

WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响

孙宁, 方艳, 张家奇, 黄昭祯, 顾振杰, 雷剑波*

天津工业大学物理科学与技术学院激光技术研究所, 天津 300387

摘要 采用激光熔覆技术成功制备了 Inconel 625/WC-12Co 复合涂层, 对添加有 WC-12Co (质量分数为 5%、10%、15%) 复合涂层的物相成分、微观组织、显微硬度和摩擦磨损性能进行了研究。结果表明: WC-12Co 颗粒在涂层中分布均匀, 大部分呈完整球形形态, 仅有少部分发生了熔解; 随着 WC-12Co 添加量的增加, 复合涂层的组织明显细化, 涂层中有多种碳化物产生, 主要包括 NbC、 $M_{23}C_6$; 未熔化的 WC-12Co 颗粒抑制粗大柱状晶的生长, WC-12Co 颗粒周围以等轴晶和短的柱状晶为主, Mo、Nb 两种元素在晶界发生了明显偏析; 复合涂层的显微硬度从 264 HV_{0.2} 逐渐增加到 308 HV_{0.2}, 磨损率从 $10.5004 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ 降低至 $0.5768 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。故 WC-12Co 的添加可以显著增强 Inconel 625 基复合涂层的耐磨性能。

关键词 激光加工; 激光熔覆; 颗粒增强复合材料; 摩擦磨损

中图分类号 TG148

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0602106

1 引言

金属基复合材料(MMCs)一般是以金属或合金为基体, 并以纤维、晶须、颗粒等为增强体的复合材料, 通过基体与增强体的协同作用可以提高材料性能^[1-2]。按基体材料分类, 主要包括铝基^[3]、镍基^[4-5]、钛基^[6]复合材料。其中镍基复合材料因具有良好的抗氧化性、耐腐蚀性、高延展性和高韧性, 广泛应用于航空航天、海洋等领域^[7-9]。

Inconel625 合金(IN625)是典型的镍基合金, 主要通过难熔金属铌和钼固溶强化镍铬基体^[10]。IN625 组织稳定、性能优异, 是喷气发动机和各种工业燃气轮机的主要材料, 可应用于高温和高磨损的极端环境^[11-12]。随着现代工业和航空航天事业的快速发展, 零部件服役环境条件变得更加苛刻, 对性能更高的 IN625 零部件的需求越来越大^[13]。

颗粒增强 IN625 金属基复合材料具有较高的材料硬度和较强的耐磨性能, 已成为近年来的研究

热点。Cooper 等^[14]采用激光熔化沉积制备质量分数均为 5% 的 SiC、 Al_2O_3 、TiC 颗粒增强 IN625 复合材料。结果表明: 添加 SiC 使复合材料硬度提高 130%, 但其组织结构有大量的孔隙和裂纹等缺陷特征; 添加 Al_2O_3 后的复合材料组织结构同样存在裂纹缺陷, 且对材料硬度没有明显影响; 添加 TiC 使得复合材料具有良好的组织结构特征, 同时硬度提高了 30%。Hong 等^[15]采用激光金属沉积工艺制备了超细(粒径为 5~7 μm)不规则 TiC 颗粒(质量分数为 5%)增强 IN625 复合材料, 发现能量密度过低会出现微孔, 适当增加线能量密度可以使组织细化, 细化的柱状枝晶与均匀分布在基体中的增强颗粒相结合, 提高了材料的耐磨性能。Huebner 等^[16]采用激光熔覆方法制备了 IN625/WC 复合涂层, 发现工艺参数选择不当会导致贯穿性裂纹出现, 优化工艺参数后制备复合涂层, 由于 WC 粉末粒径太小(约 0.54 μm), 在涂层中未观察到明显的 WC 颗粒分布, WC 熔解在涂层中生成了 NbC、 W_2C 、 $M_{23}C_6$

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-07-28; 录用日期: 2020-08-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103604)、天津市教委项目(2018KJ206)、天津市青年拔尖人才计划(TJ TZJH-QNBJRC-2-15)、工信部绿色升级项目(RZJC-XM19-004)

* E-mail: ljbtj@163.com

等多种碳化物。以上研究表明,颗粒增强 IN625 基复合材料,易产生裂纹、孔隙等缺陷,且细粉末颗粒易溶解在熔池中,很难在 IN625 基体中均匀分布并保持完整形态。

与 SiC、TiC 等碳化物相比,WC 具有硬度高、热膨胀系数低、易被熔融金属润湿等优点,是提高零件耐磨性能的理想材料,其作为增强相加入 IN625 中可以满足零件在燃气轮机等高磨损条件下的要求。MMCs 零件制造中的裂纹会显著影响材料的性能,WC 含量的提高会导致裂纹产生。WC 含量较高时,高温梯度引起的热应力以及复合材料中热膨胀系数不匹配程度增加,导致裂纹产生。有研究表明,当 WC 添加量的质量分数为 16.7% 时,复合材料容易出现裂纹^[17]。为了提高 WC 的增强作用,本文选择粒径为 45~100 μm 的包覆型 WC-12Co,其中钴热力学性质优异,可以避免激光直接作用于 WC,有利于减缓 WC 的溶解并保持颗粒的完整性,提高复合材料性能。采用激光熔覆(LC)技术制备 WC-12Co 颗粒增强 IN625 金属基复合涂层,研究

WC-12Co 质量分数 m (WC-12Co) 为 5%、10%、15% 的颗粒对 IN625 基体微观组织和耐磨性能的影响。

2 实 验

基材采用 Q235 钢。IN625 粉末粒径为 53~150 μm , 钴包球形 WC-12Co 粉末粒径为 45~100 μm , 两种粉末材料的元素组成分别列于表 1、表 2, 粉末形貌如图 1 所示。将 IN625 粉末和 WC-12Co 粉末置于干燥箱中在 110 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥 2 h, 待冷却至室温后制备质量分数为 5%、10%、15% 的 WC-12Co 混合粉末。

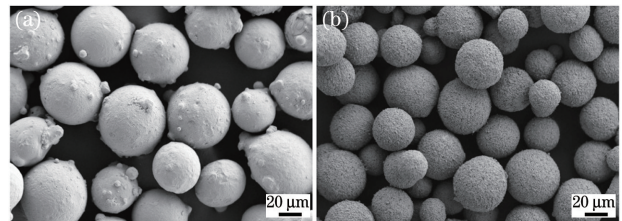


图 1 粉末形貌。(a) IN625; (b) WC-12Co

Fig. 1 Powder morphology. (a) IN625; (b) WC-12Co

表 1 IN625 元素成分及含量

Table 1 Element composition and content of IN625

unit: %

Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Mn, Si	Ti, Al
<58	20.0-23.0	8.0-10.0	3.15-4.15	<5	<0.1	<0.5	<0.4

表 2 WC-12Co 元素成分及含量

Table 2 Element composition and content of WC-12Co

unit: %

Co	C	Fe	O	W
11.9	5.36	0.03	0.1	Bal.

本实验在氩气环境下进行,送粉器(Raycham RC-PGF-D)送气量为 5 L/min、送粉量为 6.5 g/min;激光器(Raycus RFL-C1000)波长为 1080 nm,光斑直径为 2 mm;优化后的工艺参数如下:激光功率为 750 W,扫描速度为 8.5 mm/s,搭接率为 50%。激光熔覆实验现场如图 2 所示。

将待测试样在腐蚀液 $[V(\text{HCl}) : V(\text{HNO}_3) : V(\text{HF}) = 6 : 2 : 1, V$ 表示体积]中浸蚀 180 s。金相显微镜(CX40M)和扫描电子显微镜(ZEISS Sigma 300)用于分析微观组织和元素组成;X 射线衍射仪(D/MAX-2500)用于确定物相组成,衍射角范围为 $30^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 、扫描速度为 $8 (^{\circ})/\text{min}$;显微硬度计(THV-1MDT)用于测量样品的显微硬度,从涂层顶部开始测试,避开未熔化的 WC-12Co 颗粒;环块

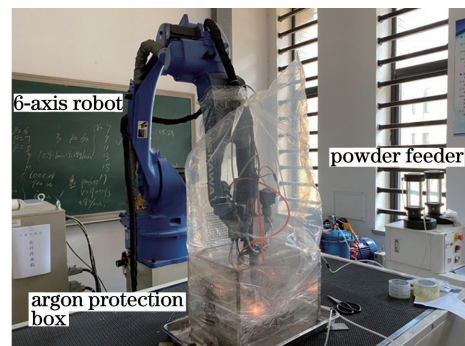


图 2 激光熔覆实验现场

Fig. 2 Laser cladding experimental site

型磨损试验机(M-2000)用于测试样品的摩擦磨损性能,载荷为 200 N,测试时间为 240 min,对磨环转速为 200 r/min,对磨环材料为 GCr15 钢,硬度 60HRC;白光干涉三维表面轮廓仪(Phase Shift MicroXAM-3D)用于测量磨痕宽度与深度;建立三维模型。

3 结果和讨论

3.1 X 射线衍射(XRD)分析

图 3 为复合涂层的 XRD 图谱。由于激光的高

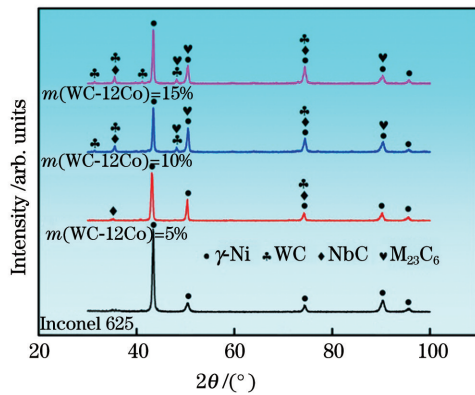


图 3 复合涂层的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD spectra of composite coatings

能量输入使 WC-12Co 颗粒在 IN625 基体中部分熔解并发生再结晶现象,它能与基体中的其他元素结合成各种金属间相,如 NbC、 $M_{23}C_6$ 等碳化物^[17-18]。IN625 基体中 Nb 含量较高,当 WC 部分熔解时会导致二次碳化物 NbC 在晶界析出。当添加质量分

数为 5% 的 WC-12Co 时,可以检测到 NbC 和少量的纯 WC 相。当添加的质量分数提高至 10% 时,WC 熔解程度增大,析出硬化相 $M_{23}C_6$ 开始出现,并且 WC 相的衍射峰增多。当添加的质量分数进一步提高至 15% 时,可以看到更多的 WC 衍射峰出现。 $M_{23}C_6$ 、NbC 的析出以及 WC 硬质相的添加,会使复合材料的硬度提升^[16]。有研究表明,在晶界析出的碳化物可以提高材料的耐磨性能^[19]。由于添加的 WC-12Co 的质量分数为 10% 和 15% 时涂层中析出相很多,所以推测其耐磨性能会更好。

3.2 微观组织分析

图 4 为四种涂层横截面的微观形貌。可以看出 WC-12Co 颗粒在涂层中均匀分布,其中大部分保持完整球形形态,部分发生了分解或边缘熔解,这是由于 Co 含量较少并且分布不均,WC-12Co 粉末因承受热的能力不同,在激光的作用下发生破碎所致。

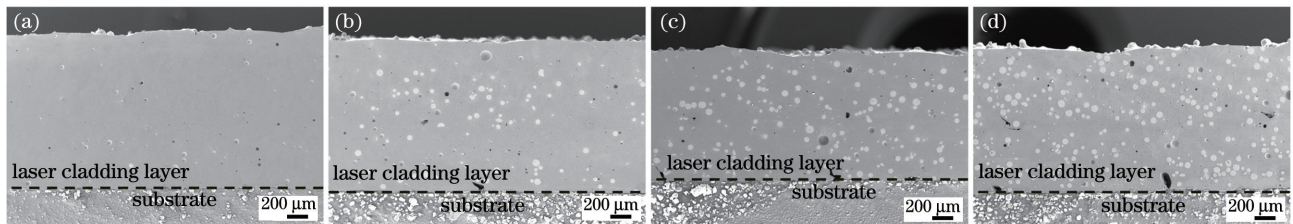


图 4 四种涂层的横截面形貌。(a) IN625; (b) 添加有质量分数为 5% 的 WC-12Co 的 IN625 基体; (c) 添加有质量分数为 10% 的 WC-12Co 的 IN625 基体; (d) 添加有质量分数为 15% 的 WC-12Co 的 IN625 基体

Fig. 4 Cross-sectional morphology of four coatings. (a) IN625; (b) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=5\%$; (c) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=10\%$; (d) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=15\%$

图 5 为三种复合涂层的微观组织。可以看出未熔化的 WC-12Co 会抑制晶粒长大,粗大的柱状

晶在遇到 WC-12Co 后停止生长,并在其周围会生成细小的等轴晶[图 5(b)],质量分数为 15% 的

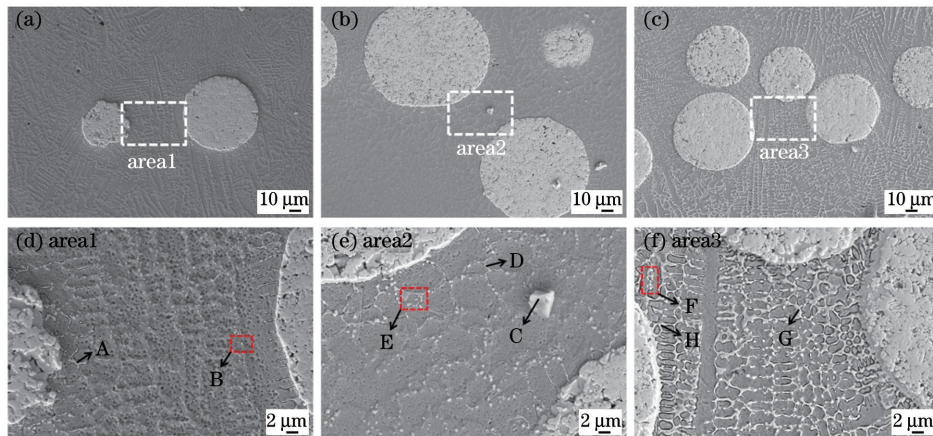


图 5 WC-12Co 含量不同时复合涂层的微观组织。(a)(d) WC-12Co 质量分数为 5%; (b)(e) WC-12Co 质量分数为 10%; (c)(f) WC-12Co 质量分数为 15%

Fig. 5 Microstructures of composite coatings with different contents of WC-12Co. (a)(d) $m(\text{WC-12Co})=5\%$; (b)(e) $m(\text{WC-12Co})=10\%$; (c)(f) $m(\text{WC-12Co})=15\%$

WC-12Co 涂层的晶粒更加细小,以上现象说明添加 WC-12Co 可以细化晶粒和微观组织。图 5(d)~(f)分别是图 5(a)~(c)中三个虚线区域的高倍扫描电镜(SEM)图,在三种涂层的晶界均

可以观察到共晶的析出,WC-12Co 添加量越多,析出越显著。对析出位置进行点和区域 EDS 扫描,扫描位置在图中标明,元素成分与含量列于表 3。

表 3 图 5(d)~(f)中不同位置 EDS 扫描的元素成分与质量分数

Table 3 Element composition and mass fraction of EDS scanning at different positions in Figs. 5(d)~(f) unit: %

Position	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	W	Co
A	53.83	22.81	8.11	2.95	2.53	3.41	5.27	1.09
B	54.32	19.71	8.79	4.32	2.83	6.07	2.94	1.01
C	12.17	3.48	—	—	—	84.35	—	—
D	48.90	17.58	8.55	12.58	2.58	3.52	4.75	1.54
E	44.52	19.97	12.40	4.86	2.16	7.64	6.83	1.61
F	45.63	18.77	8.51	5.32	2.14	8.54	9.54	1.55
G	44.80	17.37	10.18	3.14	2.68	8.26	12.37	1.20
H	26.12	17.74	18.99	7.56	1.35	10.25	17.09	0.91

结果表明,随着 WC-12Co 含量的增加,Ni 的含量显著降低,同时 Nb、Mo、C 的含量增加,说明 Mo 和 Nb 两种元素在晶界析出,生成了多种碳化物,这与其他学者关于镍基合金中元素偏析有相似的结果^[20-22]。结合 XRD 结果可知,碳化物主要为 NbC、M₂₃C₆、WC,并且添加的 WC-12Co 越多,碳化物的含量与种类也就越多。从图 5(e)中可以发现较大尺寸的析出物(C 点),结合能谱分析(EDS)结果可知,该析出物是

WC-12Co 中游离态的 C 析出后,与基体中的 Ni、Cr 结合的产物。当 WC-12Co 的质量分数为 15% 时,W 显著增加,说明 W 元素发生了更明显的扩散。

为了更明显地表示析出物的元素分布,对涂层中 WC-12Co 颗粒进行 EDS 面扫描,以质量分数为 5% 的 WC-12Co 涂层为例,结果如图 6 所示,可以看出,Mo 和 Nb 两种元素在晶界发生了明显偏析,这与上述分析结果一致。

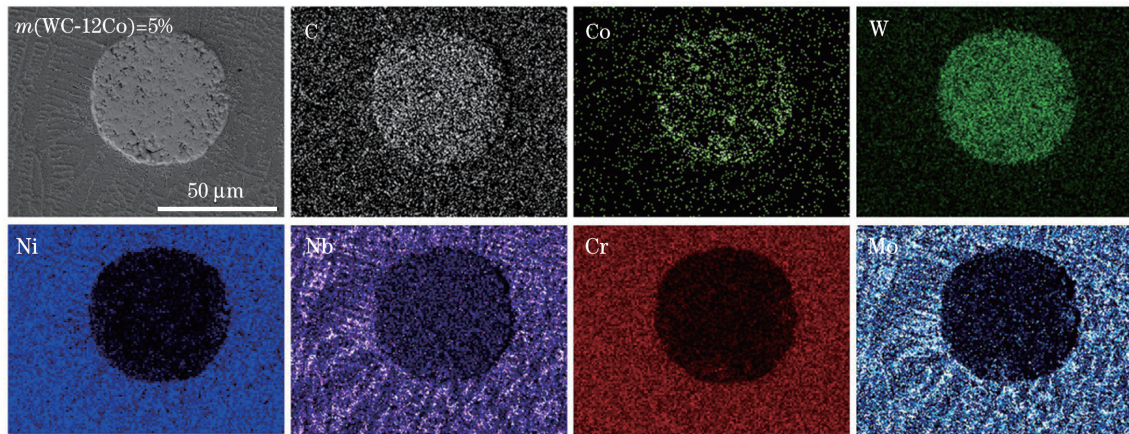


图 6 对于添加有质量分数为 5% 的 WC-12Co 复合涂层中 WC-12Co 颗粒 EDS 面扫描结果

Fig. 6 EDS surface scanning results of WC-12Co particles in composite coatings with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=5\%$

3.3 硬度

图 7(a)显示了 IN625/WC-12Co 复合涂层的显微硬度,从涂层顶部开始直至基材结束,对四种涂层的平均显微硬度进行了定量分析,如图 7(b)所示。从图中可以看出添加 WC-12Co 可以提高 IN625 基体的显微硬度,这与 XRD 分析结果一致。IN625 涂

层的平均显微硬度为 264 HV_{0.2},质量分数为 5%、10%、15% 的 WC-12Co 复合涂层的平均显微硬度分别为:274 HV_{0.2}、289 HV_{0.2}、308 HV_{0.2}。相比于纯 IN625 涂层,三种复合涂层的平均显微硬度分别提高了 3.79%、9.47%、16.67%,可以看出,增大 WC-12Co 的含量可以显著提高 IN625 基体的硬度。

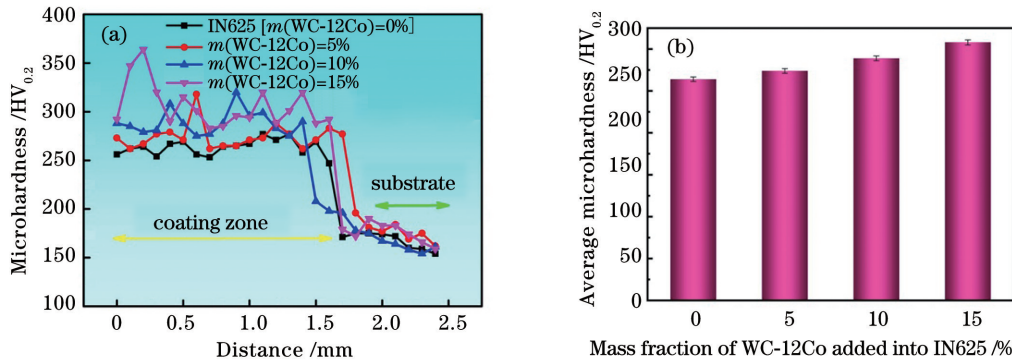


图 7 复合涂层的显微硬度。(a) 显微硬度曲线；(b) 平均显微硬度

Fig. 7 Microhardness of composite coatings. (a) Microhardness curve; (b) average microhardness

由于激光的高能量输入使 WC 发生了部分熔解,在 γ -Ni 基体晶间析出 NbC、 $M_{23}C_6$ 等碳化物, γ -Ni 晶粒被共晶包围(图 5 和图 6)。由于共晶硬度高^[16,18],复合材料的显微硬度也有所增加。WC-12Co 的添加量较高(质量分数为 10%、15%), $M_{23}C_6$ 在晶界析出,阻碍了晶界滑移,产生晶界强化。与此同时,部分熔化的 WC-12Co 颗粒与 γ -Ni 基体再结合,使得硬质相的析出量增加,起到了第二相强化的作用。这些现象都有助于提高复合涂层的显微硬度,随着 WC-12Co 添加量的增加,强化效果更加明显,显微硬度也更高。

3.4 摩擦磨损性能

图 8 为四种样品的摩擦系数曲线。从图中可以看出,摩擦磨损过程可以分为两个阶段:磨合磨损期和稳定磨损期。在磨损初期,试样与对磨环的接触面积较小,对磨环转速较快,由于载荷一定,单位接触面积上的压力较大,故磨损速度也较快^[23]。随着磨损的不断进行,接触面积不断扩大,磨损速度也逐渐变慢,摩擦系数在前 10 min 急剧上升又缓慢下降,这一阶段为磨合磨损期。在稳定磨损期,摩擦副之间的波动受力状态趋于稳定,试样表面粗糙度增

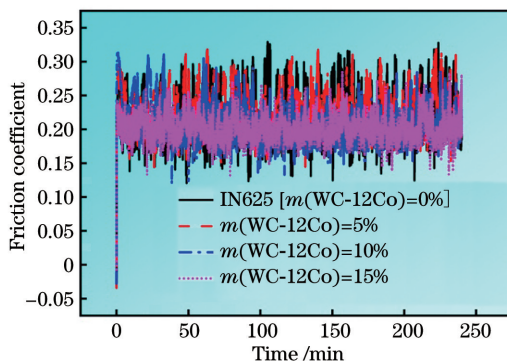


图 8 不同复合涂层的摩擦系数曲线图

Fig. 8 Friction coefficient curves of different composite coatings

加,磨损速度较慢,摩擦系数中心值也趋于稳定。从图中可以看出,四种样品的摩擦系数曲线没有显著差异,中心值均在 0.2 左右。对摩擦系数进行定量分析,可知四种样品的摩擦系数平均值分别为 0.2156、0.2260、0.2089、0.2012,随着 WC-12Co 含量的增加,四种样品摩擦系数平均值呈现先上升后缓慢下降的趋势。

四种样品在不同倍数下的磨损表面形貌如图 9 所示。从四种样品磨损表面均可以观察到平行于磨削方向的犁沟。从图中可以看出,IN625 样品的犁沟宽而深,在加入 WC-12Co 后犁沟变得更浅更窄,四种样品的平均犁沟宽度分别为 273.69 μm 、177.73 μm 、101.24 μm 、86.8 μm ,这说明添加 WC-12Co 的复合涂层的耐磨性能优于 IN625。这是因为添加 WC-12Co 可以提高材料的硬度,同时有研究表明较高的显微硬度可以提高材料的耐磨性能^[24]。与此同时,XRD 与 SEM 结果表明,经过激光作用,添加 WC-12Co 后复合涂层生成多种碳化物,其中 $M_{23}C_6$ 、NbC 耐磨粒磨损性能优异,提高了材料的耐磨性能。从微观上来看,试样与对磨环发生摩擦时并不是整个表面接触,而是试样的突出体与对磨环接触,实际接触面积很小,因此接触点的局部应力很大。过大的局部应力使接触点产生黏着或焊接,并在相对切向运动中发生剪断撕裂,具体表现为材料剥落,这表明发生了黏着磨损^[25]。从图中的虚线框可以观察到明显的片状剥落,这说明四种样品均有黏着磨损发生。随着 WC-12Co 添加量的增加,片状剥落体积变得更小,而且 WC-12Co 添加量越高,剥落区越少[图 9(i)~(k)]。这些现象均表明 WC-12Co 的含量更高,复合涂层的耐磨性能更好。

黏着磨损发生时,首先 IN625 基体在较大的局部应力下被切削,表现为大片剥落,磨损凹槽宽而

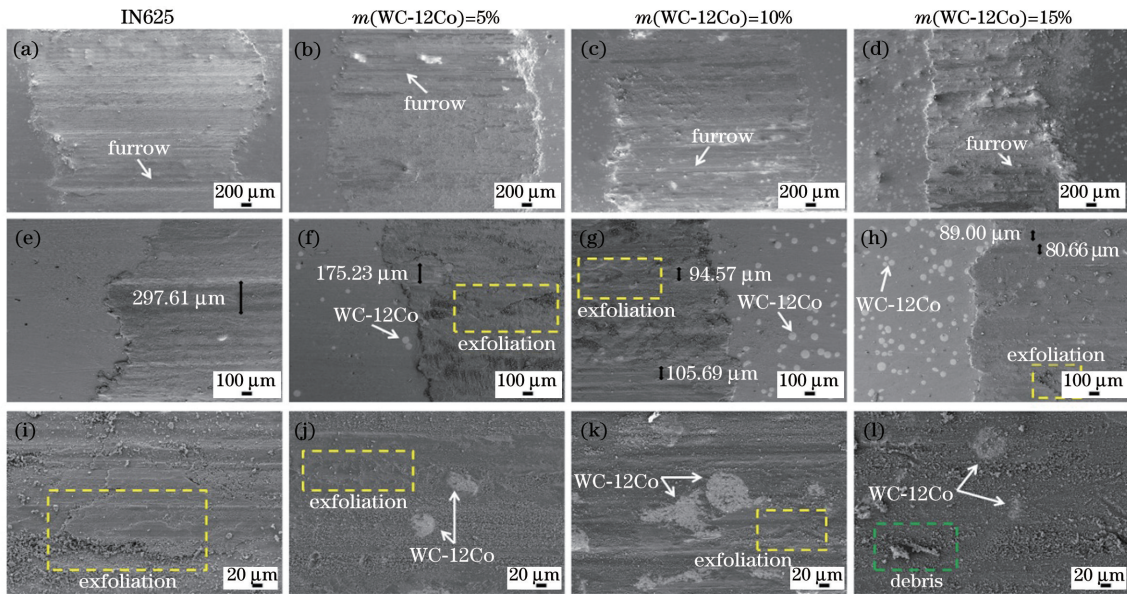


图 9 复合涂层在不同倍数下的磨损表面。(a)(e)(i) IN625; (b)(f)(j) 添加有质量分数为 5% 的 WC-12Co 的 IN625 基体; (c)(g)(k) 添加有质量分数为 10% 的 WC-12Co 的 IN625 基体; (d)(h)(l) 添加有质量分数为 15% 的 WC-12Co 的 IN625 基体
Fig. 9 SEM of wear surfaces of composite coatings at different times. (a)(e)(i) IN625; (b)(f)(j) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=5\%$; (c)(g)(k) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=10\%$; (d)(h)(l) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=15\%$

深[图 9(e)]。随后 WC-12Co 在 IN625 基体中凸出来,由于 WC-12Co 的硬度极高,不易被磨损,环块之间的磨损可以认为是 WC-12Co 颗粒与对磨环的磨损,即发生了磨粒磨损^[26]。此时磨粒磨损的微观表现为在磨损表面上细而浅的凹槽[图 9(g)]。接着,WC-12Co 被不断磨损,在一定程度后发生变形甚至破坏脱落,这时摩擦副之间环块的两体磨粒磨损就转变为了三体磨粒磨损,随后 WC-12Co 被损耗又表现为 IN625 基体与对磨环之间的黏着磨损。由此可见,黏着磨损与磨粒磨损是交替发生的。添加 WC-12Co 的质量分数为 15% 时,在磨损表面[图 9(d)]可以观察到较多的凸起,这是因为 WC-12Co 的含量越多,其与对磨环之间的磨粒磨损持续时间越长,环/块之间的高摩擦阻力导致温度升高^[27]所致。表面凸起使得 IN625 基体的损耗更少,表明添加有质量分数为 15% 的 WC-12Co 的 IN625 涂层的耐磨性能更好。在图 9(l)中可以观察到磨屑以及一些小的碎屑,这是 WC-12Co 颗粒破碎和试样表面氧化膜被破坏所致。

磨损量和磨损率是评价材料耐磨性能的指标,四种材料的磨损量与磨损率如图 10 所示。其中磨损率 ω 可表示为

$$\omega = \frac{m}{\pi \cdot d \cdot n}, \quad (1)$$

式中: m 是样品摩擦磨损实验前后质量损失(磨损

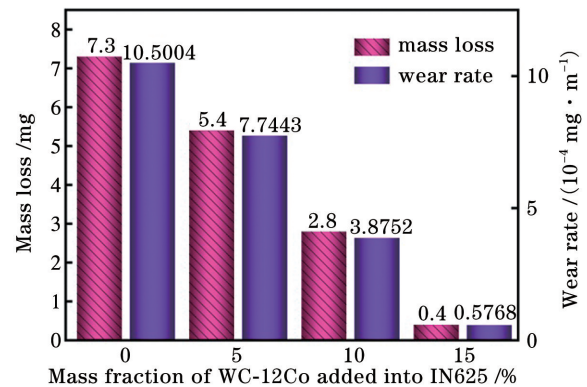


图 10 四种样品的磨损量和磨损率
Fig. 10 Mass loss and wear rate of four samples

量); d 是对磨环直径; n 是对磨环转动的总圈数。如图 10 所示,四种材料的磨损量分别为:7.3,5.4,2.8,0.4 mg。相应地,根据(1)式计算的磨损率分别为 $10.5004 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $7.7443 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $3.8752 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.5768 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。显然,随着 WC-12Co 添加量的增加,涂层的耐磨性能得到了提高,其中质量分数为 15% 的 WC-12Co 耐磨性能提升最为显著,这与磨损表面分析结果一致。

图 11 为四种涂层磨损表面的三维轮廓。三维轮廓扫描是以涂层表面最高点为参考点,颜色的变化代表磨损深度的变化,颜色差异越大表明磨损深度越大。从图中可以看出:纯 IN625 涂层磨损表面

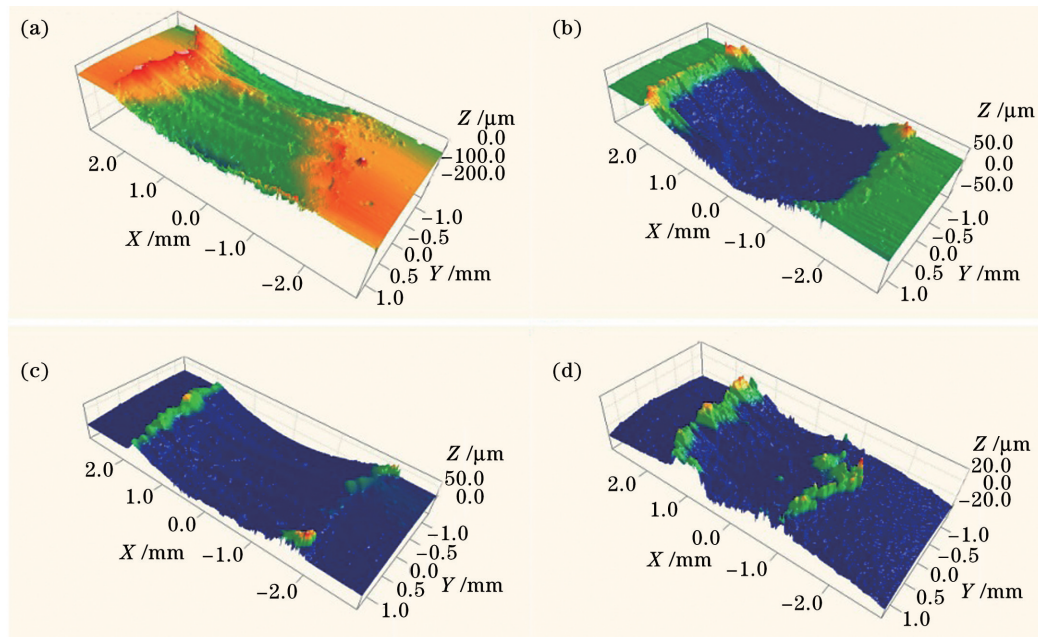


图 11 四种样品磨损表面三维轮廓。(a) IN625; (b) 添加有质量分数为 5% 的 WC-12Co 的 IN625 基体; (c) 添加有质量分数为 10% 的 WC-12Co 的 IN625 基体; (d) 添加有质量分数为 15% 的 WC-12Co 的 IN625 基体

Fig. 11 Three-dimensional profiles of wear surfaces for four samples. (a) IN625; (b) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=5\%$; (c) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=10\%$; (d) IN625 with WC-12Co added at $m(\text{WC-12Co})=15\%$

的颜色从黄色逐渐过渡到绿色和蓝色;添加有质量分数为 5% 的 WC-12Co 的涂层由绿色过渡到蓝色,这表明添加 WC-12Co 后涂层磨损深度变小,耐磨性能得到提高。由于磨损过程中温度不断升高,高温和高应力使磨屑在两侧粘连聚集,WC-12Co 添加量较高时,WC-12Co 对 IN625 基体的保护作用更强,粘连更严重,导致质量分数为 10% 和 15% 的 WC-12Co 复合涂层三维轮廓颜色差异不明显。

经测量的磨损表面宽度数据列于表 4,可以看出 WC-12Co 含量越高,磨损宽度下降越显著,这也证明较高含量的 WC-12Co 可以有效提高 IN625 的耐磨性能。

表 4 四种样品表面的磨损宽度

Table 4 Wear widths of four sample surfaces

Sample(mass fraction)	unit: μm		
	Max	Min	Mean
IN625	4823.15	3261.11	4123.91
WC-12Co(5%)	4294.68	3444.46	3887.34
WC-12Co(10%)	4074.29	3057.14	3748.60
WC-12Co(15%)	2605.56	2000.19	2338.04

4 结 论

采用激光熔覆技术成功制备了 WC-12Co 颗粒

增强 Inconel 625 基复合涂层,对不同 WC-12Co 含量的复合涂层进行了 XRD、SEM、显微硬度与摩擦磨损性能分析,结论如下。

1) 添加 WC-12Co 后组织发生细化,并伴随有 NbC、 $M_{23}C_6$ 等多种碳化物析出。随着 WC-12Co 添加量的增加,碳化物的含量和种类也增加。

2) 大部分球形 WC-12Co 颗粒保持其完整形态并且在涂层中均匀分布,只有少部分发生了分解或边缘熔解。涂层中未熔化的 WC-12Co 颗粒会抑制粗大柱状晶的生长,WC-12Co 颗粒周围的组织以等轴晶和短的柱状晶为主。在基体晶间 Mo、Nb 元素含量更多,并且添加量越高,两种元素的含量越多,这说明两种元素在晶界发生偏析。

3) 随着 WC-12Co 添加量的增加,复合涂层的显微硬度也逐渐增加。相比于纯 IN625 ($264 \text{ HV}_{0.2}$),复合涂层的平均显微硬度分别为 $274 \text{ HV}_{0.2}$ 、 $289 \text{ HV}_{0.2}$ 、 $308 \text{ HV}_{0.2}$ 。显微硬度的增加是共晶析出、细晶强化和第二相强化共同作用的结果。

4) 复合涂层的磨损量、磨损率、磨损宽度与深度都显著减小,这表明 WC-12Co 的添加可以显著增强 IN625 的耐磨性能,添加量越多,增强效果越明显。黏着磨损与磨粒磨损在摩擦磨损过程中交替

发生,由于 WC-12Co 颗粒的硬度高,添加量较高时磨粒磨损的持续时间增加,再加上晶界析出的碳化物的强化作用,减少了复合涂层的磨损,故耐磨性能提升更加显著。

参 考 文 献

- [1] Aparicio-Fernández R, Springer H, Szczepaniak A, et al. *In-situ* metal matrix composite steels: effect of alloying and annealing on morphology, structure and mechanical properties of TiB₂ particle containing high modulus steels[J]. *Acta Materialia*, 2016, 107: 38-48.
- [2] Tjong S C, Ma Z Y. Microstructural and mechanical characteristics of *in situ* metal matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 2000, 29(3/4): 49-113.
- [3] Krishna U G, Ranganatha P, Rajesh G L, et al. Studies on dry sliding wear characteristics of cermet WC-Co particulate reinforced Al7075 metal matrix composite[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 16: 343-350.
- [4] Zhang B C, Bi G J, Chew Y, et al. Comparison of carbon-based reinforcement on laser aided additive manufacturing Inconel 625 composites[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 490: 522-534.
- [5] Janicki D. Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 6-14.
- [6] Zhao Y, Song Z M, Jin J B, et al. Electrochemical corrosion properties of Ti-5%TiN composites formed by selective laser melting in Hank's solution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902005.
赵宇, 宋振明, 金剑波, 等. 激光选区熔化成形 Ti-5%TiN 复合材料在 Hank 溶液中的电化学腐蚀性能 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902005.
- [7] Verdi D, Garrido M A, Múñez C J, et al. Microscale effect of high-temperature exposition on laser cladded Inconel 625-Cr₃C₂ metal matrix composite [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 2696-2705.
- [8] Gessinger G H. Powder metallurgy of superalloys [M]. Baden, Switzerland: BBC Brown Boveri & Co. Ltd., 1984: 3-14.
- [9] Zhang B C, Bi G J, Wang P, et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625/nano-TiB₂ composite fabricated by LAAM [J]. *Materials & Design*, 2016, 111: 70-79.
- [10] Dinda G P, Dasgupta A K, Mazumder J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 509(1/2): 98-104.
- [11] Shankar V, Rao K B S, Mannan S L. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, 288(2/3): 222-232.
- [12] Feng K, Chen Y, Deng P S, et al. Improved high-temperature hardness and wear resistance of Inconel 625 coatings fabricated by laser cladding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 243: 82-91.
- [13] Cao S N, Gu D D, Shi Q M. Relation of microstructure, microhardness and underlying thermodynamics in molten pools of laser melting deposition processed TiC/Inconel 625 composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 692: 758-769.
- [14] Cooper D E, Blundell N, Maggs S, et al. Additive layer manufacture of Inconel 625 metal matrix composites, reinforcement material evaluation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(12): 2191-2200.
- [15] Hong C, Gu D D, Dai D H, et al. Laser additive manufacturing of ultrafine TiC particle reinforced Inconel 625 based composite parts: Tailored microstructures and enhanced performance [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 635: 118-128.
- [16] Huebner J, Rutkowski P, Kata D, et al. Microstructural and mechanical study of Inconel 625-tungsten carbide composite coatings obtained by powder laser cladding [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62(2): 531-538.
- [17] Wang J D, Li L Q, Tao W. Crack initiation and propagation behavior of WC particles reinforced Fe-based metal matrix composite produced by laser melting deposition [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 82: 170-182.
- [18] Huebner J, Kata D, Kusiński J, et al. Microstructure of lasercladded carbide reinforced Inconel 625 alloy for turbine blade application [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(12): 8677-8684.
- [19] Correa E O, Alcântara N G, Valeriano L C, et al. The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 276: 479-484.
- [20] Xu X, Mi G Y, Xiong L D, et al. Morphologies, microstructures and properties of TiC particle reinforced Inconel 625 coatings obtained by laser

- cladding with wire [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 16-27.
- [21] Niu X, Chao M J, Wang W L, et al. *In situ* synthesized NbC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7): 987-992.
牛薪, 晁明举, 王文丽, 等. 原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层 [J]. *中国激光*, 2006, 33(7): 987-992.
- [22] Chai L S, Wang C S, Han L Y, et al. Influence of nano-TiC/C content on microstructure and properties of laser clad Ni-based alloy coatings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1203003.
柴龙顺, 王存山, 韩立影, 等. 纳米 TiC/C 对激光熔覆镍基合金涂层组织和性能的影响 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1203003.
- [23] Jin J B, Zhao Y, Zhao S Z, et al. Effect of TiN content on microstructure and wear resistance of Ti-based composites produced by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102013.
金剑波, 赵宇, 赵淑珍, 等. TiN 含量对激光选区熔化成形钛基复合材料微结构与耐磨性能的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102013.
- [24] Zhao S Z, Jin J B, Xie M, et al. Effects of scanning speed on microstructure and wear resistance of $\text{Cu}_{80}\text{Fe}_{20}$ immiscible coatings prepared by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302005.
赵淑珍, 金剑波, 谢敏, 等. 扫描速率对激光熔覆 $\text{Cu}_{80}\text{Fe}_{20}$ 偏晶涂层组织与耐磨性能的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302005.
- [25] Zhao S Z, Zhou S F, Xie M, et al. Phase separation and enhanced wear resistance of $\text{Cu}_{88}\text{Fe}_{12}$ immiscible coating prepared by laser cladding [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(2): 2001-2010.
- [26] Xie M, Zhou S F, Jin J B, et al. Microstructure and properties of homogeneous $\text{Cu}_{90}\text{Fe}_{10}$ immiscible composites with nanotwins by laser powder deposition: effect of spot size [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 821: 153231.
- [27] Rabadia C D, Liu Y J, Wang L, et al. Laves phase precipitation in Ti-Zr-Fe-Cr alloys with high strength and large plasticity [J]. *Materials & Design*, 2018, 154: 228-238.

Effect of WC-12Co Addition on Microstructure and Wear Resistance of Inconel 625 Matrix Composites Prepared by Laser Cladding

Sun Ning, Fang Yan, Zhang Jiaqi, Huang Zhaozhen, Gu Zhenjie, Lei Jianbo*

Laser Technology Institute, School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China

Abstract

Objective Inconel 625 is one of the main materials for jet engines and various industrial gas turbines with a stable structure and an excellent performance. It is used in extreme environments with high temperature and wear. The service environmental conditions of components have become more severe with the rapid development of the marine and aerospace industries. Moreover, the demand for higher-performance Inconel 625 components has increased. Particle-reinforced Inconel 625 metal matrix composites can improve the strength and wear resistance of materials, which has become a research hotspot in the recent years. However, only a few studies have been published on the effects of different amounts of reinforcing phase on the matrix, especially on the microstructure and friction and wear properties. The advantages of WC are high hardness and low coefficient of thermal expansion. It can also easily be wetted by molten metal and is an ideal material for improving the wear resistance of components. As a reinforcing phase, WC can meet the requirements of components under high-wear conditions, such as in gas turbines. WC-12Co with a particle size of 45 – 100 μm was selected for use in this study. Cobalt has excellent thermodynamic properties, which prevents laser from directly acting on WC, thus relieving WC melting, maintaining the particle integrity, and improving the composite properties. WC-12Co particle-reinforced Inconel 625 metal matrix composite coatings were prepared herein by laser cladding. The effects of the WC-12Co particles with mass fractions of 5%, 10%, and 15% on the microstructure and wear resistance of the Inconel 625 matrix were studied, which have a high reference value for component repair technology and material selection in practical industrial applications.

Methods The Inconel 625/WC-12Co composite coatings were prepared by laser cladding in argon atmosphere. The microstructure, phase composition, microhardness, and friction and wear properties of the composite coatings were

obtained by metallographic and scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and microhardness and ring-block wear testers, respectively. The width and depth of the wear marks were measured by a white light interference 3D surface profiler, and a three-dimensional model was established. The effects of different WC-12Co additions (with mass fractions of 5%, 10%, and 15%) on the microstructure and wear resistance of the Inconel 625 matrix were obtained according to the abovementioned characterization and analysis.

Results and Discussions The WC-12Co particle-reinforced Inconel 625-based composite coatings were successfully prepared by laser cladding. The composite coatings with different WC-12Co contents were analyzed by XRD, SEM, microhardness, and friction and wear properties. The results are as follows:

1) After the WC-12Co addition, the microstructure was refined and accompanied by the precipitation of NbC, $M_{23}C_6$, and other carbides. The content and kinds of carbides also increased with the increase of the WC-12Co content.

2) Most WC-12Co kept their complete form and were uniformly distributed in the coatings. Some were decomposed or melted at the edge. The unmelted WC-12Co in the coatings inhibited the growth of coarse columnar crystals. The equiaxed and short columnar crystals were dominant around the WC-12Co. More Mo and Nb elements were found in the matrix intercrystalline. The higher the addition amount, the higher the content of the two elements, indicating that the two elements segregated at the grain boundary.

3) The composite coating microhardness gradually increased with the increase of the WC-12Co content. Compared with the pure Inconel 625 (264 $HV_{0.2}$), the average microhardness of the composite coatings was 274 $HV_{0.2}$, 289 $HV_{0.2}$, and 308 $HV_{0.2}$ respectively. The increase of the microhardness was caused by the eutectic precipitation, fine grain strengthening, and secondary phase strengthening.

4) The mass loss, wear rate, wear width, and depth of the composite coatings significantly decreased, and the wear rate decreased from 10.5004×10^{-4} to $0.5768 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$, indicating that the WC-12Co addition can significantly enhance the wear resistance of Inconel 625. Adhesive and abrasive wears occurred alternately in the friction and wear process. Due to the extremely high hardness of the WC-12Co particles, the duration of the abrasive wear increased when the amount of WC-12Co was high, and the strengthening effect of the carbides precipitated from the grain boundaries reduced the wear of the Inconel 625 matrix, significantly improving the wear resistance.

Conclusions The WC-12Co particle-reinforced Inconel 625 metal matrix composite coatings were prepared by laser cladding. The WC-12Co addition significantly affected the microstructure and the wear resistance of the Inconel 625 matrix. The composite coating microstructure was refined; carbides, such as NbC and $M_{23}C_6$, were precipitated at the grain boundaries; and equiaxed and short columnar crystals were dominant around the WC-12Co. The augmentation of the WC-12Co content significantly improved the microhardness and the wear resistance of the composite coatings. In summary, adding WC-12Co particles can refine the microstructure of the Inconel 625 matrix and improve its hardness and wear resistance.

Key words laser processing; laser cladding; particle reinforced composites; friction and wear

OCIS codes 140.3460; 140.3390; 160.3380