

WAAM-CMT 制备 WC-Co 增强 IN625 合金组织与性能

冉世豪¹ 李继文¹ 刘伟^{1,2} 孟家豪¹ 陈冲^{1,3}

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 2. 有色金属新材料及先进加工技术省部共建协同创新中心, 洛阳 471023; 3. 金属材料磨损控制与成型技术国家地方联合工程研究中心, 洛阳 471003)

摘要 采用商用 Inconel 625 实心焊丝, 通过电弧增材制备了不同 WC-Co 含量的镍基复合沉积墙, 系统研究其微观组织、元素分布、物相组成及力学性能。结果表明, 沉积层自底部至顶部的组织由短柱状枝晶逐渐过渡为柱状枝晶; 随 Co 含量(质量分数, 下同)增加, γ -Ni 固溶体中 Co 固溶度升高, 混合粉末的引入削弱了织构强度, 并促进了 MC 型碳化物(如 NbC)的弥散析出, 显著增强第二相强化效应。复合材料纵、横向抗拉强度较纯 IN625 提高了约 10%; 含 7% Co 试样的纵向伸长率降低约 20%, 但随 Co 含量增加有所恢复, 横向伸长率波动较小, 断口呈典型韧窝与沿晶混合断裂模式。

关键词 金属增材制造; WAAM-CMT; WC-Co; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG457; TG146.1+5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250279

Microstructure and Properties of WC-Co Reinforced IN625 Alloy Prepared by WAAM-CMT

RAN Shihao¹, LI Jiwen¹, LIU Wei^{1,2}, MENG Jiahao¹, CHEN Chong^{1,3}

(1. School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023;

2. National Joint Collaborative Innovation Center for Nonferrous Metal New Materials and Advanced Processing Technology, Luoyang 471023; 3. National Joint Engineering Research Center for Abrasion Control and Molding of Metal Materials, Luoyang 471003)

Abstract: Commercial Inconel 625 solid wire was utilized to fabricate nickel-based composite deposition walls with varying WC-Co contents via arc additive manufacturing, and the microstructure, elemental distribution, phase composition, and mechanical properties of the alloy were systematically investigated. The results indicate that the microstructure is transformed from short columnar dendrites at the bottom to columnar dendrites at the top. With Co content increasing, Co solubility in the γ -Ni solid solution is increased. The introduction of mixed powders weakens the texture intensity and promotes the diffusion precipitation of MC-type carbides (such as NbC), significantly enhancing the strengthening effect of the second phase. The tensile strengths in the longitudinal and transverse directions are approximately 10% higher than those of pure IN625. The longitudinal elongation of specimens containing 7% in Co is reduced by 20%, which recovers as Co content further rises. The transverse elongation presents slight fluctuations, and fracture is characterized by typical mixed fracture of ductile dimples and intergranular fracture.

Key Words: Metal Additive Manufacturing, WAAM-CRT, WC-Co, Microstructure, Mechanical Properties

镍基高温合金 IN625 因其优异的高温强度、抗热疲劳性能、可焊接性、耐高温氧化性和耐蚀性, 被广泛应用于航空航天发动机热端部件、深海油气开采设备及化工压力容器等领域^[1-2]。然而, 传统铸造和锻造工艺存在材料利用率低、复杂结构成形困难等局限, 难以满足现代工业对复杂形状部件的需求。

电弧增材制造(Wire and arc additive manufacturing, WAAM)以焊丝为原料、电弧为热源, 通过逐层堆叠实现复杂结构的近净成形, 具有成形效率高、设计灵活和制造周期短等特点^[3-4]。其中, 冷金属转移(Cold metal transfer, CMT)作为改进型气体保护金属极电弧焊(GMAW)工艺, 因其低热输入、低稀释率和低飞溅特

收稿日期: 2025-07-14; 修订日期: 2025-09-01

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金资助项目(235200810102); 河南省自然科学基金资助项目(242300420020)

第一作者: 冉世豪, 男, 2001 年出生, 硕士研究生, E-mail: 18736585955@163.com

通信作者: 李继文, 男, 1969 年出生, 教授, E-mail: ljwzq@163.com

引用格式: 冉世豪, 李继文, 刘伟, 等. WAAM-CMT 制备 WC-Co 增强 IN625 合金组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 1 036-1 044.

RAN S H, LI J W, LIU W, et al. Microstructure and properties of WC-Co reinforced IN625 alloy prepared by WAAM-CMT[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1 036-1 044.

征,可实现稳定可控的沉积过程,有效抑制裂纹与气孔等缺陷。该工艺还能细化晶粒、改善组织均匀性,从而提升沉积件的综合力学性能,在镍基合金大型构件的增材制造中展现出突出优势^[5-7]。

IN625 合金凭借优异的抗拉强度、抗表面退化性及高温抗蠕变性获广泛应用,但在高载荷场景下的力学性能仍有提升空间^[8-9]。目前,WC 陶瓷相具有高硬度、高熔化温度和良好的耐腐蚀性,成为潜在的增强候选材料^[10-13]。PARMAR G 等^[14]采用 CMT-WAAM 与 GTAW-WAAM 制备 IN625 薄壁件,发现 CMT(热输入为 297.92 J/mm)仅局部形成 Laves 相,微观结构更细,底部 BD 方向抗拉强度达 (654 ± 6) MPa、伸长率为 $68\% \pm 3\%$,力学性能与硬度均优于 GTAW;GTAW(热输入为 759 J/mm)因 Laves 相及碳化物广泛存在,力学性能下降,CMT-WAAM 在航空航天领域具优势。YU X Q 等^[15]以重力侧送粉电弧增材制造 WC 增强钢基复合材料,发现随 WC 含量增加,试样强度先升后降(40% 时强度最高),伸长率递减,断裂模式从韧性(无 WC)转为准解理(20%~60% WC)再到脆性(>60% WC)。OZGUN O^[16]以粉末冶金制备 WC 增强 Inconel 625 复合材料,发现随 WC 含量(10%~30%,质量分数,下同)增加,硬度显著提高(30% 的 WC 时达 424.54 HV_{0.5}),屈服强度上升,抗拉强度在 20% 的 WC 时达峰值后下降,伸长率降低。

目前,采用 WAAM-CMT 工艺制备 WC-Co/Ni 复合材料的相关研究报道很少,其制备工艺的优化以及生产效率和沉积构件性能的提升亟待深入探索。本研究利用金属元素 Co、IN625 合金和 WC 三相间具有良好润湿性和粘结作用的特点,将 Co 粉、IN625 粉末和 WC 粉末按照一定比例混合,采用 WAAM 结合同步送粉技术将混合粉和 IN625 焊丝同步送入熔池,制备出不同 Co 含量的薄壁试样,研究 Co 含量对沉积试样微观结构、力学性能的影响,以期为高性能 WC-Co/IN625 复合材料的设计与工程化应用提供参考。

1 试验材料与方法

采用同步侧送粉 WAMM 工艺系统制备 WC-Co/Inconel625 合金厚壁件。该系统由机器人、焊机、焊接工作台、机器人控制柜、送粉机和可编程/智能控制手柄组成。采用配备焊枪的 FANUC M-10iD/12 六轴机器人逐层实现沉积轨迹。Fronius TPS400i 数字焊机作为热源,焊接模式选用 CMT 模式;送粉采用气体驱动的粉末进给方法,焊接保护气及送粉保护气均采用纯 Ar 气防止沉积层及粉末氧化^[17]。采用具有可升降及可左右移动的工作台作为沉积平台,共同搭建 CMT

电弧增材制造快速成形系统平台。采用摆动电弧轨迹,具体路径见图 1。在路径规划中均采用往复方式,以防止出现起弧处凸起与收弧处塌陷的现象。焊枪机械摆动宽度为 8 mm,摆动长度为 2 mm,送丝速度为 8.5 m/min,焊接速度为 8 mm/s,电流为 203 A,平均电压为 15.8 V,制备厚壁件试样的尺寸为 160 mm×12 mm×63 mm,见图 1b。

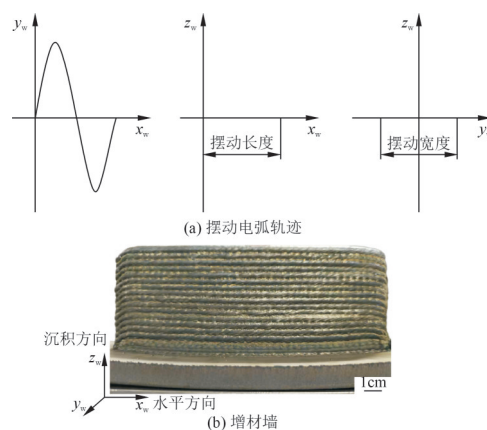


图1 WAAM-CMT 制造过程中摆动电弧轨迹和增材墙示意图
Fig.1 Schematic diagram of oscillation trajectory and AM walls during WAAM-CMT process

WC-Co/IN625 混合粉末由混粉机湿混制备。球磨过程在甲醇保护下以 240 r/min 的转速进行 3 h,球粉比为 10:3。试验用 WC(50~150 μm)、Co(45~75 μm)和 IN625(50~100 μm)原始粉末形貌见图 2。WAAM-CMT 工艺参数见表 1。将 WC、Co 与 IN625 粉末按表 1 配比混合,并与 IN625 焊丝同步送入熔池。选用 ERNi-CrMo-3 实心焊丝,其化学成分见表 2。该焊丝成分与 Inconel625 合金高度相近,常作为 IN625 合金的匹配焊材使用,因此可视为 IN625 基体对应的焊丝。使用尺寸为 250 mm×60 mm×10 mm 的 316L 不锈钢板作为基材。沉积前将基板表面打磨至无油脂和锈迹后,用酒精擦拭并烘干。使用纯 Ar 气体作为保护气体,气体流量为 15~20 L/min。

通过线切割加工从沉积试样中切割出测试试样,在乙醇中超声波清洗。图 3 为薄壁试样尺寸及取样位置。通过 D6 PHASER 台式 XRD 分析仪对合金相组成进行表征,采用 Cu K_α 辐射($\lambda=0.154\ 184\ \text{nm}$),电流和电压分别为 30 mA 和 40 kV,扫描范围为 30°~100°,步长为 0.2°。试样经 180~2 000 目金相砂纸研磨后采用 W2.5 金刚石研磨膏机械抛光至镜面,经清水、无水乙醇依次清洗并冷风干燥,以现配王水(HNO₃:HCl=1:3)腐蚀 10 s,迅速冲洗吹干,采用奥林巴斯 GX51 型光学显微镜和配备 X 射线能量色散光谱(EDS)的 JSM-IT800SHL 场发射扫描电镜进行观察和观察分析。采

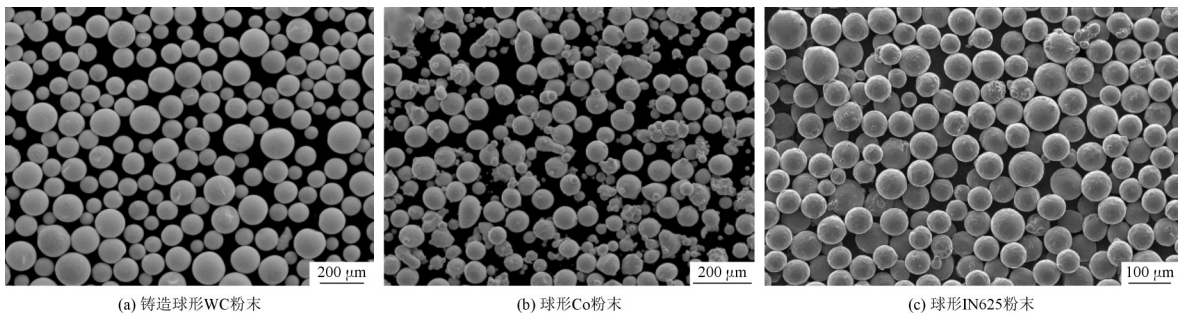


图 2 试验用 WC,Co 和 IN625 原始粉末
Fig.2 Raw powders of WC,Co and IN625 for experiment

表 1 WAAM-CMT 工艺参数
Tab.1 Parameters of WAAM-CMT process

试样	w(WC)/%	w(Co)/%	w(IN625)/%	电流/A	电压/V	送丝速度/ (m·min ⁻¹)	焊接速度/ (mm·s ⁻¹)	送粉速度/ (r·min ⁻¹)	气体流量/ (L·min ⁻¹)
S ₁	0	0	0	203	15.8	8.5	8	0.2	15~20
S ₂	83	7	10	203	15.8	8.5	8	0.2	15~20
S ₃	75	15	10	203	15.8	8.5	8	0.2	15~20
S ₄	67	23	10	203	15.8	8.5	8	0.2	15~20

表 2 ERNiCrMo-3 实心焊丝的化学成分
Tab.2 Chemical composition of ERNiCrMo-3 solid wire

w _B											
Cr	Mo	Ta+Na	Fe	Al	Cu	Mn	C	Si	P	S	Ni
22.49	8.76	3.45	0.48	0.08	0.04	0.01	0.01	0.07	0.008	0.003	余量

用 HTV-1000 型维氏显微硬度计对试样进行硬度测试,载荷为 500 N,保持时间为 10 s,相邻测点间距为 200 μm。使用岛津 AGX-100KNV2 电子万能试验机在室温下以 0.1 mm/min 的速率进行拉伸试验,拉伸试样尺寸见图 3b。通过 SEM 观察试样断口形貌。

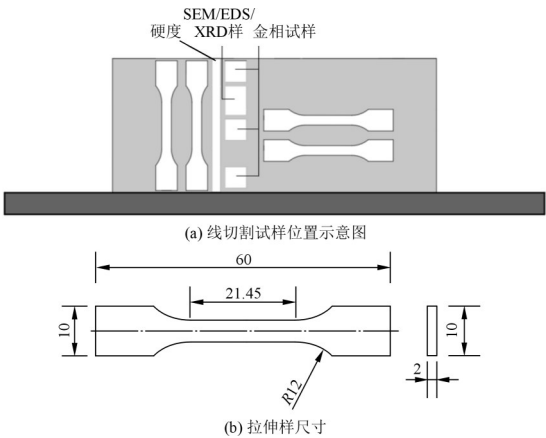


图 3 测试试样取样位置及尺寸
Fig.3 Sampling positions and dimension of test specimens

2 试验结果与讨论

2.1 增材墙凝固组织特征

图 4 为 WAAM 沉积试样的 OM 组织。可以看出,沉积层组织以柱状枝晶为主,呈现出沿沉积方向外延

生长特征。在 WAAM-CMT 工艺过程中,冷却主要依赖于基材与已沉积层的热传导作用,这使得不同区域的微观结构因散热效率与冷却速率的差异而有所不同,形成了胞状晶粒与柱状枝晶共存的复杂组织形态。底部区域因基板下方配备的水冷装置,显著提升了冷却效率,形成较大的温度梯度(G),促使短柱状枝晶与柱状枝晶混合生长^[18]。随沉积层数增加,中间和顶部区域由于持续叠加的沉积层阻碍了热量扩散,致使冷却速率下降,热量大量积聚,导致中间区域出现胞状晶粒与柱状枝晶混合的组织特征,而顶部区域则以柱状枝晶为主。在沉积初期,热量能够通过基板高效散出,但在中部与顶层,散热主要依靠大气对流和传导,其散热效率远低于底层。从图 4b 可见,沉积层中部形成宽大的重熔区,晶粒显著细化。该细化行为源于重熔区独特的凝固环境:二次熔化的金属在周围已冷却层的高效散热作用下形成较大的温度梯度(G),而金属导热系数远高于空气,进一步强化了这一梯度。根据 Jackson - Hunt 理论,高 G 值有助于抑制枝晶侧向生长,促进等轴晶生成,从而实现晶粒细化。此外,摆动电弧工艺下的热输入分布不对称,导致重熔区呈现“中宽边窄”的形貌特征。电弧摆动至边缘时因驻留时间短及 CMT 工艺低热输入,重熔深度有限;同时边缘直接与空气接触形成自然对流散热,使其冷却速率较中部提

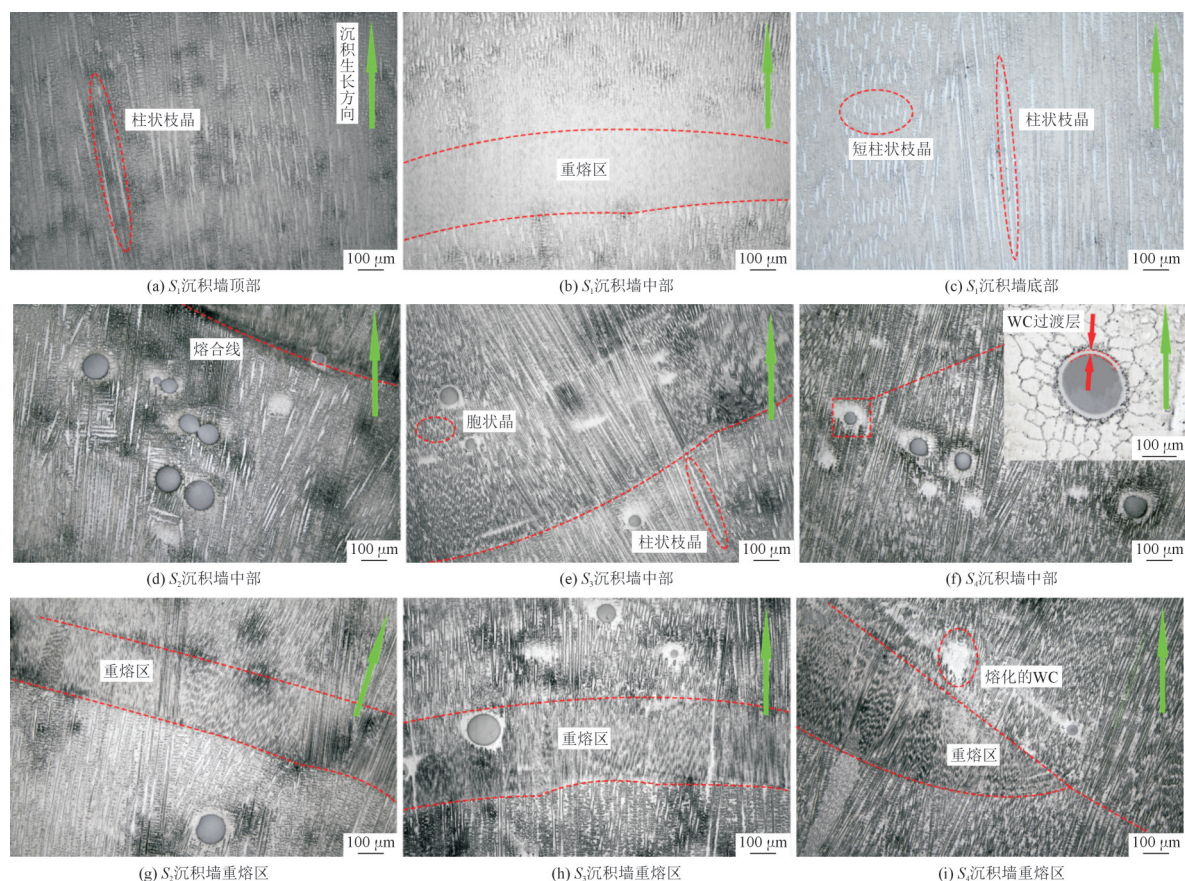


图4 不同比例混合粉末 WAAM 沉积试样壁的光学显微组织

Fig.4 OM microstructure of WAAM-deposited specimen walls with different proportions of mixed powders

高2~3倍,从而进一步抑制了重熔。热输入与散热条件的耦合作用最终导致中部重熔更显著、晶粒更细化的组织特征。

引入混合粉末后,熔点与基体材料相近的Co粉末与IN625合金粉末能够在高温下充分熔化,并实现均匀扩散,从而参与熔池成分的整体调控。相比之下,WC粉末由于熔点极高(约为2870℃),在常规电弧热输入条件下难以完全熔化,仅在颗粒表面形成局部熔化的过渡层,宏观上保持颗粒形貌,并与基体金属形成稳固的冶金结合界面(见图4f)。这种“半熔化-过渡熔合”机制常见于高熔点陶瓷颗粒增强复合材料,有效提升了增强相与基体的界面结合强度,抑制界面脱落。在晶体生长过程中,未完全熔化的WC颗粒作为异质相,显著干扰柱状枝晶的定向生长,导致枝晶生长前沿断裂和局部暂停,枝晶仅在绕过颗粒后恢复生长(见图4d)。在颗粒团聚区,这一效应尤为明显,多次枝晶中断促使新生枝晶在不同方向重新形核,诱导细小等轴晶形成。该现象符合经典晶体生长理论,固-液界面遇阻时,系统通过局部过冷与异质形核恢复生长,引发枝晶分裂和组织细化^[19]。

随Co含量增加,熔池中合金液的热导率和流动性

显著提升。Co降低了熔体黏度,增强了合金液的对流运动,加快了热量和溶质的输运效率,提升了温度梯度(G)与凝固速率(R)之比(G/R)。根据定向凝固理论, G/R 的增大促进晶体沿热流方向择优生长,形成结构完整且取向一致的柱状枝晶。同时,Co的高热导率(约为 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)加快了熔池中心向外围的热传导,稳定了柱状晶的生长方向,有效抑制晶粒的横向扰动和弯曲^[20]。此外,适量Co还能促进WC颗粒部分溶解,通过促进颗粒表面局部熔化,改善其与基体的润湿性和界面能状态,有效抑制颗粒团聚,均匀分布颗粒。特别是在重熔区高温反复作用下,Co的加入提升了界面活性并延长了熔池寿命,为深层重熔和界面重构提供了充足时间。随Co含量(质量分数,下同)由7%提升至23%,柱状晶的纵向生长特征增强,晶粒呈现出更加细长的形貌,重熔区深度及组织连续性同步提高,见图4g~图4i,这主要归因于:①Co优异的润湿性能改善粉末与熔池界面流动性,增强层间熔合强度。②Co提升熔池热稳定性和维持时间,使上层熔池对下层形成更深层次热影响和重熔。③热传导性能的提升进一步增强纵向热梯度,促进柱状晶沿垂直方向持续生长。

2.2 沉积试样微观结构表征

图 5 为不同 Co 含量沉积试样的 XRD 图谱。可以看出, S_1 沉积样和其他不同 Co 含量沉积样中都有 Ni- γ 固溶体, 在 S_2 、 S_3 和 S_4 试样中 MC (主要为 NbC、NbTiC₂、MoC) 是由 WC 中分解的少量 C 和基体中的 Nb、Ti、Mo 等元素结合形成的, 其属于硬质相, 在晶体中以弥散颗粒形式存在, 有效阻碍位错运动, 提高材料的强度和硬度, 常在晶界和晶内析出, 是重要的强化相^[21]。在 S_1 涂层中, 试样的最强峰位于 (200) 晶面 (50.772°)。加入混合粉末后, 随 Co 含量增加, WC 颗粒与 Ni 基熔池的润湿性和附着性提高, WC 在熔池中分布更均匀。同时, 在 S_3 、 S_4 试样中观察到 Ni-Cr-Co-Mo 多元固溶体, 表明 Co、Cr、Mo 逐步固溶于 Ni- γ 相中, 形成了稳定的多元 FCC 固溶体结构, 属于 Ni 基合金中典型的 γ 相演化过程。

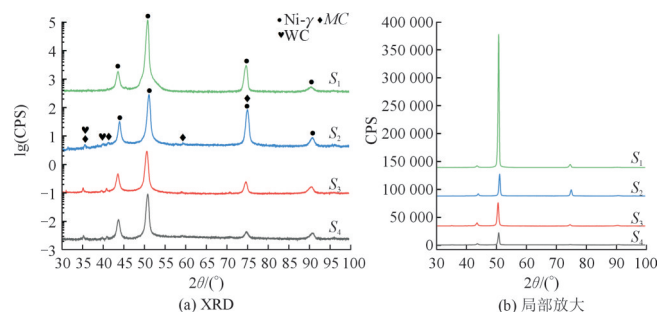


图 5 不同 Co 含量下试样沉积墙 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of deposition walls in specimens with different Co contents

不同比例混合粉末 WAAM 增材试样的 SEM 形貌见图 6, EDS 点扫结果见表 3。沉积层显微组织主要由深灰色基体、浅灰色柱状枝晶区、黑色颗粒相和白色析出相组成。浅灰色区域主要富集 Nb 和 Mo, 黑色颗粒相富集 Ti、Al 和 Nb, 点 2 处白色相富含 Nb, 结合 XRD 分析可推测为 MC 型碳化物相。随 Co 含量增加, 白色析出相显著增多, 推测 Co 的加入降低了 Nb 在 Ni 基体中的固溶度, 促进 Nb 在凝固及后续冷却过程中与 C 形成稳定的 MC 相^[22]。这类碳化物相的析出有助于提高材料的高温强度和蠕变性能, 但过多或沿晶界连续析出也可能降低韧性并增加裂纹敏感性。

S_3 试样的 SEM 形貌及 EDS 面扫结果见图 7。可以看出, W 含量较高, 表明部分 WC 颗粒在熔池中发生熔化并与基体反应生成新的金属间化合物, 相应的元素重分布可能进一步影响显微组织稳定性。增材墙中 Mo 和 Nb 均呈明显偏析, 作为分配系数 $k < 1$ 的正偏析元素, 其在凝固过程中优先向晶界富集, 易导致局部强化相富集, 进而对高温服役性能产生影响。相比之下,

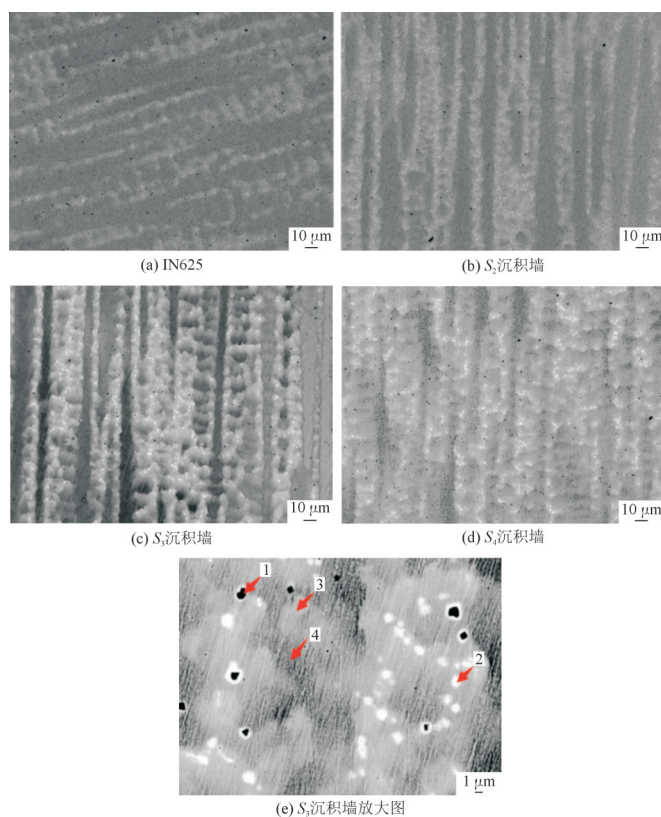


图 6 不同比例混合粉末 WAAM 沉积试样壁的 SEM 组织
Fig.6 SEM microstructure of WAAM-deposited specimen walls with different proportions of mixed powders

表 3 不同位置的 EDS 点扫分析结果

Tab.3 EDS point scanning results at different positions %

位置	w_B								
	Ni	Cr	Mo	Nb	Co	W	C	Al	Ti
1	4.89	5.24	3.24	33.68	—	0.47	—	20.01	32.47
2	10.56	5.85	6.68	59.05	0.08	0.56	14.71	0.02	2.49
3	56.67	21.67	10.33	4.32	0.24	1.67	4.87	0.11	0.12
4	59.48	21.90	8.25	2.75	0.32	1.77	5.30	0.08	0.14
5	28.30	13.41	2.87	28.30	0.29	36.12	18.21	0.59	0.09
6	21.67	14.09	27.07	10.51	0.19	18.52	7.83	0.04	0.08
7	56.68	21.08	7.66	2.74	0.21	5.00	6.36	0.09	0.18

Ni 和 Cr 为 $k > 1$ 的负偏析元素, 倾向于留在晶内, 维持 γ 基体的成分稳定性, 这与面扫结果一致。深灰色基体的主要元素组成与原始 Inconel625 相近, 可判定为 Ni- γ 固溶体^[23]。

图 8 为 S_3 试样中 WC-15Co 体系下 WC 颗粒周围的 SEM 形貌及元素分布情况。由于 CMT 工艺热输入较低, 大部分高熔点 WC 颗粒未完全熔化, 在颗粒边缘形成过渡带, 并发生局部分解, W 元素向基体扩散的同时, Mo 和 Nb 在颗粒周围富集。这种富集与过渡带的形成不仅有助于提高组织的弥散强化效果, 还可能导致局部应力集中, 对后续服役条件下的断裂行为产生影响。

图 9 为 CMT-WAAM 工艺制备的 S_1 与 S_3 试样的

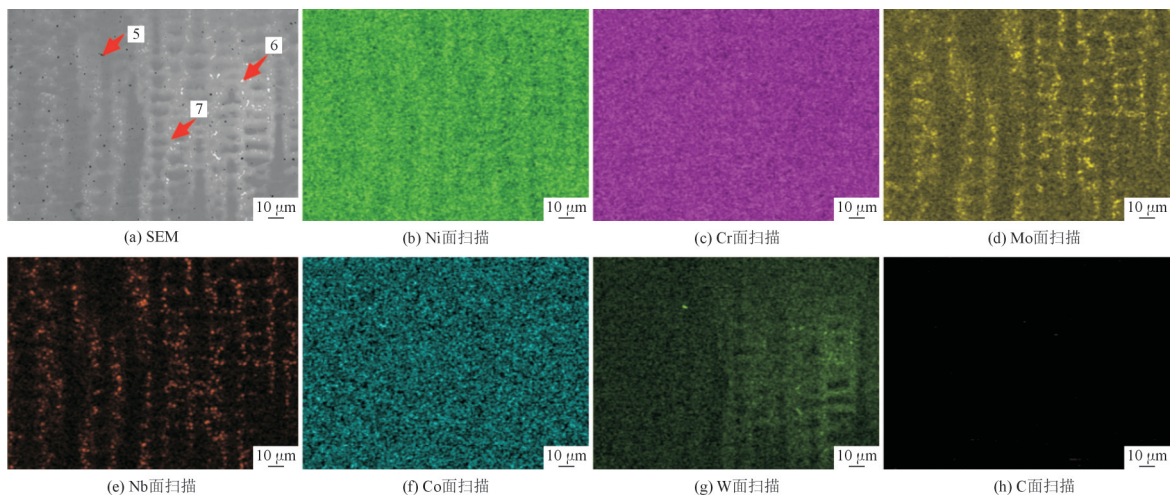


图7 S₃沉积墙 SEM 形貌及EDS面扫结果

Fig.7 SEM morphology and EDS scanning results of S₃ deposition wall

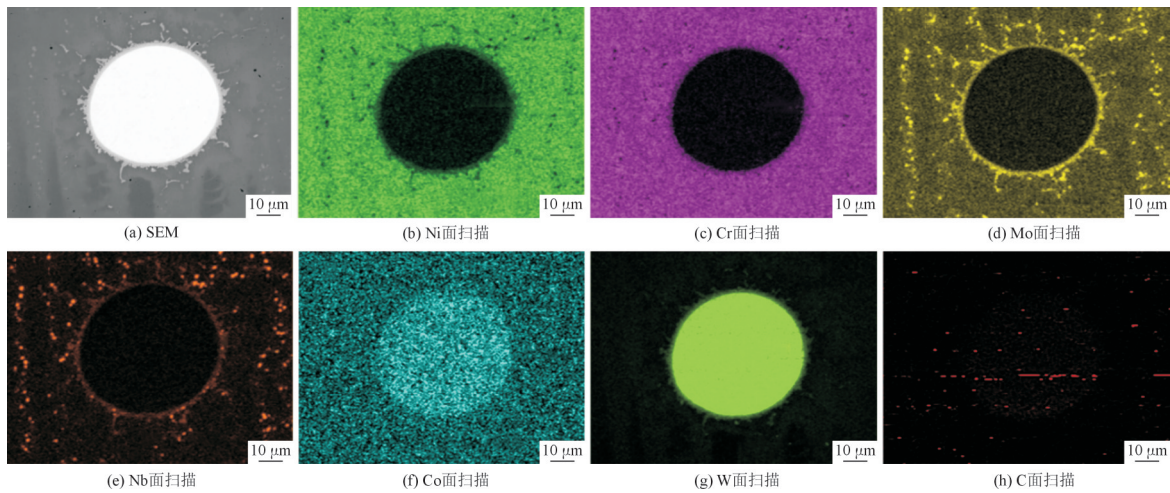


图8 S₃沉积墙中 WC 颗粒附近 SEM 形貌及EDS面扫描结果

Fig.8 SEM morphology and EDS mapping results of S₃ deposition wall around WC particles

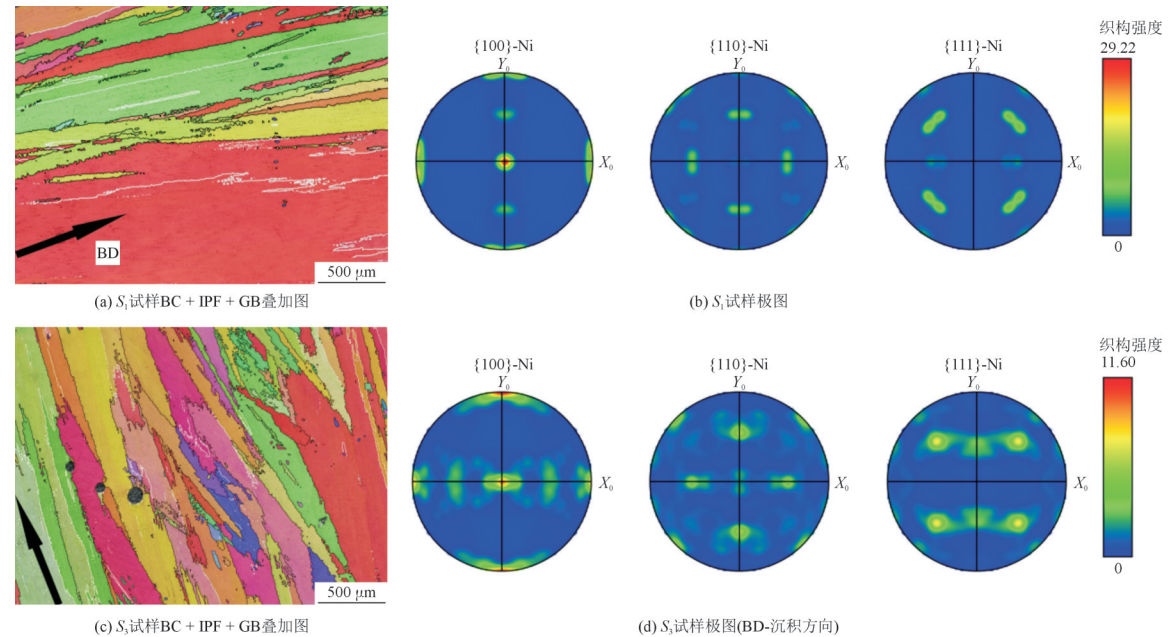


图9 采用CMT-WAAM工艺打印的试样的EBSD分析结果

Fig.9 EBSD results of specimens printed by CMT-WAAM process

EBSD分析结果,包括晶体取向图(BC+IPF+GB叠加图)和极图。由图9a与图9c可见,两组试样均呈现出沿沉积方向(BD)生长的柱状晶结构。然而, S_1 试样晶粒尺寸较大,取向集中,显示出明显的织构特征,而 S_3 试样晶粒尺寸显著减小,形貌破碎,取向分布趋于随机,表明混合粉末的添加显著影响了晶粒的长大行为及其择优生长机制。图9b和图9d进一步验证了织构演化趋势。 S_1 试样在 $\{100\}$ 和 $\{110\}$ 晶面方向存在明显的织构峰,显示出强烈的择优取向。相比之下, S_3 试样极图分布更为分散,织构强度显著减弱,这与XRD图谱中主峰强度的降低相一致,说明混合粉末的引入在降低织构强度的同时也改变了晶体学取向的集中程度,反映出组织的随机化趋势增强。

图10为晶粒等效圆直径分布图,进一步佐证了上述结果。 S_1 试样的平均晶粒尺寸为 $82.3\mu\text{m}$,而 S_3 试样降低至 $76.0\mu\text{m}$,且粗大晶粒明显减少,说明混合粉末的添加对晶粒具有显著的细化作用^[24]。这种细化机制主要归因于:①部分未完全熔化的WC颗粒在熔池中作为异质形核核心,提升了晶粒的形核率。②Co的引入增强了局部成分过冷,抑制了晶粒长大,从而提高了晶粒数密度。

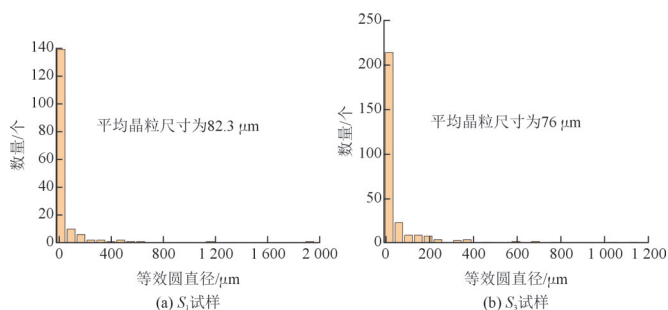


图10 采用CMT-WAAM工艺打印的试样的晶粒等效圆直径分布

Fig.10 Equivalent circle diameter distribution of grains in specimens printed by CMT-WAAM process

结合图6~图8可进一步揭示微观成分与相组成的演变规律。 S_3 试样中,W、Nb、Co等元素在晶界及柱状晶间明显富集,表明WC颗粒在沉积过程中部分保留或发生冶金反应,并与基体元素生成以W、Nb为主的MC型碳化物。XRD图谱(图5)中, S_3 试样的WC与MC相(如NbC)衍射峰强度显著增强,进一步验证了第二相的析出行为,这些弥散分布的硬质相可能通过晶界钉扎效应抑制柱状晶长大。结合相关研究,可推测其在局部区域内对等轴晶的形成具有一定促进作用,从而在晶粒细化与织构调控方面发挥潜在影响。然而,本研究的EBSD与XRD结果尚不足以提供典型粒子刺激形核(PSN)效应的直接证据。

2.3 力学性能

不同Co含量对增材墙试样显微硬度的影响见图11。可以看出,引入WC-Co增强相后,试样的显微硬度均得到提高,加入质量分数为7%的Co后,镍基合金平均硬度最大,相较纯IN625合金硬度提升了9.31%。同时,随Co含量增加,高硬度WC增强相的含量逐渐减少,显微硬度相应下降。

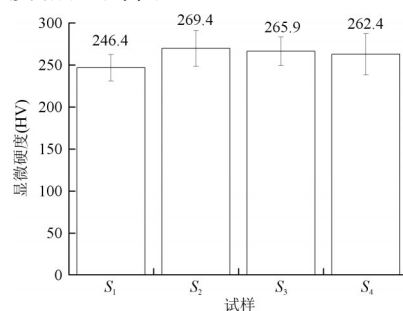


图11 不同比例混合粉末WAAM沉积墙平均显微硬度
Fig.11 Average microhardness of WAAM-deposited walls with different proportions of mixed powders

图12为横向与纵向对应位置选取的代表性试样(伸长率最接近该位置3组平行试样的平均值)的应力-应变曲线及其力学性能。分析表明,添加不同比例的混合粉末对材料力学性能产生了显著影响。试样纵向伸长率受混合粉末影响最大,横向伸长率受影响最小。同时,混合粉末的添加增强了所有试样的最大抗拉强度,但所有试样的应力-应变曲线均未呈现明显的屈服点及屈服平台现象^[25]。纯IN625增材试样(S_1)表现出显著各向异性,其纵向伸长率明显高于横向,而纵横向的抗拉强度差异较小。引入混合粉末后, S_2 的纵向伸长率较 S_1 降低了约20%,随Co含量增加(S_3 、 S_4),纵向伸长率逐步恢复。横向伸长率变化相对缓和,仅较 S_1 下降了约6%,并随Co含量增加逐渐回升至接近 S_1 水平。值得注意的是,所有含混合粉末的试样在纵、横两个方向上的抗拉强度均较 S_1 提升了约10%。

显微组织分析表明, S_1 试样在沉积方向形成连续取向的柱状枝晶,导致其力学性能呈现显著各向异性。引入WC/Co混合粉末后,WC颗粒既可能以弥散相形式存在,也可能与Nb、Mo等元素反应生成MC型碳化物,在晶界处发挥钉扎与强化作用,因此 S_2 ~ S_4 试样的抗拉强度均高于 S_1 。然而,WC在沉积过程中易于局部聚集,尤其在晶界处易形成应力集中,从而削弱纵向塑性,其中 S_2 的伸长率下降最为明显。随Co含量增加,WC与基体间的润湿性和冶金结合改善,部分缓解了塑性降低,使 S_3 和 S_4 的伸长率逐步回升。

图13为试样在不同方向的拉伸断口形貌。沉积方向上,纯IN625合金(S_1)的断口相对平整;引入增强相

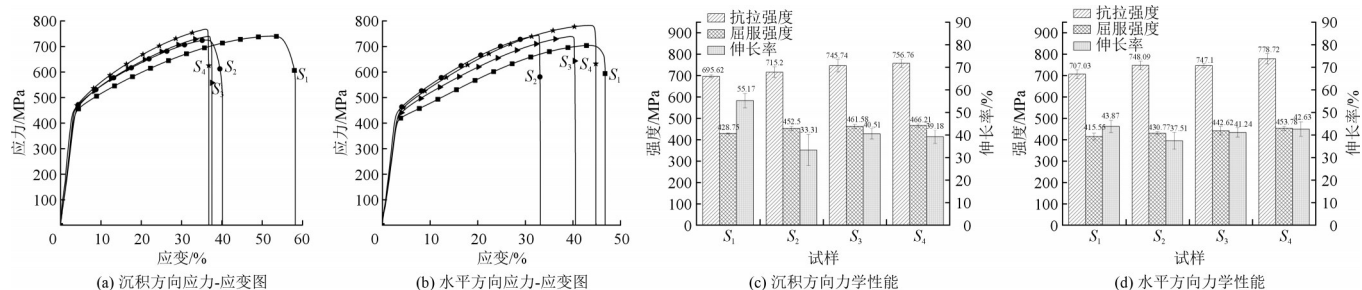


图 12 不同混合粉末 WAAM 沉积墙拉伸试样应力-应变图及力学性能

Fig.12 Stress-strain curves and mechanical properties of tensile specimens for WAAM-deposited walls with different proportions of mixed powders

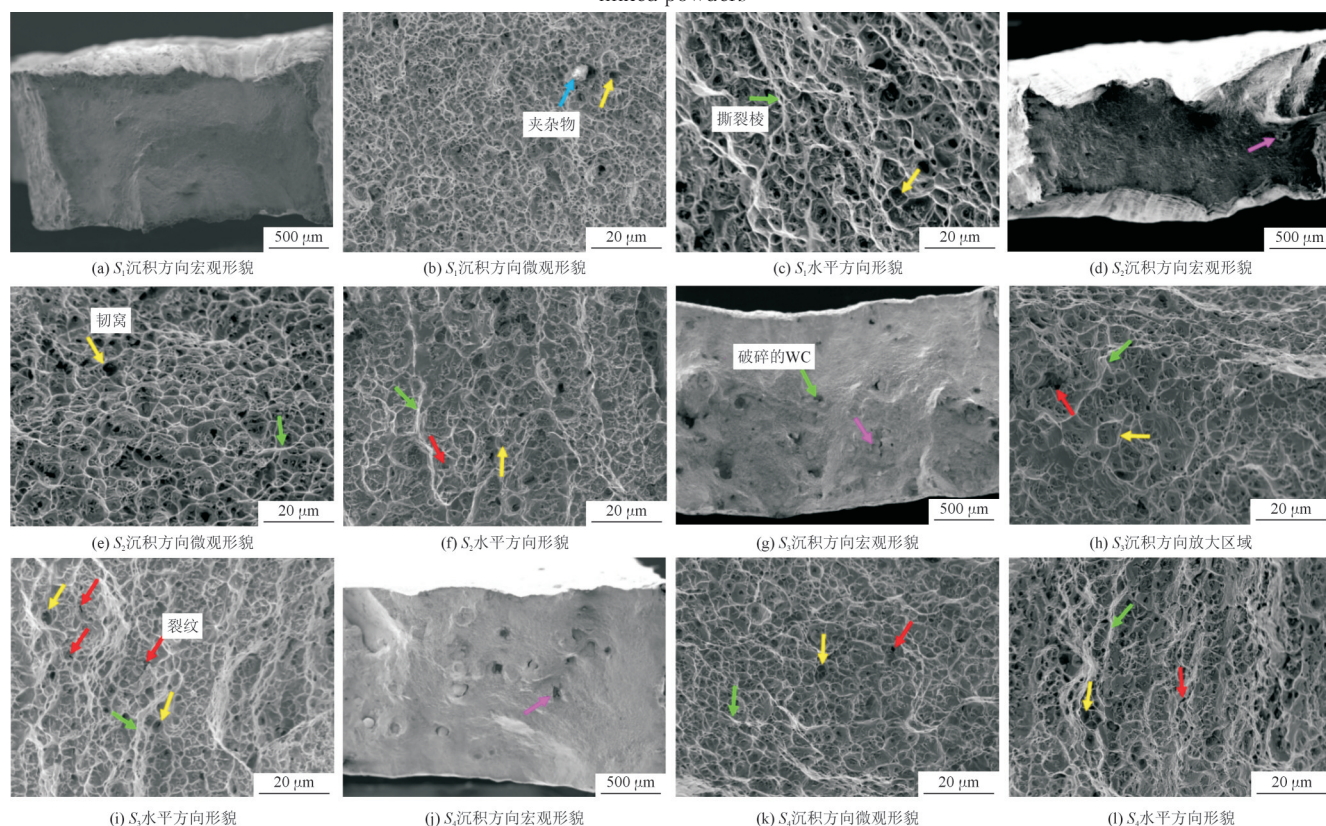


图 13 不同方向拉伸试样的断裂形貌

Fig.13 Fracture morphologies of tensile specimens along different direction

后, S_2, S_3 断口出现明显的 WC 聚集与破碎坑洞, 表明局部应力集中易诱发断裂。从整体形貌来看, 试样在拉伸过程中发生显著塑性变形, 并最终与拉伸轴约 45° 的角度断裂, 表现出较高的伸长率。微观观察显示断口表面布满大量韧窝, 局部呈蜂窝状结构, 并伴有小孔形成, 为颈缩演化提供条件, 表明断裂机制为典型的穿晶韧性断裂^[26]。水平方向试样断口则表现出明显的二次裂纹特征。进一步观察发现, 其边界区域呈台阶状韧窝形貌, 断口表面同时分布台阶结构与韧窝, 表明断裂过程兼具局部塑性变形和沿晶开裂机制。此外, 断口表面可见显著的枝晶撕裂痕迹, 二次裂纹优先在枝晶间萌生并沿其生长方向扩展, 该特征在图 13c、图 13f、图 13i 和图 13l 中得到验证。

断裂机制分析显示, 沉积方向断口以大量均匀韧

窝和蜂窝状结构为特征, 表明基体塑性变形占主导, 属于典型穿晶韧性断裂, 而横向断口则出现台阶状韧窝和沿晶二次裂纹, 反映出柱状晶界的脆性开裂特征, 并与 EDS/XRD 揭示的晶界碳化物析出及元素偏聚现象一致。综上, 混合粉末的引入一方面通过颗粒强化与细晶作用提升了材料强度, 另一方面因 WC 聚集和晶界偏聚导致塑性降低, 两者共同决定了试样的力学性能差异及断裂行为。

3 结 论

(1) WAAM-CMT 沉积层沿高度方向呈现显著组织梯度, 底部以短柱状与柱状枝晶混合为主, 中上部因热量累积逐渐演化为胞状枝晶与柱状枝晶共存, 顶部

则主要为柱状枝晶。WC颗粒在熔池中形成过渡层并作为异质形核相,有效阻碍柱状枝晶生长,促进晶粒细化与组织调控。

(2)Co的加入改善了WC与熔池的润湿性并促进晶粒细化,同时诱导MC型碳化物析出和多元固溶体的形成,从而提升高温强度与蠕变性能。但过量碳化物沿晶界析出及元素偏析会导致脆化和裂纹敏感性增加,因此Co含量控制对组织稳定性与服役性能优化至关重要。

(3)WC-Co的引入显著提高复合材料的整体硬度,当Co含量为7%时,平均硬度达到峰值。随Co含量进一步增加,硬度略有下降。添加混合粉末的试样在纵向与横向的最大抗拉强度上均较纯IN625合金提升了约10%。

(4)纯IN625试样表现出明显的拉伸各向异性,其纵向伸长率显著高于横向,而抗拉强度差异较小。引入WC-Co增强相后,纵向伸长率有所降低,但随Co含量增加逐渐回升;横向伸长率变化较缓,并趋近于IN625合金水平。复合材料在沉积方向表现出显著塑性变形,而在45°方向易发生断裂。水平方向试样断口呈台阶状韧窝特征,表现为局部塑性变形与沿晶断裂的混合模式。

参 考 文 献

- [1] 秦兰兰. 激光增材制造IN625镍基高温合金组织及性能研究[D]. 安徽马鞍山:安徽工业大学, 2017.
- [2] 张旭, 王金初, 朱亮, 等. Inconel 617镍基合金电弧增材制造微观组织与力学性能[J]. 焊接, 2024(2): 31-35.
- [3] VOTRUBA V, DIVIS I, PILSOVA L, et al. Experimental investigation of CMT discontinuous wire arc additive manufacturing of Inconel 625[J]. Metals and Materials International, 2022, 122(2): 711-727.
- [4] CHEN Y H, XU M F, ZHANG T M, et al. Grain refinement and mechanical properties improvement of Inconel 625 alloy fabricated by ultrasonic-assisted wire and arc additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 910: 164 957.
- [5] SELVI S, VISHVAKSENAN A, RAJASEKAR E. Cold metal transfer (CMT) technology-An overview[J]. Defence Technology, 2018, 14(1): 28-44.
- [6] 徐文虎, 张培磊, 蒋旗, 等. 电弧轨迹对CMT电弧增材制造Inconel 625合金厚壁件组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(10): 17-21, 47.
- [7] 林筱鹏, 罗金山, 顾小燕, 等. 基于冷金属过渡的电弧熔丝增材Inconel 625合金的组织与性能研究[J]. 材料保护, 2022, 55(10): 17-23.
- [8] XU P H, ZHU L D, XUE P S, et al. Microstructure and properties of IN718/WC-12Co composite coating by laser cladding[J]. Ceramics International, 2022, 48(7): 9 218-9 228.
- [9] HE S S, PARK S, SHIM D, et al. Study on microstructure and abrasive behaviors of Inconel 718-WC composite coating fabricated by laser directed energy deposition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 2 926-2 946.
- [10] GAO Y K, CHEN H S, ZHOU J, et al. Microstructures and wear behaviors of WC particle reinforced nickel-based composites fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 95: 291-301.
- [11] ZOU Y M, TAN C L, QIU Z G, et al. Additively manufactured SiC-reinforced stainless steel with excellent strength and wear resistance[J]. Additive Manufacturing, 2021, 41: 101 971.
- [12] 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, 2015, A635: 118-128.
- [13] KARIMI M R, WANG S H, JELOVICA J. Taguchi-based experimental investigation into weld cladding of Ni-WC MMC overlays by CMT process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(5-6): 2 433-2 461.
- [14] PARMAR G, TOMAR B, ANAND M, et al. Comparative analysis of microstructure and mechanical properties in CMT- and GTAW-based wire arc directed energy deposited Inconel 625[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2025, 78(6): 133.
- [15] YU X Q, BAI X W, SHI X Q, et al. Microstructures and properties of wire and arc additively manufactured steel matrix composites with addition of WC by gravity-driven side powder feeding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81: 236-249.
- [16] OZGUN O. WC-reinforced Inconel 625 superalloy matrix composites[J]. Iranian Journal of Science and Technology, 2020, 44(3): 825-839.
- [17] RASHID M, SABU S, KUNJACHAN A, et al. Advances in wire-arc additive manufacturing of nickel-based superalloys: Heat sources, DfAM principles, material evaluation, process parameters, defect management, corrosion evaluation and post-processing techniques[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2024, 7(6): 882-913.
- [18] 唐斌. CMT电弧熔丝增材Inconel 625镍基合金组织性能及热处理工艺研究[D]. 江苏镇江:江苏科技大学, 2022.
- [19] LI W L, DI R F, YUAN R W, et al. Microstructure, wear resistance and electrochemical properties of spherical/non-spherical WC reinforced Inconel 625 superalloy by laser melting deposition[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 74: 413-422.
- [20] LIU J L, ZHANG J, MENG J, et al. The effect of Co on the microstructure and stress rupture properties of a single crystal superalloy[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(4): 414-420.
- [21] SUN N, FANG Y, ZHANG J Q, et al. Effect of WC-12Co addition on microstructure and wear resistance of Inconel 625 matrix composites prepared by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 602 106.
- [22] 刘静姝, 王磊, 刘杨, 等. Co含量对一种新型高温合金铸态及热处理组织的影响[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(4): 351-360.
- [23] 马克, 程龙, 李继红, 等. 不同工艺参数MIG焊Inconel 625熔覆层微观组织研究[J]. 焊管, 2024, 47(2): 50-56.
- [24] MENG Y F, YU Q X, WU X, et al. Wire arc additive manufacturing of Al-Si-Mg aluminum alloy through wire-powder synchronous deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(3): 701-714.
- [25] MOHANRAJ R, BASITH S N A, CHANDRU S, et al. A review on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated using wire arc additive manufacturing process[J]. Rapid Prototyping Journal, 2024, 30(7): 1 337-1 347.
- [26] KOTZEM D, BEERMANN L, AWD M, et al. Mechanical and microstructural characterization of arc-welded Inconel 625 alloy[J]. Materials, 2019, 12(22): 3 690.

(编辑:彭瑾)