

成形气氛对大气环境下激光修复 GH4169 组织与性能的影响

唐函遥, 朱红梅, 邱长军, 申龙章

(南华大学 机械工程学院 超快激光技术与激光先进制造湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 激光制造高性能 GH4169 镍基合金通常在密闭环境下进行, 导致部件加工尺寸受限和成本增加。为了拓宽激光增材制造和再制造 GH4169 合金的应用, 本研究尝试在大气环境不同气氛 (Ar、N₂) 下进行激光修复实验。结果表明, 在大气环境 Ar 气氛下, 修复层主要由 γ 相和长链状 Laves 相组成, 呈典型的柱状晶组织, 其抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 874 MPa、621 MPa 和 23.1%。在大气环境 N₂ 气氛下, 由于其热导率更高, 熔池冷却速率更快, 修复层主要由 γ 相、尺寸与体积分数更小的颗粒状 Laves 相以及 (Ti,Nb)N 颗粒相组成, 呈细化的枝晶组织, 其抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 935 MPa、649 MPa 和 24.9%。由于细晶强化和第二相析出强化的共同作用, 在大气环境 N₂ 气氛下可成功实现对 GH4169 合金低成本、高效率的激光修复。

关键词: 激光修复; 成形气氛; 镍基合金; 组织性能

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)04-1361-08

GH4169 镍基合金具有优良的高温强度和抗氧化性能, 广泛应用于航空发动机、涡轮叶片等热端部件, 但由于长期在高温、高压、高转速及交变负荷等恶劣条件下服役, 易出现烧蚀、磨损等表面损伤和掉块、断裂等体积损伤^[1]。传统的表面修复技术如热喷涂、冷喷涂、电镀等, 存在修复层较薄、修复层与基体结合弱等不足^[2], 激光熔覆技术因具有修复层组织致密、热影响区小、修复层与基体呈冶金结合、缺损区净成形等特点, 目前已广泛应用于镍基合金零部件的修复。

近年, 各国部分学者^[3-7]研究了不同环境与气氛对激光成形 GH4169 合金的微观组织和性能的影响。刘奋成等^[3]分别在大气环境和密闭环境下 (Ar 气氛) 激光立体成形 (LSF) GH4169 合金, 发现前者制备的试样中存在较多氧化物夹杂和气孔等冶金缺陷, 经高温均匀化处理+中间热处理+双时效热处理后, 静载拉伸性能与锻件相当, 但疲劳性能低。Pauzon 等^[4]在密闭环境不同气氛 (Ar、N₂) 下采用激光粉末床融合技术 (L-PBF) 制备 GH4169 合金, 发现两者的氮氧含量和显微硬度差异较小。赵轩等^[5]采用红外热像仪和金相显微镜, 对比研究了大气环境 N₂ 气氛与密闭环境 Ar 气氛下激光熔覆 GH4169 合金的熔池状态和显微组织, 发现与后者相比, 前者熔覆

层枝晶间距和 Laves 相比比例更小, 微观偏析程度更低。李栋等^[6]研究了在大气环境下不同送粉气和不同保护气 (如 Ar 送粉+Ar 保护、Ar 送粉+He 保护、He 送粉+Ar 保护) 对激光熔覆 GH4169 涂层组织和显微硬度的影响, 发现相较于 Ar, He 作为送粉气能有效降低 Nb 元素偏析, 同时细化涂层组织, 提高显微硬度; 而 Ar 和 He 作为保护气时, 对涂层形貌和组织的影响不明显。王亮亮等^[7]采用 SEM 和显微硬度计, 对比研究了大气环境下不同保护气与送粉气组合 (如 Ar 送粉+Ar 保护、Ar 送粉+N₂ 保护、N₂ 送粉+Ar 保护) 对 GH4169 激光熔覆层的影响, 结果表明在 N₂ 送粉+Ar 保护时, 熔覆层冷速最大, Laves 尺寸最小, 显微硬度 (HV) 最高 3057.6 MPa。

可见, 目前关于不同气氛对激光修复 GH4169 镍基合金的拉伸性能的影响研究报道较少, 特别是大气环境 N₂ 气氛的影响机制尚未明确。同时, 激光制备 GH4169 镍基合金通常在密闭环境下才能获得高性能^[8-11]。因此, 本工作尝试在大气环境 2 种不同气氛下 (N₂、Ar), 利用 XRD、SEM、EPMA、TEM 以及材料万能试验机研究气氛对其微观组织和拉伸性能的影响规律及微观机制, 以期为大气环境下低成本、高效率激光增材制造和修复镍基合金提供理论参考和实验依据。

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 中央军委装备发展部装备预研基金 (61400040204)

作者简介: 唐函遥, 男, 1997 年生, 硕士, 南华大学机械工程学院, 超快激光技术与激光先进制造湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001, E-mail: 460959541@qq.com

1 实验

基材采用经固溶处理后的 GH4169 板材 (尺寸为 80 mm×40 mm×4 mm), 在激光修复前先去除其表面氧化层和油渍, 无水乙醇清洗后烘干待用。采用成都华寅粉体科技有限公司提供的真空氩气雾化 GH4169 粉末进行修复, 平均粒径为 75 μm。GH4169 基材、粉末及制备的修复层化学成分见表 1 所示。

采用 XL-F1000 型光纤激光器以同轴送粉、多道搭接方式制备修复层, 激光工艺参数如下: 激光功率密度 380 W/mm², 扫描速率 9 mm/s, 送粉速率 8 g/min, 搭接率 50%, 保护气流量 12 L/min。为研究大气环境不同气氛 (纯度为 99.999% 的 Ar 和 N₂, 送粉气和保护气相同) 对镍基修复试样组织和性能的影响, 保持其它参数不变, 所制备的试样分别命名为 Ni-Ar 和 Ni-N₂。用 X-D6 型 X-射线衍射仪 (X-ray diffractometer, XRD) 对修复层进行物相分析, 靶材为 Cu 靶, 工作电压和电流分别为 40 kV 和 35 mA, 扫描角度为 40° 到 90°, 扫描步长为 0.02°。采用 MERLIN 型扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 和能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对拉伸断口和截面试样形貌进行观察和微区成分分析。采用 EPMA-1720H 型电子探针显微分析仪 (electron probe micro-analyzer, EPMA) 研究截面试样中的元素分布。采用 JEM-2100F 型透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 对精细物相进行分析。按照小试样模式 (参照 ASTM E8/E8M-2013a, 拉伸断面 2 mm×2 mm, 修复层与基材各占 1 mm 厚度, 如图 1a) 制备出拉伸试样, 采用 PWS-E100 型材料万能试验机测试修复试样的室温拉伸性能, 采用位移控制模式, 位移速度为 2 mm/min。

2 大气环境不同气氛下激光修复镍基合金的组织与性能

2.1 拉伸性能

图 1 为大气环境不同气氛下制备的 GH4169 修复试样拉伸性能与拉伸断口形貌。从图 1b 的拉伸曲线和

表 1 GH4169 合金基材、粉末与修复层的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 alloy substrate, powder and repaired layer (wt%)

Material	C	Mn	Si	Cr	Ti	Nb	Ni
Substrate	0.05	0.04	0.15	18.2	1.02	5.24	Bal.
Powder	0.04	0.18	0.32	17.54	0.85	4.50	Bal.
Repaired layer	0.06	0.20	0.18	17.67	0.93	4.61	Bal.

图 1c 对应的拉伸性能可知, N₂ 气氛下制备的修复试样 (Ni-N₂) 的拉伸性能优于 Ar 气氛下制备的修复试样 (Ni-Ar)。由图 1d~1g 的断口形貌可见, Ni-Ar 试样呈现出由等轴韧窝和撕裂韧窝组成的混合断口形貌, 而 Ni-N₂ 试样断口主要由细小且分布均匀的等轴韧窝组成, 均为典型的韧性断裂。由于激光修复快热快冷的特点, 修复层组织细小, 在拉伸正应力作用下, 断裂后形成大量等轴韧窝, 类似于文献[12-13]激光制备的 Incol 718 (GH4169) 的拉伸断口观察结果。前者撕裂韧窝产生的可能原因是 GH4169 合金修复层枝晶间析出硬脆的 Laves 相, 在受拉伸载荷作用时, Laves 相周围易形成以枝晶间区为中心和以枝晶区为撕裂边缘的韧窝形态, 在应力载荷作用下产生微孔, 生长相互连接导致最终断裂。由于枝晶生长方向垂直于拉伸方向, 且枝晶间区域为韧窝中心, 断口上的韧窝沿柱状枝晶呈现出明显的特征^[8]。同时对比图 1f 和图 1g 可见, 后者断口的韧窝更大更深 (平均直径 0.7 μm)。因此, 与 Ni-Ar 试样相比, Ni-N₂ 试样在拉伸过程中塑性变形更均匀, 抗变形能力更强, 表现出较大的抗拉强度及屈服强度^[14]。

表 2 列出了部分各国激光制备 GH4169 合金的拉伸性能。值得指出的是, 目前公开发表的文献报道结果对应的都是在密闭环境 Ar 气氛下制备的, 试样的抗拉强度 (UTS)、屈服强度 (YS) 及延伸率 (EL) 范围分别为 820~993 MPa、620~700 MPa 和 12%~33%。本研究在大气环境 Ar 气氛下制备的 GH4169 修复试样 (Ni-Ar) 拉伸性能较文献密闭环境 Ar 气氛下制备的低, 其可能原因是受大气环境中氧的影响降低了合金元素的有益作用^[3], 而在 N₂ 气氛下制备的修复试样具有较好的综合力学性能 (UTS、YS 和 EL 分别为 935 MPa、649 MPa、24.9%), 推测是由于原位渗氮效应产生了强韧化效果^[15], 使修复试样性能得到提升。

2.2 显微组织与成分分析

2.2.1 XRD 分析

图 2 为基材和大气环境不同气氛 (Ar、N₂) 下制备的修复试样的 XRD 图谱。可见三者均主要由 γ 相和 Laves 相组成, 其中基材中 γ 相的特征衍射峰强度最高, 这主要是由于基材中含有 γ' 相与 γ'' 相, 其特征衍射峰与 γ 相位于同一位置产生叠加效应导致的^[16-17]。与基材相比, 修复层的 γ 相峰强度下降, 这可能是由于激光熔池冷速快, 不利于 Nb 元素的均匀扩散, 抑制了强化相 γ' 相与 γ'' 相的析出^[18]。此外, 在 2θ 值约为 43.5° 时, 修复层的 γ 相特征衍射峰相较于基材出现右移 (约 0.5°)。这可能是由于基体经过固溶处理后, 在

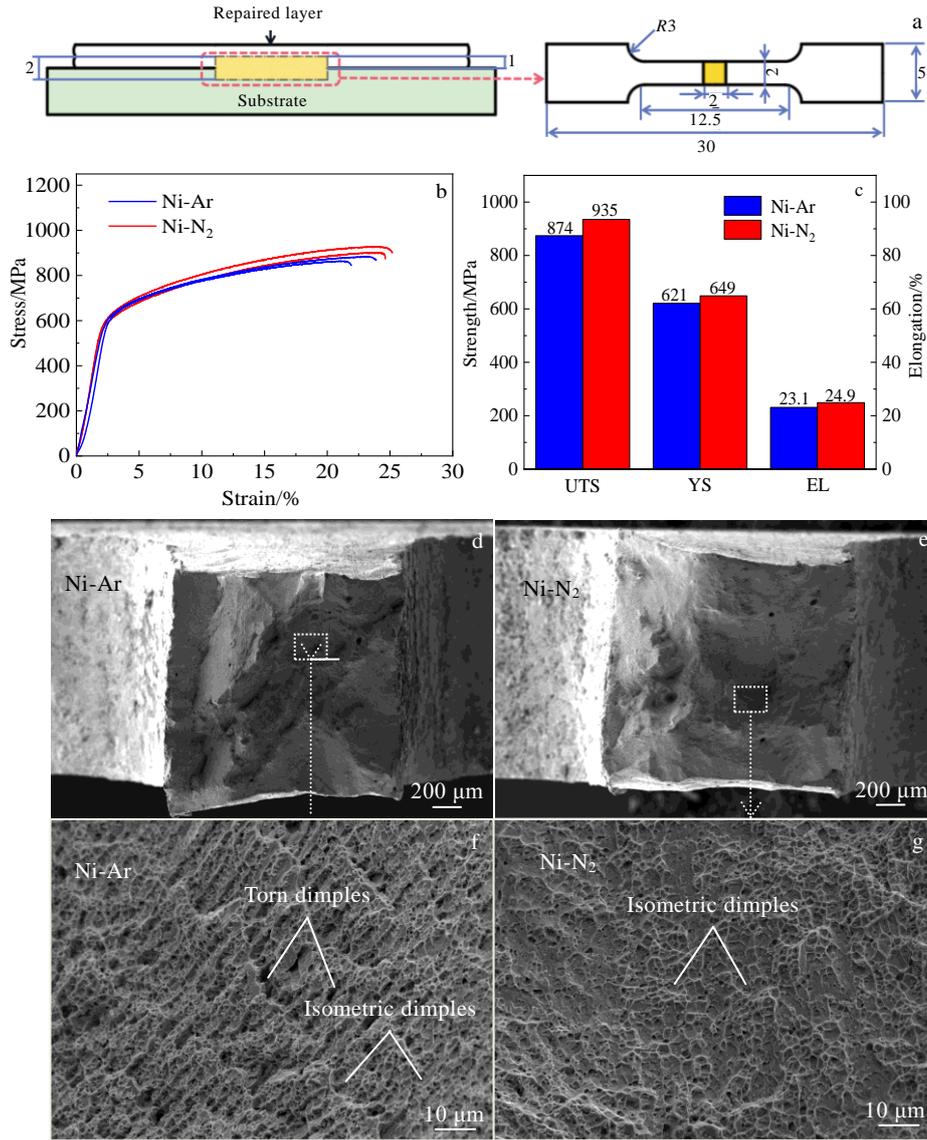


图1 拉伸取样位置尺寸和修复试样的拉伸性能与断口形貌

Fig.1 Tensile sample's location and size (a), stress-strain curves (b), tensile properties (c) and fracture morphologies (d-g) of repaired sample

表2 部分各国激光制备GH4169合金的拉伸力学性能

Table 2 Tensile mechanical properties of some domestic and foreign laser-prepared GH4169 alloys

Environment and atmosphere	UTS/MPa	YS/MPa	EL/%	References
Closed environment Ar	940	645	22.4	[8]
Closed environment Ar	820	625	33	[9]
Closed environment Ar	993	700	20.4	[10]
Closed environment Ar	950	695	12	[11]
Atmospheric environment Ar	874	621	23.1	This work
Atmospheric environment N ₂	935	649	24.9	This work

高温下 Laves 相发生部分溶解, 释放 Nb 元素固溶至 γ 相基体中, 由于 Nb 元素的原子半径 (146 pm) 大于 Ni 元素的原子半径 (135 pm), 导致晶面间距 d 增大、 θ 值减小, 而修复层为激光快冷直接制备未经任何后热处理, 故相较于基体出现右移。在大气环境不同气氛下制备的修复试样中, 基体和二次相的特征衍射峰位置相似, 但 Ni-Ar 试样的 γ 相特征衍射峰相对强度更高, 可见气氛对 γ 相的形成有一定影响。然而, 不同修复层的 XRD 图谱中未检测到 MC 相的特征衍射峰, 与文献[4,8,10]结果一致, 分析其可能的原因是析出颗粒相尺寸小且所占体积分数低, 对应的特征衍射峰弱而引起的。

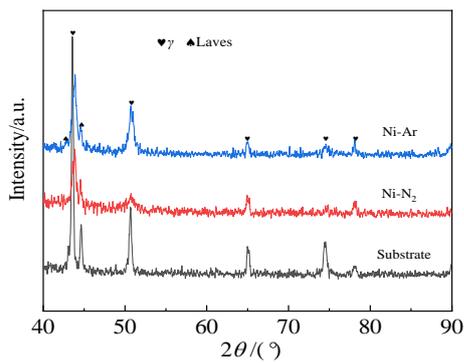


图 2 GH4169 基材与大气环境不同气氛(Ar、N₂)下制备 GH4169 镍基修复层的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of GH4169 substrate and nickel-based repaired layer prepared under different atmospheres (Ar, N₂) of atmospheric environment

2.2.2 SEM/EDS 分析

图 3 为大气环境 Ar、N₂ 2 种气氛下制备的 GH4169 镍基修复层的 SEM 形貌,修复层呈现沿熔覆方向外延连续生长的柱状晶组织(如图 3a 和 3b),但其生长方向并非严格沿沉积方向垂直向上。这主要与激光修复过程中的热量扩散方向和晶体学上有利取向有关^[19]。

在 Ni-Ar 试样中(如图 3a1),修复层为典型的柱状晶组织, Laves 相在晶界间呈链状分布,这主要是由于在 Ar 气氛下熔池冷却速率相对较低(1500 °C 时 N₂ 和 Ar 导热系数分别为 0.0997、0.0633 W/(m·K), N₂ 气氛与 Ar 气氛下熔池的冷却速率分别为 2640 和 2070 °C/s^[5]),修复层外延生长区的一次树枝晶沿横向和纵向迅速生长,形成粗大的柱状晶组织,从而枝晶间区域中的二次树枝晶生长受到限制,导致合金元素如 Nb、Mo、Si 等难以偏析到枝晶间区域,从而形成长链状的 Laves 相(在修复层中体积分数占比为 6.03%,图 3a2)。对图 3 中标注相进行 EDS 分析(表 3)可知,颗粒 1、4 为基体 γ 相,颗粒 2、5 为 Laves 相,富含 Nb 和 Cr 等元素。颗粒 3 为 MC 相,可作为 GH4169 合金的强化相,能提高其力学性能与耐磨性^[20],通常由于激光修复过程中 C 和 Ti、Nb 元素浓度超过奥氏体基体中最大溶解度而析出产生。

在 Ni-N₂ 试样中(如图 3b1),除柱状晶组织外,还存在明显的等轴树枝晶。这主要是由于 N₂ 气氛热导率较高,使液相中形成较宽的成分过冷区而导致的。同时可见 Ni-N₂ 试样组织较 Ni-Ar 试样更为致密,故在塑性变形过程中,位错可更加均匀地分布在各晶粒中,不易产生较大的应力集中,延伸率(24.9%)较

Ni-Ar 试样(23.1%)高(表 2)。

值得一提的是, Ni-N₂ 试样中的 Laves 颗粒相沿晶界弥散分布(在修复层中体积分数占比为 5.50%,图 3b2),明显不同于 Ni-Ar 试样中长链状 Laves 相,这主要是由于熔池冷速不同导致的。Sui 等^[21]发现激光熔覆 GH4169 合金中的 Laves 相形态与含量主要受熔池冷却速率的影响,冷却速率越大, Laves 相越细小,长宽比越小,且 Laves 相含量越少。同时, Laves 相的断裂对裂纹的形成起主导作用,细小的 Laves 相更有利于材料的塑性变形,较大的 Laves 相使滑移线难以通过。通常,在修复层中, Laves 相比比例过高会降低其性能,这是由于在形成 Laves 相时消耗了大量的 Nb、Mo 和 Ti 等合金元素,显著降低了这些元素的固溶强化作用^[22]。此外, Ni-N₂ 修复层中还存在棱角分明的四方颗粒相(图 3b2 颗粒 7, 8), EDS 结果表明主要富集 Ti、Nb 和 N 元素,故可推测该氮化物的析出形式为(Ti, Nb)N,与文献[4]采用激光粉末床熔融技术在 N₂ 气氛下制备的 GH4169 冷速更快,所得尺寸更为细小(0.3~0.6 μm)。可见 Ni-Ar 与 Ni-N₂ 修复层均主要由灰色基体 γ 相、不同形态的白色 Laves 相和 MC 相组成,后者中还存在 MN 颗粒相。

2.2.3 EPMA 分析

为了揭示在不同气氛下制备的修复层试样中主要元素的分布情况,进行了 EMPA 元素面扫描分析,结果如图 4 和图 5 所示。可知,修复层呈现为暗灰色的树枝晶组织,晶间存在大量亮白色析出相及少量岛状颗粒相和四方状析出相。其中,灰色部分贫 Nb 和 Mo,为 γ 相基体,而白色析出相富含 Nb 和 Mo 元素,可认为是 Laves 相。Laves 相对电子有较高的反射能力,在 EPMA 下呈白色^[23]。从图 4b 和图 5b 中可见,修复层均存在 C 元素富集的岛状颗粒相,可认为是 MC 相。与 Ni-Ar 试样相比, Ni-N₂ 试样中可见 N、Nb 和 Ti 元素富集的四方状析出相,与表 3 中颗粒 7 的 EDS 结果一致。

通过对比 Nb、Mo 及 Ti 元素的分布,可进一步确认 Laves 相的形态。因为 Laves 相的成分接近为(Ni,Fe,Cr)₂(Nb,Mo,Ti)^[20],而在凝固过程中,γ 相为初生相,产生 Laves 的共晶反应出现在凝固末期,导致生成的 Laves 相 Nb 元素含量远高于基体,同时 Nb 元素在枝晶与枝晶间区域之间的扩散为非稳态扩散过程,在激光熔覆的快冷条件下,在试样中呈不均匀分布。在 Ni-Ar 试样中(图 4d~4f),根据 3 种元素的分布情况,可判断 Laves 相呈链状沿晶间分布。而在 Ni-N₂ 试样中(图 5d~5f),可判断 Laves 颗粒相沿晶间弥散分布,这一结果与图 3 的 SEM 观察结果一致。

2.2.4 TEM 分析

为了进一步揭示 Ni-N₂ 修复层的精细组织,进行了 TEM 分析,结果如图 6 所示,对应颗粒的 EDS 结果见表 4。修复层主要由白色相与分布在枝晶间的灰色析出相组成,根据选区电子衍射花样标定结果,白

色基体相为 γ 相(图 6a),灰色析出相为富含 Nb 元素的 Laves 相(图 6b),分别为体心立方结构和密排立方结构。在修复层中,还存在一些其他形态的析出物,如分布在晶界间的岛状颗粒 MC 相(图 6c,尺寸约为 150 nm)和棱角分明的四方状颗粒 MN 相(图 6d,尺

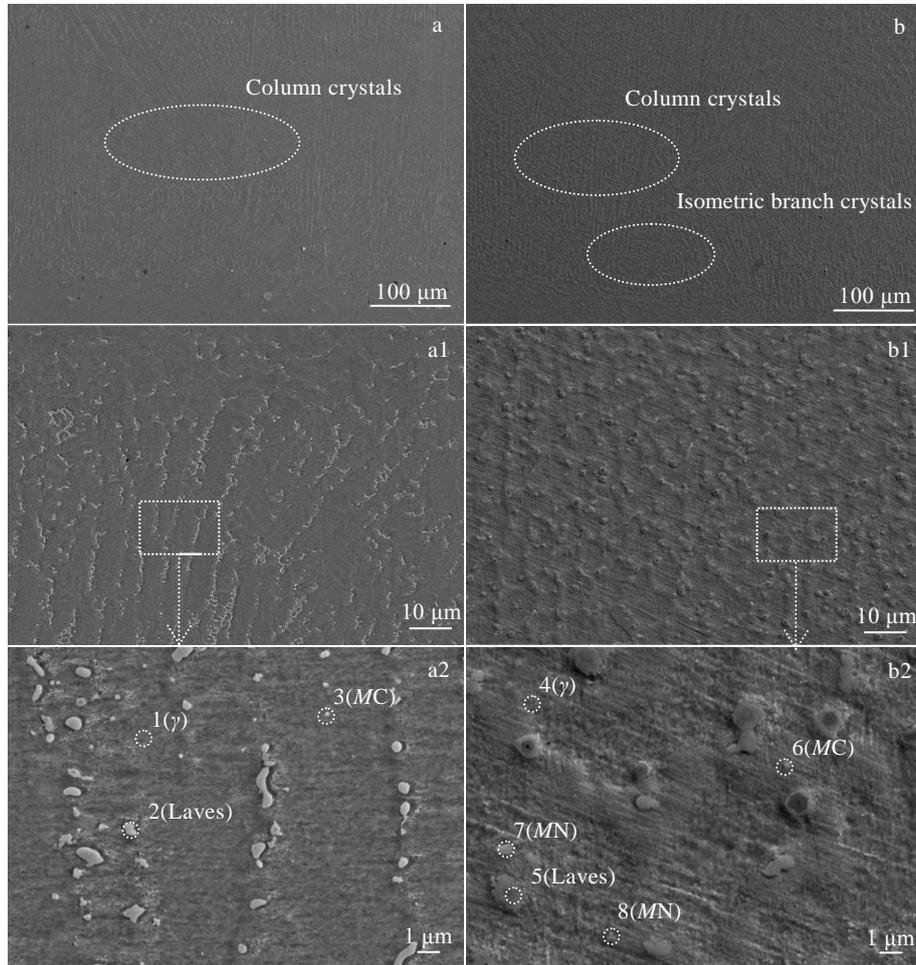


图3 大气环境不同气氛下制备的 GH4169 镍基修复层的 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphologies of GH4169 nickel-based repaired layers prepared under different atmospheres: (a-a2) Ni-Ar and (b-b2) Ni-N₂

表3 图3中不同颗粒的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of different particles marked in Fig.3 (at%)

Particle	C	N	Al	Ti	Cr	Fe	Nb	Ni
1 (γ phase)	0.09	-	1.9	0.89	22.62	19.24	2.17	53.08
2 (Laves phase)	0.16	-	-	1.97	18.53	16.2	17.73	45.41
3 (MC phase)	0.57	-	3.8	7.6	17.88	15.43	21.52	33.19
4 (γ phase)	0.12	-	1.47	-	22.77	20.78	1.50	53.37
5 (Laves phase)	0.14	-	1.9	1.28	20.26	17.54	8.45	50.43
6 (MC phase)	0.48	-	2.01	7.52	17.30	12.30	29.26	31.13
7 (MN phase)	0.05	51.36	0.83	27.71	4.68	2.04	9.22	4.12
8 (MN phase)	0.15	42.95	-	12.96	9.41	6.79	10.57	17.17

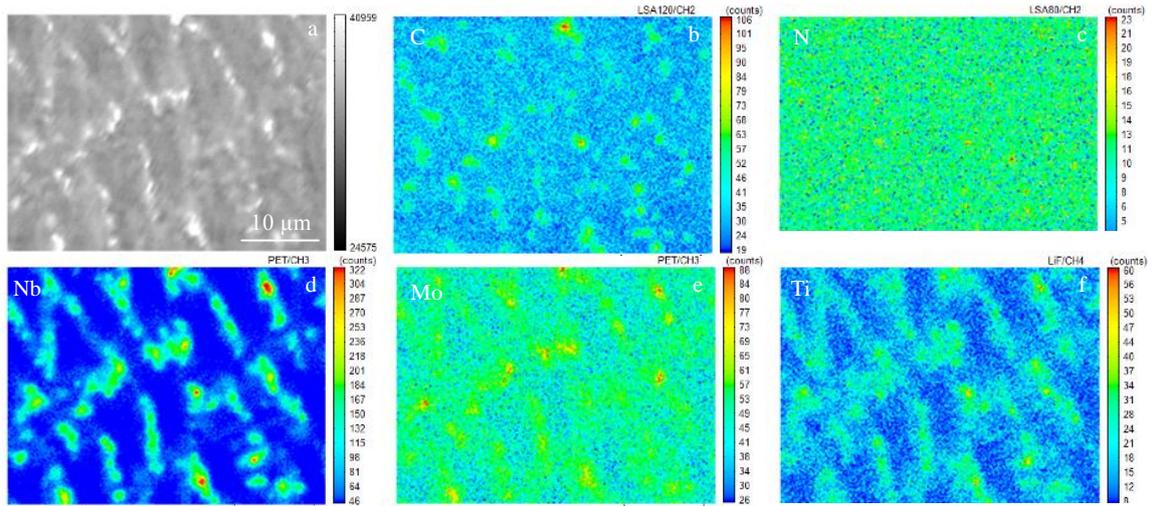


图 4 大气环境 Ar 气氛下制备的 GH4169 修复层 (Ni-Ar) 的 EPMA 元素面扫描

Fig.4 EPMA element mappings of GH4169 repaired layer (Ni-Ar) prepared under Ar forming atmosphere of atmospheric environment:

(a) backscattered electron image, (b) C, (c) N, (d) Nb, (e) Mo, and (f) Ti

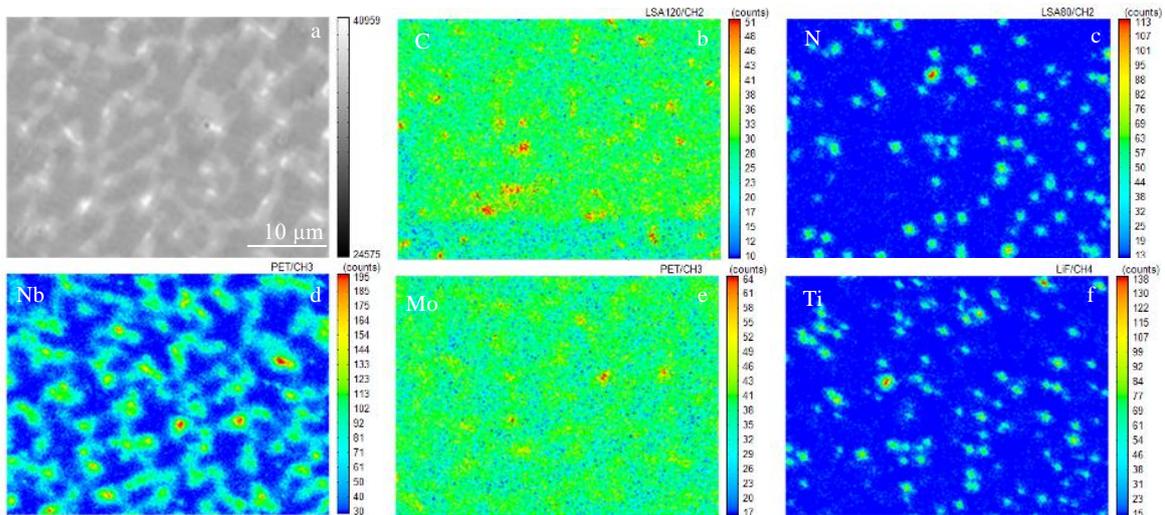


图 5 大气环境 N₂ 气氛下制备的 GH4169 修复层 (Ni-N₂) 的 EPMA 元素面扫描

Fig.5 EPMA element mappings of GH4169 repaired layer (Ni-N₂) prepared under N₂ forming atmosphere of atmospheric environment:

(a) backscattered electron image, (b) C, (c) N, (d) Nb, (e) Mo, and (f) Ti

寸约为 500 nm)。MC 相和 MN 相的平均硬度 (HV_{0.5}) 分别约为 19 770.5 和 13 450.5 MPa, 弹性模量分别约为 371.8 和 328.8 GPa, 均高于基体 γ 相的平均硬度 (647.78 MPa) 和弹性模量 (62.7 GPa) [20], 故它们的存在可提高修复层的力学性能。

在凝固过程中, Nb 元素由于分配系数较低在液相中析出, Ti、C、N 在凝固初期由于扩散系数小于其他合金元素而被排斥在反应外。这些元素的浓度随着凝固过程的进行而增加, 当元素浓度超过奥氏体基体中最大溶解度时, MN 和 MC 同时形成。岛状颗粒 MC 相富含 Nb 与 C 元素, 四方状颗粒 MN 相富含 Nb、Ti

和 N 元素, 各析出相的吉布斯自由能如下^[20]:

$$\Delta G < \text{TiC} > = -135.08 - 0.0939T \text{ kJ/mol} \quad (1)$$

$$\Delta G < \text{NbC} > = -31.5 - 0.000995T \text{ kJ/mol} \quad (2)$$

$$\Delta G < \text{TiN} > = -286.89 - 0.1027T \text{ kJ/mol} \quad (3)$$

$$\Delta G < \text{NbN} > = -140.21 - 0.0428T \text{ kJ/mol} \quad (4)$$

当温度低于 2000 °C 时, 计算各析出相的吉布斯自由能结果, 分别为 -348.53、-33.76、-520.34、-237.50 kJ/mol, 故这 4 种颗粒相形成生长的先后顺序为 TiN、TiC、NbN、NbC。通过对图 6d 电子衍射花样分析可得, 在 Ni-N₂ 修复样品中出现的含氮析出相为 TiN 和 NbN, 其生成的可能原因为 TiN 和 NbN 均为 bcc 结构, 其晶胞参数

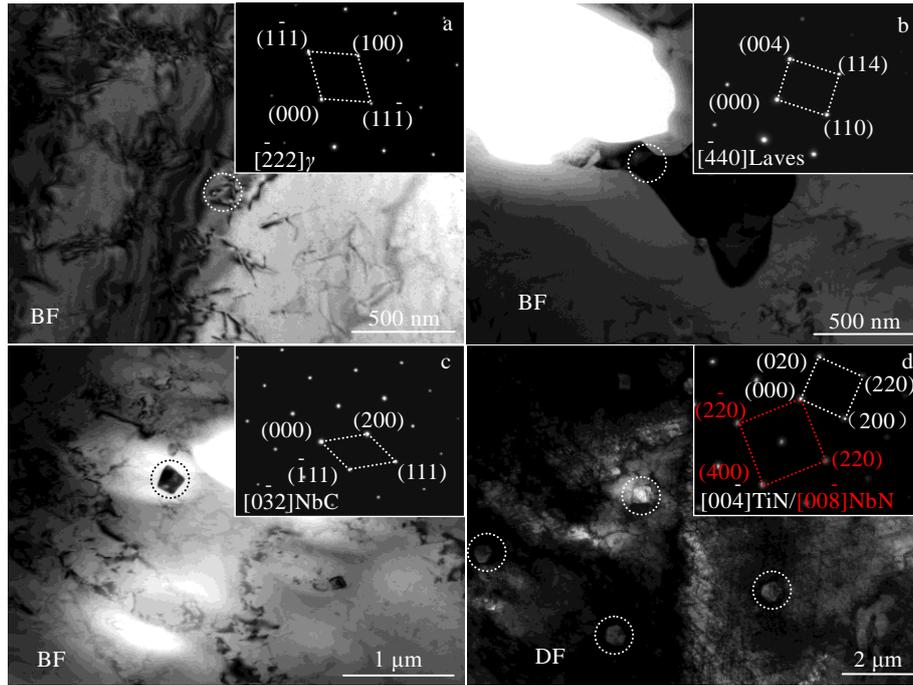


图 6 大气环境 N₂ 气氛下制备的 GH4169 修复层(Ni-N₂)TEM 像

Fig.6 TEM images and selected area electron diffraction patterns of GH4169 repaired layer (Ni-N₂) prepared under N₂ atmosphere:
(a) γ phase, (b) Laves phase, (c) NbC phase, and (d) TiN and NbN phases

表 4 图 6 中不同颗粒的 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results of different particles marked in Fig.6 (at%)

Particle	C	N	Al	Ti	Cr	Fe	Nb	Ni	Mo
γ phase of Fig.6a	-	-	2.52	0.95	23.41	18.06	5.42	46.59	3.04
Laves phase of Fig.6b	-	-	-	0.89	17.28	12.18	27.97	36.77	4.92
NbC phase of Fig.6c	85.09	-	-	1.04	0.84	0.40	11.97	0.66	-
(Ti,Nb)N phase of Fig.6d	39.42	24.69	-	18.64	2.26	0.31	14.19	0.48	-

分别为 0.44 nm×0.44 nm×0.44 nm 和 0.4375 mm×0.4375 mm ×0.4375 nm, 两者错配度较低, 在激光熔池的快热快冷的作用下吉布斯自由能较低的 TiN 先形成, 后续产生的 NbN 依附在 TiN 形核上生长, NbC 后析出。因此结合选区电子衍射花样(图 6c, 图 6d)与 EDS 结果可知, 图 6c 中尺寸约为 150 nm 的岛状颗粒相为 NbC, 图 6d 中平均尺寸约为 500 nm 的四方状颗粒相为氮化物 (Ti,Nb)N, 与图 3 SEM 和表 3 EDS 的分析结果一致。

因此, 本研究中在大气环境 Ar、N₂ 气氛下激光制备的修复试样拉伸性能存在差异, 分析其主要原因如下: 一方面, Ar 气氛下熔池冷却速度低于 N₂ 气氛, 形成 Laves 相比例更多(图 3), 修复试样的抗拉强度和延伸率随之下降; 另一方面在 N₂ 气氛下, N 与合金元素发生反应, 原位生成硬质相(Ti,Nb)N, 析出相与位错的共存阻碍了晶格运动, 有利于涂层的强化, 导致修复层的力学性能得

到提升, 同时富 Nb 相的形成有利于抑制镍基合金中 Nb 元素的偏析, 减少有害相 Laves 相的生成。在(Ti,Nb)N 第二相析出强化和尺寸与体积分数更小的 Laves 相的共同作用下, Ni-N₂ 试样的拉伸性能优于 Ni-Ar 试样。

3 结 论

1) 在 Ar 气氛下试样修复层主要由 γ 相、Laves 相和 NbC 相组成, 为典型的柱状晶组织, 长链状 Laves 相分布在晶界。而在 N₂ 气氛下熔池冷却速度增大, 修复层主要由 γ 相、尺寸与体积分数更小的颗粒状 Laves 相、NbC 相和(Ti,Nb)N 颗粒相组成, 组织更细密, 除柱状晶组织外, 存在明显的等轴树枝晶。

2) 与 Ar 气氛相比, N₂ 气氛下制备的修复层试样拉伸性能更优。一方面由于细化作用, N₂ 气氛可获得比 Ar 气氛更快的散热速率, 能显著改善液态熔池的冷

却效果, 导致熔池冷速更快, Laves 相更为细小且呈弥散分布, 而 Ar 气氛下呈链状分布。另一方面由于第二相析出作用, 在 N₂ 气氛下修复层原位生成(Ti,Nb)N, 起钉扎作用, 阻碍位错移动。

参考文献 References

- [1] Qu S, Fu C M, Dong C *et al. Engineering Failure Analysis*[J], 2013, 32: 292
- [2] Li Danyang(李丹阳), Yin Fengshi(殷凤仕), Wang Xiaoming(王晓明). *Surface Technology*(表面技术)[J], 2020, 49(8): 105
- [3] Liu Fencheng(刘奋成), Lin Xin(林鑫), Yang Gaolin(杨高林) *et al. Materials Genome Engineering*(金属学报)[J], 2010, 46(9): 1047
- [4] Pauzon C, Markström A, Goff D L *et al. Metals*[J], 2021, 11(8): 1254
- [5] Zhao Xuan(赵轩), Sui Shang(隋尚), Li Zuo(李祚) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2020, 47(8): 72
- [6] Li Dong(李栋), Zhang Qunli(张群莉), Zhang Jie(张杰) *et al. Surface Technology*(表面技术)[J], 2018, 47(7): 185
- [7] Wang Liangliang(王亮亮). *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*(真空科学与技术学报)[J], 2020, 40(7): 609
- [8] Yang Huihui, Meng Liang, Luo Shuncun *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 828: 154 473
- [9] Wan H Y, Zhou Z J, Li C P *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 753: 42
- [10] Zhang Rong(张荣), Liu Zhongqiang(柳中强), Huang Jiahao(黄嘉豪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(1): 255
- [11] Liu Fencheng, Cheng Hongmao, Yu Xiaobin *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2018, 99: 342
- [12] Du Borui(杜博睿), Zhang Xuejun(张学军), Guo Shaoqing(郭绍庆) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(1): 27
- [13] Zhang Tao, Li Huigui, Gong Hai *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 884: 161 050
- [14] Ming Xianliang(明宪良), Chen Jing(陈静), Tan Hua(谭华) *et al. Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2015, 42(4): 71
- [15] Li Baichun, Zhu Hongmei, Qiu Changjun *et al. Materials Letters*[J], 2020, 259: 126 829
- [16] Zhang Y N, Cao X, Wanjara P. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 69: 2569
- [17] 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
- [18] Zhang Yaocheng, Li Zhuguo, Nie Pulin *et al. Journal of Materials Science and Technology*[J], 2013, 29: 349
- [19] Parimi L L, Ravi G A, Clark D *et al. Materials Characterization*[J], 2014, 89: 102
- [20] Zhang Yaocheng, Li Zhuguo, Nie Pulin *et al. Optics and Laser Technology*[J], 2013, 52: 30
- [21] Sui Shang, Tan Hua, Chen Jing *et al. Acta Materialia*[J], 2019, 164: 413
- [22] Zhang Jie(张杰), Zhang Qunli(张群莉), Chen Zhijun(陈智君) *et al. Surface Technology*(表面技术)[J], 2019, 48(2): 47
- [23] Zhang Jie, Zhang Qunli, Zhuang Yifan *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2021, 135: 106 659

Effect of Forming Atmosphere on Microstructure and Properties of Laser Repaired GH4169 in Atmospheric Environment

Tang Hanyao, Zhu Hongmei, Qiu Changjun, Shen Longzhang

(Hunan Provincial Key Laboratory of Super-fast Micro-nano and Laser Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The laser manufactured high-performance GH4169 Ni-based alloys were generally prepared in a closed environment, resulting in limited component dimension and increased fabrication cost. In order to broaden the application of laser additive manufacturing and remanufacturing GH4169 alloy, this work was attempted under different atmospheres (Ar, N₂) in atmospheric environment. The results indicate that the laser-repaired layer under Ar atmosphere is mainly composed of γ phase and long-chain shaped Laves phase, with a typical columnar crystal structure. The tensile strength, yield strength and elongation are 874 MPa, 621 MPa and 23.1%, respectively. In contrast, due to its higher thermal conductivity and faster molten pool cooling rate under N₂ atmosphere, the laser-repaired layer is mainly composed of γ phase, granular Laves phase with smaller size and volume fraction, and granular (Ti,Nb)N phase. The dendritic structure is refined, with tensile strength, yield strength and elongation of 935 MPa, 649 MPa and 24.9%, respectively. Under the combined effects of fine grain strengthening and second-phase precipitation strengthening, the laser repairing of GH4169 alloy can be achieved successfully under N₂ atmosphere at low cost and high efficiency.

Key words: laser repairing; forming atmosphere; nickel-based alloys; microstructure and properties

Corresponding author: Zhu Hongmei, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, P. R. China, Tel: 0086-734-8282034, E-mail: zhuhongmei@usc.edu.cn