

TC4添加调控激光熔化沉积GH4169合金组织与性能

程春龙¹, 蒋 巍¹, 许 泉¹, 王叶青¹, 王 林¹, 陈 正^{1,2}

(1. 中国矿业大学 材料与物理学院, 江苏 徐州 221116)

(2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区 工学院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘 要: 在常规GH4169合金粉末中添加TC4合金粉末, 代替Al和Ti合金化, 采用球磨合金化与激光熔化沉积技术制备了具有不同TC4含量的GH4169合金试样。研究了TC4添加及其含量对激光熔化沉积GH4169合金组织与性能的影响。结果表明, 激光熔化沉积TC4/GH4169合金显微组织仍主要由粗大柱状晶构成, 但柱状晶一次枝晶臂间距及晶粒尺寸降低, Laves相由连续长链状转变为弥散短棒状, 长宽比由9.2下降至2.6, 合金组织得到明显细化。TC4添加可有效代替Al和Ti合金化, 沉积过程中TC4熔化, 主要组成元素Ti和Al充分溶解到GH4169合金熔体, 参与凝固及组织的形成, 提升合金沉积熔池的凝固速率, 减少元素偏析, 促进强化相 γ' 和 γ'' 析出, 提高沉积态合金硬度与力学性能。激光熔化沉积GH4169合金中TC4添加可以起到细晶强化、固溶强化和析出强化作用。

关键词: 激光熔化沉积; GH4169; TC4; 组织与性能

中图分类号: TG146.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)11-2870-09

1 引言

GH4169合金是目前应用最广泛且在-253~650℃范围内应用具有优异强度、抗腐蚀、抗蠕变及高疲劳寿命的镍基高温合金, 广泛应用于航空发动机涡轮盘与叶片、石油管道、核工业结构件等, 有“万能合金”的美誉^[1-3]。该合金是一种沉淀强化型变形高温合金, 其合金化程度高, 传统真空感应熔炼易出现合金化元素偏析, 产生黑斑和白斑等冶金缺陷, 影响合金性能^[4-5]。

激光增材制造技术具有高冷却速率与高温度梯度特征, 十分适用于GH4169等容易出现成分偏析的镍基高温合金的成形, 但该技术同时导致GH4169合金沉积态组织多为贯穿多道沉积层的粗大柱状晶^[6-7]。此外, GH4169合金Nb元素偏析及粗大Laves相的形成也是其典型组织特征, 该现象的发生不利于强化相 γ' 和 γ'' 的析出以及合金的高温力学性能。为解决这一问题, 国内外开展了大量的研究, 美国学者通过加入9wt%的Co并提高Al含量约1wt%, 同时降低Fe含量约9wt%, 获得了718Plus合金(国内牌号GH4169), 其服役温度可高达704℃^[8]。在国内, 研究者为了抑制Nb元素偏析做出诸多尝试, 指出进一步合金化, 如提高Co、Al、Ti含量有助于强化相的析出, 进而改善GH4169合金的组织与高温力学、抗蠕变等性能。其中, 姚晓雨^[9]考察了Co和Al对一

种718基合金(国内牌号GH4169)组织及力学性能的影响, 结果表明, Co的添加显著提高Nb、Mo元素在 γ 基体和Nb元素在Laves相中的固溶度, 从而降低Nb和Mo元素在剩余液相的偏析, 提升 γ 基体的形核率, 进而实现合金晶粒的细化。此外, Al的添加可提高晶界Laves相析出速度, 细化合金晶粒尺寸, 并促进晶内 γ' 相的析出, 提高合金的强度与塑性。谢锡善等人^[10]研究表明, GH4169合金中增加Al和Ti含量可提高 γ' 和 γ'' 相的溶解温度, 提升 γ' 和 γ'' 相的析出总量, 从而提升合金的使用温度。

此外, 目前研究多集中于合金化对真空感应熔炼制备GH4169合金组织性能的影响, 合金化对激光熔化沉积制备GH4169合金组织与性能的影响研究有待进一步考察。另外, 从力学性能角度看, 虽然增材成形GH4169合金韧性较高, 但强度不太理想, 这限制了其进一步发展和应用^[11-13]。进一步合金化以期引入更多强化相, 提升GH4169合金强度, 提高其综合力学性能, 以及研究显微组织随合金化演变尤为重要。单独添加Al与Ti等元素将增大其分散难度, TC4和GH4169具有相近的熔点与相差不大的热膨胀系数^[14]。因此, 本研究考虑添加TC4合金提高GH4169合金的合金化程度, 考察其对激光熔化沉积GH4169合金组织与性能的影响。

本研究采用高能球磨的方法将TC4粉末进行破碎细

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2023M733776); 江苏省自然科学基金(BK20231081); 江苏省卓越博士后基金(2023ZB780)

作者简介: 程春龙, 男, 1993年生, 博士后, 助理研究员, 中国矿业大学材料与物理学院, 江苏 徐州 221116, E-mail: ccl@cumt.edu.cn

化,再通过三维机械混料机将GH4169粉末与TC4粉末混合均匀,制备含有不同TC4含量的混合粉末,使用激光熔化沉积方法成形不同TC4添加量的GH4169合金试样,研究TC4添加对激光熔化沉积GH4169合金组织与性能的影响。

2 实验

所用GH4169和TC4合金粉末化学成分见表1和表2,其中GH4169合金粉末粒径约50 μm,TC4合金粉末粒径约100 μm,2种原始粉末球形度均良好,表面光滑,无明显缺陷,如图1a、1b所示。

设计1wt% TC4/GH4169、3wt% TC4/GH4169、5wt% TC4/GH4169、8wt% TC4/GH4169(后续简写为1TC4/GH4169、3TC4/GH4169、5TC4/GH4169、8TC4/GH4169)

表1 实验用GH4169合金粉末化学成分
Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy powder for experiment (wt%)

Ni	Cr	Nb	Mo	Fe
53.15	19.58	4.93	2.98	Bal.

表2 实验用TC4合金粉末化学成分
Table 2 Chemical composition of TC4 alloy powder for experiment (wt%)

Al	V	Fe	C	Ti
6.03	3.92	0.02	0.01	Bal.

成分粉末。通过单罐行星式球磨机将TC4粉末破碎为细小颗粒,然后通过三维混料机连续翻滚碰撞将TC4与GH4169合金粉末均匀混合,得到表面均匀附着细小TC4颗粒的GH4169合金预制粉,如图1d所示。

采用中科煜宸RC-LMD-8060同轴送粉式激光熔化沉积设备进行TC4/GH4169合金增材制造实验,在激光功率1200 W,扫描速度360 mm/min,送粉速率8.2 g/min工艺参数下制备了单道单层及单道多层沉积层。激光增材制造过程中,为防止金属粉末在沉积过程中氧化,对打印腔室进行抽真空处理并充入高纯氩气作为保护气体,增材制造过程中通过氧含量检测仪实时监测氧含量,控制氧含量保持在50 μg/g以下。本实验基板材料为316L不锈钢,基板尺寸为160 mm×160 mm×20 mm,于160 mm×160 mm表面进行试样的沉积。实验前使用砂纸将基板表面打磨光滑,去除表面氧化层,随后以丙酮擦拭清洗基板表面,乙醇冲洗后吹干备用。

沉积态样品通过线切割制成5 mm×4 mm×3 mm试样,经砂纸打磨抛光在体积分数为70%的磷酸溶液中进行电解腐蚀后进行组织观察。采用德国DVM6M光学显微镜对沉积态合金的宏观组织形貌进行观察。选用配备能谱仪(EDS)的日本SU3500扫描电子显微镜(SEM)对沉积态合金的微观组织进行观察。采用德国Bruker公司的D8 Advance型X射线衍射仪(XRD)对沉积态合金试样相组成进行分析。此外,TC4/GH4169合金的析出相形貌及相结构在EM 2100型透射电子显微镜(TEM)下进行观察。试样晶体取向测试通过德国蔡司Gemini 300

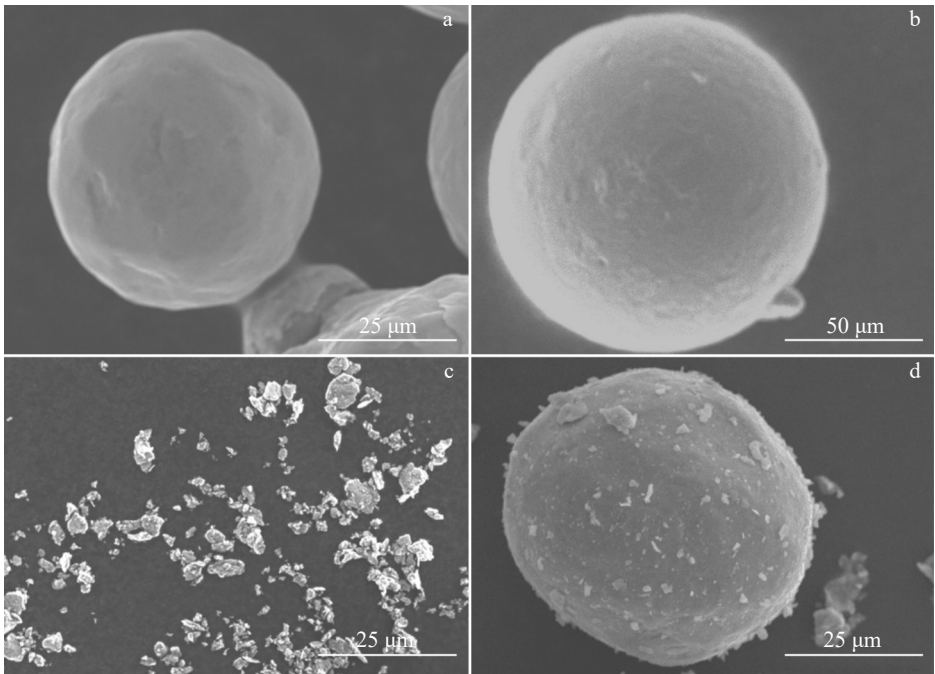


图1 实验粉末SEM形貌
Fig.1 SEM morphologies of experimental powders: (a) GH4169 raw powder, (b) TC4 raw powder, (c) ball-milled TC4 powder, and (d) precast TC4/GH4169 powder

扫描电镜电子背散射衍射(EBSD)完成。硬度测试通过 Wilson VH1102 型显微硬度计进行,加载载荷为 100 g,保压时间为 10 s,每个试样至少取 5 个距离间隔高于 100 μm 的点进行测试,结果取平均值。室温拉伸测试通过 Instron 5982 万能试验机完成,拉伸速率为 1.2 mm/min。

3 实验结果

3.1 TC4 添加对合金宏微观组织形貌的影响

图 2 为激光熔化沉积 TC4/GH4169 合金单道单层沉积层宏观组织形貌。由图 2 可知,TC4 添加略有提高 GH4169 合金沉积熔池的稀释率。沉积熔池的稀释率提升在于,TC4 的添加导致合金粉末在熔池中合金化反应放热量增多,熔池整体温度提升,发生更大深度重熔^[15]。图 3 给出了激光熔化沉积 TC4/GH4169 合金单道多层沉积层宏观组织形貌。由图 3 可以看出,当沉积层数较多时,GH4169 合金沉积层出现倾斜,沉积不能稳定进行。1wt% 和 3wt% TC4 添加时,沉积层宽化严重,总体来看,

5wt% TC4 添加的 GH4169 合金沉积层整体形貌较好。

此外,激光熔化沉积 TC4/GH4169 合金组织仍表现常规沉积态 GH4169 合金组织特征。沉积层底部主要为粗大柱状晶,上部主要为细小等轴晶。单道多层沉积层清晰可见层与层之间的层带,但粗大柱状晶贯穿多层沉积层,表明各沉积层之间冶金结合良好,保证了合金组织生长上的连续性与各层间的结合强度。

为进一步考察 TC4 添加对激光熔化沉积 GH4169 合金组织形貌的影响,对单道单层沉积层试样底部相同位置进行了高倍观察,如图 4 所示。沉积层底部粗大柱状晶由下而上生长,方向与沉积层底部近乎垂直。采用平均值法对实验合金的一次枝晶臂间距进行测量^[16],图 5 给出了实验合金图 4 所示柱状晶一次枝晶臂间距统计结果, GH4169、1TC/GH4169、3TC/GH4169、5TC/GH4169 和 8TC/GH4169 合金沉积层底部柱状晶一次枝晶臂间距分别为 5.6、3.9、3.6、3.5 和 4.5 μm ,合金粗大柱状晶一次

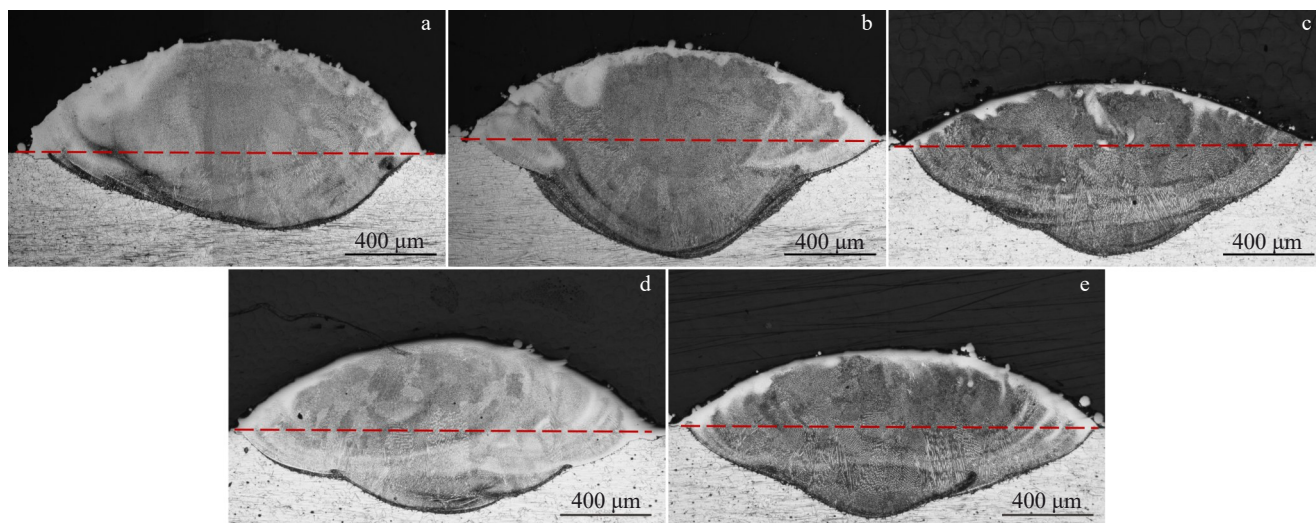


图2 TC4/GH4169 合金试样单道单层沉积层宏观组织形貌

Fig.2 Macrostructures of single layer deposit of TC4/GH4169 superalloy samples: (a) GH4169, (b) 1TC4/GH4169, (c) 3TC4/GH4169, (d) 5TC4/GH4169, and (e) 8TC4/GH4169

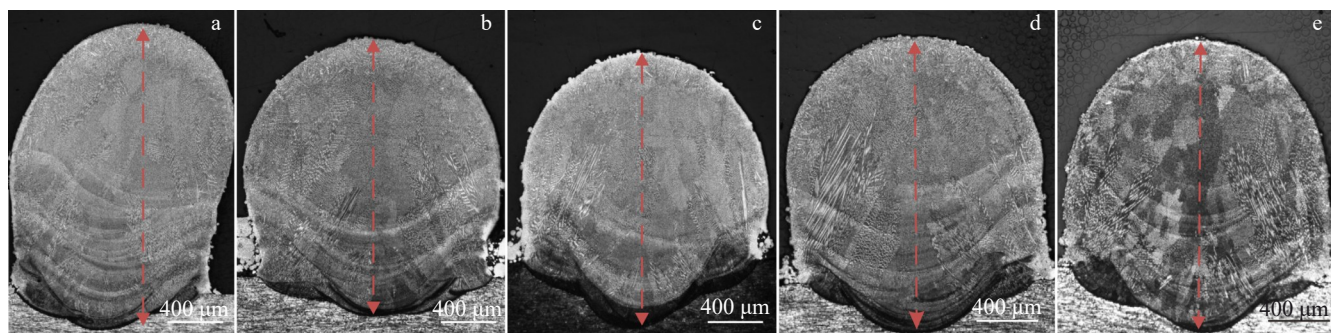


图3 TC4/GH4169 合金试样单道多层沉积层宏观组织形貌

Fig.3 Macrostructures of multilayer deposit of TC4/GH4169 superalloy samples: (a) GH4169, (b) 1TC4/GH4169, (c) 3TC4/GH4169, (d) 5TC4/GH4169, and (e) 8TC4/GH4169

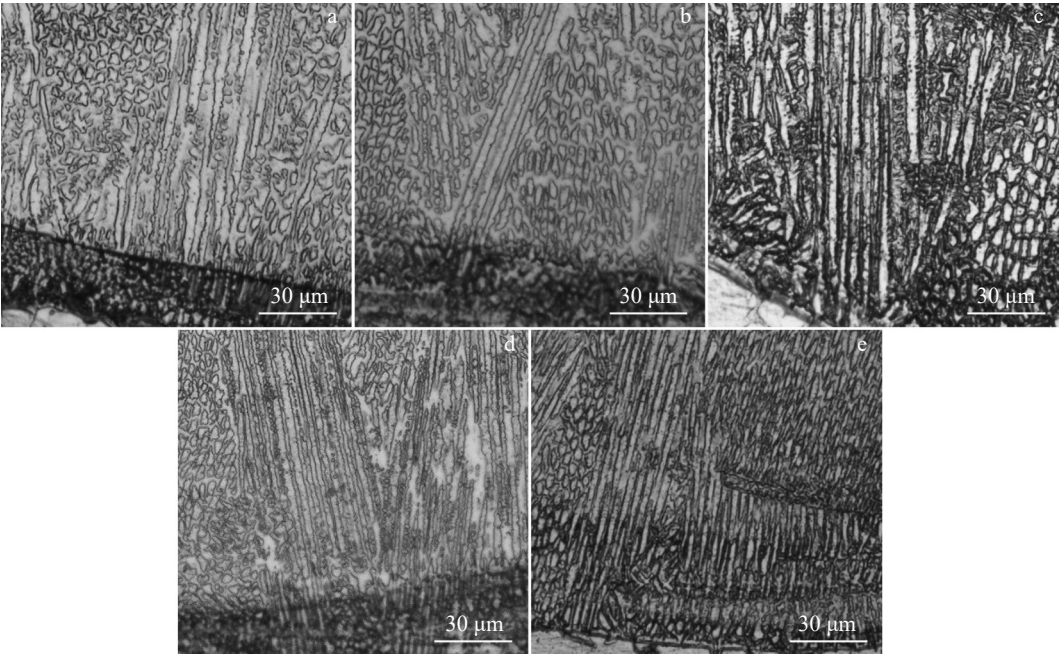


图 4 TC4/GH4169 合金试样单层沉积层底部微观组织形貌

Fig.4 Microstructures of the bottom of single layer deposit of TC4/GH4169 superalloy samples: (a) GH4169, (b) 1TC4/GH4169, (c) 3TC4/GH4169, (d) 5TC4/GH4169, and (e) 8TC4/GH4169

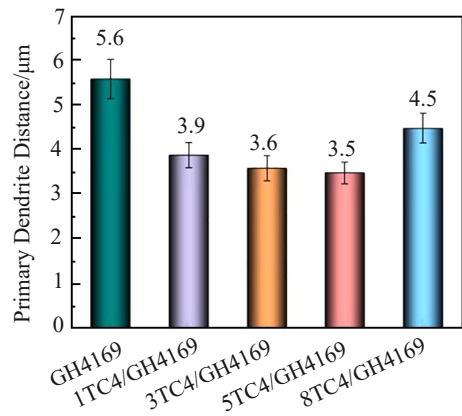


图 5 TC4/GH4169 合金试样单层沉积层底部柱状晶一次枝晶臂间距

Fig.5 Primary dendrite arm distance of columnar crystals at the bottom of single layer deposit of TC4/GH4169 superalloy samples

枝晶臂间距随 TC4 添加整体有所下降。凝固时冷却速率是影响枝晶间距的重要因素,当冷却速率上升时,枝晶生长时间被缩短,则枝晶间距相应降低^[17],因此,TC4 添加有助于提升合金沉积熔池的凝固速率,获得更加有益于性能的组织。

以上实验结果表明,5TC4/GH4169 合金展现出较好的沉积效果,选取 GH4169 与 5TC4/GH4169 合金单道单层沉积层试样进行 EBSD 分析,其结果如图 6 所示。由于基板与沉积层所用材料的差异,基板为细小等轴晶,而沉积层则表现为由下而上生长的粗大柱状晶,其生长方

向沿沉积层边界法线向沉积层内与顶部发展。从图 6a 和 6c 均可见,存在较小晶粒打断粗大柱状晶的外延生长现象,这是由于 Marangoni 对流影响温度梯度导致阻碍了柱状晶的生长^[11]。此外,图 6a 所示的 GH4169 合金中柱状晶最大尺寸可达 225 μm,而图 6c 所示的 5TC4/GH4169 合金中柱状晶最大尺寸为 175 μm,TC4 的添加细化了沉积态 GH4169 合金晶粒,这将有利于合金力学性能的提升,晶粒细化的原因为 TC4 的添加引入 Ti、Al 等更多异质元素,凝固时形成更大的成分过冷,同时增加形核位点^[18-19]。此外,从图 6b 和 6d 所示的极图可以看出,沉积态 GH4169 与 5TC4/GH4169 合金极密度最大值分别为 4.87 和 3.17,意味着 2 种合金晶粒生长均未表现出择优取向,即 TC4 添加对 GH4169 合金晶粒生长取向无影响。

3. 2 TC4 添加对合金物相的影响

图 7 给出了沉积态 TC4/GH4169 合金试样 XRD 图谱以及 49.5°~51.5°范围内详细图谱。由 XRD 分析结果表明,沉积态 TC4/GH4169 合金主要由基体 γ 相组成,检测到(111)γ、(200)γ、(220)γ、(311)γ 4 个晶面对应的衍射峰。未检测到其他相存在可能是:(1)其他相析出量过少不足以被 XRD 检测到;(2)其他相衍射峰与基体 γ 相衍射峰重合。因此,需通过其他检测手段进一步确定合金相组成。此外,由图 7b 所示的衍射峰可以看出,与 GH4169 合金相比,添加 TC4 的合金(200)γ 晶面衍射峰均有一定程度的左移,即 θ 减小,根据布拉格公式^[15]:

$$2d\sin\theta=n\lambda$$

(1)

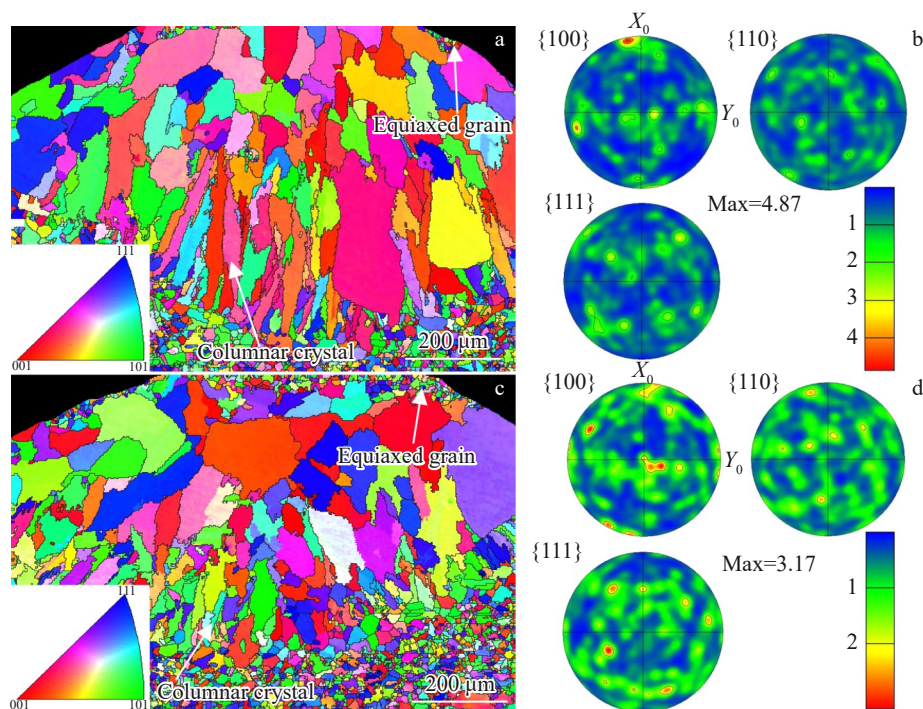


图6 GH4169 和 5TC4/GH4169 合金试样单道单层沉积层 EBSD 照片

Fig.6 EBSD images of single layer deposit of GH4169 and 5TC4/GH4169 superalloy samples: (a) inverse pole figure of GH4169, (b) pole figure of GH4169, (c) inverse pole figure of 5TC4/GH4169, and (d) pole figure of 5TC4/GH4169

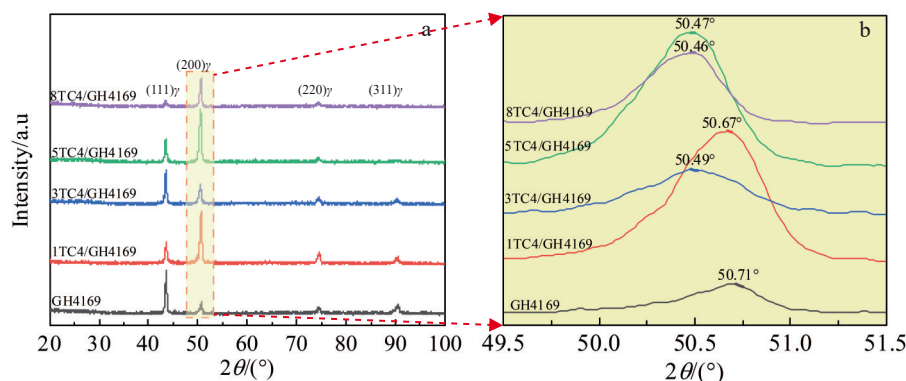


图7 沉积态 TC4/GH4169 合金试样 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of as-deposited TC4/GH4169 superalloy samples: (a) $2\theta=20^\circ-100^\circ$; (b) $2\theta=49.5^\circ-51.5^\circ$

式中, d 为晶面间距, θ 为入射 X 射线与相应晶面的夹角, λ 为 X 射线的波长, n 为衍射级数。可知, θ 减小意味着晶面间距 d 增大, 即 TC4 添加导致合金晶面间距增大, 说明晶格发生畸变^[9], 对基体起到强化作用, 这可能是 TC4 中 Ti、Al 等原子固溶到基体的原因, 即 TC4 添加导致 γ 相原子固溶度增加, 固溶强化加强。

图 8 为沉积态 TC4/GH4169 合金 SEM 形貌。由图可知 TC4/GH4169 合金基体中分布着白色析出相, 其中 GH4169 合金白色析出相呈长链状, 其长宽比约为 9.2, TC4 添加后合金基体中白色链状析出相被细化, 形貌逐渐转变为非连续短棒状, 其长宽比也显著减小, TC4 添加量为 5wt% 时, 白色相长宽比约为 2.6。对图 8 中实验合

金灰黑色基体与白色析出相进行 EDS 点分析, 其结果如表 3 所示, 可以看出灰黑色区域 Ni、Fe、Cr 含量处于较高水平, Ni 含量在 44%~53% (质量分数) 范围内, Fe 含量在 20%~24% (质量分数) 范围内, Cr 含量在 19%~21% (质量分数) 范围内, 而 Nb 含量较低, 仅 3% 左右。与之相对的, 白色区域 Nb 含量远高于灰黑色区域, 达到 20% 以上, 但 Ni、Fe、Cr 含量较低。此外, $L \rightarrow \gamma + \text{Laves}$ 共晶转变是 GH4169 合金凝固后期发生的典型组织变化。由此判断, 灰黑色区域为基体 γ 相, 白色区域为脆性 Laves 相 (Cr_2Nb)^[20-21]。另一方面, 由 A、C、E、G、I 点 EDS 分析结果可知, 基体 γ 相中固溶的 Ti 含量随 TC4 添加量增加而增加, Ti 的较多固溶引起 γ 相晶格畸变, 进而导致晶面间

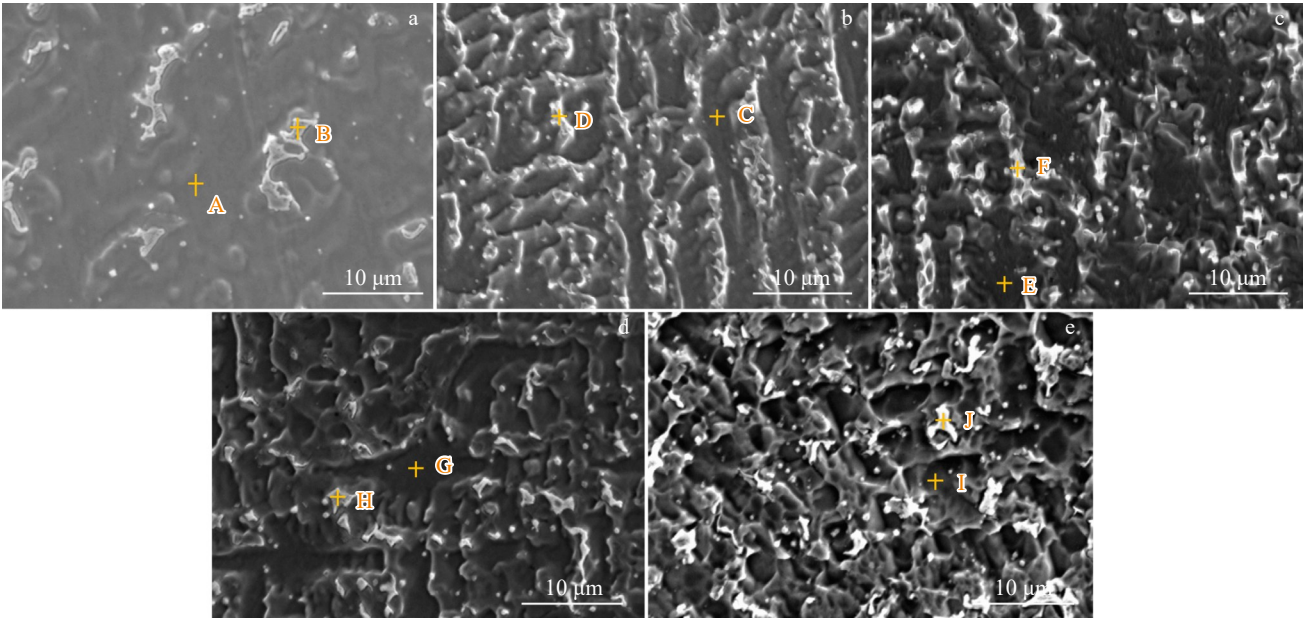


图8 沉积态 TC4/GH4169 合金微观组织 SEM 像

Fig.8 SEM images of as-deposited TC4/GH4169 superalloys: (a) GH4169, (b) 1TC4/GH4169, (c) 3TC4/GH4169, (d) 5TC4/GH4169, and (e) 8TC4/GH4169

表 3 图 8 中不同标记位置的 EDS 成分分析

Table 3 EDS analysis results of different points marked in Fig.8 (wt%)

Point	Ni	Fe	Cr	Nb	Ti	Al
A	52.02	20.35	19.71	2.68	0.69	0.90
B	40.27	11.38	12.29	28.03	1.65	0.51
C	51.79	20.75	20.06	3.20	0.82	0.75
D	39.23	14.27	15.40	21.91	3.36	0.28
E	51.55	20.02	19.48	3.29	1.14	0.63
F	39.50	14.83	16.56	19.59	3.51	0.39
G	51.77	21.36	21.01	2.83	1.41	0.78
H	39.23	14.27	15.40	21.91	3.72	0.28
I	44.85	24.00	20.78	2.71	2.49	0.89
J	33.90	17.11	14.61	23.26	4.58	0.41

距增加,其结果解释了图 7b XRD 图谱中衍射峰左移的原因。

对沉积态 GH4169 和 5TC4/GH4169 合金灰黑色 γ 相进行 TEM 观察,其结果如图 9 所示。可以看出,除图 7 与图 8 分析发现的相外,TEM 照片中出现了其他相,其呈白色粒状或椭球状,可以确定其为强化相 γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$)和 γ'' (Ni_3Nb),其中粒状相是 γ' ,椭球状相是 γ'' ^[11,22]。对比图 9a 和 9b 发现,沉积态 5TC4/GH4169 合金中强化相 γ' 和 γ'' 含量远高于 GH4169,即 TC4 添加提升了 GH4169 合金中强化相 γ' 和 γ'' 含量,将有利于合金力学性能的提升。此外,TC4 添加带来的 Al 元素含量的增加将抑制 Nb 元素偏析,并提高 Laves 相析出速度,细化合金晶粒尺寸,导致 Laves 相由长链状转变为短棒状^[9,23]。

图 10 给出了沉积态 GH4169 和 5TC4/GH4169 合金

组织内位错 TEM 照片,由于激光熔化沉积制造的高凝固速率、熔池扰动、体积变化等,凝固时热应力和组织应力来不及释放形成位错^[24-25],位错的出现有利于合金强度的提升。对比图 10a 和 10b 可以看出,5TC4/GH4169 合金位错密度更高,即 TC4 添加可以提升 GH4169 合金沉积态组织中的位错密度,其原因在于该合金成分更为复杂、凝固时冷却速率更大带来凝固后合金位错密度的提升,这同样有利于提高合金强度。

3.3 TC4 添加对合金力学性能的影响

为探究 TC4 添加对沉积态 GH4169 合金力学性能的影响,对实验合金试样进行显微硬度测试,每试样分别取 5 个不同的点进行测试,结果取平均值。合金显微硬度测试结果如图 11 所示,由图 11 可以看出,GH4169 合金试样显微硬度为 296.2HV,随 TC4 添加量的提高,试样的显

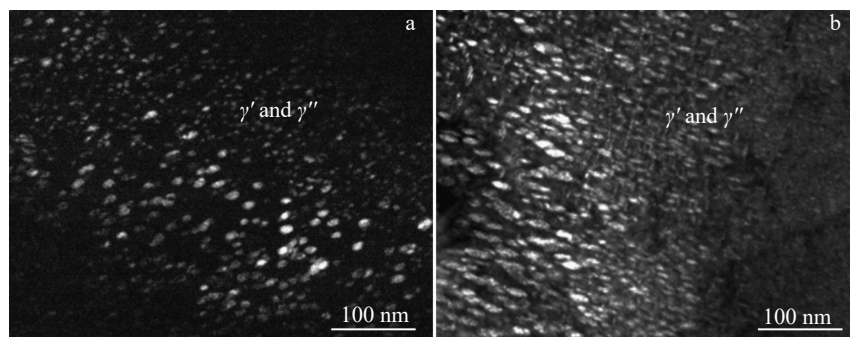


图9 沉积态 GH4169 和 5TC4/GH4169 合金微观组织 TEM 照片

Fig.9 TEM images of as-deposited superalloys: (a) GH4169 and (b) 5TC4/GH4169

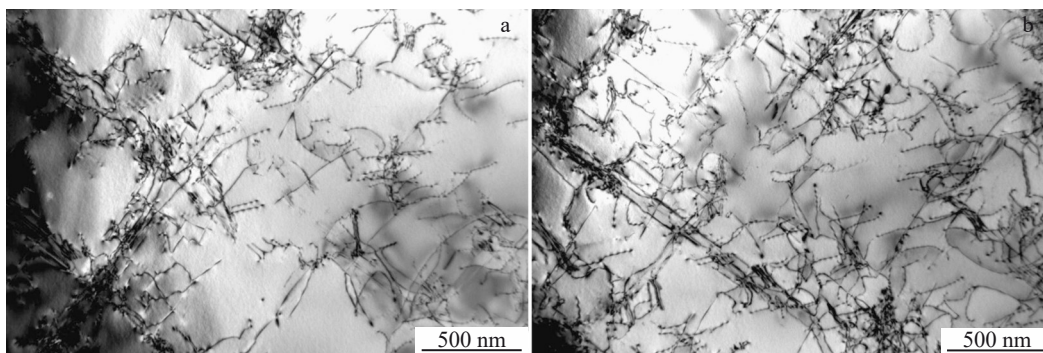


图10 沉积态 GH4169 和 5TC4/GH4169 合金位错 TEM 照片

Fig.10 TEM images of dislocations in as-deposited superalloys: (a) GH4169 and (b) 5TC4/GH4169

微硬度呈上升趋势。TC4 添加量为 0%~5% (质量分数) 时, 试样显微硬度提升较缓, 但当 TC4 添加量达到 8% 时, 试样显微硬度上升幅度较大, 其硬度值达到 365.1HV, 相较于 GH4169 提升 23.3%。材料的硬度提升与多种因素和机制有关^[26-27], 本实验中显微硬度的提高主要归因于细晶强化与析出强化。首先, 随着 TC4 添加量的提高, 晶粒组织得到细化, 实现细晶强化。其次, 由图 9 所示的 TEM 照片可以明显看出, 添加 5% TC4 后 GH4169 合金中的 γ' 与 γ'' 强化相析出量明显提高, 更多强化相的析出也导致合金硬度提升。

考察 TC4 添加对 GH4169 合金室温拉伸性能的影响, 对实验合金标准拉伸试样进行拉伸测试, 得到如图 12 所示的结果, 其中 8TC4/GH4169 高温合金沉积试样存在较多宏观裂纹, 力学性能较差, 对其不再进行拉伸性能测试。研究表明, Al 和 Ti 增多会使镍基高温合金具有更大的裂纹形成倾向^[28], 8TC4/GH4169 合金由于 Al 和 Ti 合金化程度更高, 凝固时冷却速率更大, 热应力和凝固应力大引起开裂。拉伸测试结果显示, 沉积态 GH4169 合金抗拉强度为 1021.58 MPa, 延伸率为 29.5%。随 TC4 添加及其含量的增加, 沉积态合金的强度逐步提升但伴随着塑性降低。1TC4/GH4169、3TC4/GH4169 和 5TC4/GH4169 合金沉积态抗拉强度分别为 1058.12、1081.43 和 1213.01 MPa, 延伸率分别为 25.3%、24.4% 和 17.5%。抗

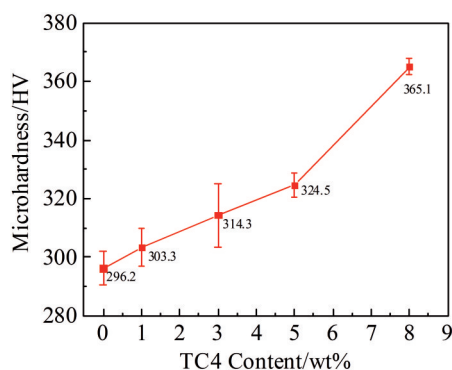


图11 不同 TC4 含量 GH4169 合金沉积态显微硬度

Fig.11 Microhardness of as-deposited GH4169 superalloy with different TC4 contents

拉强度分别提高了 3.6%、5.9% 和 18.7%, 其中添加 5% TC4 时合金抗拉强度提升最为显著。力学性能结果与微观组织形态分别对应, 晶粒越细, 晶界越多, 材料内部位错密度越大, 材料受到外力作用, 变形分散在更多晶粒中, 其强度也越高^[29]。因此, GH4169 合金中 TC4 添加代替 Ti 和 Al 的合金化, 沉积过程中 TC4 熔化, 其主要组成元素 Ti 和 Al 充分溶解到 GH4169 合金熔体, 参与凝固及凝固组织的形成, 结果提升沉积熔池凝固速率, 减少元素偏析的同时起到细晶强化、固溶强化、析出强化作用,

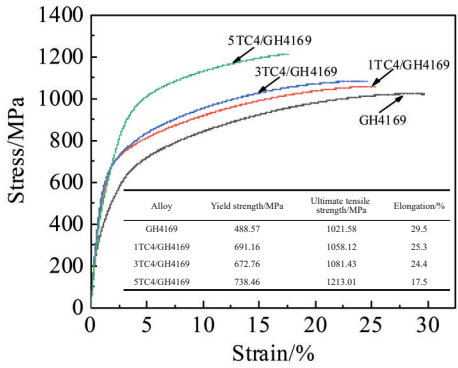


图 12 沉积态 TC4/GH4169 合金试样应力-应变曲线和力学性能
Fig.12 Stress-strain curves and mechanical properties of as-deposited TC4/GH4169 superalloy samples

综合提升了沉积态 GH4169 合金力学性能。

4 结 论

1)激光熔化沉积 GH4169 合金中 TC4 添加未改变沉积合金组织形态,合金沉积层底部主要为粗大柱状晶,上部主要为细小等轴晶。但 TC4 添加能有效细化合金沉积态晶粒与脆性 Laves 相尺寸,导致 Laves 相由连续长链状转变为弥散短棒状,长宽比由 9.2 下降至 2.6。

2)TC4 添加显著提升沉积态 GH4169 合金硬度与力学性能,其中 5wt% TC4 的添加效果最好,在延伸率下降不显著的同时将合金抗拉强度由 1021.58 MPa 提升至 1213.01 MPa,强度提高达 18.7%。

3)TC4 添加可有效代替 Al 和 Ti 合金化,沉积过程中 TC4 熔化,其主要组成元素 Ti 和 Al 充分溶解到 GH4169 合金熔体,参与凝固及组织的形成,提升合金沉积熔池凝固速率,减少元素偏析,促进强化相 γ' 和 γ'' 析出,提高沉积态合金硬度与力学性能。

4)激光熔化沉积 GH4169 合金中 TC4 添加可以起到细晶强化、固溶强化、析出强化的作用。

参考文献 References

[1] Tian Sugui(田素贵), Wang Xin(王 欣), Xie Jun(谢 君) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2013, 49(7): 845
[2] Liu Yongjun(刘拥军), Long Tianxin(龙田鑫), Guo Chengcheng(郭成城). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(10): 3522
[3] Pan Yifan(潘一帆), Liu Daoxin(刘道新), Liu Bo(刘 博) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(8): 2955
[4] Liu Fang(刘 芳), Sun Wenru(孙文儒), Yang Shulin(杨树林) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2008, 44(7): 791
[5] Shi Zhaoxia(石照夏), Xu Guohua(胥国华), Liu Ning(刘 宁). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(8): 2926

[6] Huang Weidong(黄卫东). *Laser Solid Forming*(激光立体成形)[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007: 1
[7] Qiu C, Ravi G A, Dance C *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 629: 351
[8] Kennedy R. *Superalloys*[J], 2005, 718(706): 1
[9] Yao Xiaoyu(姚晓雨). *Influence of Co and Al on the Microstructure and Mechanical Properties of A 718 Based Alloy* (Co 和 Al 对一种 718 基合金组织及力学性能的影响)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022
[10] Xie Xishan(谢锡善), Dong Jianxin(董建新), Fu Shuhong(付书红) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(11): 1289
[11] Yang Huihui(杨慧慧). *Microstructure Evolution and Performance Control of GH4169 Alloy Formed by Laser Selective Melting*(激光选区熔化成形 GH4169 合金的组织演变及性能调控)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021
[12] Zhou H, Yang Y Q, Han C J *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2023, 882: 145480
[13] Li Y G, Geng J W, Wang Z P *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2023, 467: 129690
[14] Song Chenchen(宋晨晨), Cai Yuchen(蔡昱陈), Zhu Yuhao(朱禹昊) *et al.* *Surface Technology*(表面技术)[J], 2022, 51(3): 326
[15] Ren Hang(任 航), Liu Fencheng(刘奋成), Lin Xin(林 鑫) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(10): 3289
[16] Ma M M, Wang Z M, Zeng X Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 685: 265
[17] Easton M A, Stjohn D H. *Acta Materialia*[J], 2001, 49: 1867
[18] Wu D J, Song C C, Di T D *et al.* *Composites Part B*[J], 2022, 235: 109736
[19] Ma G Y, Liu X, Song C C *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2022, 59: 103087
[20] Tian Y, Mcallister D, Colijn H. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2014, 45: 4470
[21] Zhao C Z, Wang L, Wang B B *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 27: 7259
[22] Tian Songwen(田淞文), Wang Xin(王 欣), Liu Lirong(刘丽荣) *et al.* *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2023, 43: 25
[23] Qin Lanyun(钦兰云), Pan Xiangda(潘相达), Wang Chao(王 超) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2022, 49(22): 2202007
[24] Yuan Shijun(元世军). *Research on the Process and Mechanical Properties of Direct Laser Deposition TC4/GH4169 Gradient Materials*(直接激光沉积 TC4/GH4169 梯度材料工艺及力学性能研究)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019
[25] Zhao W, He W F, Zhu D F *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2024, 29: 276
[26] Pan Yifan(潘一帆), Liu Daoxin(刘道新), Liu Bo(刘 博) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J],

- 2022, 51(8): 2955
- [27] Yang Junjie(杨俊杰), Zhang Changsheng(张昌盛), Li Hongjia(李洪佳) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2024, 60(1): 30
- [28] Wang Nan(王楠), Li Jinguo(李金国), Liu Jide(刘纪德) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(1): 257
- [29] Mao Diyue(毛笛越). *Research on the Process, Microstructure and Properties of GH4169 Alloy by Plasma Arc Additive Manufacturing*(等离子弧增材制造GH4169合金工艺与组织性能研究) [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020

Effects of TC4 Addition on Microstructure and Mechanical Properties of GH4169 Alloy Prepared by Laser Melting Deposition

Cheng Chunlong¹, Jiang Wei¹, Xu Quan¹, Wang Yeqing¹, Wang Lin¹, Chen Zheng^{1,2}

(1. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(2. Faculty of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China)

Abstract: GH4169 alloy samples with different TC4 contents were prepared using ball milling alloying and laser melting deposition by adding TC4 alloy powder to conventional GH4169 alloy powder instead of Al and Ti alloying. The effects of TC4 addition on microstructure and properties of GH4169 alloy prepared by laser melting deposition were investigated. The results show that TC4/GH4169 alloy is mainly composed of coarse columnar crystals, but the primary dendrite arm distance and grain size of the columnar crystals decrease. Besides, the Laves phase changes from continuous long chain to diffused short rod with the aspect ratio decreased from 9.2 to 2.6. During the deposition process, TC4 is melted, of which Ti and Al elements are released, then fully dissolved into GH4169 alloy melt, and finally participated in solidification and microstructure formation of the alloy. The addition of TC4 increases the solidification rate of the alloy deposition pool and reduces the segregation of elements in the solidification structure. Besides, the addition of TC4 promotes precipitation of γ' and γ'' in the solidification microstructure. Thus, the hardness and mechanical properties of the deposited alloy are improved. The addition of TC4 shows effects of fine crystal strengthening, solid solution strengthening, and precipitation strengthening.

Key words: laser melting deposition; GH4169; TC4; microstructure and properties

Corresponding author: Chen Zheng, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, P. R. China, E-mail: chenzheng1218@163.com