

激光定向能量沉积 Inconel 718 合金高频窄脉冲电化学后处理行为研究

耿建峰¹, 吴琳¹, 郭鹏飞^{1*}, 王慧君¹, 林鑫², 张宇锋², 杨光³, 黄卫东²

¹青岛理工大学山东增材制造工程技术研究中心, 山东 青岛 266520;

²西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072;

³沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136

摘要 高频窄脉冲电解加工技术能有效提高加工精度和表面质量,在镍基高温合金等难加工金属材料的精密制造方面有着广泛的应用。然而,对于微观组织极不均匀的激光定向能量沉积构件,其加工质量尚不清晰,尤其是采用无水电解液时。以激光定向能量沉积 Inconel 718 合金为研究对象,采用频率为 30~100 kHz、占空比为 30%~80% 的高频窄脉冲电流以及饱和 NaCl 乙二醇电解液进行射流电解加工实验。结果表明:沉积态 Inconel 718 合金组织由 γ 基体相、Nb 偏析区与枝晶间相(主要为 γ /Laves 共晶相)组成;在 10.50 A/cm² 的电流密度下,加工区表面粗糙度随脉冲频率的增加而增大,且脉冲频率为 30 kHz 时表面粗糙度最小($R_a=1.562 \mu\text{m}$),加工精度最高;表面粗糙度随占空比的增加先减小后增大,占空比为 50% 时表面粗糙度最小,占空比为 60% 时加工精度最高;而在直流模式下,表面粗糙度随电流密度的增大而降低,且电流密度为 10.50 A/cm² 时,表面质量最优($R_a=0.526 \mu\text{m}$),这是由于高电流密度更容易诱导表面“过饱和盐膜”的形成,从而有效抑制选择性溶解,降低表面粗糙度。但在加工精度方面,高频窄脉冲电流模式的加工定域性较好。最后,基于“盐膜”理论和双电层模型,揭示了高频窄脉冲电流模式下沉积态 Inconel 718 合金的微观阳极溶解机理,为提高激光增材制造镍基高温合金射流电解加工表面质量提供了理论支撑和实验依据。

关键词 激光技术; 激光定向能量沉积; Inconel 718 镍基高温合金; 射流电解加工; 表面完整性; 加工精度

中图分类号 TG175; TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231447

1 引言

20 世纪 90 年代发展起来的激光定向能量沉积(LDED)技术是一种以粉末、丝材等材料同步送进为技术特征的激光增材制造(LAM)技术,其具有逐点、逐线、逐面、逐层沉积的成形特点,能够实现高性能、复杂结构、全致密金属构件的近净成形^[1-4]。Inconel 718 镍基高温合金在 650 °C 时仍具有优异的力学性能、抗氧化性以及良好的组织稳定性,被广泛应用于航空发动机、燃气轮机等热端部件^[5-8]。近年来,大量成形实践证明,LDED 是加工 Inconel 718 合金最有效的技术之一^[9-11]。然而,熔覆道间的搭接、沉积层间的堆垛效应以及试件表面的粘粉等使得成形件的加工精度和表面质量较差,在使用之前必须进行减材加工^[12]。LDED-Inconel 718 合金具有高温性能优异、加工硬化严重、导热系数低等特点,使用传统加工方法(如机械铣削)进行加工会带来刀具磨损严重、生产效率低以及表面完整性差等问题^[13-15]。

电解加工(ECM)是基于电化学阳极溶解反应进行材料加工的一种特殊的加工方法,其通过金属离子溶解的方式去除材料,加工过程不受工件强度、硬度等力学性能的影响,且具有工具阴极无磨损、工件表面无重铸层、无加工硬化层等优点^[16-19]。目前,研究者们已经将 ECM 作为 LDED 构件减材加工的重要方法之一,并开展了一系列的研究。Wang 等^[20]采用 ECM 对 LDED-Inconel 718 合金进行了表面光整加工及小孔加工实验,发现加工表面不平整。An 等^[21]利用电解磨削对 LDED-316SS 不锈钢构件内表面进行了光整加工,指出 ECM 后表面仍存在鱼鳞状的凸起,需后续机械磨削处理。不难发现,采用 ECM 对 LDED 构件进行加工处理时,仍存在表面质量较差的难题。对此,Guo 等^[22]对 LDED-Inconel 718 合金微观组织中不同组成相的溶解行为进行了系统研究,发现 Nb 偏析区的溶解速率远大于 γ 相,而 Laves 相未溶解,即发生了选择性溶解。进一步研究发现,采用 ECM 加工时合金表面存在不均匀的超钝化膜组织,

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2024-01-15; 录用日期: 2024-01-15; 网络首发日期: 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(52005280, U22A20189)、山东省自然科学基金(ZR2020ZDD04)

通信作者: *dr2019guopf@163.com

其诱导的裂纹与侵蚀破坏、高速流动的电解液会引起膜/金属界面剪切应力以及膜/金属界面处的金属阳离子空位凝结,从而发生局部失效,最终加剧了选择性溶解,微区表面质量变差^[23]。近年来,Kawanaka等^[24]发现采用脉冲电解加工(PECM)可有效提高不锈钢 SUS304 的表面光整度;Guo等^[25]对锆基非晶合金进行了高频脉冲电解加工,结果表明脉冲参数对杂散腐蚀的影响较大,但通过调节脉冲频率与占空比可以获得光滑的表面;Wu等^[26]研究发现,高频群脉冲电解加工能够显著改善电极间隙的流场特性,获得更好的加工质量;Wang等^[27]采用高频脉冲电解加工制备了具有良好尺寸精度与表面质量的直纹叶片前缘结构,表面粗糙度可达 0.358 μm 。尽管 PECM 能有效提高表面质量,但是 LDED-Inconel 718 合金在水基电解液中极易形成超钝化膜而引发选择性溶解。无水乙二醇基电解液因可有效抑制超钝化膜的形成并通过形成“过饱和盐膜”来提高加工表面质量而备受关注。如 Liu 等^[28]针对钛合金开展了实验研究,发现相较于水基电解液,乙二醇基电解液可显著提高表面质量。但是,在 ECM 过程中,乙二醇对 LDED-Inconel 718 合金表面质量的影响机制尚不明确,尤其是在 PECM 作用下。

表 1 Inconel 718 合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical compositions of Inconel 718 alloy powder

Composition	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C	Mn	Si	Ni
Mass fraction / %	18.590	18.350	5.130	3.080	1.090	0.510	0.043	0.160	0.220	Bal.

2.2 ECM 实验

采用自制机床进行射流电解加工(EJM)实验。该机床(其示意图与实物图如图 1 所示)包含高频-脉冲电源、电解液喷射系统、电解液循环系统、三坐标工作台。其中:脉冲频率选用 30~100 kHz,占空比为 30%~50%;管电极材质为不锈钢 304SS,内径与外径分别为 0.85 mm 和 1.10 mm;加工间隙为(0.30±0.05)mm。电解液为饱和 NaCl 乙二醇电解液(质量分数为~5%),阳极材料为沉积态 Inconel 718 试件。实验过程中采用示波器进行波形数据监测。另外,为了进一步阐明脉冲电流的作用,实验中增加直流模式下的射流电解加工对比实验。电解液温度均为(25±1)°C,管电极进给速度为 2 mm/s,电解液流量为 5 mL/s。

2.3 显微组织及加工形貌观察

采用扫描电子显微镜(SEM)对沉积态 Inconel 718 合金的枝晶形貌及相组成进行表征分析;EJM 实验后的加工表面微观形貌亦采用 SEM 进行表征分析;利用 X 射线衍射仪对沉积态 Inconel 718 合金表面进行元素分布测定;采用激光共聚焦显微镜(CLSM)对凹槽 X 轴方向的中心区域进行测量,根据表面粗糙度衡

因此,为了提高 LDED-Inconel 718 合金的表面质量和加工精度,我们系统研究了其组织特征以及脉冲电流与乙二醇电解液耦合作用下 LDED-Inconel 718 合金各组成相的溶解行为,同时基于“盐膜”理论和双电层模型,揭示了沉积态 Inconel 718 合金中非均匀组织溶解行为对表面完整性和加工精度的影响机制。

2 材料与方 法

2.1 材料准备

LDED 实验选用激光立体成形设备(含 6 kW 半导体激光器、数控工作台、手套箱以及载气式送粉系统)。Inconel 718 粉末选用气雾化法生产的球形粉末,粉末粒径为 45~125 μm ,其化学成分如表 1 所示。实验前,将粉末置于真空干燥箱内在 120 °C 下恒温保持 4 h,以去除粉末表面吸附的水分,保证粉末良好的流动性。LDED 工艺参数如下:激光功率为 4 kW,扫描速度为 15 mm/s,送粉速率为 0.5 g/s,光斑直径为 5.3 mm,搭接率为 50%。为减小残余应力,采用层间交错扫描策略。采用线切割加工机床在成形件中切割出尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体试件,以进行显微组织分析及后续 ECM 实验。

量凹槽的表面加工质量,根据凹槽外轮廓的深宽比辨别加工精度。

3 结 果

3.1 显微组织特征及元素分布

图 2 显示了沉积态 Inconel 718 合金在不同截面上的显微组织形貌。从图 2(a)、(b)可以看到,树枝晶在水平截面上呈等轴状,而在竖直截面上为柱状,即沉积态 Inconel 718 合金内部为典型的柱状枝晶组织。由图 2(c)、(d)可以看到,枝晶干区域为 γ 相,而枝晶间区域则由 Nb 偏析区以及 γ /Laves 共晶相等组成。另外,不规则的 γ /Laves 共晶相分布在 Nb 偏析区。

图 3 为激光定向能量沉积 Inconel 718 合金竖直截面的元素分布特征。从图 3 不难看出,激光定向能量沉积 Inconel 718 合金不存在宏观偏析,这是因为激光定向能量沉积特点为逐点沉积成形,且 Inconel 718 合金粉末粒径以及激光光斑直径均很小,激光熔池快热速冷后沉积试件各处的成分在宏观尺度上是均匀分布的。但是,在激光定向能量沉积 Inconel 718 合金试样的枝晶干处和枝晶间仍存在

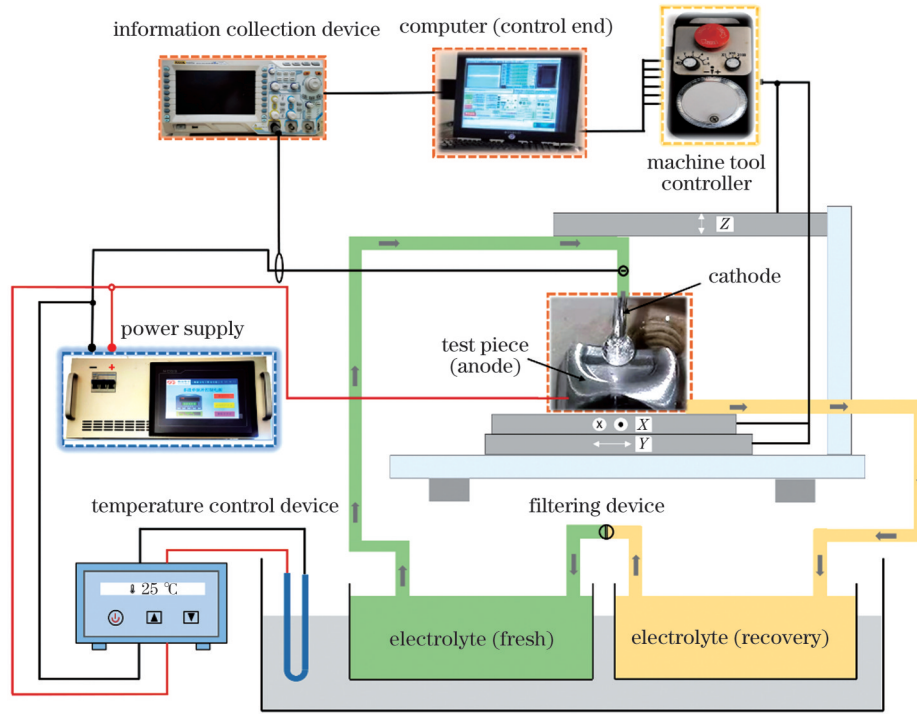


图 1 射流电解加工示意图

Fig. 1 Schematic of electrolyte jet machining

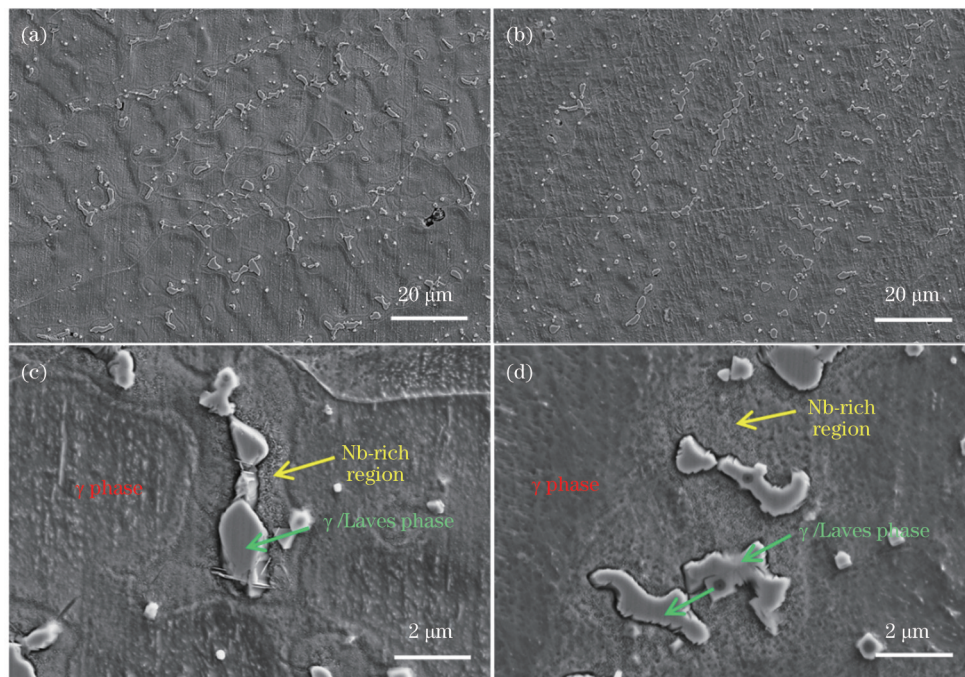


图 2 激光定向能量沉积 Inconel 718 合金在不同截面上的显微组织特征。(a)水平截面的枝晶形貌;(b)竖直截面的枝晶形貌;(c)水平截面的相组成及分布;(d)竖直截面的相组成及分布

Fig. 2 Microstructure characteristics of Inconel 718 alloy at different cross sections by laser directed energy deposition. Dendrite morphologies at (a) horizontal and (b) vertical sections; phase compositions and distributions at (c) horizontal and (d) vertical sections

微观偏析。大原子序数的 Nb、C、Mo 和 Ti 等元素在枝晶间富集,小原子序数的元素(如 Ni、Fe、Cr 等)则富集在枝晶干处。根据共晶相的形成过程可知,由于合金元素的溶质再分配,γ 基体在形成过程中,

Nb、C、Mo 和 Ti 等合金元素被不断排到液相中。随着枝晶的不断生长,合金元素最终在枝晶间区域富集,即激光定向能量沉积 Inconel 718 合金中依然存在微观偏析。

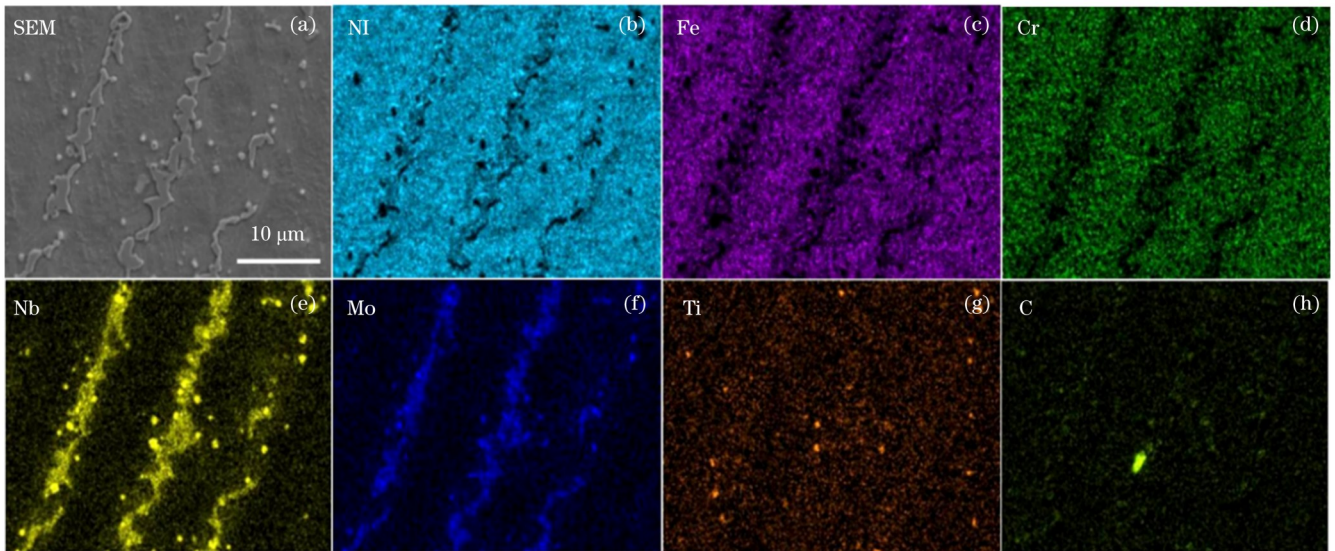


图 3 激光定向能量沉积 Inconel 718 合金的元素分布

Fig. 3 Element distributions of Inconel 718 alloy by laser directed energy deposition

3.2 脉冲频率对微区溶解形貌的影响

表 2 为沉积态 Inconel 718 合金在不同脉冲频率下的 EJM 实验参数,图 4 则显示了加工区域的表面微观形貌。当脉冲频率为 30 kHz 时,加工微区表面呈现出柱状枝晶形貌[图 4(a)],枝晶干凹陷而枝晶间凸起,即枝晶干溶解速率大于枝晶间。另外,在枝晶间区域发现了大量的点蚀坑(尺寸为 2~3 μm),这是因为 Laves 相/Nb 偏析区相界面处 Nb 偏析区一侧的原子自由能高而优先溶解,稳定的 Laves 相与基体脱黏,最终被流动的电液冲刷带走而形成凹坑。当脉冲频率为 40 kHz 和 60 kHz 时,加工微区表面的选择性溶解更加强烈[图 4(b)、(c)],可以看到枝晶间明显凸起,且在

表 2 不同脉冲频率下的 EJM 实验参数

Table 2 Experimental parameters under different pulse frequencies during EJM

Group No.	Frequency / kHz	Duty ratio / %	Feeding speed / (mm/s)	Translating number
1	30	50	2	60
2	40	50	2	60
3	60	50	2	60
4	80	50	2	60
5	100	50	2	60

枝晶间区域 Laves 相与点蚀坑同时出现,即 Laves 相的剥离速率变小。当脉冲频率增加到 80 kHz 时,加工微

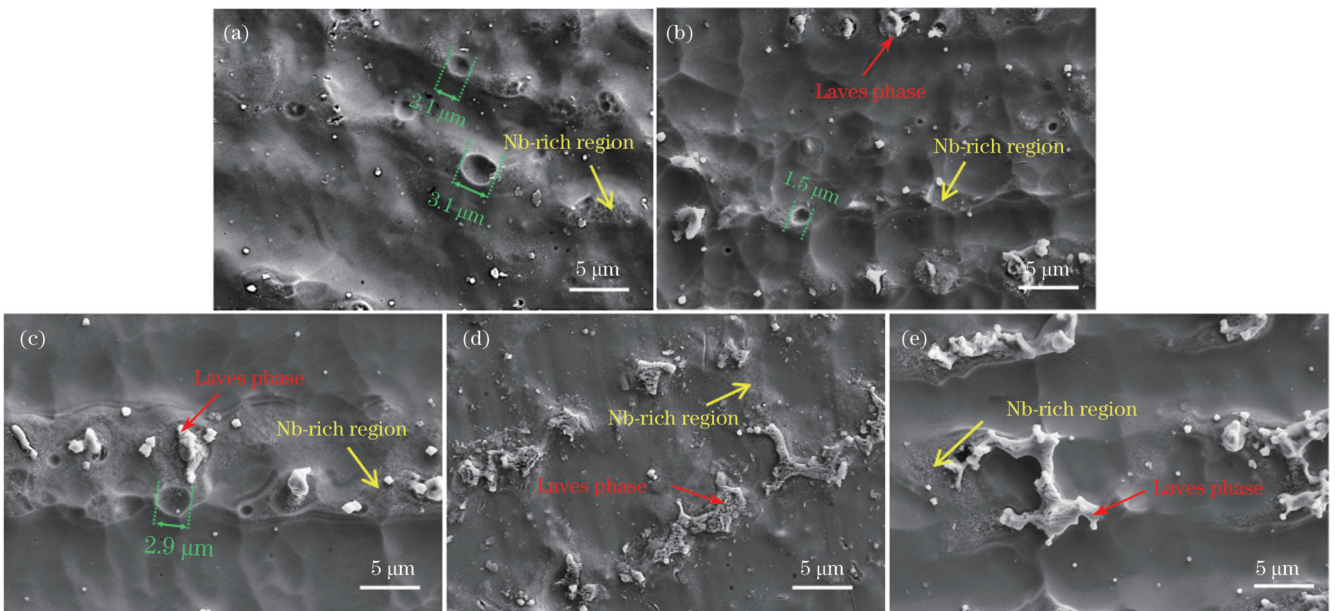


图 4 不同脉冲频率下 EJM 后沉积态 Inconel 718 合金的表面微观形貌。(a) 30 kHz; (b) 40 kHz; (c) 60 kHz; (d) 80 kHz; (e) 100 kHz

Fig. 4 Surface microstructures of as-deposited Inconel 718 alloy after EJM at different pulse frequencies. (a) 30 kHz; (b) 40 kHz;

(c) 60 kHz; (d) 80 kHz; (e) 100 kHz

区表面更加不平整[图 4(d)],且枝晶间区域没有出现点蚀坑,只有成簇的 Laves 相凸起,即 Laves 相的剥离速率极小。在 100 kHz 的脉冲频率下,完整形态的 Laves 相在枝晶间区域凸起[图 4(e)],合金表面更为粗糙。显然,Laves 相的剥离速率随脉冲频率的增加而降低,这并不利于获得光滑的表面。需要指出的是,无论脉冲频率如何变化,其微区表面形貌均呈现出枝晶干凹陷而枝晶间凸出,即枝晶干 γ 基体相的溶解速

率高于枝晶间 Nb 富集区,这与沉积态 Inconel 718 在 NaCl 水溶液中的实验结果^[22]相反。

如图 5 所示,当脉冲频率为 30 kHz 时,表面粗糙度 (R_a) 为 1.562 μm ,当脉冲频率增加到 100 kHz 时, R_a 急剧增加到 1.923 μm 。不难理解,沉积态 Inconel 718 合金的表面粗糙度随脉冲频率的增加而急剧增大。同样,随着频率的增加,凹槽的深宽比减小,即在 30 kHz 时加工精度最高。

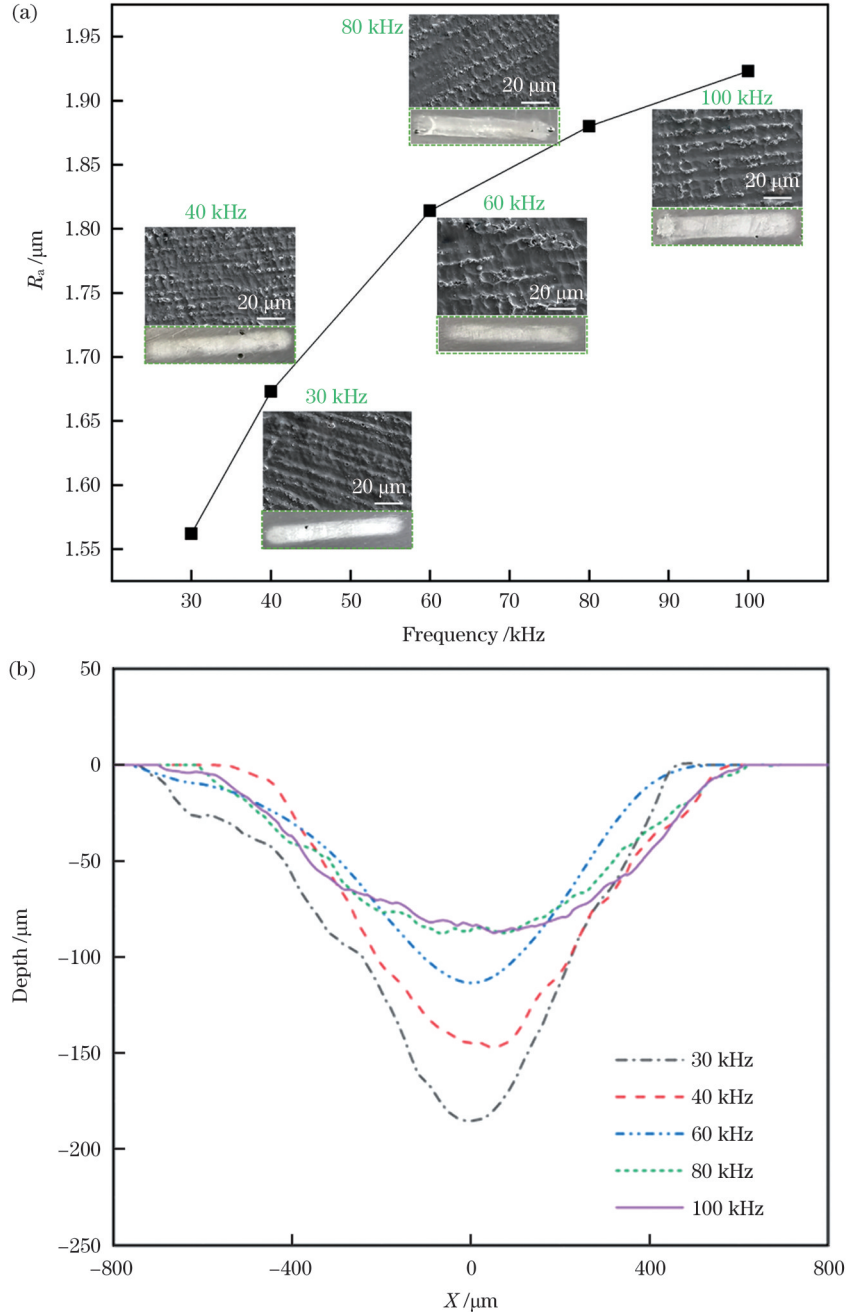


图 5 不同脉冲频率下 EJM 后凹槽的表面粗糙度与剖面形貌图。(a) 表面粗糙度;(b) 剖面形貌图

Fig. 5 Surface roughness and cross-section morphologies of groove prepared by EJM under different pulse frequencies. (a) Surface roughness; (b) cross-section morphologies

3.3 占空比对微区溶解形貌的影响

表 3 为沉积态 Inconel 718 合金在不同脉冲占空比下的 EJM 实验参数。在不同占空比的条件下,改变其

扫描次数,即加工时长(t),进而保证输入的总电荷量(Q)相等。当然,其余实验条件保持不变,即外加电流密度为 10.50 A/cm^2 、脉冲频率为 30 kHz、进给速度

表 3 不同脉冲占空比下的 EJM 实验参数

Table 3 Experimental parameters under different pulse duty ratios during EJM

Group No.	Frequency / kHz	Duty ratio / %	Feeding speed / (mm/s)	Translating number
1	30	30	2	100
2	30	40	2	75
3	30	50	2	60
4	30	60	2	50
5	30	70	2	43
6	30	80	2	38

为 2 mm/s。图 6 为 EJM 区域的微区表面形貌图,当脉冲占空比为 30% 时,枝晶干凹陷而枝晶间凸起,即选择性溶解较为严重。由图 6(a) 可以观察到近乎完整的 Laves 相镶嵌在枝晶间区域,未发生脱黏现象。当

占空比为 40% 时, Laves 相体积变小[图 6(b)], 说明其发生一定程度的溶解。从图 6(c) 可以看到, 枝晶间区域存在 Laves 相与基体脱黏而形成的圆形坑, 但加工微区表面较为平整, 即 Inconel 718 合金各组成相的溶解速率趋于相同, 此时脉冲占空比为 50%。继续增加脉冲占空比, 加工微区表面又开始变得不平整。如图 6(d)、(e) 所示, 当占空比为 60% 与 70% 时, 枝晶干凹陷与枝晶间凸起的程度逐步变大, 即各组成相的溶解速率差异逐步增大。当占空比增大到 80% 时, 镶嵌在枝晶间区域的 Laves 相呈现完整形态[图 6(e)、(f)], 即其未溶解。不难看出, 在利用高频窄脉冲射流电解加工沉积态 Inconel 718 合金时, 并不是占空比越大其表面质量越好, 而是当脉冲电流接通时间(t_{on})与关闭时间(t_{off})越接近 1:1 时, 合金各个相的溶解速率差异越小, 射流电解加工表面质量越好。

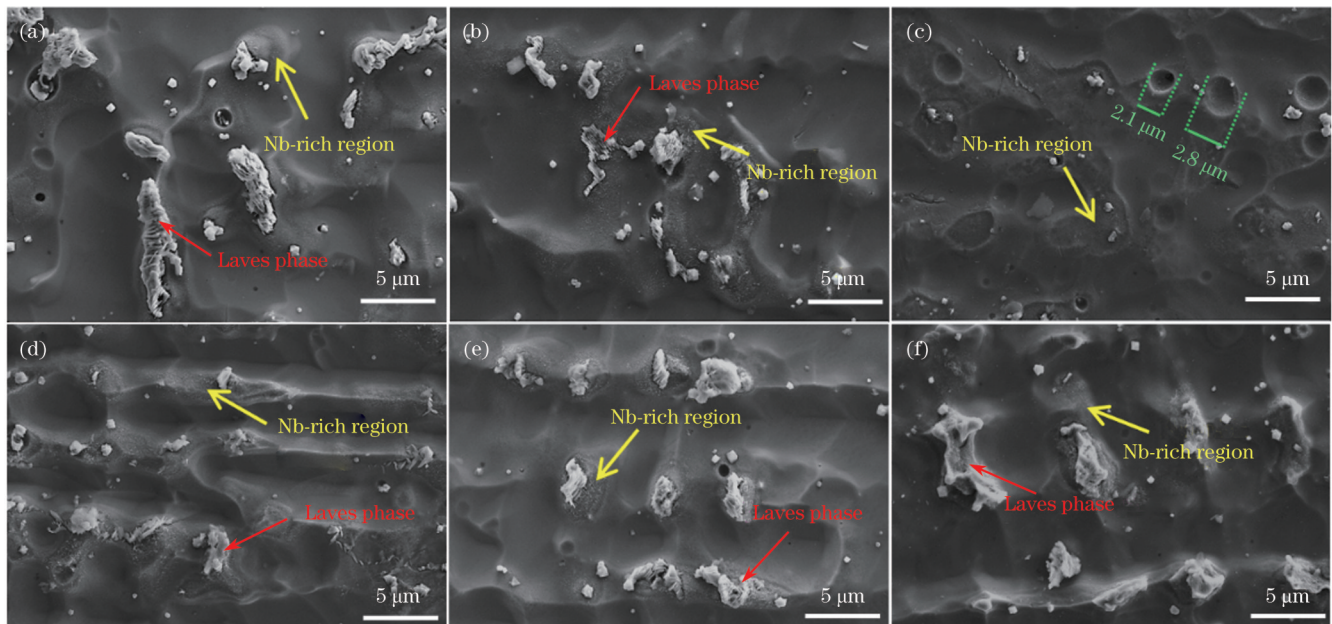


图 6 不同占空比下 EJM 后沉积态 Inconel 718 合金的表面微观形貌。(a) 30%; (b) 40%; (c) 50%; (d) 60%; (e) 70%; (f) 80%
Fig. 6 Surface microstructures of as-deposited Inconel 718 alloy after EJM under different duty ratios. (a) 30%; (b) 40%; (c) 50%; (d) 60%; (e) 70%; (f) 80%

如图 7(a) 所示, 当占空比(D)为 50% 时, 沉积态 Inconel 718 合金的表面粗糙度最小为 $1.562 \mu\text{m}$ 。而当占空比为 30% 与 80% 时表面粗糙度较大, 分别为 $1.856 \mu\text{m}$ 与 $1.827 \mu\text{m}$, 与上述微区形貌分析结果一致。凹槽的深度与宽度都随占空比的变化而变化[图 7(b)], 但当占空比为 30%~60% 时深度相差无几, 而当占空比为 60% 时凹槽宽度最小, 即深宽比最大, 加工精度最高。

3.4 电流模式对微区溶解形貌的影响

为进一步厘清高频窄脉冲电流对 NaCl 乙二醇电解液中沉积态 Inconel 718 合金射流电解加工的影响, 增加直流模式以对比研究。其中, 脉冲电流参数选用上述加工实验中效果最好的一组, 即脉冲频率

(f) 为 30 kHz, 占空比为 50%。表 4 为具体的实验参数。图 8 为沉积态 Inconel 718 合金加工微区的表面形貌。从图 8(a)、(c) 可以看出, 当外加脉冲电流密度(J)为 1.05 A/cm^2 和 5.26 A/cm^2 时, 加工微区表面粗糙, γ 基体相凹陷而 Nb 偏析区与 Laves 相凸起。采用直流模式且在相同外加电流密度情况下, 加工微区表面更平整[图 8(b)、(d)], 表明高频窄脉冲电流并不利于沉积态 Inconel 718 合金各组成相的均匀性溶解。值得注意的是, 在外加电流密度为 10.50 A/cm^2 的情况下, 采用脉冲电流模式进行射流电解加工, 去除 Laves 相后出现了遗留的圆形凹坑[图 8(e)], 而采用直流模式进行射流电解加工, 并没有出现圆形凹坑[图 8(f)]。这是因为在直流模式

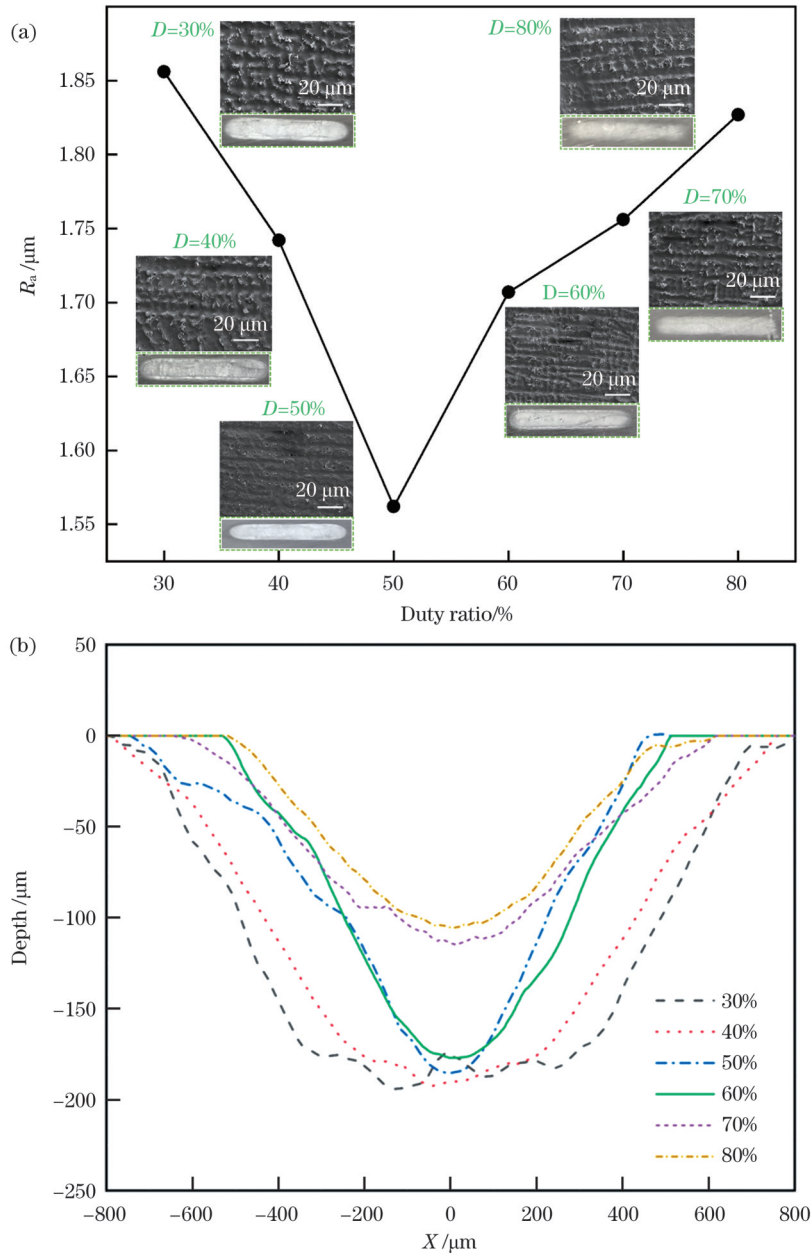


图 7 不同脉冲占空比下 EJM 后凹槽的表面粗糙度与剖面形貌图。(a) 表面粗糙度; (b) 剖面形貌图

Fig. 7 Surface roughness and cross-section morphologies of groove prepared by EJM under different pulse duty ratios. (a) Surface roughness; (b) cross-section morphologies

表 4 不同电流模式下的 EJM 实验参数

Table 4 Experimental parameters under different current modes during EJM

Group No.	Current mode	Current density / (A/cm^2)	Frequency /kHz	Duty ratio /%	Feeding speed / (mm/s)	Translating number
1	Direct current	1.05			2	300
2	Direct current	5.26			2	60
3	Direct current	10.5			2	30
4	Pulse current	1.05	30	50	2	600
5	Pulse current	5.25	30	50	2	120
6	Pulse current	10.50	30	50	2	60

下, 沉积态 Inconel 718 合金各组成相的溶解速率几乎相同, Laves 相不会与基体脱黏而被电解液冲刷带走。另外, 我们可以看到, 无论是直流模式还是脉冲

电流模式, 随着电流密度的增加, 其表面质量变好^[28]。

如图 9(a) 所示, 当电流密度为 $1.05\ \text{A}/\text{cm}^2$ 时, 脉

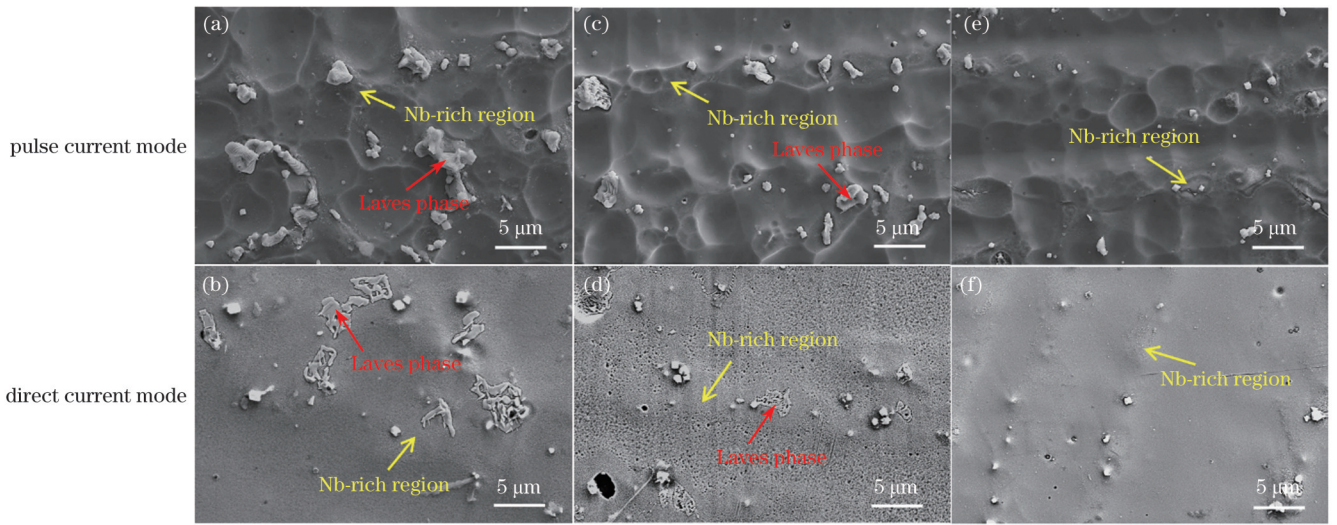


图 8 EJM 后沉积态 Inconel 718 合金在不同电流模式和电流密度下的表面微观形貌。(a)(b) 1.05 A/cm²; (c)(d) 5.26 A/cm²; (e)(f) 10.50 A/cm²

Fig. 8 Surface microstructures of as-deposited Inconel 718 alloy under different current modes and current densities. (a)(b) 1.05 A/cm²; (c)(d) 5.26 A/cm²; (e)(f) 10.50 A/cm²

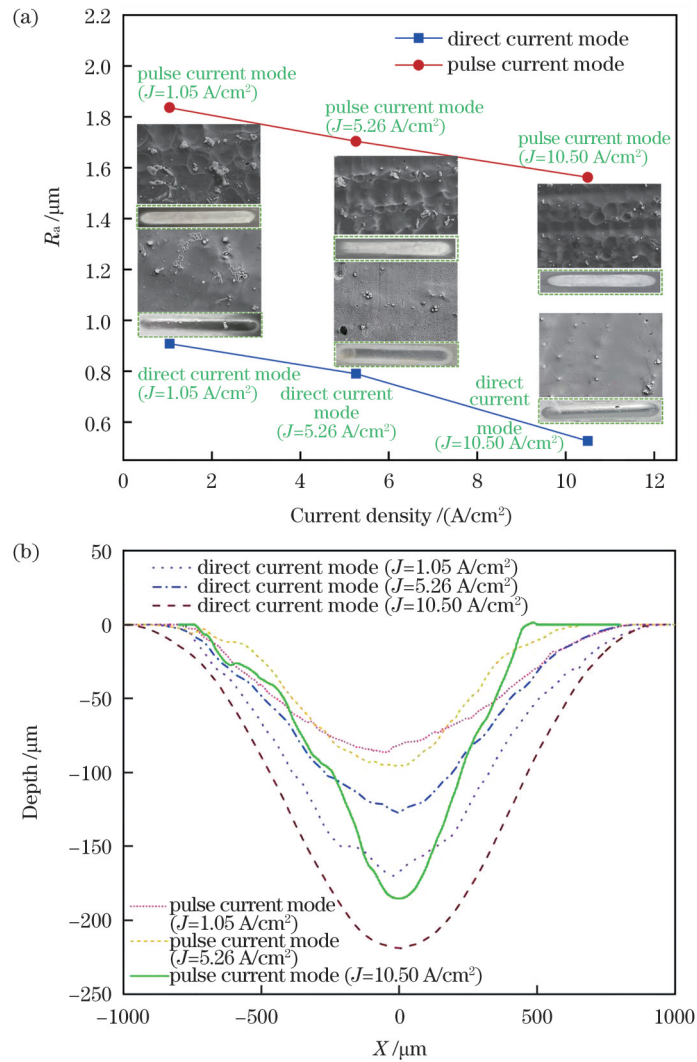


图 9 不同电流模式下 EJM 后凹槽的表面粗糙度与剖面形貌图。(a) 表面粗糙度; (b) 剖面形貌图

Fig. 9 Surface roughness and cross-section morphologies of groove prepared by EJM under different current modes. (a) Surface roughness; (b) cross-section morphologies

冲电流模式下合金表面粗糙度 R_a 最大为 $1.836 \mu\text{m}$, 最小为 $1.562 \mu\text{m}$, 而直流模式下合金表面粗糙度 R_a 最大为 $0.908 \mu\text{m}$, 最小为 $0.526 \mu\text{m}$ 。从图 9(b) 可以看到, 无论是高频脉冲电流模式还是直流模式, 随着电流密度的增加, 加工精度增大。当电流密度为 10.50 A/cm^2 时, 在直流模式下凹槽深且宽, 在高频脉冲电流模式下凹槽较浅且窄。但两者相比, 脉冲电流模式下凹槽的深宽比较大, 即加工定域性较好。

4 讨 论

4.1 直流模式下的电解加工原理

图 10 为直流模式下沉积态 Inconel 718 合金在 NaCl 乙二醇溶液中进行射流电解加工后的表面微区溶解机理图, 可分为两个阶段, 即超钝化溶解阶段^[23]和盐膜整平阶段。在超钝化溶解阶段, Inconel 718 合金不同组成相表面的超钝化膜成分和结构不同, 溶解速率存在差异, 从而导致合金表面凹凸不平[图 10(a)]。特别地, 当超钝化膜发生局部破裂时, 会诱导选择性溶解, 从而导致加工质量变差^[23]。当超钝化膜在电流密

度增大的过程中完全被去除时, 快速溶解的金属离子会在阳极表面快速堆积, 进而形成“盐膜”^[28](即过饱和膜)。此时进入第二阶段[图 10(b)], 阳极溶解完全由传质步骤控制。腐蚀电流密度为浓差极化 Butler-Volmer 方程的极限电流(i)可表示为

$$i = \frac{zFD(c_s - c_b)}{\delta}, \quad (1)$$

式中: c_s 与 c_b 分别为阳极/盐膜和盐膜/电解液界面的金属离子浓度; δ 为盐膜厚度; z 为金属原子参与溶解反应的电荷量; F 为法拉第常数; D 为金属离子的扩散系数。由图 10(b) 可以看出, 阳极表面凸起处(Laves 相)的盐膜厚度(δ_1)小于周围平面处(基体)的盐膜厚度(δ_2), 根据式(1)可知不同盐膜厚度导致不同的腐蚀电流密度, 因此阳极表面凸起处较小的盐膜厚度导致较大的电流密度, 造成更快的阳极溶解速度, 使得阳极表面凸起逐步整平^[29]。整平后 Inconel 718 合金表面盐膜内的离子的电势梯度与浓度依旧控制了整个阳极溶解过程, 消除了各组成相的溶解速率差异, 从而获得了光整的表面^[30]。

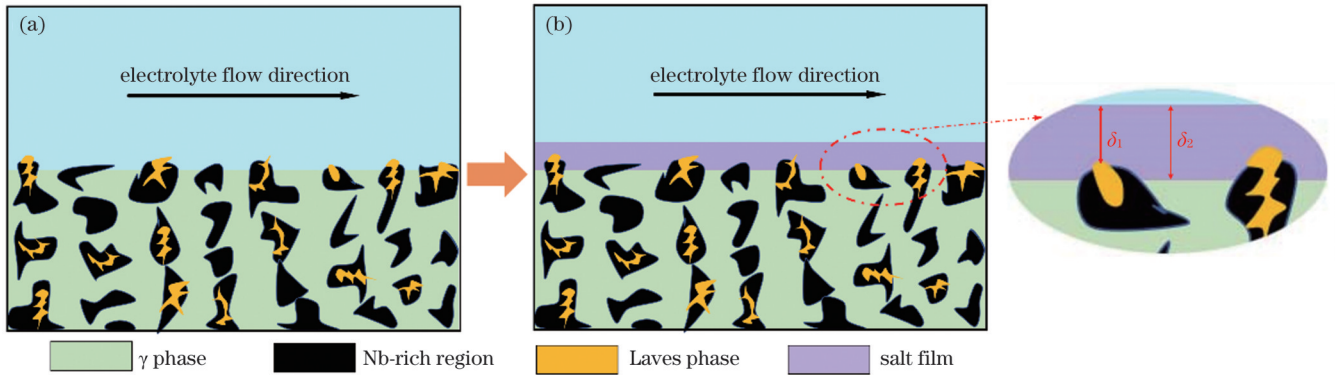


图 10 直流模式下 EJM 后表面的整平机理示意图。(a) 超钝化溶解阶段; (b) 盐膜整平阶段

Fig. 10 Schematics of surface levelling after EJM under direct-current mode. (a) Transpassive dissolution stage; (b) salt film levelling stage

4.2 脉冲电流模式下的电解加工原理

图 11 为基于电阻-电容充电和放电的物理模型^[31], 该模型包含了双电层电容(C_{DL})和电解液电阻(R_E)。整个充电过程的时间常数(τ)为

$$\tau = RC = \rho d C_{DL}, \quad (2)$$

式中: R 为电阻; C 为电容; ρ 为电阻率; d 为加工间隙。

脉冲电流模式下 Inconel 718 合金在 NaCl 乙二醇溶液中的溶解机理分为三个周期性的阶段(图 12), 即超钝化阶段、盐膜整平阶段和盐膜消逝阶段。当电源接通时, 双电层电容会经历一个短暂的充电过程, 这意味着电极电位不会立马达到峰值[图 13(b)], 即电路中的大部分电流用来对双电层电容进行充电, 其余小部分进行阳极反应。在低电流密度下, 此时处于超钝化阶段, Inconel 718 合金在超钝化膜的作用下发生选择性溶解, 导致表面粗糙度较大[图 12(a)]。当双电层电容充电完成时, 外加电流全部用于阳极溶解, 同时

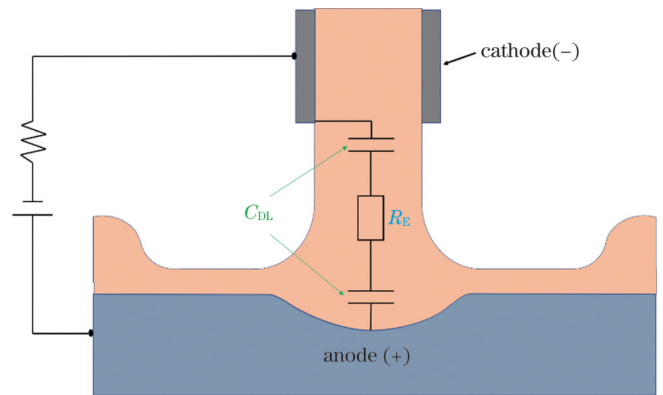


图 11 EJM 中基于 RC 模型的等效电路

Fig. 11 Equivalent circuit based on RC model in EJM

超钝化膜在高电流密度下完全被去除。此时, 由于阳极溶解形成的金属离子在乙二醇电解液中的扩散速率极慢, 在阳极表面堆积形成盐膜, 进而进入盐膜整平阶

段[图 12(b)]。在这个阶段,控制溶解速率的因素为盐膜内离子的电势梯度与浓度,而不是微观结构的电势[29]。因此,盐膜可以有效消除不同微观结构下局部溶解速率的差异。但是,盐膜整平作用还没来得及发挥(或者刚开始),脉冲电流便进入关闭阶段。在没有外加电流的情况下,盐膜内的离子无法保持动态平衡,盐膜会在快速流动电解液的冲刷下迅速消逝,在这个过程中,合金各相的溶解速率差异会逐步增大[图 12(c)],直至双电层放电完成[图 13(c)],阳极反应停止。下一个脉冲电流接通阶段开始后,因双电层

需要重新充电,阳极溶解须重新从第一个阶段开始。值得一提的是,如果脉冲周期内的 t_{on} 太小,阳极表面溶解的离子没有充足的时间堆积形成盐膜,也就不存在盐膜整平阶段、消逝阶段,只会不断重复双电层充电、超钝化、双电层放电、充电……。这也是外加电流密度相同时,在脉冲电流模式下进行射流电解加工比在直流模式下进行射流电解加工质量差的原因。而正因为上述高频窄脉冲电流加工的特性,凹槽边缘的电流密度极低,无法蚀除超钝化膜,进而能够屏蔽杂散电流,实现优秀的加工定域性。

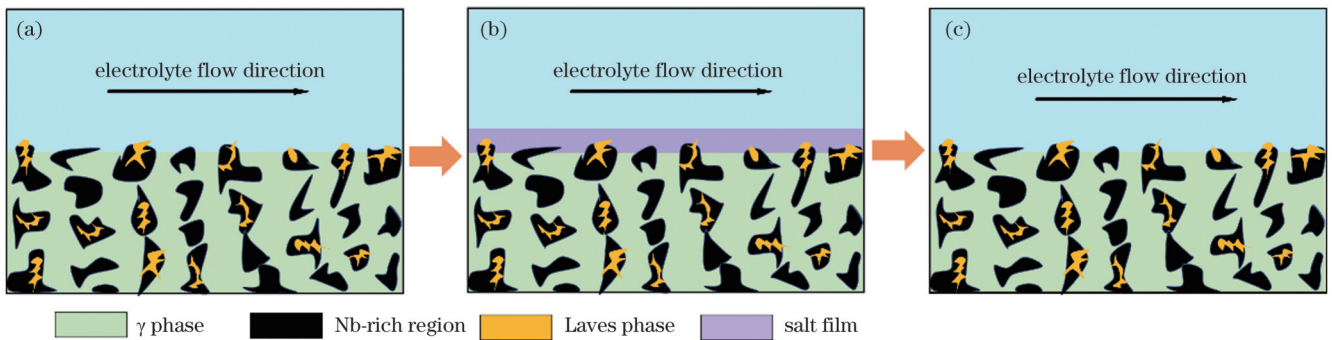


图 12 脉冲电流模式下 EJM 后表面的整平机理示意图。(a)超钝化溶解阶段;(b)盐膜整平阶段;(c)盐膜消逝阶段

Fig. 12 Schematics of surface leveling after EJM under pulse current mode. (a) Transpassive dissolution stage; (b) salt film levelling stage; (c) salt film disappearing stage

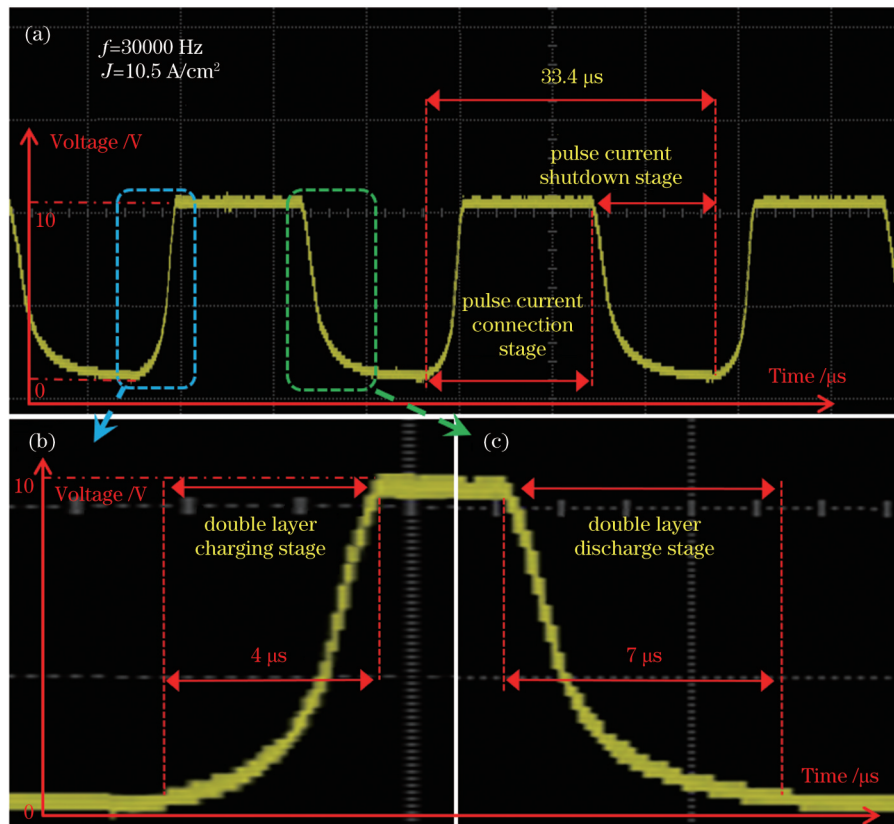


图 13 EJM 中脉冲电压的波形图。(a)30000 Hz 时的波形图;(b)双电层充电;(c)双电层放电

Fig. 13 Waveform diagrams of pulse voltage during EJM. (a) Waveform diagram at 30000 Hz; (b) double-layer charging; (c) double-layer discharging

5 结 论

研究了脉冲电流模式下 Inconel 718 合金在 NaCl 乙二醇基溶液中的阳极溶解特性,具体结论如下:

1) 激光定向能量沉积 Inconel 718 合金组织主要由 γ 相、Nb 偏析区以及 Laves 相组成。

2) 表面粗糙度随脉冲频率的增加而增加,30 kHz 时表面加工质量最优($R_a=1.562 \mu\text{m}$),且 30 kHz 时加工精度最高。脉冲占空比为 50% 时凹槽表面加工质量最优,60% 时加工精度最高。

3) 提出了脉冲电流模式下沉积态 Inconel 718 合金 EJM 的阳极溶解机理,即加工过程分为超钝化阶段、盐膜整平阶段与盐膜消逝阶段。因脉冲电流周期性通断电的特性,脉冲射流电解加工后凹槽的表面质量较差但加工精度较高。

参 考 文 献

- Yang L, Hsu K, Baughman B, et al. Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
Wang H M. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698.
- 白玉超, 王迪, 李朝将. 激光定向能量沉积制造 A131 EH36/AISI 1045 双金属结构性能研究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402304.
Bai Y C, Wang D, Li C J. Research on A131 EH36/AISI 1045 bimetallic material fabricated by laser directed energy deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402304.
- 王予, 黄延禄, 杨永强. 同轴送粉激光定向能量沉积 IN718 的数值模拟[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602115.
Wang Y, Huang Y L, Yang Y Q. Numerical simulation on coaxial powder feeding laser directional energy deposition of IN718[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602115.
- Rahman M, Seah W K H, Teo T T. The machinability of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1/2/3): 199-204.
- Cao Y, Zhu Y J, Ding W F, et al. Vibration coupling effects and machining behavior of ultrasonic vibration plate device for creep-feed grinding of Inconel 718 nickel-based superalloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(2): 332-345.
- Chen Y, Zhang K, Huang J, et al. Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. Materials & Design, 2016, 90: 586-594.
- 李惠, 张建勋, 卢秉恒. 激光粉末床熔融 TiC 颗粒增强 Inconel 718 复合材料的成形质量及力学性能研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 0802307.
Li H, Zhang J X, Lu B H. Forming quality and mechanical properties of TiC-particle-reinforced Inconel 718 composites produced by laser powder bed fusion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 0802307.
- Li Z, Chen J, Sui S, et al. The microstructure evolution and tensile properties of Inconel 718 fabricated by high-deposition-rate laser directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 100941.
- Yu X B, Lin X, Liu F C, et al. Influence of post-heat-treatment on the microstructure and fracture toughness properties of Inconel 718 fabricated with laser directed energy deposition additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 798: 140092.
- 张昊, 戴冬华, 石新宇, 等. 激光直接能量沉积 316L/Inconel 718 多材料熔池热行为[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402208.
Zhang H, Dai D H, Shi X Y, et al. Thermal behavior of molten pool for laser directed energy deposition of 316L/Inconel 718 multi-materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402208.
- 朱荻, 刘嘉, 王登勇, 等. 脉动态电解加工[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 8-21.
Zhu D, Liu J, Wang D Y, et al. Pulse dynamic electrochemical machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 8-21.
- Wang Z Y, Rajurkar K P, Fan J, et al. Hybrid machining of Inconel 718[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(13): 1391-1396.
- Uçak N, Çiçek A. The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 662-673.
- Quan F, Chen Z T, Li Q T, et al. Effects of process combinations of milling, grinding, and polishing on the surface integrity and fatigue life of GH4169 components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020, 234(3): 538-548.
- Tyagi A, Sharma V, Jain V K, et al. Investigations into side gap in wire electrochemical micromachining (wire-ECMM) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 4469-4478.
- Liu W D, Kunieda M, Luo Z. Three-dimensional simulation and experimental investigation of electrolyte jet machining with the inclined nozzle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117244.
- Sharma V, Gyanprakash D M, Gupta P, et al. Analysis of circuit current in electrochemical micromachining process under the application of different waveforms of pulsed voltage[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 110-124.
- 桂豫杰, 王玉峰, 杨勇, 等. 同步纳秒激光辅助电解加工 Ti-6Al-4V 钛合金实验研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 0802304.
Gui Y J, Wang Y F, Yang Y, et al. Experimental study on synchronous nanosecond laser-assisted electrochemical processing of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 0802304.
- Wang X D, Qu N S, Guo P F, et al. Electrochemical machining properties of the laser rapid formed Inconel 718 alloy in NaNO_3 solution[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(14): E548-E559.
- An L C, Wang D Y, Zhu D. Combined electrochemical and mechanical polishing of interior channels in parts made by additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2022, 51: 102638.
- Guo P F, Lin X, Li J Q, et al. Electrochemical behavior of Inconel 718 fabricated by laser solid forming on different sections [J]. Corrosion Science, 2018, 132: 79-89.
- Guo P F, Lin X, MacDonald D D, et al. Unveiling the transpassive film failure of 3D printing transition alloys[J]. Corrosion Science, 2022, 204: 110412.
- Kawanaka T, Kunieda M. Mirror-like finishing by electrolyte jet machining[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 237-240.
- Guo C, Wu B, Xu B, et al. Investigation of pulse electrochemical machining of Zr-based bulk metallic glasses in NaNO_3 -ethylene glycol electrolyte[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(7): 071502.
- Wu G Y, Zhang Z J, Zhang W M, et al. High frequency group pulse electrochemical machining[J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2007, 2(3): 293-296.
- Wang J T, Xu Z Y, Geng T Y, et al. Dependency of the pulsed electrochemical machining characteristics of Inconel 718 in NaNO_3 solution on the pulse current[J]. Science China Technological

- Sciences, 2022, 65(10): 2485-2502.
- [28] Liu W D, Luo Z, Kunieda M. Electrolyte jet machining of Ti1023 titanium alloy using NaCl ethylene glycol-based electrolyte[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 283: 116731.
- [29] Liu W D, Ao S S, Luo Z. Multi-physics simulation of the surface polishing effect during electrochemical machining[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(8): 7773-7789.
- [30] Lohrengel M M, Klüppel I, Rosenkranz C, et al. Microscopic investigations of electrochemical machining of Fe in NaNO_3 [J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(20/21/22): 3203-3211.
- [31] Schuster R, Kirchner V, Allongue P, et al. Electrochemical micromachining[J]. Science, 2000, 289(5476): 98-101.

Study on High-Frequency Narrow Pulse Electrochemical Post-Processing Behavior of Inconel 718 Alloy by Laser Directed Energy Deposition

Geng Jianfeng¹, Wu Lin¹, Guo Pengfei^{1*}, Wang Huijun¹, Lin Xin², Zhang Yufeng²,
Yang Guang³, Huang Weidong²

¹Shandong Engineering Research Center for Additive Manufacturing, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China;

²State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

³School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China

Abstract

Objective Laser-directed energy deposition (LDED) is an effective technique for processing Inconel 718. However, because of the overlap of cladding tracks and the stacking effect of the deposition layers with unmelted powders, the processing accuracy and surface quality of the as-deposited parts are poor; thus, subsequent substrate processing must be performed before use. Electrochemical machining (ECM) can effectively improve machining accuracy and surface quality and has a wide range of applications in the precision manufacturing of difficult-to-process metals (such as nickel-based superalloys). Therefore, ECM is used for the subsequent substrate processing of LDED-Inconel 718 components. However, the processing quality of LDED components with inhomogeneous microstructures is unclear, particularly when nonwater-based electrolytes are used. Therefore, the microstructural characteristics and dissolution behavior of the constituent phases of the LDED-Inconel 718 alloy under a pulsed current and ethylene glycol electrolyte are systematically investigated to improve the surface quality of the LDED-Inconel 718 alloy.

Methods In this study, the LDED-Inconel 718 alloy is used as the research object. The parameters of the high-frequency narrow-pulse current with a frequency of 30–100 kHz, duty cycle of 30%–80%, and saturated NaCl glycol electrolyte are employed to perform electrolyte jet machining (EJM) experiments. The dendritic morphologies and constituent phases of the as-deposited Inconel 718 alloy and the micro-morphologies of the machined surface after the EJM experiments are characterized using scanning electron microscope (SEM). Confocal laser microscope is performed to measure the central region of the groove along the X -axis. The surface-machining quality of the groove is characterized based on the surface roughness, and the machining precision is evaluated based on the depth-to-width ratio of the groove profile.

Results and Discussions The results show that the microstructure of the as-deposited Inconel 718 alloy is composed of the γ matrix phase, Nb-segregated γ phase, and inter-dendritic phase (mainly the γ /Laves eutectic phase), as shown in Fig. 2. At a current density of 10.50 A/cm^2 , the surface roughness increases with increasing pulse frequency, and the smallest surface roughness ($R_a = 1.562 \mu\text{m}$) and highest machining accuracy (Fig. 5) are obtained when the pulse frequency is 30 kHz. The surface roughness first decreases and then increases with an increase in the duty cycle, whereas the machining precision is optimum when the duty cycle is 60% (Fig. 7). In the direct-current mode, the surface roughness decreases with increasing current density. When the current density reaches 10.50 A/cm^2 , the surface quality is the best ($R_a = 0.526 \mu\text{m}$). This is because a high current density can easily induce the formation of surface-supersaturated salt films and effectively inhibit selective dissolution and reduce the surface roughness. However, in terms of the machining accuracy, the processing localization in the high-frequency narrow pulse mode is better (Fig. 9).

Conclusions Two stages (transpassivation dissolution and salt film leveling stages) exist during the direct-current mode EJM process. During the first stage, the composition and structure of the transpassivation films on the surface of the Inconel 718 alloy result in a dissolution rate difference. During the second stage, the salt films on the Inconel 718 surface eliminate the difference in the dissolution rate of each phase, and a smooth surface is formed. In the pulse current model, the dissolution process is divided into transpassive dissolution, salt film leveling, and salt film vanishing stages. However, the surface quality of the alloy is poor because of the periodic on-off property of the pulse current. The current density around the edge of the groove is very low owing to the pulse current characteristics; thus, the transpassive film is difficult to break, which improves the machining accuracy.

Key words laser technique; laser directed energy deposition; Inconel 718 nickel based superalloy; electrolyte jet machining; surface integrity; machining precision