

# CMT-Pin 增材制备 GH4169 高温合金柱形阵列成形工艺和组织特征

肖鹏华<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 汤莹莹<sup>2</sup>, 肖琳<sup>1</sup>, 夏春<sup>1</sup>, 刘奋成<sup>1</sup>, 柯黎明<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

(2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 采用  $\phi 1.2$  mm 的 ER-GH4169 焊丝, 通过 CMT-Pin 增材技术在 5 mm 厚 Q235 碳钢基板上制备柱形阵列结构, 研究了 Pin 针成形工艺和组织特征。结果表明: 当 Ball/Cyl Adaptation 参数为负时, Pin 针头型为平头; 当 Ball/Cyl Adaptation 为非负时, Pin 针头型为球头; Altitude Adaptation 控制 Pin 针生长的高度, 获得 Pin 针高度在 2.30-4.96 mm 之间。Pin 针的微观组织分为 Pin 轴区、熔合区、母材区。Pin 轴区分布着大量的柱状晶, 沿轴向外生长; 在熔合区, 沿 Pin 轴往上柱状晶由细晶转变为粗晶, 熔合区为一条极细的熔合线, 晶间析出大量条状的 Laves 相; 在母材区, 存在组织明暗交接分层。

**关键词:** CMT-Pin; GH4169; 柱形阵列; Pin 针成形; 组织特征

**中图分类号:** TG457; TG146.1<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)06-2134-07

带有柱形阵列的层板冷却结构集射流冲击、内部对流冷却和多孔全覆盖气膜冷却于一体, 被广泛用于航空航天发动机的涡轮叶片、燃烧室尾喷管的散热构件中, Lamilloy 层板冷却结构是其中的典型代表<sup>[1]</sup>。层板间的扰流柱阵列具有加强冷却和增加换热面积的功效, 是 Lamilloy 层板制备的关键环节<sup>[2-3]</sup>。对于涡轮叶片的小间距冷却层板(间距小于 1 mm)的微小尺寸扰流柱阵列制备, 较成熟的方法有化学刻蚀、半固态成形、照相电解等<sup>[4-6]</sup>。然而, 对于大尺寸大间距需求的燃烧室尾喷管层板冷却结构, 绕流柱尺寸较大(大于 1 mm), 上述方法难以适用。因此, 开发一种高精度高效率的柱形阵列制备方法意义显著。

CMT-Pin 技术是 Fronius 公司基于 CMT(冷金属过渡)焊接技术开发的一种在基材上直接增材制备 Pin 针的新技术, 通过电流反馈和焊丝运动的结合提供了 Pin 针成型的可能性<sup>[7]</sup>。CMT-Pin 技术已经在复合材料制备中取得了应用。Sarantinos 等<sup>[8]</sup>综述了利用 3D 增强 Pin 技术实现复材-复材和复材-金属的连接应用, 指出这种新型连接技术的最大优点是连接重量轻、强度高、损伤容限显著提高。Ucsnik 等<sup>[9]</sup>研究证明了 CMT-Pin 作为加固元件与(-CFRP-)(碳纤维复合材料)组件形成的金属-CFRP-复合结构, 接头机械性能显著

提高。不同头部形状的 Pin 针还被用于钢与碳纤维层压板(FML)的组合应用<sup>[10]</sup>。此外, CMT-Pin 在铝合金、不锈钢等材料的 Pin 针阵列制备上也得到了关注。Gerhard 等<sup>[11]</sup>基于-GMAW-(熔化极气体保护焊)、CMT-Pin 工艺, 采用双相不锈钢制造涡轮叶片, 实现了将微小 Pin 针焊接到部件表面。Zhang 等<sup>[12]</sup>基于 CMT-Pin 工艺, 在铝合金或钢板上增材铝凸点, 然后通过凸点进行电阻点焊, 解决了传统铝/钢电阻点焊接头强度低、焊缝严重减薄的问题。

基于上述研究可知, CMT-Pin 具备热输入小、可重复性高和工艺性好等优点, 可以将其应用于航空发动机高温合金柱形阵列结构的制备, 有望替代传统的制备方法, 提高制备效率。然而, 目前为止基于 GH4169 高温合金的 CMT-Pin 工艺研究未见公开报道, 相关工艺对 Pin 针形貌及微观组织的影响有待深入研究。本研究选取直径 1.2 mm 的 GH4169 焊丝, 以 5 mm 厚 Q235 碳钢为基板, 研究了不同工艺参数对 CMT-Pin 成形工艺和组织特征的影响。

## 1 实验

焊丝选用直径 1.2 mm 的商用镍基高温合金 ER-GH4169(化学成分如表 1 所示), 试验的碳钢基板

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 江西省自然科学基金(20202BAB204017); 航空科学基金(2020Z048056001)

作者简介: 肖鹏华, 男, 1998 年生, 硕士生, 南昌航空大学先进连接技术重点实验室, 江西 南昌 330063, E-mail: xph15770675316@126.com

为 Q235 低碳钢, 其化学成分如表 2 所示。

试验母材选用尺寸为 300 mm×100 mm×5 mm 的 Q235 低碳钢, 用砂纸和乙醇去除表面油污和氧化物。本试验设备为南昌航空大学搭建的数控焊接成形系统, 如图 1 所示。该系统由三轴可编程移动工作平台、CMT2700 焊机、RCU5000i, 工装夹具、气体保护箱组成。程序库选用焊机自带的 DB0921, 程序选用 Cr-Ni-19-9 Pin。焊丝与母材呈 90°固定, 干伸长 10 mm, 采用质量分数为 99.99%氩气作为保护气, 氩气以 20 L/min 的流速从直径为 16 mm 的喷嘴中流出。

表 3 为 CMT-Pin 成形参数, 主要由 Cr-Ni-19-9Pin 程序中的 Altitude Adaptation(定义为 Alt)和 Ball/Cyl Adaptation(定义为 Ball/Cyl) 2 个参数决定 Pin 针的高度和头部的形状。其中, Alt 由冷却阶段的电阻差值决定, Ball/Cyl 由电流能量密度决定。通过改变程序中的 Alt 和 Ball/Cyl, 采用单一变量法进行 Pin 针成形试验, 获得如图 2 所示的平头和球头 Pin 针, 最终确定成形优良的优化工艺参数。最后, 在基板上制备 6×6

的柱形阵列。

将制备的 Pin 针试样沿轴线进行线切割, 使用乙醇清洗样品。采用 XQ-1 型热镶嵌机将试样制作成镶嵌样, 对其进行打磨、抛光等处理后, 使用 5 g FeCl<sub>3</sub>+100 mL C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH+20 mL HCl 进行腐蚀。最后, 采用 MR-5000 型金相显微镜观察不同区域的微观组织, 采用 S-3400N 扫描电子显微镜(SEM)及能谱 (EDS) 仪对试样进行显微组织和元素成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 工艺参数对 Pin 针尺寸的影响

首先, 通过改变 Alt 和 Ball/Cyl 参数确定平头针和球头 Pin 针成形参数范围, 相同参数重复 3 次, 数值采取中间值, 试验结果如表 4 所示。试验发现, Ball/Cyl 为负时, 可以得到头型为平头的 Pin 针; 而 Ball/Cyl 为 0 或正时, 头型为球头, 调整 Alt 参数能够控制 Pin 针的高度。Pin 针尺寸随 Alt 和 Ball/Cyl 的参数变化如图 3 所示。图 3a 为平头 Pin 针高度随 Alt 和

表 1 ER-GH4169 化学成分

Table 1 Chemical composition of ER-GH4169 (ω/%)

C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Fe
≤0.08	17.0-21.0	50.0-55.0	≤1.0	2.80-3.30	0.30-0.70	0.75-1.15	Bal.

表 2 Q235 钢化学成分

Table 2 Chemical composition of Q235 steel (ω/%)

C	Mn	Si	S	P	Fe
≤0.22	≤1.40	≤0.35	≤0.05	≤0.045	Bal.

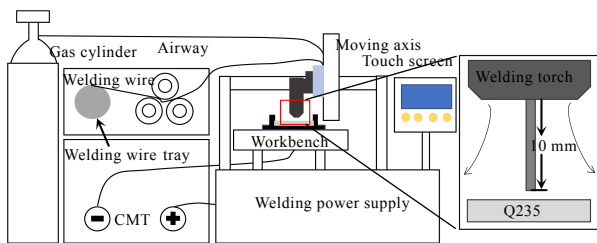


图 1 CMT-Pin 成形柱形阵列装置图

Fig.1 Schematic diagram of CMT-Pin forming columnar array device

表 3 CMT-Pin 成形参数

Table 3 CMT-Pin welding parameters

Parameter	Range	Variable amplitude
Alt	-30-30	1
Ball/Cyl	-5-5	0.1

Ball/Cyl 参数变化。当 Ball/Cyl=-2.5 时, 增大 Alt, 平头 Pin 针的高度增长, 相对最低高度 2.3 mm 而言, 最大能增长约 78%, 但是当增长到(4±0.1) mm 后, Pin 针高度会稳定在 (4±0.1) mm 不再增长; 当 Alt=0 时, 增大 Ball/Cyl, Pin 针高度稳定在 3 mm 左右。图 3b 为 Ball/Cyl=0 时, 球头 Pin 针高度随 Alt 的变化, 增大 Alt, 球头 Pin 针高度随之增大, 球头直径基本不变。图 3c 为 Alt=0 时, 球头 Pin 针高度随 Ball/Cyl 的变化图, 随着 Ball/Cyl 参数的增大, 球头 Pin 针的高度呈明显增长趋势, 相对最低高度 3 mm, 增长约 63%, 球头直径稍有增大。可以看出, Ball/Cyl 参数决定 Pin 针的头型, Alt 参数决定 Pin 针的高度, 并且, Ball/Cyl

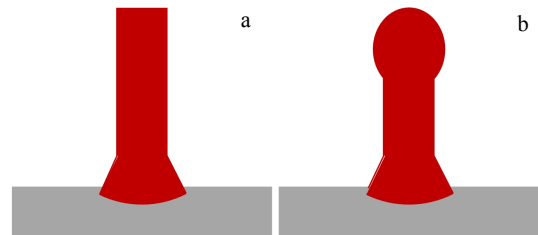


图 2 不同头部形状的 Pin 针

Fig.2 Schematic diagrams of cylindrical Pin (a) and ball Pin (b)

参数影响级别比 Alt 参数更高, 更能决定 Pin 针的头形和是否能够稳定成形。

2.2 宏观形貌

图 4 为 Alt=0 时, 依次改变 Ball/Cyl 参数的 Pin 针宏观形貌, 选取图 4a 和 4b 这 2 组成形较好的参数分别制备了平头和球头 Pin 针阵列, 如图 5 所示。可以看出, Pin 针焊脚存在熔融金属堆积(焊瘤), 平头 Pin

针焊脚不规则偏向一侧堆积, 球头 Pin 针焊脚呈现梯形状。图 4c、4d 分别为球头 Pin 针球头成形时, Pin 针处于熔融金属状态, 球头液滴在焊丝回抽时发生偏向一侧不规则凝固的成形缺陷。焊丝在 CMT-Pin 工艺最后阶段回抽的角度会影响到整个 Pin 针的成形, 当焊丝回抽角度没有偏差时整个 Pin 针会竖直向上, 成形较稳定。

2.3 微观组织

图 6 为典型参数下平头 Pin 针组织形貌。如图 6a 所示, 平头 Pin 针由 Pin 轴区、熔合区、母材区组成。图 6b 为头部区域放大图, 分布着粗大的不规则铸态组织, 晶粒尺寸约为 100 μm, 生长方向无序。图 6c 为身部区域, 这一阶段对应着冷却阶段, 热输入为零,

表 4 Pin 针头型与高度试验结果

Table 4 Pin head type and height test results

Ball/Cyl	Pin head shape	Height/mm	Head diameter/mm
<0	Cylindrical Pin	2.30-3.96	-
≥0	Ball Pin	3.72-4.90	2.00-2.20

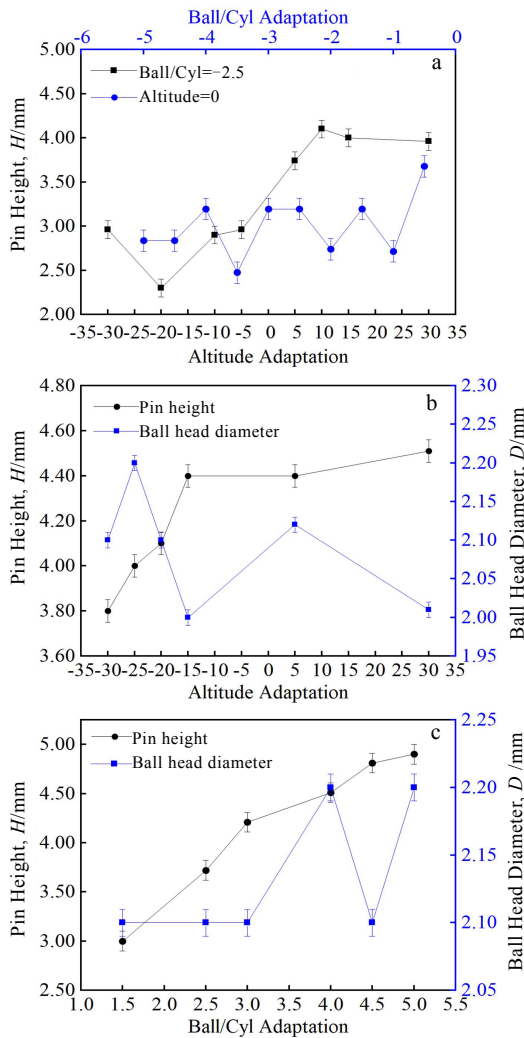


图 3 不同工艺参数对 Pin 针成形尺寸的影响

Fig.3 Effects of process parameters on Pin forming dimensions: (a) cylindrical Pin height variation with parameters; (b) Ball/Cyl=0, ball Pin height variation with Alt; (c) Alt=0, ball Pin height variation with Ball/Cyl

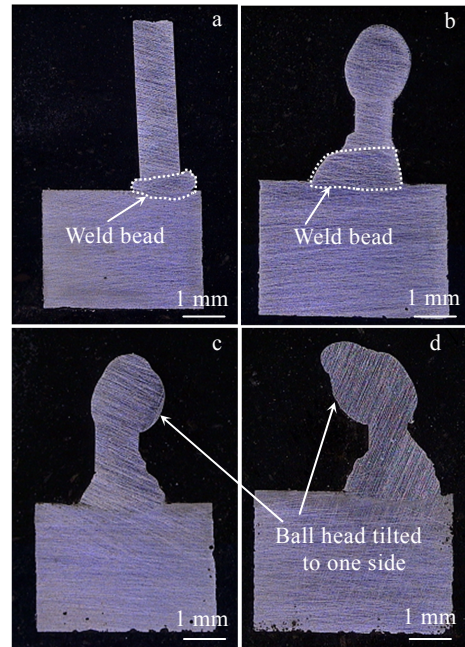


图 4 Alt=0 时, 不同 Ball/Cyl 参数下 Pin 针宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphologies of Pins with different Ball/Cyl parameters with Alt=0: (a) Ball/Cyl=-1.0, (b) Ball/Cyl=4, (c) Ball/Cyl=1, and (d) Ball/Cyl=2

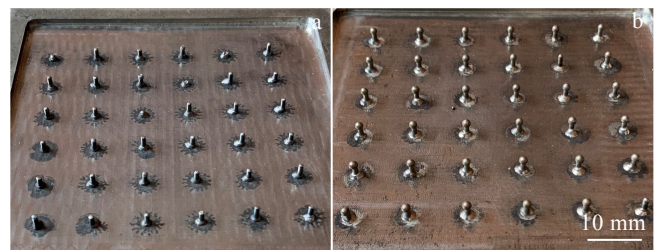


图 5 CMT-Pin 6×6 阵列图

Fig.5 6×6 array diagrams of CMT-Pin: (a) cylindrical Pin array and (b) ball Pin array

仅可以观察到熔融金属拔出的纵向结构,呈轧制态(亮色)。图 6d 为根部区域,此处组织为明显的柱状晶组织,柱状晶向上向外连续生长,枝晶间距细小致密。图 6e 为母材和熔合区,这一阶段为熔合阶段,整个热影响区(HAZ)分为粗晶热影响区(CGHAZ)和细晶热影响区(FGHAZ),熔合区为一条极细的熔合线,观察到母材区有明显的组织分界。

图 7 为典型参数下球头 Pin 针组织形貌。图 7b 为球头头部区域,这一阶段球头成形阶段,分布着粗大的类枝晶组织,在 Pin 针的头部,热输入集中在球中间,较高的温度停留会导致枝晶被进一步粗化。图 7c 为身部区域,分布着大量致密的柱状晶组织,沿着向上方向外延生长。图 7d 为根部和熔合区,细小的柱状晶向上向外生长。图 7e 为母材区,观察到明暗分界的组织。

图 8 是 Pin 针 EDS 元素点扫描位置和 SEM 组织形貌,对图 8a 和图 8b 中的不同位置点进行 EDS 元素点扫描并进行 EDS 成分分析(见表 5)。可以看出,点 1 的 Fe 元素含量接近 Q235 中 Fe 元素含量,点 1 和点 2 的 Fe 元素含量远高于 GH4169 焊丝中 Fe 元素含量,点 1 与点 3、4、5 的 Fe 元素含量从 FL 向 HAZ 区逐渐降低,最低的点 5 处 Fe 元素含量略高于 GH4169 的 Fe 含量,表明碳钢一侧的晶粒向 Pin 针中生长。点 1 的 Nb 含量为 0,点 2、3、4、5 可能存在  $\text{Cr}_2\text{Nb}$  型 Laves 相<sup>[13-14]</sup>。Laves 相作为一种脆性相,会降低 Pin 针的冲

击性能,另一方面又会消耗大量的 Nb 元素,影响强化相的形成。图 8c、8d 为球头 Pin 针 SEM 组织形貌。可以看到,图 8c 中白色区域为枝晶间的  $\gamma$ +Laves 共晶区<sup>[13-14]</sup>,热影响区靠近熔合线处存在大量 Laves 相析出,对比元素的原子分数可以发现,枝晶间可能存在着少量  $\gamma''(\text{Ni}_3\text{Nb})$  强化相,图 8d 中枝晶间析出白色条状的 Laves 相。

## 2.4 CMT-Pin 成形与组织形成机制

CMT-Pin 工艺通过特定的程序库和材料选择实现 Pin 针成形,经过更改参数,可以形成不同高度和头型的 Pin 针。图 9 为 Pin 针成形与组织机制,图 9a 为平头 Pin 针成形机制,可分为 3 个阶段<sup>[15-16]</sup>。在第 1 阶段,熔合(预热加热)阶段,GH4169 焊丝接触母材,CMT 输入第一电流(58~60 A),作用时间短(低于 0.5 s);第 2 阶段是冷却阶段,此时焊丝和母材的温度降低,热输入为零;最后,第 3 阶段为成形阶段,焊丝为熔融金属状态,在第二电流和焊丝的反向协调运动下,焊丝回抽,在此阶段,78 A 的电流电弧施加在焊丝上,根据程序参数的设定,生成平头 Pin 针。图 9b 为球头成形机制,与平头 Pin 针不同的是,在第 3 阶段,与熔合阶段第一电流相比,第二电流停留的时间更长,因此引起更高的热输入,电阻加热使焊丝收缩,在第二电流作用下焊丝形成液态焊接金属液滴,焊丝回抽,液滴分离形成球头 Pin 针。

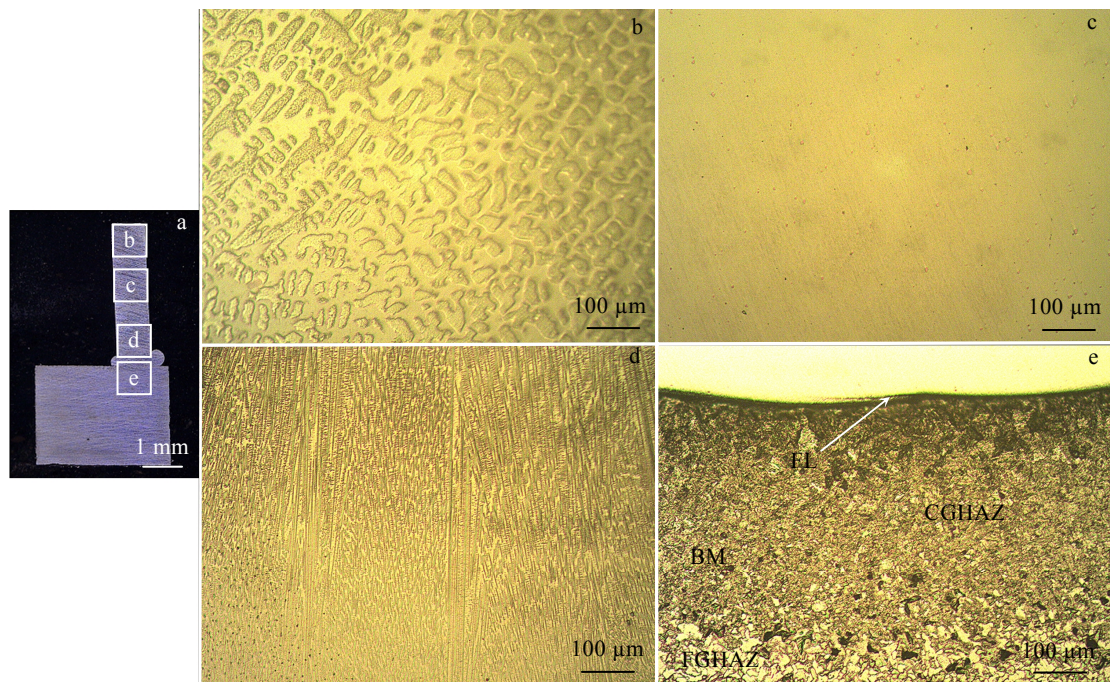


图 6 平头 Pin 针微观形貌

Fig.6 Microscopic morphologies of cylindrical Pin: (a) overall cylindrical Pin morphology, (b) head zone, (c) axis center zone, (d) root zone, and (e) fusing zone and base material zone

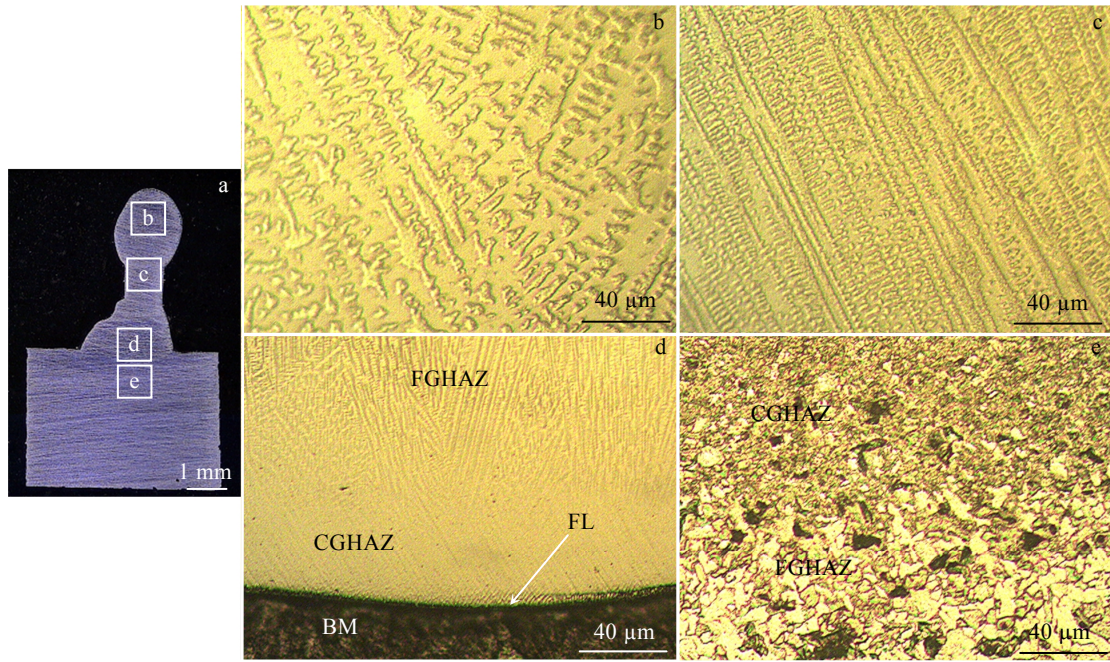


图 7 球头 Pin 针微观形貌

Fig.7 Microscopic morphologies of ball Pin: (a) overall ball Pin morphology, (b) head zone, (c) axis center zone, (d) root zone, and (e) base material zone

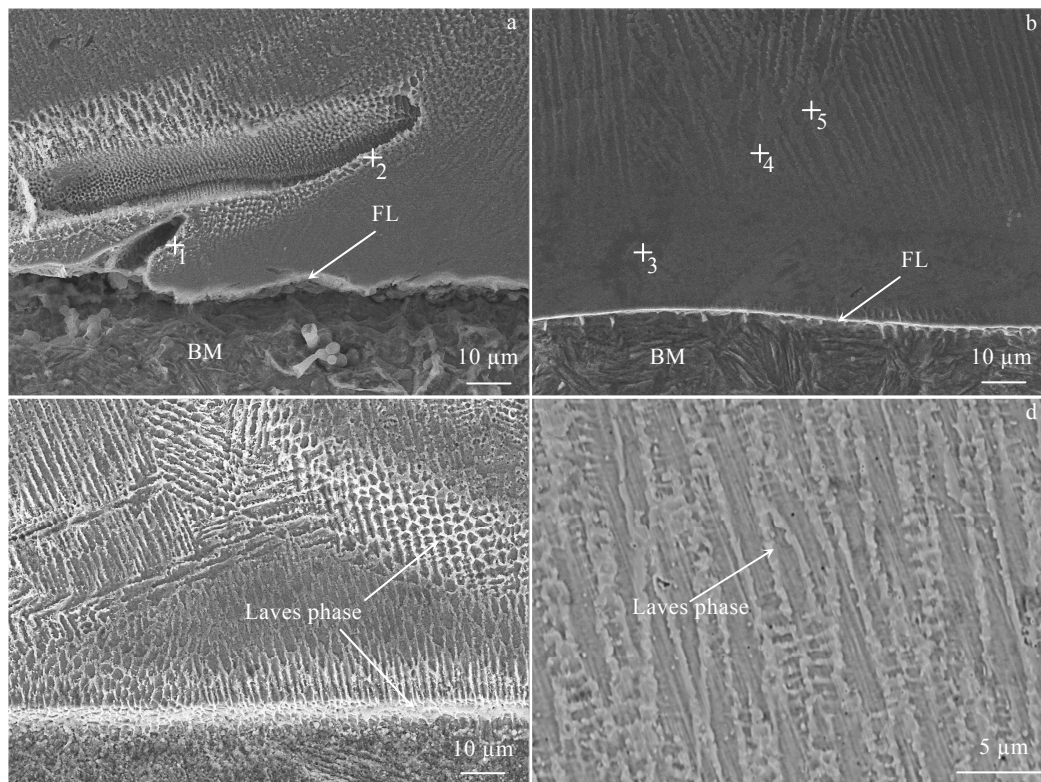


图 8 球头 Pin 针 EDS 元素点扫描位置和球头 Pin 针根部 SEM 形貌

Fig.8 EDS element point scanning positions of the ball Pin (a-b) and SEM morphologies of the root of ball Pin (c-d): (c) ball Pin fusion zone and (d) ball Pin root zone

表5 图8a、8b中不同位置的EDS元素分析

Table 5 EDS analysis results of different positions in Fig.8a and Fig.8b (at%)

Element	Position in Fig.8a		Position in Fig.8b		
	1	2	3	4	5
Fe	89.76	40.13	40.45	32.51	29.96
Cr	6.24	17.51	16.08	18.04	18.05
Ni	4.00	34.62	36.41	44.59	46.60
Nb	0.00	2.11	3.17	2.30	2.81
Ti	0.00	1.26	0.13	1.55	0.06
Al	0.00	2.50	2.04	1.01	2.52

图9c为球头Pin针的组织形成机制,氩气向下向外喷出,散热气流方向为向下向外,故晶粒向上向外生长<sup>[14]</sup>。焊丝接触母材,会以熔融金属的状态在母材表面堆积,因为CMT-Pin工艺热输入较小,在Pin针根部下区域,分布着细小致密的柱状晶;在根部上区域,分布着粗大的柱状晶,在晶间析出Laves相。在球头的形成过程中,开始不规则的冷却以及异质成核,这种成核是对球中出现的柱状晶的形成和生长的响应。在球头的内部,热输入集中在球的中间,较高的温度使得晶粒被粗化,而Pin针身部的结构由于较少的热量输入而不受影响,呈现轧制态的组织。

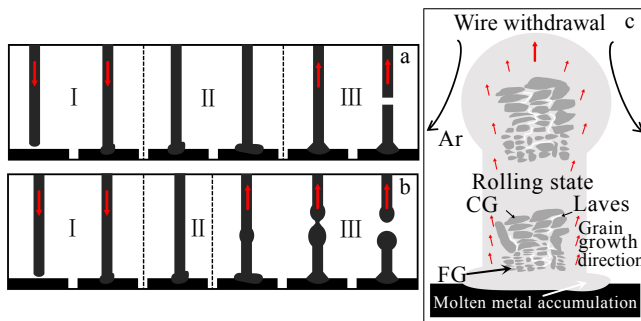


图9 Pin针成形与组织机制

Fig.9 Forming and microstructure mechanisms of Pins: (a) cylindrical Pin forming mechanism, (b) ball Pin forming mechanism, and (c) formation mechanism of ball Pin microstructure

### 3 结论

1) 通过控制参数 Alt 和 Ball/Cyl 能够制备不同头部形状(平头、球头)的 Pin 针。当 Ball/Cyl 为负时,头形为平头; Ball/Cyl 为 0 或正时,头形为球头。增大 Ball/Cyl, 球头直径稍有增加, 增大 Alt, Pin 针高度会

有一定的增幅, 最大增长约 78%。Ball/Cyl 参数的优先影响级别比 Alt 参数更高, Ball/Cyl 参数能决定 Pin 针的头形和是否稳定成形。

2) 在宏观成形上, Pin 针焊脚存在熔融金属堆积(焊瘤), 平头 Pin 针焊脚不规则偏向一侧堆积, 球头 Pin 针呈现梯形状。微观组织上, Pin 轴分布着大量的柱状晶, 沿轴向外生长; 在焊脚处, 沿 Pin 轴往上柱状晶由细晶转变为粗晶, 熔合区为一条极细的熔合线, 晶间析出大量条状的 Laves 相; 在母材区, 存在明暗交接的组织分层。

3) CMT-Pin 工艺可分为 3 个阶段: 在熔合阶段, 电流作用了较短的时间, 热输入较低, 柱状晶沿 Pin 针向上向外生长, 晶间析出 Laves 相; 而在冷却阶段, 也就是 Pin 针的身部形成阶段, 热输入为零, 组织呈轧制态; 成形阶段, 电流和焊丝协同回抽使 Pin 针成形。

### 参考文献 References

- [1] Zhang Guangwu(张广武). *Research on Strengthening Mechanism of Fiber-Metal Laminate Interface*(纤维金属层板界面增强机理研究)[D]. Yanshan: Yanshan University, 2021
- [2] Wang Hongyue(王虹越). *Effect of Pin-Fins Combined with Dimple and Protrusion Structure on the Cooling Efficiency of Turbine Blade Trailing Edge*(扰流柱结合凹凸结构对涡轮叶片尾缘冷却效果的影响)[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021
- [3] Sun Qichao(孙启超). *Investigation on Flow and Heat Transfer of the Internal Characteristics with Lamilloy Board*(层板结构内部流动与换热特性研究)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012
- [4] Zhang Xi(张希). *Research on Chemical Etching of Metal Microgroove Array on the Surface of Rotating Body*(回转体表面金属微沟槽阵列的化学刻蚀加工)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021
- [5] Tang Pei(唐培), Mei Deqing(梅德庆), Yao Zhehe(姚喆赫) et al. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(12): 3334
- [6] Li Hongying(李红英), Zhang Mingqi(张明岐), Zhang Zhijin(张志金) et al. *Aviation Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2018, 61(3): 41
- [7] Stelzer S, Ucsnik S, Pinter G. *Composites Part A*[J], 2016, 88: 39
- [8] Sarantinos N, Tsantalis S, Ucsnik S et al. *Composite Structures*[J], 2019, 229: 111 404
- [9] Ucsnik S, Stelzer S, Sehrschön H et al. *ECCM16-16th Euro-*

- pean Conference on Composite Materials[C]. Spain: Research Gate, 2014
- [10] Skhabovskiy I, Batista N L, Damato C A *et al.* *Composite Structures*[J], 2017, 180 : 263
- [11] Gerhard P, Ferdinand K, Heinz H *et al.* *Metal Additive Manufacturing Conference*[C]. Vienna: Research Gate, 2014
- [12] Zhang G T, Zhao H, Xu X H *et al.* *Volume*[J], 2019, 44: 427
- [13] Sun Wenjun(孙文君), Wang Shanlin(王善林), Tan Guanhua (谭观华) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2020, 47(10): 83
- [14] Ren Hang(任 航). *Microstructure and Mechanical Properties of Nb Modified GH4169 Superalloy Produced by Laser Additive Manufacturing*[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019
- [15] Somoskői G, Török I. *Production Processes and Systems*[J], 2013, 6: 47
- [16] Reisgen U, Willms K, Schäfer J *et al.* *Kovove Materialy*[J], 2019, 57(6): 397

## CMT-Pin Additive Preparation of GH4169 High Temperature Alloy Columnar Array Forming Process and Microstructure

Xiao Penghua<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>1</sup>, Tang Yingying<sup>2</sup>, Xiao Lin<sup>1</sup>, Xia Chun<sup>1</sup>, Liu Fencheng<sup>1</sup>, Ke Liming<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Using  $\Phi 1.2$  mm ER-GH4169 welding wire, the columnar array structure was prepared on Q235 carbon steel substrate with 5 mm in thickness by CMT-Pin additive technique, and the Pin forming process and tissue characteristics were investigated. Results show that when the Ball/Cyl adaptation parameter is negative, the Pin head shape is cylindrical; when the Ball/Cyl adaptation is non-negative, the Pin head shape is ball. The altitude adaptation controls the height of Pin growth, and the Pin height is 2.30-4.96 mm. The microstructure of Pins is divided into Pin axis zone, fusion zone, and base material zone. Pin axis area has a large number of columnar crystals, which grow outward along the axis. In the fusion area, the columnar crystals change from fine crystals to coarse crystals along the upward Pin axis, and the fusion area is a very fine fusion line with a large number of strips of Laves phase precipitated between the crystals. The tissues of light and dark interlayers exist in the base material area.

**Key words:** CMT-Pin; GH4169; columnar array; Pin forming; microstructure

---

Corresponding author: Wang Lei, Ph. D., Lecturer, School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: lbw@nchu.edu.cn