

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.019

低温微磨料气射流加工 PDMS 传热仿真及实验研究

钱炳坤¹, 孙玉利¹, 张桂冠¹, 刘旭¹, 高航², 左敦稳¹

(1. 南京航空航天大学直升机传动技术重点实验室, 南京 210016;
2. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024)

摘要: 由于在常温下聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)是一种高弹性材料而非硬脆材料, 此时利用微磨料气射流对其进行加工, 加工效率很低, 甚至为零, 而且还会有大量的磨料颗粒嵌入 PDMS 表面中。当 PDMS 冷却不完全, 即处于高弹态和玻璃态之间的过渡状态时, 利用低温微磨料气射流加工 PDMS 仍然会发生很严重的磨料嵌入现象, 致使加工效果较差。针对这一问题, 本文利用 ANSYS Fluent 软件对 PDMS 进行传热仿真分析来获得 PDMS 内部温度的变化情况, 从而能够计算得到在 PDMS 深度方向上的冷却速率, 同时利用与传热仿真分析过程中完全相同的工艺参数在 PDMS 表面上加工微孔, 计算出在 PDMS 深度方向上的最大平均冲蚀加工速率, 最终发现冷却速率远大于冲蚀加工速率。根据传热仿真的分析结果, 通过开展单因素实验探究进给速度 v 、加工距离 D 、冲蚀角度 α 以及加工压强 p 对 PDMS 加工性能的影响规律, 为后续进行更深入的研究提供重要参考依据。

关键词: 聚二甲基硅氧烷; 低温微磨料气射流; 传热仿真; 加工性能

中图分类号: TH145.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)01-0163-09

Heat Transfer Simulation and Experimental Research of Cryogenic Micro-abrasive Air Jet Machining PDMS

QIAN Bingkun¹, SUN Yuli¹, ZHANG Guiguan¹, LIU Xu¹, GAO Hang², ZUO Dunwen¹

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: As polydimethylsiloxane (PDMS) is a high elastic material rather than a hard and brittle material at room temperature, the processing efficiency is very low or even zero by using micro-abrasive air jet to process it, and a large number of abrasive particles will be embedded into the surface of PDMS. When the cooling of PDMS is incomplete, that is, in the transition state between the high elastic state and the glass state, the machining of PDMS using cryogenic micro-abrasive air jet will still have a very serious abrasive embedding phenomenon, resulting in poor processing effect. To solve this problem, this paper uses ANSYS Fluent software to conduct heat transfer simulation analysis on PDMS to obtain the internal temperature change of PDMS, so as to calculate the cooling rate in the depth direction of PDMS. At the same time, the same process parameters are used to process micro holes on the surface of PDMS, and the maximum average erosion processing rate in the depth direction of PDMS can be calculated. Finally, it is found that the cooling rate is much faster than the erosion processing rate. According to the analysis results of heat transfer simulation, single-factor experiments are carried out to explore the effect of feed speed v , processing distance

收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2021-07-12

通信作者: 孙玉利, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: sunyuli@nuaa.edu.cn。

引用格式: 钱炳坤, 孙玉利, 张桂冠, 等. 低温微磨料气射流加工 PDMS 传热仿真及实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(1): 163-171. QIAN Bingkun, SUN Yuli, ZHANG Guiguan, et al. Heat transfer simulation and experimental research of cryogenic micro-abrasive air jet machining PDMS[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 163-171.

D , erosion angle α , and processing pressure p on the processing performance of PDMS, which provides an important reference for further research.

Key words: polydimethylsiloxane (PDMS); cryogenic micro-abrasive air jet; heat transfer simulation; processing performance

微流控芯片又被称为“芯片实验室”和“微全分析系统”,是微机电技术在生物医学等领域中的一个典型应用。通过在微流控芯片表面上加工光程长、密度高的微米级通道构建微型的反应和分析单元,利用可控的微量液体即可实现对无机离子、有机物质、核酸、蛋白质和其他生化组分快速而准确地检测^[1-3]。为了更好地实现分析功能,微流控芯片对材料的选取具有很高的要求。有机高分子聚合物材料聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)具有较好的化学惰性、生物相容性、透光性以及键合性,并且无毒,是一种制作微流控芯片的理想材料^[4-6]。

目前,加工PDMS的主要方法有模塑法、注塑法等,这些方法可以进行大批量复制生产,加工效率高。然而,它们在加工之前都需要制作微模具,面对日益发展的微流控芯片多元化应用需求,工艺灵活性差的问题便显得尤为突出。除上述加工方法外,激光切蚀法也能够对PDMS进行加工^[7],但是激光切蚀法具有加工效率低、加工质量差、激光器成本高且需要专业的操作环境等缺点,极大地限制了其在微流控芯片加工领域中的应用。

微磨料气射流加工技术是一种利用高速压缩的空气加速磨料颗粒对工件表面进行冲蚀加工的微细加工技术^[8]。该技术具有热影响区小、工艺灵活性强以及加工效率高等优点,特别适合于加工玻璃、硅、石英和陶瓷等硬脆材料^[9]。李全来等^[10]通过开展全因素实验研究了各主要工艺参数对微磨料气射流加工硅片时表面波纹度的影响。研究表明,对硅片表面波纹度影响最为显著的工艺参数是进给速度。Lari和Papini^[11-12]利用逆向求解的方法建立了微磨料气射流加工脆性材料时的表面演化数学模型,该模型能够对具有三维特征微结构的横截面轮廓形貌进行准确地预测。

但在常温下,PDMS为高弹性材料,使用微磨料气射流对其进行加工,加工效率很低,甚至为零^[13]。经研究发现,在低温下PDMS的机械性能会发生改变,表现出类似于脆性材料的性质,其硬度提高了约50%^[14]。Getu等^[13,15]设计了一种简易实验装置并开展了低温微磨料气射流加工PDMS的实验研究。经研究表明,当PDMS冷却至 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会发生玻璃化转变,此时PDMS具有明

显的脆性特征,加工效率显著提高。但是,若PDMS冷却不完全,即处于高弹态和玻璃态之间的过渡状态时,利用微磨料气射流加工PDMS仍然会发生很严重的磨料嵌入现象,致使加工效果较差。为了达到预期的加工效果,就必须要保证当射流喷嘴移动到任意位置时其正下方在PDMS中任一深度冷却至 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间快于磨料颗粒加工至这一深度的时间。

针对上述问题,本文对PDMS进行传热仿真分析来获得PDMS内部温度的变化情况,从而能够计算得到在PDMS深度方向上的冷却速率,同时利用与仿真过程中完全相同的工艺参数在PDMS表面上加工微孔,根据最终得到的最大深度和相应加工时间计算出在PDMS深度方向上的最大平均冲蚀加工速率,得出两速率之间的大小关系。在传热仿真的基础上,开展单因素实验探究低温微磨料气射流对PDMS加工性能的影响规律,为后续进行更深入的研究提供重要参考依据。

1 实验装置简介

本文所有实验均采用自行研制的低温微磨料气射流加工微通道专用装置,如图1所示。

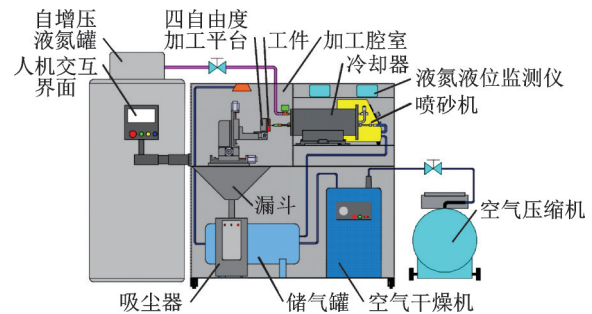


图1 低温微磨料气射流加工微通道专用装置

Fig.1 Micro-channel special device for cryogenic micro-abrasive air jet machining

装置的工作原理为:空气压缩机产生的压缩空气流经空气干燥器和储气罐,在喷砂机中与磨料混合,产生压力稳定且干燥的微磨料气射流。自增压液氮罐中的液氮通过液氮电磁阀流入冷却器,射流从另一个方向流入冷却器,被液氮冷却形成低温射流。四自由度加工平台和射流喷嘴安装在封闭的加工腔室中,工件(PDMS)固定在四自由度加工平台的工作台上,射流喷嘴与冷却器相连并保持固

定,低温射流对工件进行加工,空气干燥机向加工腔室内持续提供干燥空气防止结冰。加工腔室中产生的磨料落入漏斗中,由吸尘器抽走。控制系统部分能够控制四自由度加工平台获得工件所需要的运动轨迹。专用装置的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 专用装置的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of special device

类别	技术指标
低温射流出口温度调节范围/°C	-181.03~-121.33
工作压力范围/MPa	0~1
磨料流量调节范围/(g·min ⁻¹)	0~9
平台移动控制精度/μm	±10
平台旋转控制精度/(°)	±0.015
进给速度范围/(mm·s ⁻¹)	0~5
冲蚀角度范围/(°)	0~90
射流喷嘴直径/mm	0.46、0.8、1.2
磨料粒径适用范围/μm	25~125

2 PDMS 加工过程的传热仿真分析

2.1 模型建立及网格划分

专用装置对 PDMS 的冷却方式是将经过液氮冷却后的低温微磨料气射流冲击在 PDMS 表面上,通过热量的传递从而使 PDMS 内部的温度逐渐降低,直至降低到其玻璃化转变温度以下,这个降温冷却的过程被称为射流冲击传热过程。若要对射流冲击传热过程进行定量分析,就需要得到低温射流与 PDMS 之间的对流换热系数,然而,射流冲击传热是一个十分复杂的传热过程,准确计算对流换热系数并不容易。实际上,在低温射流冲击 PDMS 的过程中,对流换热系数并不是一个定值,而是会在一定的范围内发生变化,因此,为了提高仿真的准确性,可以利用 ANSYS Fluent 软件强大的计算功能自动确定任意时刻的对流换热系数。为了达到仿真的目的,建立了如图 2 所示的二维仿真模型,其网格划分如图 3 所示。

在模型中,PDMS 固体区域全长为 50 mm,宽度(相当于 PDMS 的厚度)为 3 mm,PDMS 固体直接加工区域的长度为 19 mm。在后续进行的所有

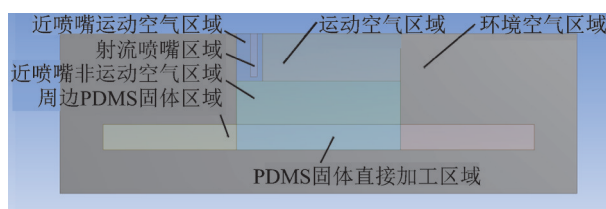


图 2 二维仿真模型

Fig.2 Two-dimensional simulation model

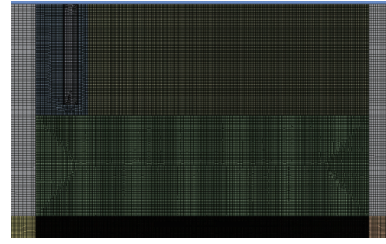


图 3 二维仿真模型网格划分

Fig.3 Meshing of two-dimensional simulation model

实验中,为了达到最好的冷却效果,拟将射流出口温度选择为专用装置所能够达到的最低值 -181.03 °C,同时射流喷嘴直径也为固定值,取 0.8 mm,那么将射流喷嘴区域的宽度设置为 0.8 mm。由于直接受到射流的冲击,PDMS 固体直接加工区域为该模型中的重点计算区域,将该区域的网格尺寸设置为 0.02 mm,而其余的位置即周边 PDMS 固体区域仅作为数据传递使用,网格尺寸设置为 0.06 mm。对于其余的计算区域,射流喷嘴区域与其相邻计算区域的网格尺寸应尽量相同,将近喷嘴运动空气区域、射流喷嘴区域、近喷嘴非运动空气区域以及运动空气区域的网格尺寸均设置为 0.04 mm,而最大的环境空气区域同样仅作为数据传递使用,为了降低计算难度将其网格尺寸设置为 0.12 mm。

2.2 仿真参数及边界条件设置

在前期探究过程中发现,进给速度越大,低温射流在 PDMS 表面上相同位置处所冷却的时间越短,致使冷却效果变差;加工距离越大,低温射流从射流喷嘴中射出之后与环境空气进行热交换的时间越长,那么射流最终到达 PDMS 表面时的温度就越高,致使冷却效果变差;加工压强越小,低温射流冲击在 PDMS 表面时的冲击传热强度越弱,致使冷却效果变差。在后续进行的所有实验中所采用的最大进给速度为 2 mm/s、最大加工距离为 5.5 mm、最小加工压强为 0.2 MPa,若在该工艺参数组合下最终得到当射流喷嘴移动到任意位置时其正下方在 PDMS 中任一深度冷却至 -120 °C 的时间都要快于磨料颗粒加工至这一深度的时间,那么在更小的进给速度、更小的加工距离以及更大的加工压强等工艺参数组合下进行加工,也一定能够满足加工要求。

对于本文仿真,只需要考虑对流换热即可。打开能量方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型(k 为湍动能, ϵ 为耗散率)并在竖直方向上激活重力(重力加速度设置为 -9.8 m/s^2)。PDMS 计算区域的材料可在材料库中自行定义,其热性能参数如表 2 所示。将其余计

算区域的材料均设置为空气,由于在仿真过程中涉及温度的变化,而空气的密度受温度影响很大,因此将空气选用理想气体类型。

表2 PDMS热性能参数

Table 2 Thermal performance parameters of PDMS

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
970	1 460	0.15

模型的各个边界示意如图4所示,其中红色边界为外围压力出口、蓝色边界为接触面、绿色边界为绝热无滑移壁面、加粗黑色边界为射流喷嘴入口。在各个边界确定之后,将射流喷嘴入口设置为压强入口,进入的相为空气,经调压阀调节后的射流压强为0.2 MPa,射流温度为 $-181.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

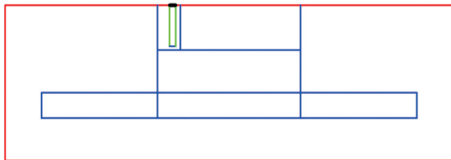


图4 模型的各个边界示意图

Fig.4 Schematic diagram of each boundary of the model

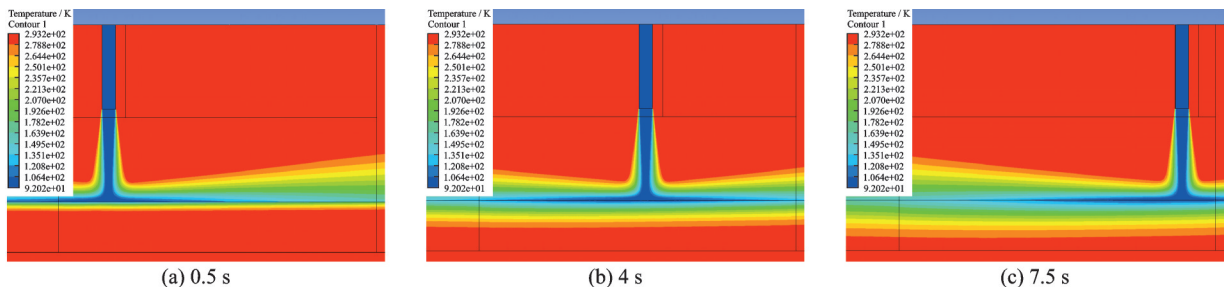


图5 3个时刻的PDMS内部温度分布的仿真结果

Fig.5 Simulation results of the internal temperature distribution of PDMS at three times

由图5可知,随着加工过程的进行,PDMS内部在深度方向上的温度是逐渐降低的。为了获得在PDMS深度方向上的冷却速率,当射流喷嘴在PDMS上方做匀速直线运动时,分别在其正下方位于PDMS内部0.5、5、10、20、30、40、50、60、80和100 μm 深度的位置处添加温度提取点,这10个温度提取点均能够随着射流喷嘴的运动而运动,最终得到PDMS内部各个深度的温度冷却至 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所用的加工时间。若射流喷嘴移动到任意位置时其正下方在PDMS中任一深度冷却至 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间都快于磨料颗粒加工至这一深度的时间,那么这些深度也一定能在加工之前被冷却至PDMS的玻璃化转变温度 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

将所得到的时间点放入坐标系中进行线性拟合,能够近似得到PDMS内部冷却至 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深度与加工时间之间的关系,如图6所示。在线性拟

最后进行求解器设置。在配置文件中将射流喷嘴区域的运动速度设置为2 mm/s,由于在后续进行的所有实验中所加工的微通道长度均为15 mm,那么加工所用的时间即为7.5 s。对于射流喷嘴区域的运动过程而言,其每运动一个时间步的距离不允许超过近喷嘴运动空气区域以及运动空气区域中所划分的网格尺寸(0.04 mm),否则就会出现计算错误。但是,为了提高计算的速度,让射流喷嘴区域在每一个时间步内的运动距离均等于0.04 mm即可,则将每一个时间步长均设置为0.02 s,那么7.5 s的总运动时间就需要设置375个时间步。将模型整体初始温度设置为室温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$),忽略射流中磨料颗粒的传热效应,采用Coupled算法进行求解。

2.3 仿真结果及分析

利用上述仿真参数以及边界条件进行求解之后,能够得到7.5 s加工时间以内所有时刻PDMS内部温度的分布情况。其中当加工时间为0.5、4以及7.5 s时PDMS内部温度分布的仿真结果如图5所示。

合中,若拟合优度 R^2 的值越接近1,说明拟合程度越好,而这10个温度提取点在进行线性拟合之后的拟合优度 $R^2=0.96$,接近1,那么可以采用拟合直线来代表这些离散数据点的变化趋势,这种情况下计算得到该拟合直线的斜率为148.12,则可以认为在PDMS深度方向上的平均冷却速率约为148.12 $\mu\text{m}/\text{s}$ 。

为了得到在PDMS深度方向上的冲蚀加工速率,利用与传热仿真分析过程中完全相同的工艺参数在PDMS表面上加工微孔,通过VHX-6000型数码显微镜(日本基恩士公司)测量得到的最大微孔深度为152.23 μm ,如图7所示。再根据相应的7.5 s加工时间计算出在PDMS深度方向上的最大平均冲蚀加工速率,为20.3 $\mu\text{m}/\text{s}$ 。经比较可以得到,在PDMS深度方向上的平均冷却速率远大于最大平均冲蚀加工速率,因此,利用低温微磨料气

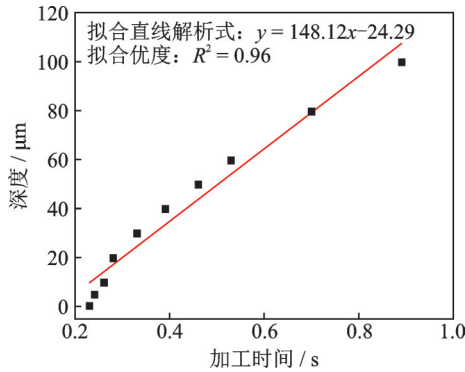


图 6 PDMS 内部冷却至 $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深度随加工时间变化的拟合直线

Fig.6 Fitting straight line of PDMS internal cooling to $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ depth changing with processing time

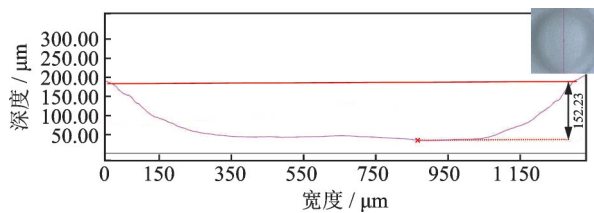


图 7 微孔的最大深度测量

Fig.7 Maximum depth measurement of the micro hole

射流加工 PDMS 是具有理论可行性的。

3 PDMS 加工性能的实验研究

一般来说,影响低温微磨料气射流加工 PDMS 性能的因素有很多,结合实验装置的实际情况,选择了对加工性能影响可能较大且便于进行定量控制的 4 个工艺参数,分别为进给速度 v 、加工距离 D 、冲蚀角度 α 以及加工压强 p ,通过开展单因素实验来探究这 4 个工艺参数对加工性能的影响规律。

3.1 PDMS 的制备

PDMS 在进行固化之前是一种预聚物,常温下为无色、无味且不易挥发的黏稠液体,它在一定温度下通过特定交联剂的催化作用进行交联反应,最终发生固化。实验选用 Sylgard 184 PDMS 预聚物和交联剂(美国道康宁公司),并按照微流控芯片行业内常用的 10:1 质量比制备固体 PDMS。将预聚物和交联剂以 10:1 的质量比倒入烧杯中,并用匀胶机充分搅拌 30 min,搅拌后将混合物倒入尺寸为 $60\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的玻璃模具中静置 8 h,静置完成后将模具放入 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温干燥箱中在真空状态下固化 2 h,待固化完成后冷却至室温并脱模即可得到 PDMS 试样,如图 8 所示。

3.2 磨料的选择

实验选用粒径为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的 Cobra 氧化铝磨料



图 8 固化后的 PDMS 试样

Fig.8 Cured PDMS sample

(德国仁福公司),氧化铝质量含量在 99.5% 以上,磨料颗粒色泽洁白、强度高、切削性能好,其 SEM 照片如图 9 所示。

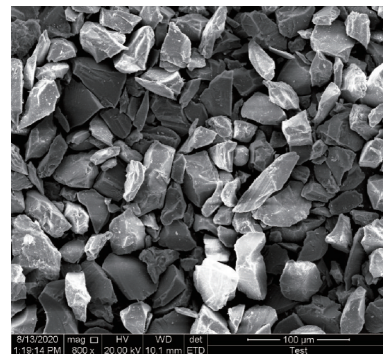


图 9 $25\text{ }\mu\text{m}$ Cobra 氧化铝磨料颗粒

Fig.9 $25\text{ }\mu\text{m}$ Cobra alumina abrasive particles

3.3 实验方案

根据所选的 4 个工艺参数,制定了如表 3 所示的单因素实验方案,实验中其余的固定工艺参数如表 4 所示,图 10 为 4 个工艺参数在加工过程中的示意。

表 3 探究 PDMS 加工性能的单因素实验方案

Table 3 Single-factor experiment scheme for exploring processing performance of PDMS

工艺参数	进给速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	加工距离 D/mm	冲蚀角度 $\alpha/(^{\circ})$	加工压强 p/MPa
水平 1	0.25	1.5	30	0.2
水平 2	0.50	2.5	45	0.3
水平 3	1.00	3.5	60	0.4
水平 4	1.50	4.5	75	0.5
水平 5	2.00	5.5	90	0.6

表 4 实验中其余的固定工艺参数

Table 4 The rest of fixed process parameters in experiment

固定工艺参数	数值或指标
射流出口温度 $T_{\text{out}}/^{\circ}\text{C}$	-181.03
射流喷嘴直径 d_1/mm	0.8
磨料流量 $G/(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$	2.2
加工次数 N	1
加工微通道长度 L/mm	15

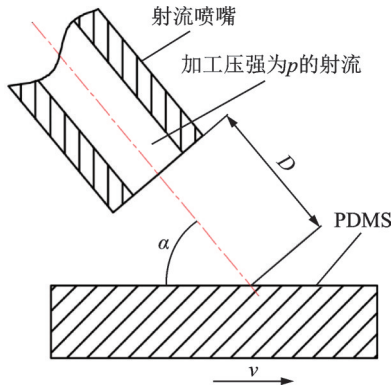


图10 4个工艺参数在加工过程中的示意图

Fig.10 Schematic representation of four process parameters during processing

3.4 PDMS加工性能的评价指标及测量

本实验采用单次冲蚀加工之后的归一化冲蚀率 E 来评价低温微磨料气射流的加工性能,其定义如下

$$E = \frac{m_p}{m_a} \quad (1)$$

式中: m_p 为材料去除质量, m_a 为加工用磨料质量。

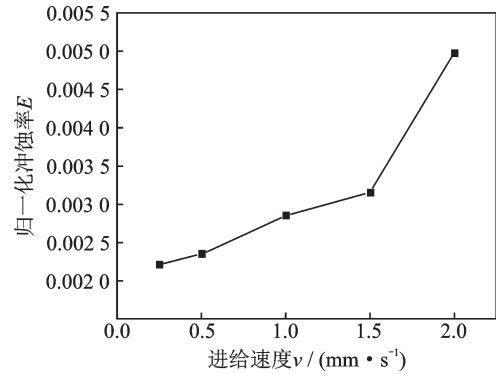
每一小组实验中均在同一片PDMS试样上加工3条15 mm长的微通道,在每条微通道上任取3段2 mm长的小段微通道,共计9段。由于本实验中的磨料流量 G 和加工微通道长度 L 是固定的,而且每一次加工所使用的进给速度 v 也是已知的,因此很容易获得每一次加工用磨料质量 m_a 。但是实验中所加工微通道的材料去除质量 m_p 是非常微小的,不便于用天平进行直接测量,因此采用了DSX 510型超景深显微镜(日本奥林巴斯公司)测量这9小段微通道的材料去除体积,而PDMS的密度是已知的,通过求得这9小段微通道的平均材料去除体积即可间接得到它们的平均材料去除质量,进而得到每一小组实验的平均归一化冲蚀率。

3.5 加工工艺参数对PDMS归一化冲蚀率的影响

3.5.1 进给速度对PDMS归一化冲蚀率的影响

当仅改变进给速度 v 时,其余不变的工艺参数为:加工距离 $D=3.5$ mm、冲蚀角度 $\alpha=90^\circ$ 、加工压强 $p=0.4$ MPa,最终得到进给速度 v 对PDMS归一化冲蚀率 E 的影响规律,如图11所示。

由图11可知,随着进给速度的增加,归一化冲蚀率会呈现持续增加的趋势,即单位时间内材料的去除质量增加。实际上,进给速度越快,单位时间内射流在材料表面上的加工面积也就越大,而在本实验中磨料流量的值是固定不变的,那么单位面积上起到冲蚀作用磨料颗粒的数量就会减少,进而降

图11 进给速度 v 对PDMS归一化冲蚀率 E 的影响规律Fig.11 Effect of feed speed v on normalized erosion rate E of PDMS

低了材料的去除质量。但是,归一化冲蚀率的大小不仅仅取决于材料去除质量,还与加工用磨料质量有关。虽然进给速度增加会导致材料去除质量的降低,但是加工相同长度的微通道所用的时间更短,那么加工用的磨料总质量也会更少,而且加工用磨料质量的减少程度要高于材料去除质量的减少程度,因此通过定义式计算后的归一化冲蚀率会随着进给速度的增加而呈现持续增加的趋势。那么在这种情况下随着进给速度的增加,加工性能是否更好还需要进行进一步的讨论。图12为在5个不同的进给速度下所加工微通道的底部显微镜图,放大倍数均为5倍。

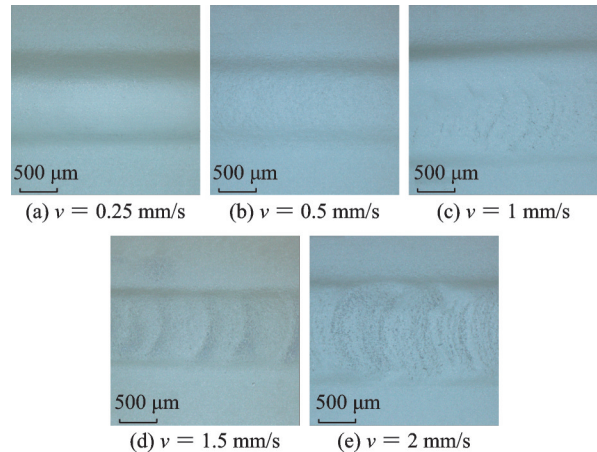


图12 5个不同进给速度下所加工微通道的底部显微镜图

Fig.12 Bottom micrographs of microchannels machined at five different feed speeds

由图12可知,当进给速度为0.25 mm/s和0.5 mm/s时,所加工微通道的底部较为平整;当进给速度从1 mm/s增加至2 mm/s时,由于射流的冷却效果会逐渐变差且在相同的位置上加工时间会逐渐变短,所加工微通道的底部会逐渐产生明显可见的波纹,这种波纹不仅会极大地影响加工质量,还会对使用性能造成很大影响,在微流控芯片的微

通道中是绝对不允许出现的,故认为当进给速度为 1、1.5 以及 2 mm/s 时的加工性能较差。由以上分析可知,当进给速度为 0.25 和 0.5 mm/s 时,加工性能较好。

3.5.2 加工距离对 PDMS 归一化冲蚀率的影响

当仅改变加工距离 D 时,其余不变的工艺参数为:进给速度 $v=0.25$ mm/s、冲蚀角度 $\alpha=90^\circ$ 、加工压强 $p=0.4$ MPa,最终得到加工距离 D 对 PDMS 归一化冲蚀率 E 的影响规律,如图 13 所示。

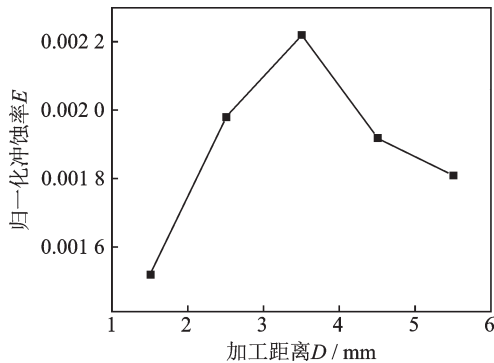


图 13 加工距离 D 对 PDMS 归一化冲蚀率 E 的影响规律
Fig.13 Effect of processing distance D on normalized erosion rate E of PDMS

由图 13 可知,当加工距离在 1.5~3.5 mm 时,随着加工距离的增加,归一化冲蚀率会呈现增加的趋势;当加工距离在 3.5~5.5 mm 时,随着加工距离的增加,归一化冲蚀率会呈现降低的趋势。当加工距离在 1.5~3.5 mm 时,磨料颗粒的速度低于其载体空气的速度,磨料颗粒做加速运动,即射流的冲蚀动能逐渐增加,导致归一化冲蚀率也相应增加;当加工距离为 3.5 mm 时,射流的冲蚀动能达到最大,归一化冲蚀率也达到最大;当加工距离在 3.5~4.5 mm 时,由于射流的发散效应,随着加工距离的增加,处于加速过程的磨料颗粒数量在不断减少,而处于加速区域之外的磨料颗粒数量越来越多,这些磨料颗粒开始做减速运动,从而使射流的总冲蚀动能降低,进而导致归一化冲蚀率降低;当加工距离在 4.5~5.5 mm 时,所有的磨料颗粒均做减速运动,这会使射流的冲蚀动能进一步降低,从而导致归一化冲蚀率继续降低。

由于进给速度不变,那么上述过程是一种在加工用磨料质量一定的条件下,归一化冲蚀率发生变化的情况,则可以认为当加工距离在 1.5~3.5 mm 时,随着加工距离的增加,加工性能会呈现增加的趋势;当加工距离为 3.5 mm 时,加工性能达到最大;当加工距离在 3.5~5.5 mm 时,随着加工距离的增加,加工性能会呈现降低的趋势。

3.5.3 冲蚀角度对 PDMS 归一化冲蚀率的影响

当仅改变冲蚀角度 α 时,其余不变的工艺参数为:进给速度 $v=0.25$ mm/s、加工距离 $D=3.5$ mm、加工压强 $p=0.4$ MPa,最终得到冲蚀角度 α 对 PDMS 归一化冲蚀率 E 的影响规律,如图 14 所示。

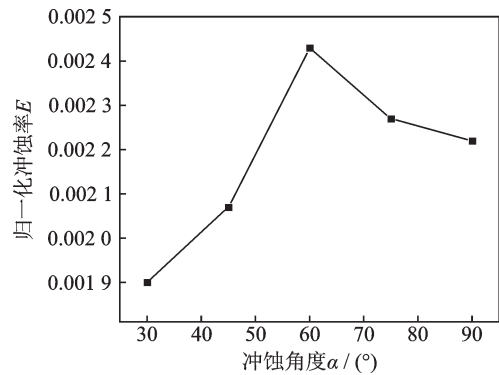


图 14 冲蚀角度 α 对 PDMS 归一化冲蚀率 E 的影响规律
Fig.14 Effect of erosion angle α on normalized erosion rate E of PDMS

由图 14 可知,当冲蚀角度在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 时,随着冲蚀角度的增加,归一化冲蚀率会呈现增加的趋势;当冲蚀角度在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 时,随着冲蚀角度的增加,归一化冲蚀率会呈现降低的趋势。当低温微磨料气射流以一定冲蚀角度冲击在工件表面时,射流的冲蚀动能可以分解为平行于工件表面的切向冲蚀动能和垂直于工件表面的法向冲蚀动能。对于脆性材料而言,它们抵抗切向冲蚀动能的能力较强,材料去除机理主要为弹性压痕造成的裂纹扩展,故材料去除主要取决于法向冲蚀动能,归一化冲蚀率会随着冲蚀角度的增加而增加,当冲蚀角度为 90° 时归一化冲蚀率达到最大;对于塑性材料而言,它们抵抗法向冲蚀动能的能力较强,材料去除机理主要为微切削、变形磨损和挤压去除,故材料去除主要取决于切向冲蚀动能,归一化冲蚀率会随着冲蚀角度的降低而增加,当冲蚀角度在 15° 附近时归一化冲蚀率达到最大^[16]。对于低温微磨料气射流加工 PDMS 而言,经研究发现低温下的 PDMS 并不完全是脆性材料,还具有塑性材料的特征,在低温下加工 PDMS 的材料去除机理实际上是一种脆性和塑性的混合去除机理^[17]。当冲蚀角度小于 90° 时,除了脆性去除,磨料颗粒冲击在 PDMS 表面时还会产生横向剪切应力造成塑性去除;当冲蚀角度为 90° 时,磨料颗粒冲击在 PDMS 表面时主要以脆性去除的方式去除材料。正是这种混合去除机理导致归一化冲蚀率出现了随着冲蚀角度增加而先增加后降低的趋势,在冲蚀角度为 60° 附近时归一化冲蚀率达到最大。

由于进给速度不变,那么上述实验过程是一种在加工用磨料质量一定的条件下,归一化冲蚀率发生变化的情况,则可以认为当冲蚀角度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,随着冲蚀角度的增加,加工性能会呈现增加的趋势;当冲蚀角度为 60° 时,加工性能达到最大;当冲蚀角度在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,随着冲蚀角度的增加,加工性能会呈现降低的趋势。

3.5.4 加工压强对PDMS归一化冲蚀率的影响

当仅改变加工压强 p 时,其余不变的工艺参数为:进给速度 $v=0.25$ mm/s、加工距离 $D=3.5$ mm、冲蚀角度 $\alpha=90^{\circ}$,最终得到冲蚀角度 α 对PDMS归一化冲蚀率 E 的影响规律,如图15所示。

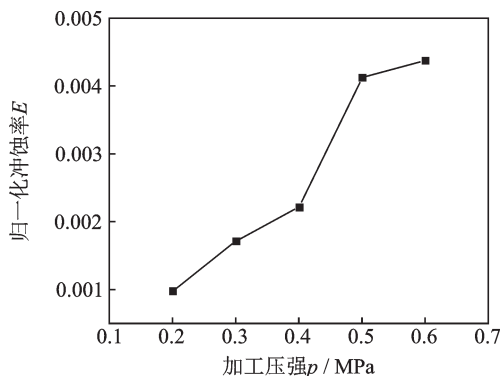


图15 加工压强 p 对PDMS归一化冲蚀率 E 的影响规律
Fig.15 Effect of processing pressure p on normalized erosion rate E of PDMS

由图15所示,随着加工压力的增加,归一化冲蚀率会呈现持续增加的趋势。加工压力越大,射流从射流喷嘴中射出时磨料颗粒的速度越大,那么射流的冲蚀动能也就越大,从而造成了归一化冲蚀率的增加。

由于进给速度不变,那么上述实验过程是一种在加工用磨料质量一定的条件下,归一化冲蚀率发生变化的情况,则可以认为随着加工压力的增加,加工性能会呈现持续增加的趋势。

4 结 论

(1)对低温微磨料气射流加工过程中的PDMS进行传热仿真分析,探究了在此过程中射流喷嘴移动到任意位置时其正下方在PDMS中深度方向上的冲蚀加工速率和冷却速率之间的数量关系。传热仿真分析结果表明,在PDMS深度方向上的平均冷却速率远大于最大平均冲蚀加工速率,利用低温微磨料气射流对其进行加工是完全可行的。

(2)通过开展单因素实验探究了进给速度、加工距离、冲蚀角度以及加工压强4个工艺参数对加工PDMS性能的影响规律。实验结果表明:①随着进给速度的增加,归一化冲蚀率会呈现持续增加的趋势,但这是一种加工用磨料质量和材料去除质量同时发生变化而导致归一化冲蚀率增加的情况,经进一步研究发现,当进给速度为0.25和0.5 mm/s时,加工性能较好。②当加工距离在1.5~3.5 mm时,随着加工距离的增加,加工性能会呈现增加的趋势;当加工距离为3.5 mm时,加工性能达到最大;当加工距离在3.5~5.5 mm时,随着加工距离的增加,加工性能会呈现降低的趋势。③当冲蚀角度在 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,随着冲蚀角度的增加,加工性能会呈现增加的趋势;当冲蚀角度为 60° 时,加工性能达到最大;当冲蚀角度在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,随着冲蚀角度的增加,加工性能会呈现降低的趋势。④随着加工压强的增加,加工性能会呈现持续增加的趋势。

参考文献:

- [1] WHITESIDES G M. The origins and the future of microfluidics[J]. Nature, 2006, 442(7101): 368-373.
- [2] NGE P N, ROGERS C I, WOOLLEY A T. Advances in microfluidic materials, functions, integration, and applications[J]. Chemical Reviews, 2013, 113(4): 2550-2583.
- [3] 姜迪, 项楠, 唐文来, 等. 微操控技术发展与应用[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(3): 9-22.
JIANG Di, XIANG Nan, TANG Wenlai, et al. Development and application of microfluidic manipulation [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(3): 9-22.
- [4] 林晓梅, 张铭. PDMS微流控芯片加工技术研究[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 172-179.
LIN Xiaomei, ZHANG Ming. The researches in the PDMS microfluidic chip processing technology[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(2): 172-179.
- [5] MILLS C A, MARTINEZ E, BESSUEILLE F, et al. Production of structures for microfluidics using polymer imprint techniques[J]. Microelectronic Engineering, 2005, 78(2): 695-700.
- [6] 夏飞. PDMS微流控芯片的制备工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
XIA Fei. Studies on fabrication technology of PDMS microfluidic chips[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [7] 付川. 激光加工表面微观形貌与疏水特性研究[D].

- 大连:大连理工大学,2017.
- FU Chuan. Study on micro-morphology and hydrophobic characteristics of surface after laser processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [8] MELENTIEV R, FANG F Z. Recent advances and challenges of abrasive jet machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Technology, 2018, 22: 1-20.
- [9] 樊晶明,王成勇,王军,等.微磨料空气射流加工特性研究[J].中国机械工程,2008,19(5):584-589.
- FAN Jingming, WANG Chengyong, WANG Jun, et al. Study on the machining performance of micro abrasive jet machining[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 584-589.
- [10] 李全来,李长林,陶春生.微磨料气射流成形加工表面波纹度研究[J].现代制造工程,2017(6):114-120.
- LI Quanlai, LI Changlin, TAO Chunsheng. Surface waviness analysis on micro abrasive air jet machining technology[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(6): 114-120.
- [11] LARI M R S, PAPINI M. Inverse methods to gradient etch three-dimensional features with prescribed topographies using abrasive jet micro-machining: Part I—Modeling[J]. Precision Engineering, 2016, 45: 272-284.
- [12] LARI M R S, PAPINI M. Inverse methods to gradient etch three-dimensional features with prescribed topographies using abrasive jet micro-machining: Part II—Verification with micro-machining experiments[J]. Precision Engineering, 2016, 45: 262-271.
- [13] GETU H, SPELT J K, PAPINI M. Cryogenically assisted abrasive jet micromachining of polymers[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(11): 1-8.
- [14] KAKINUMA Y, YASUDA N, AOYAMA T. Micromachining of soft polymer material applying cryogenic cooling[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2008, 2(4): 560-569.
- [15] GETU H, SPELT J K, PAPINI M. Thermal analysis of cryogenically assisted abrasive jet micromachining of PDMS[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(9): 721-730.
- [16] GHOBEITY A, GETU H, PAPINI M, et al. Surface evolution models for abrasive jet micromachining of holes in glass and polymethylmethacrylate (PMMA)[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 17(11): 2175-2185.
- [17] 娄元帅. PDMS 低温磨料气射流加工装置及实验研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
- LOU Yuanshuai. Research on device and experiment of cryogenic abrasive air jet machining of PDMS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

(编辑:胥橙庭)