

增材制造内腔流道超声辅助磨粒流光整研究

刘维伟, 吴宜洲, 李浩然, 罗子彦, 刘金津, 王占爽

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要:通过研究超声振动磨粒的运动作用,结合内腔流道磨料流动仿真试验,开展增材制造零件内腔流道超声辅助磨粒流加工研究。对 $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ 铝合金打印成型的流道进行仿真,计算出其磨粒流加工的最优工艺参数为加工压力 10 MPa、磨粒 270 目、磨料浓度 60%。对比施加与不施加超声辅助磨粒流加工后直弯组合流道内腔表面形貌,发现施加超声振动可更好地去除增材制造零件的表面缺陷,但对于深度较大的凹陷处球化效应去除有限。施加超声辅助后磨粒流加工效率和零件表面质量得到提高,在超声波频率 20 kHz、工具头振幅 30 μm 、加工时间 360 s 的最佳工艺参数组合下,直管段表面粗糙度 R_a 降至 0.165 5 μm ,弯管段表面粗糙度 R_a 降至 0.371 8 μm 。

关键词:磨粒流加工;超声振动;增材制造;表面质量

中图分类号:V261.93

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)05-0809-09

航空发动机是航空飞行器的主要动力装置,也是促进航空技术发展的核心装置。提高航空发动机推重比,最主要的方法就是提高涡轮进口温度^[1],但这需要对高温部件设计复杂的冷却结构;其次采用空心结构设计、整体叶盘结构、高通流设计,也可以提高推重比^[2]。这使得航空发动机部件的内腔结构更加复杂,对部件的制造精密程度提出更高要求。由于材料的限制和结构加工能力有限,目前常采用精密熔模铸造工艺制造上述零件,具体工艺环节包括:压蜡、组模、制壳、脱蜡、浇筑、去壳等^[3]。而在上述成型工艺中,冷却阶段所占比例约为整个成型过程用时的 60% 以上^[4]。冷却周期直接影响着生产周期,因此冷却水路的设计具有重要意义。模具的传统冷却水路受到加工局限性的制约,冷却效率低且不均匀,并容易出现机构干涉^[5]。而增材制造技术可以制造出更加贴合工件表面的随形冷却水路,提高冷却效率,减少机构干涉^[6]。然而增材制造由于球化效应、粘粉效应及阶梯效应,内腔表面十分粗糙,极大地影响了随形冷却水路的冷却效率。

磨粒流加工 (abrasive flow machining, AFM) 技术采用高黏度有机高分子作为主相,混合硬质磨料

形成流体磨料,并在压力作用下,通过黏弹性流体在待加工表面进行微切削,以实现零件表面的光整^[7]。随着对零件加工要求的不断提高,对磨粒流加工技术的抛磨效率提出了更高的要求^[8]。超声波辅助磨粒流加工 (ultrasonic assistant abrasive flow machining, UAAFM) 是一种结合了磨粒流加工工艺和超声振动的复合光整工艺^[9]。相比传统磨粒流加工技术,其具有抛磨更高效、光整效果更均匀等优点,有望解决增材制造零件内腔流道的高效光整问题。印度理工学院 Venkatesh 等^[10]研究了用超声辅助磨粒流加工来抛磨齿轮,所得齿轮表面质量高于直接采用磨粒流加工的齿轮,并且超声辅助磨粒流加工 5 min 即可达到磨粒流直接加工 15 min 的效果,抛磨效率大大提高。浙江工业大学计时鸣等^[11-12]研究发现超声振动使磨粒流产生空化效应,可以改变磨粒运动方向,使其运动更加无规则,从而增强切削能力,并根据被加工工件的表面形状,对超声振动端面进行了仿形设计,与被加工工件共同形成约束流道,从而使超声效果更强,产生空化现象,结果表明,该方法可以大幅提高抛光效率和表面质量。张宇超等^[13]利用超声振动产生的空化效应,解决喷嘴喷嘴孔加工过程中磨粒容易团聚堵塞流道的问题,并得出空化效应产生的高能量冲击波可提高加工质量与加工效率。国内外对超声辅助磨粒流的

研究多是针对直流道以及孔加工,很少有文献研究弯流道的超声辅助磨粒流光整工艺。

本文探讨超声辅助下磨粒流光整材料的去除机理,对直弯组合内腔流道进行磨料流动仿真研究,开展增材制造铝合金内腔流道超声辅助磨粒流加工工艺试验,对解决增材制造金属内腔流道的高效光整问题有重要意义。

1 超声振动作用机理分析

1.1 超声振动对磨粒作用分析

超声振动对磨粒作用机理如图 1 所示。在工件壁面处施加超声振动,其中超声往复振动的方向定义为 x ,磨粒流流体的流动方向定义为 z 。对超声振动下的磨粒状态进行分析,可以发现在磨料介质的带动下,磨粒沿流体方向 z 受到作用力 F_0 ,并以 V_0 的速度进行流动。同时,在超声振动的作用下,磨粒在 x 向上受到作用力 F_u ,并产生了速度 V_u 。从而磨粒在合力 F_a 的作用下沿合力方向分散,并以合速度 V_a 进行流动,合力 F_a 和合速度 V_a 与流动方向 z 的夹角为 θ 。

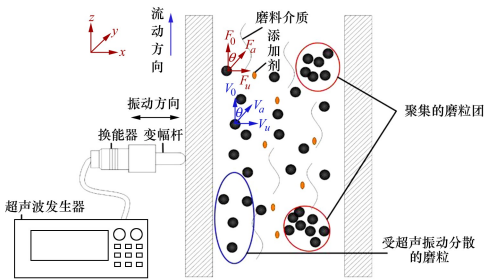


图 1 超声振动对磨粒作用机理

超声波发生器发射的超声波为高频正弦波,其通过变幅杆产生的振动带动磨粒产生位移,在任一时刻 t 产生沿 x 方向的速度为 V_u ,其表达式为

$$V_u = \frac{dx}{dt} = \frac{dA \sin(2\pi ft)}{dt} = 2\pi f A \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: A 为超声振动的振幅; f 为振动频率。

流道中磨粒沿流动方向 z 的速度为 V_0 ,假设其与流体速度一致,其表达式为

$$V_0 = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

式中: Q 为单位时间内通过的流量; S 为流道横截面积。

则合速度 V_a 和方向 θ 表达式为

$$V_a = \sqrt{(V_0)^2 + (V_u)^2} \quad (3)$$

$$\theta = \cot\left(\frac{V_0}{V_u}\right) \quad (4)$$

沿 x 方向的作用力 F_u 表达式为

$$F_u = m_c \frac{dV_u}{dt} = 4m_c \pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

式中, m_c 为单磨粒质量。

1.2 超声空化效应对流体相作用分析

磨料介质被视为不可压缩流体,在超声波的频率下,形成有规律的密集和稀疏区域,并产生空化效应,当超声波振幅达到一定条件时,磨粒表面往往会作为空化核,产生空化气泡。气泡在负压区快速增长,在正压区迅速被压缩,直至最终溃灭,瞬间释放所积蓄的声波能量,产生极大的压力。这部分压力一部分作用于磨粒,防止磨粒团聚,增加磨粒的速度,增加了磨料的湍动能,提高其作用于壁面的剪切力;一部分直接作用于壁面,协助光整。空化效应发生需要一定的条件,与其受到的超声频率有关。只有超声频率小于等于空化气泡谐振频率时,才能够发生。空化气泡谐振频率 f_0 的表达式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho_j} \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)} \quad (6)$$

式中: R_0 为气泡的初始半径; p_0 为磨粒流流体静压; γ 为绝热指数; σ 为液体表面张力系数。

当空化核半径逐渐长大,并最终溃灭时,将瞬间释放其内部存在的声波能量,产生高压和高温^[14],其所产生的最大压力 $p_{\max}$ 表达式为

$$p_{\max} = p_n \left[\frac{p_w (\gamma - 1)}{p_n} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (7)$$

当涡流形成的气泡破裂时,空化气泡迅速释放能量,形成高压冲击。而当高压冲击辐射到磨粒时,则会驱动磨粒运动,增加势能,从而增加磨粒的切削能力,实现高效光整。为简化计算,假设在空化气泡溃灭的瞬间磨粒受到冲击作用的面积 S_c 是一个常数,且此时磨粒距离溃灭点最近的距离为 r_1 ,最远距离为 r_2 。则溃灭点的冲击对磨粒做功的表达式为^[11]

$$W = \int_{r_2}^{r_1} p S_c dr = \frac{AS}{k} \int_{r_2}^{r_1} \frac{1}{r_c} dr = \frac{AS}{k} (\ln r_2 - \ln r_1) \quad (8)$$

式中: A 为溃灭点中心处的压强; p 为距离溃灭点 r 处的压强; k 为比例常数。

1.3 超声辅助下磨粒流光整材料去除机理

如图 2 所示,磨粒流光整材料去除机制主要分为 2 种:一种是磨损去除,其机制类似于砂轮抛磨,包括挤压、滑擦、犁削和切除 4 个阶段^[15]。这种机制主要发生在磨料介质黏度高、外部施加压力大的情况下。另一种是冲击去除,当磨粒处于湍流状态时,其随机运动对待加工壁面进行冲击,造成去除。

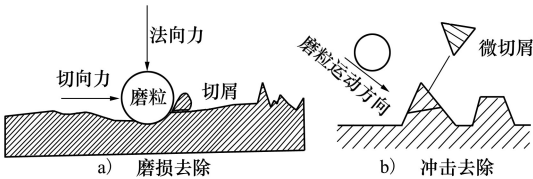


图 2 磨粒流光整材料去除机理

在施加超声振动辅助的作用下,超声振动作用及产生的空化效应使得磨粒原有的去除机制得到增强:①当磨粒距离待加工表面较近时,超声振动带动磨粒沿振动方向高速移动,从而加强磨粒的磨损去除作用。②超声振动能够产生紊流和增加流体动能,从而强化磨粒的切向力,进一步加强磨粒的磨损去除机制。③空化气泡在超声振动作用下溃灭,释放大能量,增加磨粒的动能,从而加强磨粒的冲击去除机制。④当空化气泡靠近壁面时,其溃灭产生的高压射流将直接作用于壁面,产生微小的空化去除机制。

2 基于 Fluent 的内腔流道磨粒流加工仿真研究

计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 可以利用计算机的强大计算力对流体控制方程进行求近似解,因而被广泛应用于解决航空航天中的流体问题。本文选用的 Fluent 软件是目前世界上应用最为广泛的 CFD 计算软件。尽管随形冷却水路结构复杂,但其主要特征仍由直管和弯管 2 种构成,由此提取这 2 种典型特征设计出特征件,如图 3 所示,流道出口设置在试验件侧面,以方便磨粒流体流出。磨粒流由于其软性磨料的特性,雷诺数较大,流动状态为湍流,故选用湍流模型中更易收敛的 Realizable k-ε 模型。磨粒流为典型的固液两相不可压缩流体,因此选用多相流模型中的 Mixture 模型,采用压力基求解器求解^[16]。壁面边界条件设置为

无滑移壁面边界,计算壁面函数为 Standard Wall Functions,壁面粗糙度设置为 0.008 mm。

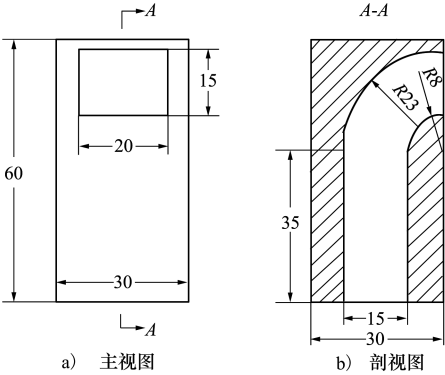


图 3 内腔流道特征试验件

本文中磨粒流的主相为二甲基硅油,次相为碳化硅颗粒,其各项属性如表 1 所示。

表 1 磨粒流各相材料属性

组分	材料	密度/(kg · m ⁻³)	黏度/(Pa · s ⁻¹)
主相	二甲基硅油	790	0.03
次相	碳化硅	3 170	1.71×10 ⁻⁵

本仿真模型设置了 7 种磨料组合,如表 2 所示。

表 2 磨粒流仿真研究参数组合

序号	加工压力/MPa	磨粒粒径/目	磨料浓度/%
1	10	180	70
2	8	180	70
3	6	180	70
4	8	180	80
5	8	180	60
6	8	270	70
7	8	100	70

由于在各种工艺参数下磨粒流的流动特性总体趋势基本一致,因此选取磨粒粒径 180 目,加工压力 8 MPa,磨料浓度 70%的加工参数,对内腔流道特征试验件的流场进行具体分析,明晰磨粒流的流动特性。如图 4a)~4b)所示,磨料流体进入特征试验件内腔流道后,磨料在入口处获得较大的动能,在压力作用下向上移动,在直管段,静压小幅度向动压转变,整体趋势趋于稳定。随着磨料继续向上进入弯管段,由于磨料的惯性,外侧弯管壁面受到强力冲击,动能转化为压力能,静压数值急速上升,动压数值随之减小。在内侧弯管壁面处,静压急速下降,甚至出现了负压,形成涡流,对应的动压显著增高。如

图 4c) 所示,速度场和动压场在流道中具有一致的变化规律。图 4d) 的剪切力分布云图中磨料流体进入流道后,在入口处剪切力较大,随着向上流动,受壁面阻力以及流体的黏性力影响,其剪切力略微减

小并保持稳定。随着流体继续流动至弯管段,外侧弯管段处动能较低,无法驱动磨粒产生足够的剪切力,内弯侧的涡流处,动压和速度骤变,动能高,磨料流体有足够的力驱动磨粒完成剪切。

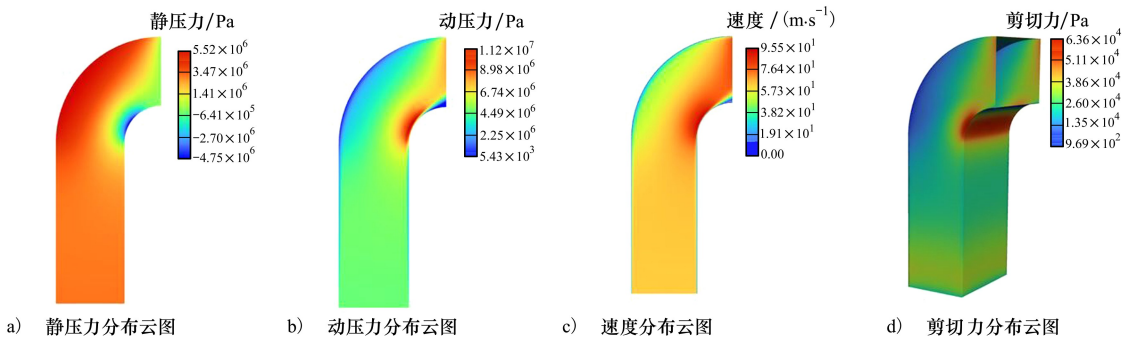


图 4 流场特性示意图

综合压力场、速度场和剪切力场分析,对于特征件的磨粒流加工主要问题在于弯管段外侧低流速和低剪切力可能导致的磨抛不足,以及弯管段内侧高流速和剪切力可能导致的过抛。。加工压力从 8 MPa 提高到 10 MPa,平均剪切力在入口处提高 31%,出口处提高 23%,在内侧弯管处提高 20%,外侧弯道处提高 44%。对外侧弯道较大剪切力提升可以弥补弯管段内、外侧磨抛不均的问题。

如表 3 所示,减小磨粒粒径会使磨粒的流动性变好,在弯管部分的通过性增强,使剪切力和速度呈现增长趋势;增加磨料浓度使弯管段的剪切力呈现先下降再上升的趋势,磨料浓度过高,会使单位体积磨粒流分子团数量增多,流动性变差,容易导致磨抛不均匀。因此,综合考量后选择加工压力为 10 MPa、磨粒粒径为 270 目、磨料浓度为 60% 作为后续试验的磨粒流工艺参数。

3 增材制造内腔流道特征试验件超声辅助磨粒流光整工艺试验

3.1 内腔流道特征试验件成型质量分析

增材制造内腔流道特征试验件采用选区激光熔融技术制造,设备为深圳华阳的 HY-M300。成形材料为铝合金 AlSi₁₀Mg,其成分如表 4 所示。选区激光熔融技术工艺参数设置如表 5 所示。

表 4 粉末成分表

元素	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
质量分数/%	其他	9	<0.55	<0.55	<0.45	<0.45
元素	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	
质量分数/%	<0.05	<0.10	<0.05	<0.05	<0.15	

表 5 成型参数表

成型参数	激光功率/ W	扫描速度/ (mm·s ⁻¹)	扫描间距/ mm	铺粉层厚/ μm
数值	200	300	0.09	30

表 3 不同磨粒粒径和磨料浓度下各位置各项数值

位置	磨料浓度/ %	磨粒粒径/ 目	静压/ MPa	速度/ (m·s ⁻¹)	剪切力/ Pa
内侧 弯道	60	180	-3.32	104.03	74 186.41
	70	180	-4.75	95.51	57 973.11
	80	180	-7.41	96.39	71 192.91
	70	100	-4.41	94.03	50 186.41
	70	270	-6.47	100.36	64 022.74
外侧 弯道	60	180	5.29	37.83	7 840.66
	70	180	5.52	43.93	7 233.02
	80	180	5.63	40.48	7 570.63
	70	100	5.69	41.47	6 997.25
	70	270	5.27	44.67	7 585.44

采用表 4~5 参数,依照图 3 所示尺寸制备 13 组试验件,1 组用于分析选区激光熔融成型特征试验件的初始质量,3 组用于对比有无超声对磨粒流光整效果的影响,其余 9 组用于探究超声辅助参数对磨粒流光整效果的影响。

由于特征试验件需要检测内腔表面,检测设备

无法直接进行测量。将特征试验件采用如图 5 的方式对半切开后,选取特征试验件流道入口、中段、出口、内弯段、外弯段 5 个位置作为测量区域,在各测量区域选取 5 个点,测出表面粗糙度并取平均值,其结果如表 6 所示。

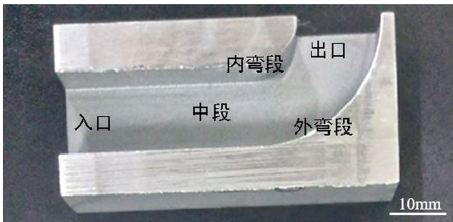


图 5 试验件区域划分示意图

表 6 表面粗糙度数值表

表面粗糙度/ μm	入口	中段	出口	内弯段	外弯段
R_a	2.279 9	2.321 7	2.884 6	8.051 2	6.190 8
R_q	2.903 4	2.974 0	3.556 0	11.062 4	12.703 9
R_z	13.490 9	14.625 2	15.638 4	31.977 4	33.705 6

3.2 试验平台及方案

抛光采用西安斯曼克磨粒流精密机械有限公司 SMKS-561 立式单向磨粒流机床。由于试验件自身具备封闭内腔,无需进行工装设计,仅需要对超声振动工具头设计工装,确保超声振动能稳定连续地传递并作用于工件受力面几何中心。该工装使用熔融沉积成型技术制成,材料为 ABS 塑料,通过螺栓连接在特氟龙底座上,并由 2 个 C 形夹固定在加工平台格栅上,形成如图 6 所示的试验平台。



图 6 超声辅助磨粒流光整平台

研究选择正交试验,实验固定加工压力为 10 MPa,磨料浓度为 60%,磨粒粒径为 270 目,研究超声波频率、超声工具头振幅、加工时间 3 个影响因素,设计三因素三水平正交试验,正交编码如表 7 所示。并增设 3 组以加工时间作为变量,不施加超声辅助的对照组。

表 7 三因素三水平正交试验参数组合表

序号	频率/kHz	振幅/ μm	加工时间/s	是否施加超声
1	20	10	120	是
2	20	20	240	是
3	20	30	360	是
4	30	10	240	是
5	30	20	360	是
6	30	30	120	是
7	40	10	360	是
8	40	20	120	是
9	40	30	240	是
10			120	否
11			240	否
12			360	否

3.3 材料去除率分析

材料去除量 Γ 和材料去除率 Γ_R 是反映超声辅助磨粒流光整对内腔流道特征试验件抛光效果和抛光效率的重要衡量因素,其材料去除量 Γ 的表达式为

$$\Gamma = m_0 - m_1 \tag{9}$$

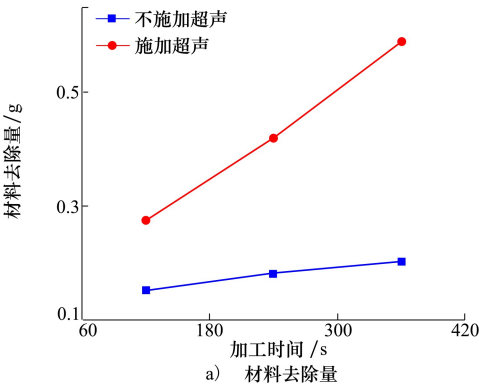
式中: m_0 为光整试验前试验件质量; m_1 为光整试验后试验件质量。

材料去除率 Γ_R 的表达式为

$$\Gamma_R = \frac{\Gamma}{t} \tag{10}$$

式中, t 为加工时间。

图 7 展示了施加超声辅助和不施加超声辅助的 Γ 和 Γ_R 。结果表明,在相同的加工时间内,施加超声辅助组的 Γ 和 Γ_R 都远高于不施加超声辅助组,同时,施加超声辅助组的 Γ_R 衰减速度要小于不施加超声辅助组。可以得出施加超声辅助能提高磨粒流光整的效率。



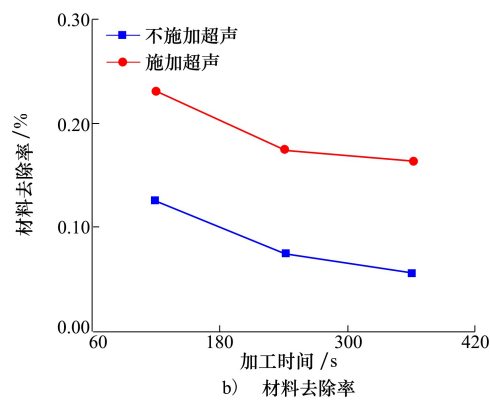


图 7 施加超声和不施加超声材料去除量及材料去除率规律曲线

3.4 表面粗糙度分析

使用线切割将经过光整后的试验件从中间切开,分别在直管段和弯管段各取 3 点测量并取平均值以确保测量结果的准确性。测量结果如表 8 所示。

在直管段内腔表面,未施加超声辅助组的表面粗糙度 R_a 在 $0.302\ 5\sim0.356\ 1\ \mu\text{m}$ 之间, R_q 在 $0.359\ 8\sim0.429\ 1\ \mu\text{m}$ 之间,而施加超声辅助组的平均表面粗糙度 R_a 在 $0.167\ 6\sim0.175\ 8\ \mu\text{m}$ 之间, R_q 在 $0.204\ 1\sim0.209\ 4\ \mu\text{m}$ 之间。在弯管段内腔表面,未施加超声辅助组的表面粗糙度 R_a 在 $2.463\ 1\sim$

$3.041\ 1\ \mu\text{m}$ 之间, R_q 在 $3.027\ 2\sim3.824\ 0\ \mu\text{m}$ 之间,施加超声辅助组的平均表面粗糙度 R_a 在 $0.480\ 1\sim0.632\ 4\ \mu\text{m}$ 之间, R_q 在 $0.607\ 3\sim0.763\ 9\ \mu\text{m}$ 之间,即施加超声辅助可以提高磨粒流对内腔表面的光整效率并提高表面质量。

表 8 直管段和弯管段表面粗糙度测量结果

序号	直管段		弯管段	
	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$
1	0.178 8	0.215 2	0.648 9	0.808 2
2	0.160 2	0.197 3	0.458 1	0.521 1
3	0.165 5	0.205 2	0.371 8	0.465 6
4	0.171 5	0.210 2	0.570 2	0.678 7
5	0.155 7	0.187 8	0.459 7	0.587 3
6	0.172 3	0.209 6	0.615 3	0.706 2
7	0.181 5	0.219 3	0.608 8	0.769 1
8	0.176 2	0.203 3	0.633 1	0.777 3
9	0.179 5	0.205 7	0.550 7	0.702 2
10	0.356 1	0.429 1	3.041 1	3.824 0
11	0.320 6	0.384 0	2.667 9	3.325 9
12	0.302 5	0.359 8	2.463 1	3.027 2

如图 8 所示,由于直管段初始表面粗糙度相对较好,超声辅助磨粒流加工较高的加工效率使得直管段表面粗糙度很快达到平台期,超声波频率、工具头振幅、加工时间变化对于直管段的表面粗糙度 R_a 和 R_q 影响均较小。

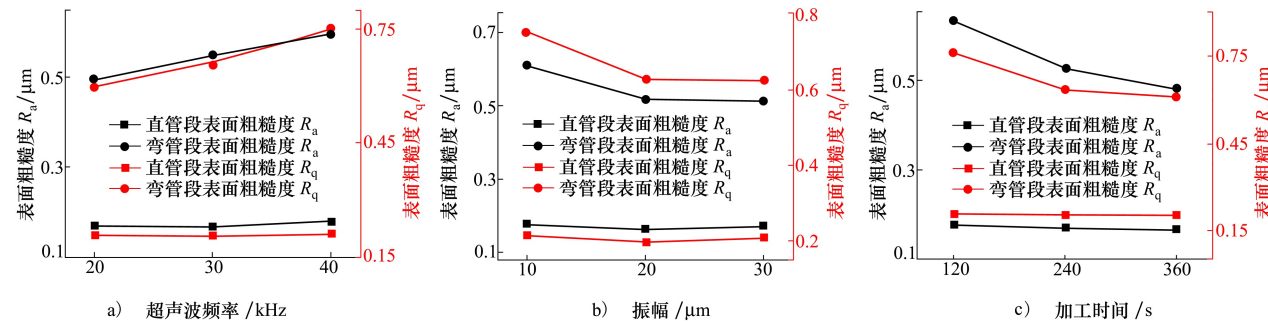


图 8 超声参数变化对直管段和弯管段表面粗糙度 R_a 和 R_q 的影响

弯管段的 R_a 和 R_q 随着超声波频率的升高呈上升趋势。超声波频率大于等于空化气泡谐振频率时,空化气泡来不及生长和储能,空化效应随之减弱,导致零件表面粗糙度升高。在实际加工过程中,应选用促进空化气泡产生和生长的超声波频率,从而给磨粒提供更多的能量,提高磨料对零件表面的切削能力。

弯管段的 R_a 和 R_q 随着工具头振幅升高呈现下降的趋势。由于弯管段的初始表面质量相对较差,工具头振幅的增长可以有效提高空化气泡的溃灭频率,从而提升弯管段磨粒的切削能力,但可以看出工具头振幅 $20\ \mu\text{m}$ 时已经满足使空化气泡溃灭的条件,此时提高工具头振幅也难以使零件表面粗糙度进一步降低。

加工时间由 120 s 延长到 240 s 时,弯管段表面粗糙度 R_a 和 R_q 均下降,但当时间由 240 s 增加到 360 s 时,下降变缓。原因在于随着加工时间的上升,表面质量趋于稳定,此时继续进行表面光整,光整效果便会逐渐下降。在实际加工中,延长加工时间,可获得更好的表面质量,但如果加工时间过长,后续的光整效率会衰减,导致成本增加和资源浪费。本文研究中,最佳光整工艺参数组合为超声波频率 20 kHz、工具头振幅 30 μm 、加工时间 360 s,可使直管段表面粗糙度 R_a 降至 0.165 5 μm ,表面质量提升 49.3%,弯管段表面粗糙度 R_a 降至 0.371 8 μm ,表面质量提升 86.4%。

3.5 表面形貌分析

由于粉末熔融堆积的特点,选区激光熔化制造零部件常存在球化效应、粘粉效应和阶梯效应等特征。本文制造的试验件在放大倍数为 100 倍情况下,可以看到图 9 中有大量的灰褐色粉末粘附在表面,由于本试验件存在弯道,倾斜度较大,即使选取较为合理的工艺参数,也会存在一定的阶梯效应。

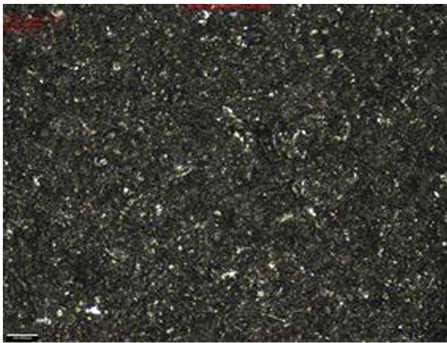


图 9 原始试验件的表面形貌

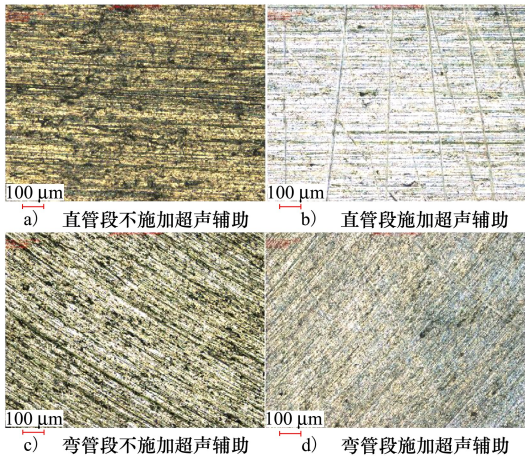


图 10 施加与不施加超声直、弯管段表面形貌图

如图 10 所示,无论施加与不施加超声辅助的磨粒流抛光后零件表面原有的粉末粘附情况和球化效应均有明显改善,但图 10b) ~ 10d) 可以看到施加超声辅助组的表面金属光泽更加显著,其表面不止有沿着磨料流动方向的划痕,还多了与磨料方向垂直的划痕,这部分划痕是施加超声振动辅助后,空化气泡溃灭产生的微射流极大地提升了磨粒的湍动能,从多个角度对试验件表面进行切削,产生与流道方向的不同的长划痕。

对比图 11a) ~ 11b),施加超声辅助对于球化效应改善效果更好,但深度较大的凹陷处依旧存在着球化效应,改善效果有限。实际加工生产时,应从成型工艺入手,提高工件的初始成型质量,可以大幅提高磨粒流对于凹坑的光整效果,得到符合表面质量要求的工件。

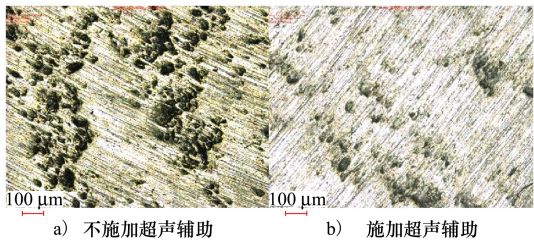


图 11 施加超声与不施加超声辅助球化效应改善图

4 结 论

本文通过选区激光熔融成型直弯组合流道特征试验件,测量获取磨粒流光整后零件表面典型缺陷以及粗糙度变化规律。探究施加超声辅助对于磨粒流材料去除效率的影响,以及工具头振幅、超声波频率、加工时间对零件表面粗糙度 R_a 、 R_q 的影响规律,主要结论如下:

- 1) 仿真试验表明:增大加工压力,磨料对整个流道的剪切力增大,弯管段外侧增加最为明显;减小磨粒粒径,磨粒流速增加,剪切力增大;增加磨料浓度,磨料对弯管段剪切力先下降再上升。仿真得出最佳工艺参数组合为加工压力为 10 MPa、磨粒粒径为 270 目、磨料浓度为 60%。
- 2) 施加超声辅助可为磨粒提供额外的动能,增加单位时间内磨粒的行程,可大幅提高磨粒流加工的材料去除量 Γ 与材料去除率 Γ_R ,即提高磨粒流的加工效率。
- 3) 超声辅助可大幅提高磨粒流加工后零件表

面质量。在最佳光整工艺参数组合超声波频率 20 kHz、工具头振幅 30 μm 、加工时间 360 s 的条件下,直管段内腔表面粗糙度 R_a 降至 0.165 5 μm ,弯管段内腔表面粗糙度 R_a 降至 0.371 8 μm 。

4) 与未施加超声辅助相比,施加超声辅助的试验件表面形貌表现出更为复杂的磨粒划痕,具有更好的金属光泽和更平整的表面,对粘粉效应和球化效应的去除效果更好。

参考文献:

- [1] 金如山, 党进, 刘富强. 新一代航空发动机燃烧室[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(2): 543-552
JIN Rushan, DANG Jin, LIU Fuqiang. New generation aero-engine combustor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(2): 543-552 (in Chinese)
- [2] 陈伟. 高推重比航空发动机整体精铸燃烧室机匣用高强度高温合金研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 1-5
CHEN Wei. Research on high-strength superalloy for integral precision casting combustion chamber casing of high thrust-to-weight ratio aero engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 1-5 (in Chinese)
- [3] 崔康. 空心涡轮叶片精铸蜡型壁厚控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018: 1-3
CUI Kang. Research on wall thickness control method of precision casting wax type of hollow turbine blade[D]. Xi'an: North-western Polytechnical University, 2018: 1-3 (in Chinese)
- [4] MARIN F, DE MIRANDA J R, DE SOUZA A F. Study of the design of cooling channels for polymers injection molds[J]. Polymer Engineering and Science, 2018, 58(4): 552-559
- [5] 徐赛男. 空心涡轮叶片精铸蜡型的快速模具设计与成型仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 2-7
XU Sainan. Research on rapid mold design and molding simulation of precision casting wax mold of hollow turbine blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 2-7 (in Chinese)
- [6] 马一恒, 王小新, 董志家, 等. 基于 3D 打印的注塑模随形冷却水路优化设计研究进展[J]. 中国塑料, 2019, 33(5): 130-137
MA Yiheng, WANG Xiaoxin, DONG Zhijia, et al. Research progress on optimization design of conformal cooling channel of injection mold based on 3D printing[J]. China Plastics, 2019, 33(5): 130-137 (in Chinese)
- [7] 蔡智杰, 刘薇娜, 高彬彬, 等. 共轨管微小孔磨粒流抛光实验研究与表面粗糙度预测[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(11): 1722-1728
CAI Zhijie, LIU Weina, GAO Binbin, et al. Experimental study and surface roughness prediction of abrasive flow polishing of micropores in common rail tube[J]. Mechanical Science and Technology, 2017, 36(11): 1722-1728 (in Chinese)
- [8] SANTHOSH K, SOMASHEKHAR S, HIREMATH S. A review on abrasive flow machining(AFM)[J]. Procedia Technology, 2016, 56(5): 297-304
- [9] SHARMA A K, VENKATESH G, RAJESHA S, et al. Experimental investigations into ultrasonic-assisted abrasive flow machining(UAAFM) process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1): 477-493
- [10] VENKATESH G, SHARMA A K, KUMAR P. On ultrasonic assisted abrasive flow finishing of bevel gears[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 29-38
- [11] 计时鸣, 李军, 谭大鹏. 基于超声波激振强化的软性磨粒流光整加工模拟与试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(21): 182-189
JI Shiming, LI Jun, TAN Dapeng. Simulation and experimental study on streamer finishing of soft abrasive particles based on ultrasonic excitation strengthening[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(21): 182-189 (in Chinese)
- [12] 计时鸣, 陈凯, 谭大鹏, 等. 超声空化对软性磨粒流切削效率和质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 82-90
JI Shiming, Chen Kai, TAN Dapeng, et al. The influence of ultrasonic cavitation on the cutting efficiency and quality of soft abrasive flow[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 82-90 (in Chinese)
- [13] 张宇超, 董志国, 雷鸿博, 等. 超声振动辅助软性磨粒流喷孔光整加工研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 569(7): 165-169
ZHANG Yuchao, DONG Zhiguo, LEI Hongbo, et al. Research on ultrasonic vibration assisted soft abrasive flow spray hole polishing processing[J]. Combination Machine Tool and Automated Processing Technology, 2021, 569(7): 165-169 (in Chinese)

[14] ZOU J, JI C, YUAN G B, et al. Collapse of an antibubble[J]. Physical Review E, 2013, 87(6): 102-106

[15] MINASSE A, APPL F C. Theoretical analysis of the basic mechanics of abrasive processes: part II: model of the ploughing process[J]. Wear, 1988, 126(3): 267-283

[16] 胡佳伟. 离心水泵叶轮工作面有限元分析及优化设计[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2011: 14-15

HU Jiawei. Finite element analysis and optimization design of working surface of centrifugal water pump impeller[D]. Xi'an: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011: 14-15 (in Chinese)

Study on ultrasonic-assisted abrasive flow polishing of internal flow channels in additive manufacturing

LIU Weiwei, WU Yizhou, LI Haoran, LUO Ziyang, LIU Jinjin, WANG Zhanshuang
(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: By studying the movement of ultrasonically assisted abrasives, combined with simulation experiments of abrasive flow in internal flow channels, the study on ultrasonic assisted abrasive flow machining of internal flow channels in additive manufacturing is carried out. Simulations were performed on the channels of AlSi₁₀Mg aluminum alloy printed components, yielding the optimal process parameters for abrasive flow machining: a processing pressure of 10 MPa, abrasive particle size of 270 mesh, and abrasive concentration of 60%. By comparing the surface morphology of the combined straight and curved flow channels before and after applying ultrasonically assisted abrasive flow machining, it was evident that the application of ultrasonic assistance yielded superior removal of surface defects on additive manufacturing parts. However, its ability to remove the spheroidization effect in deeper concave areas is limited. The efficiency of abrasive flow machining and the surface quality of the parts were enhanced with the incorporation of ultrasonic vibration. Under the optimal polishing process parameter combination of an ultrasonic frequency of 20 kHz, a tool head amplitude of 30 μm, and a processing time of 360 s, the surface roughness (R_a) of the straight section reduced to 0.165 5 μm, while the surface roughness (R_a) of the curved section reduced to 0.371 8 μm.

Keywords: abrasive flow machining; ultrasonic vibration; additive manufacturing; surface quality

引用格式: 刘维伟, 吴宜洲, 李浩然, 等. 增材制造内腔流道超声辅助磨粒流光整研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(5): 809-817

LIU Weiwei, WU Yizhou, LI Haoran, et al. Study on ultrasonic-assisted abrasive flow polishing of internal flow channels in additive manufacturing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(5): 809-817 (in Chinese)