于 Untreated, 温度为 650 ℃时, 粗糙度改善了最显著, 下降了 1.144 μm , 即降低了 87.6%; 相较于 NT+USRP 试样, 粗糙度下降了 0.55 μm , 即降低了 77.2%。

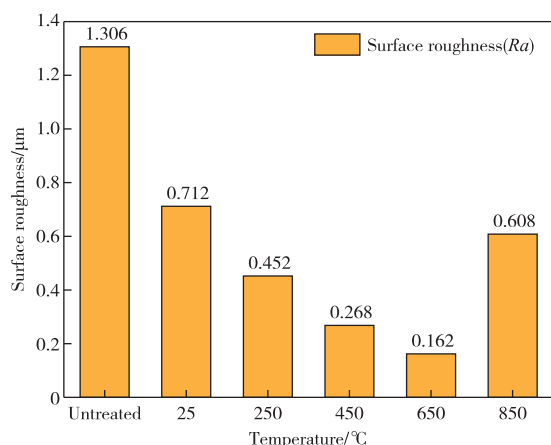


图2 USRP前后Fe基WC涂层的表面粗糙度(不同温度)

Fig. 2 Surface roughness of Fe-based WC coating before and after ultrasonic rolling (with different temperatures)

出现上述现象的主要原因是: Untreated 的试样进行了磨削加工, 由于磨削是粗加工, 导致涂层表面凹凸不平, 粗糙度高^[16]。NT+USRP 的试样在超声动态冲击力与滚压力作用下, 试样发生剧烈的塑性变形, 由于塑性流动的作用, 凹坑被凸起材料流动填平, 达到了“削峰填谷”的效果, 降低了表面粗糙度。HT+USRP 的试样进行了高温加热, 涂层经高温后被软化, 加剧了塑性变形效果, 硬度和强度都下降。由于温度场的协同作用, 有效加快了应力波传送, 还减缓了涂层表面的冷作硬化, 所以更容易发生塑性流动^[17]。有效改善了 Fe 基 WC 涂层表面的缺陷。但温度到了 850 ℃时, 涂层表面的粗糙度会增大, 可能是由于温度过高导致界面应力减小, 位错运动衰减。因此想要得到高质量的涂层, 在对试样进行 USRP 时, 应采用较高的温度进行辅助。

2.2.2 主轴转速对表面粗糙度的影响

在温度分别为 25 和 650 ℃、静压力为 0.5 MPa、下压量为 0.25 mm 的条件下进行 USRP 试验。图 3 为 USRP 试样表面 Fe 基 WC 涂层在不同主轴转速下的粗糙度。Untreated 和 NT+USRP (主轴转速为 125 r/min) 的试样粗糙度 R_a 分别为 1.298 和 0.602 μm , 经 HT+USRP 后试样的粗糙度与主轴转速呈正相关关系, 主轴转速为 125、180、250 和 355 r/min 时, Fe 基 WC 涂层的表面粗糙度 R_a 分别为 0.211、0.326、0.487 和 0.743 μm , 主轴转速为

125 r/min 时, 涂层的粗糙度改善最为显著, 相比于 Untreated 和 NT+USRP 的试样分别下降了 1.087 和 0.447 μm , 即减小了 83.7% 和 65.5%。另外, 在静压力为 0.5 MPa 和下压量为 0.25 mm、主轴转速为 125 r/min 条件下进行了 USRP 试验, 观察温度对表面粗糙度影响, 试验的试样中 Untreated、NT+USRP 和 (250、450、650、850 ℃) HT+USRP 的表面粗糙度值 R_a 分别为 1.312、0.722 和 0.531、0.332、0.203、0.612 μm , 温度为 650 ℃时, 相比于 Untreated 和 NT+USRP 的试样粗糙度分别下降了 1.109 和 0.519 μm , 即减小了 84.5% 和 71.9%。比较发现主轴转速对粗糙度的影响略低于温度对粗糙度的影响, 与上述正交试验的结果相符。

主轴转速过大会导致在 USRP 过程中, 试样表面点的加工和未加工共存的跳跃性现象, 使得试样表面会出现很多凹凸不平的点, 加工不均匀^[18]。在主轴转速较低时, 能确保试样表面的周向加工很均匀, 塑性变形均匀, 加工效果更佳。所以, 试样的粗糙度随着主轴转速的增大而增大。

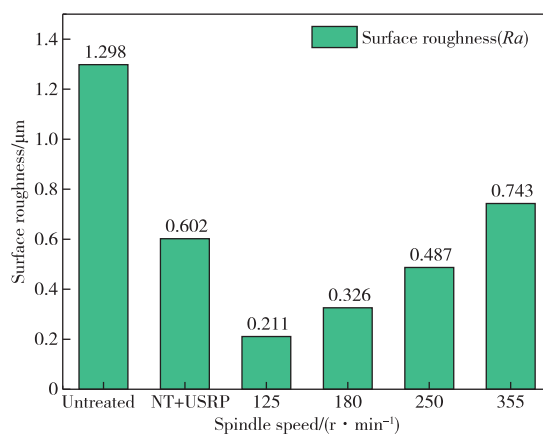


图3 USRP前后Fe基WC涂层的表面粗糙度(不同主轴转速)

Fig. 3 Surface roughness of Fe-based WC coating before and after ultrasonic rolling (different spindle speeds)

2.3 截面组织形貌

在温度分别为 25 和 650 ℃、主轴转速为 125 r/min、静压力为 0.4 MPa 和下压量为 0.25 mm 的条件下进行 USRP 试验, 图 4 为 Untreated、NT+USRP (25 ℃) 和 HT+USRP (650 ℃) 试样的截面组织形貌。可以看到等离子喷涂后, Untreated (图 4a) 试样的涂层截面有许多堆积在一起的层状结构, 层状结构间还存在许多裂纹和孔隙^[19], 涂层中还存在大量未熔的 WC 颗粒且随机分布, 喷涂过程中对材料快速加热融化和冷却凝固^[20], 合金粉末

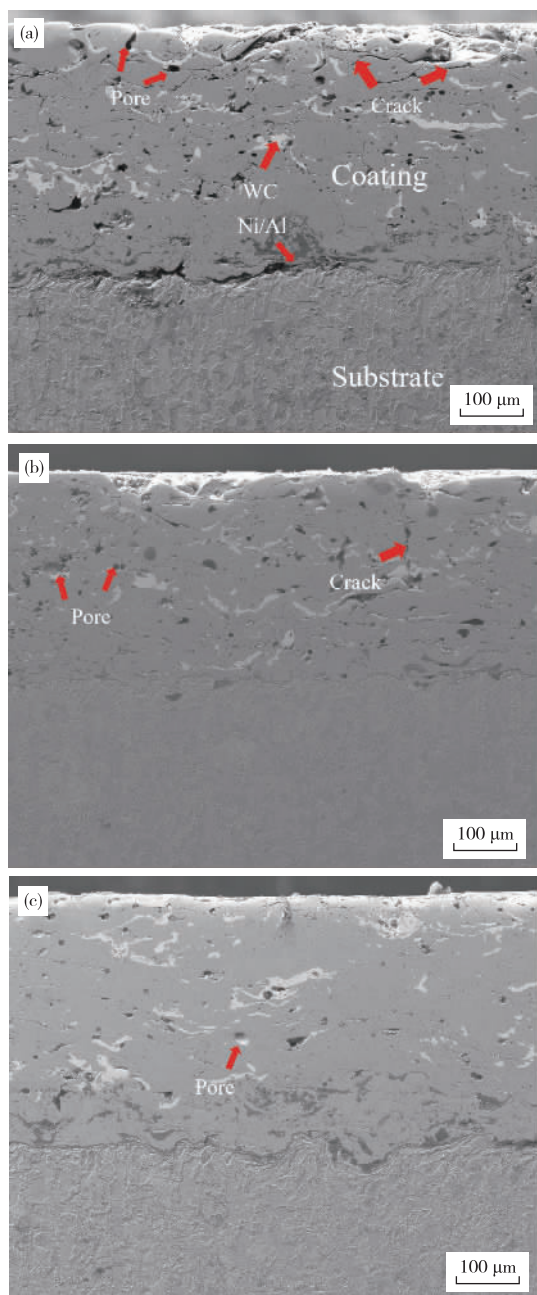


图 4 USRP 前后涂层截面组织形貌

Fig. 4 Microstructure of coating section before and after ultrasonic rolling

和陶瓷颗粒受热不均匀,颗粒不会完全重叠,产生了许多孔隙和气孔。经 NT+USRP 后(图 4b)试样涂层的层状结构减少,组织结构致密性提高,孔隙和裂纹减少。图 4(c)为 HT+USRP 后试样涂层截面的微观组织结构形貌,可以看到涂层表面较为平整,层状结构基本消失,孔隙和裂纹进一步减少,这是因为在高温环境下,涂层软化,塑性变形抗力降低,位错滑移能力更强,使晶粒进一步细化,孔隙和裂纹被铁基合金填充,涂层微观形貌质量不断提高^[21]。

2.4 显微硬度

在温度分别为 25 和 650 ℃、主轴转速为 125 r/min、静压力为 0.4 MPa 和下压量为 0.25 mm 的条件下进行 USRP 试验,对滚压前后涂层表面到基体内部的显微硬度进行测量,Untreated、NT+USRP(25 ℃)和 HT+USRP(650 ℃)试样的显微硬度沿基体内部的变化曲线如图 5 所示。Untreated 试样的显微硬度沿涂层至基体方向差别不大;经 NT+USRP 后试样的显微硬度明显高于 Untreated 的试样表面,显微硬度沿涂层至基体方向逐渐降低;经 HT+USRP 后试样的显微硬度,相较于前两者有显著的提升。三种工艺下试样的显微硬度最终都在基体下方趋于稳定。HT+USRP 试样的表层显微硬度达到了 1 058.8 HV,相较于 Untreated 试样(588.3 HV)提高了 80%,次表层显微硬度达到了 1 126.2 HV,相较于 Untreated 试样(593.1 HV)提升了 90%。NT+USRP 试样的表层硬度(712.5 HV)和次表层硬度(758.2 HV),相较于 Untreated 试样的表层硬度和次表层硬度分别提高了 21.1%和 27.8%。USRP 后,试样由于加工硬化、晶粒细化的作用,导致了次表层的硬度要高于表层硬度。

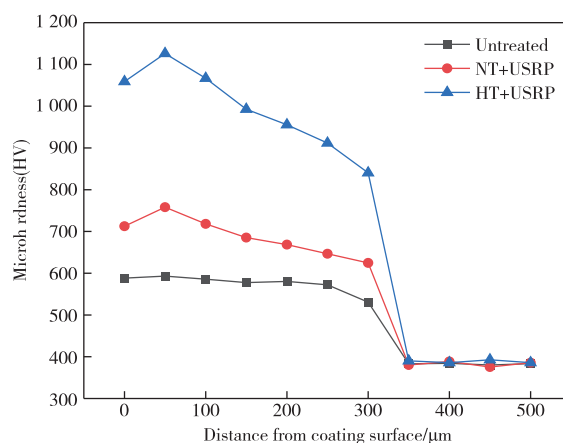


图 5 USRP 处理前后涂层的显微硬度

Fig. 5 Microhardness of coating before and after ultrasonic rolling treatment

在 USRP 过程中,涂层发生了塑性变形、加工硬化、晶粒细化,在塑性流动过程中,位错密度不断增加,使位错墙和位错缠结湮灭重排,在原本的粗晶粒中形成大量的晶界和亚晶界,通过晶界之间的相互作用,亚晶粒被切分形成纳米晶粒^[21]。高温软化涂层会降低其塑性变形抵抗能力,导致晶粒细化程度更为显著。显微硬度沿深度方向逐渐降低,最终

稳定在 385 HV 左右,晶粒尺寸沿深度方向逐渐增大,这种现象也符合霍尔-帕奇(Hall-Petch)表达式^[22]:

$$H_v = H_0 + K \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: H_v 为显微硬度; H_0 为原始表面硬度; K 为材料系数; d 为晶粒的平均直径。

2.5 表面残余应力

在温度分别为 25 和 650 °C、主轴转速为 125 r/min、静压力为 0.3 MPa 和下压量为 0.15 mm 的条件下进行 USRP 试验,对滚压前后涂层表面残余应力进行测量,Untreated、NT+USRP(25 °C)和 HT+USRP(650 °C)的残余应力如图 6 所示。Untreated 的试样涂层表面呈现的是残余拉应力,为 158.8 MPa;NT+USRP 后试样,涂层表面的残余应力由原本的拉应力转变成压应力,为 -359.7 MPa;HT+USRP 后的试样,涂层的残余压应力降至 -308.2 MPa。

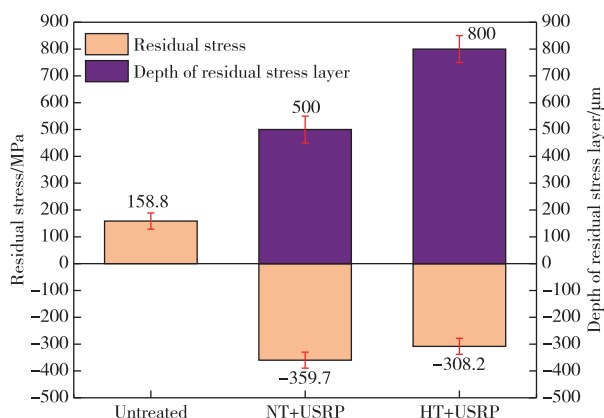


图 6 USRP 处理前后涂层的残余应力和残余应力层的深度
Fig. 6 Residual stress of coating and depth of residual stress layer before and after ultrasonic rolling treatment

在等离子喷涂中,涂层颗粒经历了融化-堆积-凝固等过程,先沉积凝固后的颗粒对后沉积凝固的颗粒会产生一个拉力的作用,这是形成残余拉应力的原因所在;在 NT+USRP 过程中,涂层表面会发生剧烈的塑性变形,工具头的冲击能量沿涂层至基体方向不断降低,不均匀的变形引入了残余压应力^[13,23];在 HT+USRP 过程中,高温环境会降低涂层塑性变形抗力,即涂层的屈服应力减小,涂层内部的残余压应力定会小于屈服应力,对应的残余压应力也跟着减小。

然而,残余压应力降低并不代表 HT+USRP 表面强化效果比 NT+USRP 效果差。残余压应力

与显微硬度、晶粒组织有很大的关联性,NT+USRP 后试样的残余压应力层深度为 500 μm,但 HT+USRP 后试样的残余压应力层深度能达到 800 μm,比前者高出了 90%。

3 结论

1) HT+USRP 对涂层表面的各方面性能都有提升。在温度为 650 °C、主轴转速为 125 r/min、静压力为 0.5 MPa 和下压量为 0.25 mm 时,涂层表面粗糙度 R_a 由原本磨削后 Untreated 的 1.298 μm 和 NT+USRP 的 0.658 μm 降至 0.211 μm。

2) 在温度为 650 °C、主轴转速为 125 r/min、静压力为 0.4 MPa 和下压量为 0.25 mm 时,涂层表面发生塑性变形,晶粒细化,显微硬度由原本磨削的 588.3 HV 和 NT+USRP 的 712.5 HV 升至 1058.8 HV,分别提高了 80% 和 21.1%;NT+USRP 后的残余压应力为 -359.7 MPa,HT+USRP 后降至 -308.2 MPa,但 HT+USRP 后试样的残余压应力层深度能达到 800 μm,比 NT+USRP(500 μm)高出了 90%。

3) 在 USRP 过程中,工艺参数对粗糙度影响的程度顺序为温度>主轴转速>静压力>下压量。温度与涂层显微硬度和残余应力层的深度呈正相关,都随着温度升高而增大。温度与残余应力呈负相关,随着温度的升高而减小。

参考文献:

- [1] 韩志海,王海军,王斌利,等.超音速等离子喷涂制备先进陶瓷涂层的特点[J].有色金属(冶炼部分),2008(增刊1):61-66.
HAN Zhihai, WANG Haijun, WANG Binli, et al. Characteristics of advanced ceramic coatings by supersonic plasma spray [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2008(S1): 61-66.
- [2] 郭玉珠.激光与等离子复合制备热障涂层性能研究[D].天津:中国民航大学,2020.
GUO Yuzhu. Study on the properties of thermal barrier coating for laser and plasma composite preparation [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [3] 赵运才,上官绪超,张继武,等.激光重熔改性 WC/Fe 等离子喷涂涂层组织及其耐磨性能[J].表面技术,2018,47(3):20-27.
ZHAO Yuncai, SHANGGUAN Xuchao, ZHANG Jiwu, et al. Microstructure and wear resistance of WC/Fe plasma

- sprayed coatings modified by laser remelting [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(3): 20-27.
- [4] 水东莉, 李刚. 激光烧结原位合成钨精原矿粉/Al-Cu 复合材料组织结构及致密性[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(7): 26-32.
- SHUI Dongli, LI Gang. Densification and microstructure of tungsten ore/Al-Cu composites synthesized in situ by laser sintering [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(7): 26-32.
- [5] SALIMIARIZI A, FOROOZMEHR E, BADROSSAMAY M, et al. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6 [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 77: 112-117.
- [6] YANG C, LIU Y G, LI M Q. Characteristics and formation mechanisms of defects in surface layer of TC17 subjected to high energy shot peening [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 509: 144711. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144711.
- [7] 王新锋, 贺卫卫, 朱纪磊, 等. 热等静压铁钴镍基高温合金的显微组织和力学性能[J]. *粉末冶金技术*, 2020, 38(5): 371-376.
- WANG Xinfeng, HE Weiwei, ZHU Jilei, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-Co-Ni based superalloy prepared by hot isostatic pressing[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2020, 38(5): 371-376.
- [8] 刘洁. 超声滚压加工对改善金属表面性能的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
- LIU Jie. Ultrasonic surface rolling processing research to improve the metal properties[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013.
- [9] 赵波, 姜燕, 别文博. 超声滚压技术在表面强化中的研究与应用进展[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 42-67.
- ZHAO Bo, JIANG Yan, BIE Wenbo. Ultrasonic rolling technology in surface strengthening: progress in research and applications [J]. *Acta Aero-nautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 42-67.
- [10] 张飞, 赵运才. 超声表面滚压改善 45# 钢表层特性及疲劳性能的研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(9): 185-190.
- ZHANG Fei, ZHAO Yuncai. Research on surface characteristics and fatigue properties of 45# steel by ultrasonic surface rolling [J]. *Surface Technology*, 2017, 46(9): 185-190.
- [11] 孟成, 赵运才, 张新宇, 等. 超声滚压表面强化技术的研究现状与应用[J]. *表面技术*, 2022, 51(8): 179-202.
- MENG Cheng, ZHAO Yuncai, ZHANG Xinyu, et al. Research status and application of ultrasonic rolling surface reinforcement technology[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(8): 179-202.
- [12] YIN M, YIN H, ZHANG Q, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on the high temperature fretting wear behavior of Inconel 690 alloy [J]. *Wear*, 2022, 500: 204347. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204347.
- [13] 何扬, 赵运才, 张峻, 等. 高温辅助超声滚压下主轴转速对涂层组织结构和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2022, 43(5): 170-176.
- HE Yang, ZHAO Yuncai, ZHANG Jun, et al. Effect of spindle speed on surface microstructure and properties of coating under high temperature assisted ultrasonic surface rolling process [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2022, 43(5): 170-176.
- [14] 李刚. 热等静压 Ti-6Al-4V 材料的表面加热辅助超声复合滚压强化机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- LI Gang. Study on the strengthening mechanism of surface heating assisted ultrasonic composite rolling HIP Ti-6Al-4V alloy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [15] 张天增. 超声滚压装置及其工艺试验的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- ZHANG Tianzeng. Research on ultrasonic rolling device and its processing experiment [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [16] 詹友基, 周家骐, 许永超, 等. 纳米晶粒硬质合金磨削加工表面质量试验研究[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(6): 39-45.
- ZHAN Youji, ZHOU Jiaqi, XU Yongchao, et al. Experimental research on surface quality of nano-grain cemented carbide grinding [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(6): 39-45.
- [17] 蒋书祥. 热力耦合高速二维超声滚压表面形变强化机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
- JIANG Shuxiang. Research on the mechanism of surface strain strengthening in thermo-mechanical coupling high speed two-dimensional ultrasonic rolling process [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [18] 张飞. 超声表面滚压工艺参数对 45# 钢摩擦磨损性能的影响研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- ZHANG Fei. Research on the effect of ultrasonic surface rolling extrusion parameters on friction and wear properties of 45# steel [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018.