

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.006

低温磨料气射流加工 PDMS 实验研究

娄元帅 孙玉利 王亚霁 公正 刘志刚 左敦稳

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:通过自研的低温磨料气射流加工装置进行低温磨料气射流加工聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)实验研究,分析了加工时间、加工距离、冲蚀角度和磨料粒径对冲蚀率、孔深和孔横截面形貌的影响。结果表明:随着加工时间的增加,冲蚀率先增大后减小,在第 1 阶段加工过程中,孔深与加工时间大致呈线性关系,增加加工时间还可使孔底部变平整;存在一个最佳加工距离使孔深最大,当加工距离大于最大加工距离时,孔深将随着加工距离的增加而急剧下降,孔的锥度随着加工距离的增大而增大;当冲蚀角度处于 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间时,冲蚀率最大,随着冲蚀角度的增加,孔的形状逐步由椭圆形变成圆形;存在一个最佳磨料粒径,使冲蚀率和孔深达到最大;当冲蚀角度小于 90° 时,低温磨料气射流加工 PDMS 材料去除机理为塑性去除和脆性去除的结合。

关键词:低温磨料气射流加工;工艺参数;冲蚀率;横截面形貌;塑脆转变

中图分类号:TH145.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2019)03-0305-07

Experimental Study on Cryogenic Abrasive Air Jet Machining of PDMS

LOU Yuanshuai, SUN Yuli, WANG Yaji, GONG Zheng, LIU Zhigang, ZUO Dunwen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Experiment on cryogenic abrasive air jet machining (CAAJM) of PDMS has been achieved using self-developed CAAJM device. Based on the experimental study of CAAJM of PDMS, the influences of machining time, the centerline distances from the nozzle to the target, attack angle and the diameter of abrasive on erosion rate, the depth of holes and cross-sectional morphologies are investigated. Results indicate that with the increase of time, erosion rate firstly increases and then decreases. In the first stage of processing, the depth of the hole has linear relation to the the machining time. Increasing machining time can make the bottom of the hole smooth. There is an optimum distance to get the maximum machining depth. When the machining distance is greater than the optimum distance, the depth of the hole drops off sharply with machining distance. The taper of the hole grows with machining distance. The maximum erosion rate can be obtained when attack angle is between 30° and 60° . With the increase of attack angle, the shape of the hole gradually changes from elliptical to circular. There is an optimum diameter of abrasive to get the maximum erosion rate and machining depth. When the attack angle is less than 90° , the material removal mechanism of CAAJM of PDMS is a mix of ductile erosive system and brittle erosive system.

Key words: cryogenic abrasive air jet machining; process parameters; erosion rate; cross-sectional morphology; ductile-brittle transition

基金项目:国家自然科学基金面上(51375237)资助项目;南京航空航天大学 2017 年研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170507)资助项目。

收稿日期:2018-4-2; **修订日期:**2018-6-12

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

引用格式:娄元帅,孙玉利,王亚霁,等.低温磨料气射流加工 PDMS 实验研究[J].南京航空航天大学学报,2019,51(3):305-311. LOU Yuanshuai, SUN Yuli, WANG Yaji, et al. Experimental Study on Cryogenic Abrasive Air Jet Machining of PDMS[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3):305-311.

磨料气射流加工技术是一种新型的微细加工技术,它利用压缩空气加速磨料颗粒并通过微喷嘴形成高速射流,高速射流喷射到工件表面对工件进行冲蚀加工。磨料气射流加工具有加工成本低、加工范围广、材料去除率高、能加工复杂形状结构等优点,常被用来加工玻璃、陶瓷、硅和石英等硬脆材料^[1-2]。KUMAR对磨料气射流加工孔进行了深入研究,他用氧化铝磨料加工石英,发现喷嘴的进给速度会影响孔的锥度,当进给速度等于材料厚度的平均变化率时,得到的孔锥度最小^[3]。文献[4]用田口法对磨料气射流加工Ti-6Al-4V合金进行了研究,研究表明喷嘴直径对材料去除率的影响最大,加工距离对孔的质量影响最大。邱燕飞等用磨料气射流在玻璃表面加工微结构,结果表明加工过程中存在磨料反弹并对槽侧壁进行二次加工的现象,利用这一现象,通过改变射流入射角度,可以加工一些复杂的三维结构^[5]。李全来研究了不同加工工艺参数对玻璃表面粗糙度的影响,结果表明,对表面粗糙度影响最显著的因素为气压,喷嘴移动速度对表面粗糙度影响最小,对于各工艺参数,存在一个最佳组合使玻璃表面粗糙度最小^[6]。

由于硅材料有成本高、易碎、电绝缘性差和不透光等缺点,玻璃和石英具有成本高,且难以加工出深宽比高的微结构等缺点,人们开始选用具有价格低、耐化学腐蚀且相对容易成型等优点的有机高分子聚合物材料来代替硅和玻璃等硬脆材料,如PDMS材料被用来制作微流控芯片,聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)材料被用来制作管道、阀门等,丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(Acrylonitrile butadiene styrene, ABS)被用来制作汽车、飞机和家庭电器上的各种零部件。但是在常温下,使用磨料气射流加工PDMS等聚合物材料时,材料去除率非常低,甚至为零。

经研究发现,对于非晶态聚合物材料,存在一个玻璃化转变温度,当环境温度低于该温度时,聚合物材料将处于玻璃态,此时材料将具有很大的弹性模量($10^9 \sim 10^{10}$ Pa)以及很小的弹性变形(小于1%),由塑性材料转变为脆性材料。对于PDMS,其玻璃化转变温度为 -120 °C^[7]。当加工温度低于 -120 °C时,可使PDMS发生玻璃化转变,由塑性材料变为脆性材料,磨料气射流在此条件下以 90° 冲蚀角度冲击玻璃态PDMS时,可对其进行脆性去除。Getu等用混有液氮的磨料气射流加工PDMS等聚合物材料,结果表明混有液氮的磨料气射流可以以任何冲蚀角度加工PDMS等聚合物材料,并且能减少加工过程中磨料的嵌入^[8]。Gra-deen等研究了不同温度对低温磨料气射流加工

PDMS材料去除率的影响,发现材料去除率在 -178 °C时比在 -127 °C时提高了约15倍^[9]。

当冲蚀角度为 90° 时,低温磨料气射流加工PDMS材料去除机理可从单颗磨粒冲蚀脆性材料进行分析。当磨粒冲击处于玻璃态的PDMS表面时,玻璃态PDMS因受到冲击力而在表面产生裂纹,随着加工的进行,裂纹不断扩展,最后玻璃态PDMS发生脆性破碎而被去除^[10]。同时,对于处于玻璃态的PDMS,气射流的冲击应力也会在其表面产生裂纹,这被称为“银纹”现象。“银纹”会导致PDMS表面强度下降,当磨粒冲击PDMS表面时更易发生脆性破碎。“银纹”现象具有可逆性,在常温下并不会影响材料性能^[11]。

目前低温磨料气射流加工尚处于起步阶段,急需对工艺参数对被加工工件的影响规律进行实验研究。本文根据低温磨料气射流加工原理,自主搭建了一款低温磨料气射流加工装置,研究了低温磨料气射流加工PDMS工艺参数对冲蚀率及加工深度的影响,观察了不同加工条件下孔横截面形状的变化并分析了低温磨料气射流加工PDMS材料去除机理。

1 实 验

1.1 PDMS样品制备

将Sylgard184和交联剂按质量比1:10进行混合,静置30 min以除去搅拌时产生的气泡,然后浇注到直径60 mm,深度3 mm的培养皿中,随后在真空干燥箱中抽真空15 min,最后在 80 °C下固化4 h。

1.2 实验装置与实验原理

低温磨料气射流加工装置主要由空气压缩机、干燥机、气粉混合器、冷却筒、液氮罐、四维工作台和吸尘器等组成。其示意图如图1所示。其工作原理是,空气压缩机产生的压缩空气,经空气干燥机干燥,进入气粉混合器与磨料混合,形成高速磨料气射流,自增压液氮罐产生的液氮进入冷却筒中,将气射流管道浸没在液氮中,当磨料气射流从管道中流过时,被液氮降温冷却形成低温磨料气射

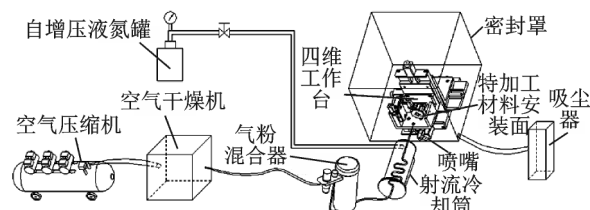


图1 低温磨料气射流加工装置示意图

Fig.1 Sketch map of cryogenic abrasive air jet machining equipment

流,随后经喷嘴喷射到工件表面将工件冷却至工件塑脆转变温度以下并进行微细加工。本装置通过改变浸没在液氮中的蛇形管长度来改变射流温度,工作台置于密封罩内,可避免实验人员吸入磨料粉尘。吸尘器用于收集加工产生的磨料粉尘,收集的磨料经后处理后可循环利用,大大降低了加工成本。

在整个实验过程中,喷嘴保持固定。将PDMS固定在四维工作台上,通过电脑控制四维工作台的运动,从而改变加工距离和冲蚀角度。

1.3 实验方法

加工距离对材料去除率和加工深度有很大的影响。低温磨料气射流的结构如图2所示,大致可分为初始段、基本段和发散段^[12]。喷嘴直径为 d ,加工距离为 h ,当 $0 < h < 6.2d$ 时,射流处于初始段,在初始段形成一个锥形区域,该区域内射流速度大且基本保持不变,初始段多用于材料的切割;当 $6.2d < h < 8d$ 时,射流处于基本段,该区域内射流速度开始逐渐减小,已不再具有切割能力;当 $h > 8d$ 时,射流处于发散段,射流速度逐渐减小为0,不具有任何加工能力。因此本实验加工距离选在初始段内。

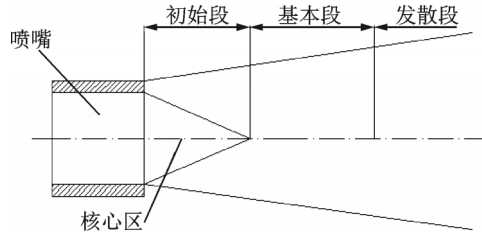


图2 低温磨料气射流结构示意图

Fig.2 Structure diagram of cryogenic abrasive air jet

除加工距离外,冲蚀角度、加工时间、磨料粒径、喷嘴尺寸、温度和加工压力等因素都对低温磨料气射流加工PDMS有影响。在低温磨料气射流加工过程中,射流温度与蛇形管长度和加工压力有关,一旦选定加工温度,加工压力就不能再改变。由于PDMS的塑脆转变温度为 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此射流温度应低于 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$,本实验固定加工温度,选用长度为140 cm的蛇形铜管,加工压力为400 kPa,此时射流的温度为 $-178\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本文采用单因素实验法对可控参数进行研究,选取的工艺参数如表1所示。其中加工距离指的是喷嘴中心线到工件表面的距离。冲蚀角度是指喷嘴中心线与工件表面所成的角度,如图3所示。本实验选用等效粒径为25, 50, 110, 125 μm 的氧化铝磨料进行加工实验。氧化铝磨料是一种白色高硬度化合物,极难溶于水,真密度为 3.97 g/cm^3 ,莫氏硬度9.0。50 μm 氧

化铝颗粒如图4所示。本实验采用直径为1.2 mm的圆形碳化钨喷嘴。

表1 低温磨料气射流加工工艺参数

Tab. 1 Technical parameters of cryogenic abrasive air jet machining

加工时间 t/s	加工距离 h/mm	冲蚀角度 $\alpha/(\text{ }^{\circ})$	磨料粒径/ μm
20	1	30	25
30	2	45	50
40	3	60	110
50	4	75	125
60	5	90	

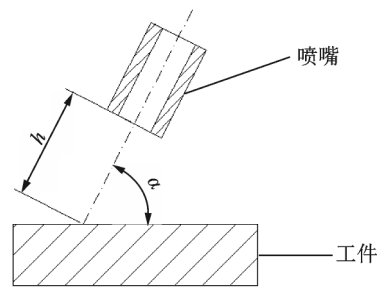


图3 加工距离和冲蚀角度示意图

Fig.3 Sketch map of machining distance and attack angle

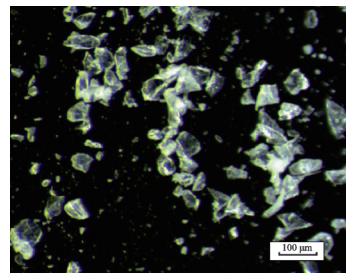


图4 50 μm 氧化铝颗粒

Fig.4 50 μm aluminum oxide powder

本实验采用冲蚀率来衡量加工效率,冲蚀率 E 定义为

$$E = \frac{\text{去除的工件质量}}{\text{加工所用的磨料质量}} \quad (1)$$

去除的工件质量通过冲蚀加工的孔的体积来计算。收集低温磨料气射流加工装置喷射60 s所喷射出的磨料然后称重即可计算出不同加工时间下加工所用的磨料质量。本实验选用美国G&G公司的JJ523BC型精密电子分析天平称量磨料质量,其量程为520 g,测量精度为1 mg。采用NANOVEA ST400(美国)三维形貌仪测量加工后的孔体积、孔深和孔的横截面形貌。

2 实验结果与分析

2.1 加工时间对加工效果的影响

图5为加工时间对冲蚀率和孔深的影响。工

艺参数为:加工距离 5 mm, 冲蚀角度 90° , 磨料粒径 $25\ \mu\text{m}$ 。

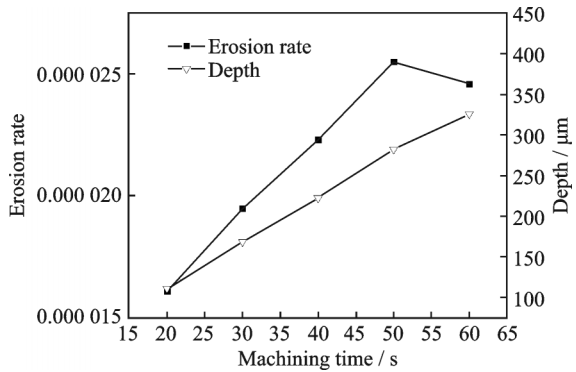


图5 加工时间对加工效果的影响

Fig.5 Influence of machining time on machining results

由图5可知,加工时间对冲蚀率和孔深都有较大的影响。在20~60 s加工时间内,随着加工时间的增加,冲蚀率出现了先增大而后减小的情况,且冲蚀率在前期基本呈线性增长。这表明在低温磨料气射流加工初期,加工时间对冲蚀率影响较大,这是因为在低温磨料气射流加工前期,工件材料尚未完全冷却,还未由塑性材料完全转变为脆性材料,随着加工时间的增加,材料逐渐从塑性转变为脆性,材料冲蚀率逐渐增加;同时在加工初期,低温磨料射流在加工PDMS材料的浅层,此时材料表面粗糙度较小,磨料粒子在材料表面会发生回弹和偏转,不易形成裂纹,影响加工效果,当随着加工时间的增加,孔达到一定深度,孔内部材料粗糙度增加,裂纹比较容易形成,冲蚀率也逐步增加。当加工时间继续增加时,部分磨料和加工碎屑会在孔内产生堆积从而影响冲蚀率,因此冲蚀率会开始下降^[13]。

由于在20~50 s内,冲蚀率呈线性增加,在50~60 s内冲蚀率开始缓慢下降,因此孔深呈现了线性增加的趋势,在50~60 s内,孔深的增加速度开始呈现放缓的趋势,可以预测,随着喷射时间的继续增加,孔深增加速度将开始逐步减小直到趋近于0。

在低温磨料气射流加工过程中,会存在3个阶段,如图6所示。在第①阶段,孔的横截面形状为碗状;在第②阶段,磨料粒子向两侧反弹对侧壁进行冲蚀加工,同时由于孔深度的增加以及磨料粒子的相互作用,射流边缘的粒子动能下降,冲蚀率下降,导致孔的横截面变为V形;在第③阶段,对工件侧壁进行冲蚀加工的磨料粒子反弹到孔底部后仍然具有加工能力,对孔底部进行2次冲蚀从而使孔的横截面变为U形^[14]。

图7为加工时间20 s, 50 s和60 s时的孔横截

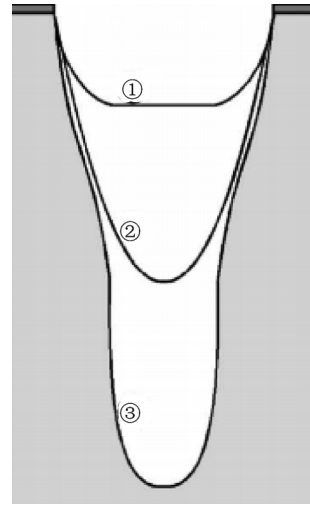


图6 低温磨料气射流加工3个阶段

Fig.6 Three stages of cryogenic abrasive air jet machining

面形貌。由图7发现在20 s时孔的横截面形状并不处于第①阶段,在50 s和60 s时孔的横截面形状处于第①阶段。这是由于本实验选用的气粉混合器工作原理为负压式,空气从磨料仓底部经过形成负压吸入磨料形成磨料气射流,因此磨料粒子主要集中在射流的边缘,从射流边缘到射流中心,磨料浓度逐渐降低,所以在低温磨料气射流加工初期,孔的横截面形状呈现两边低中间高,底部不平整,随着加工时间的增加,磨料粒子向底部反弹对底部进行冲蚀加工,同时两侧粒子动能下降,才开始进入图6所示的第①阶段,底部变得较为平整。由图5的冲蚀率变化规律也可知,在50~60 s内磨料冲蚀率开始下降,低温磨料气射流加工处于第①阶段和第②阶段的过渡期,因此加工时间为50 s和60 s时的横截面形状呈碗状。

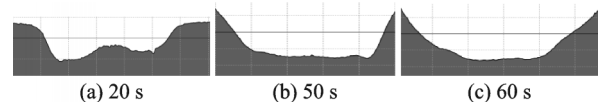


图7 加工时间20, 50和60 s时的孔横截面形貌

Fig.7 Cross-sectional morphologies of holes machined for 20, 40 and 60 s

2.2 加工距离对加工效果的影响

图8为加工距离对加工效果的影响。工艺参数为:加工时间40 s, 冲蚀角度 90° , 磨料粒径 $25\ \mu\text{m}$ 。

如图8所示,随着加工距离的增加,低温磨料气射流加工PDMS孔深呈现出了先增大后减小的变化趋势,在加工距离为3 mm时孔深最大,且随着加工距离的改变,孔深变化较大。在低温磨料气射流加工过程中,加工距离的改变会使发生冲蚀作用的射流的部位发生改变。本实验所选加工距离

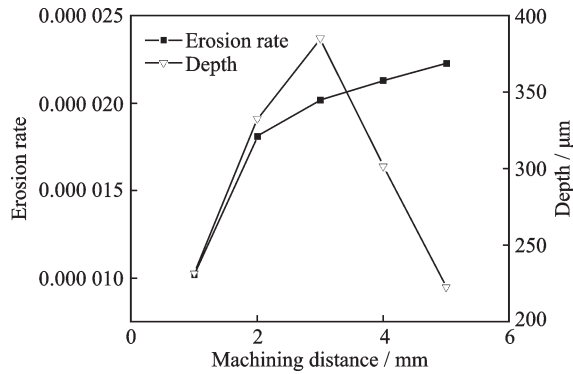


图 8 加工距离对加工效果的影响

Fig.8 Influence of machining distance on machining results

均处在初始段,但由于射流从喷嘴离开后就处于发散的状态,随着加工距离的增加,低温磨料气射流的能量逐渐减弱。因此加工距离在 3~5 mm 范围时,孔深呈现下降趋势。但当加工距离在 1~3 mm 范围时,孔深并没有下降而是呈现了增加的趋势,主要原因有:(1)当加工距离较小时,空气速度没有明显变化,但由于磨粒在离开喷嘴时其速度小于空气速度,在离开喷嘴后,磨粒在空气的带动下还会继续加速直至磨粒速度达到最大,在这个过程中,射流动能持续增加,因此孔深也在呈现增加的趋势。(2)喷射距离较短时,射流冲击工件表面后发生反弹,与后续射流产生相互碰撞,导致后续射流能量降低,因此在加工距离较短时,孔深较小,随着加工距离的增加,射流反弹后与后续射流之间的相互作用减弱,加工效率提高,孔深会有一个最大值,在加工距离为 3 mm 时,孔深达到最大。对于不同的加工条件,总存在一个最佳加工距离,此时射流冲蚀能力最强,孔深最大。

虽然孔深在加工距离为 3~5 mm 范围内呈现下降趋势,但冲蚀率并没有降低,反而在持续增加。这是因为随着喷射距离的增加,射流开始发散,射流直径增加,射流在工件表面的作用范围增大。因此冲蚀率随着喷射距离的增加而增大。随着喷射距离的增加,当射流能量开始明显下降时,孔深减小,冲蚀率的增加速率也逐渐放缓。同时本实验选用的气粉混合器为负压式,磨料在射流内部在分布不均匀,从射流中心到射流外围,磨料浓度逐渐增加,因此,随着喷射距离的增加,虽然孔深开始下降,但孔两侧冲蚀率仍然在增加,因此冲蚀率仍呈现了缓慢增加的趋势。可以预测,当加工距离进一步增加时,冲蚀率将开始呈现下降的趋势。

图 9 为加工距离 1 mm,加工距离 3 mm 和加工距离 5 mm 时的孔横截面形貌。由图 9 可知当加工距离为 1 mm 时,孔横截面近似于倒梯形,横截面轮廓较为平整,侧壁倾角比较小。这是因为加工距

离短,射流几乎没有发散,磨料大都垂直反弹,向两侧反弹的磨料较少,对侧壁的二次冲蚀作用减弱,使孔横截面呈现出了倒梯形。随着加工距离的增大,孔直径增大,锥度开始增加,当加工距离为 3 mm 时,冲蚀率达到最大,此时孔横截面轮廓依旧近似于倒梯形,说明此时向两侧壁反弹的磨料仍然较少。当加工距离为 5 mm 时,射流发散现象严重,孔直径继续增加,同时大量磨料粒子向两侧壁反弹对侧壁进行 2 次冲蚀加工,导致孔横截面呈现碗状,即处于第①阶段。

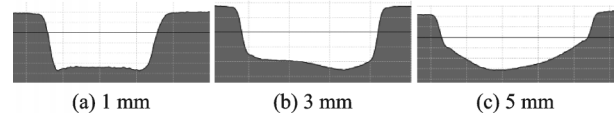


图 9 加工距离 1, 3 和 5 mm 时的孔横截面形貌

Fig.9 Cross-sectional morphologies of holes machined at 1, 3, 5 mm

加工距离对孔深、冲蚀率和横截面形貌都有较大影响,针对本实验装置,当想得到最大孔深时,加工距离应选 3 mm,当想得到最大冲蚀率时,加工距离应选 5 mm,若想得到锥度较小的孔,则应尽量减少加工距离。

2.3 冲蚀角度对加工效果的影响

图 10 为冲蚀角度对加工效果的影响。工艺参数为:加工时间 40 s,加工距离 5 mm,磨料粒径 25 μm。

当低温磨料气射流冲蚀工件表面时,射流的动能可以分解成平行于工件表面的动能和垂直于工件表面的动能。平行于工件表面的动能在工件表面产生微切削作用,垂直于工件表面的动能使工件产生压痕、裂纹形核与扩展。对于脆性材料,其抵抗水平动能的能力较强,冲蚀率主要取决于垂直动能,因此对于脆性材料,其冲蚀率会随着冲蚀角度的增加而增大,最大冲蚀率发生在冲蚀角度为 90° 时;对于塑性材料,其抵抗水平动能的能力较弱,冲蚀率受水平动能影响较大,因此气冲蚀率会随着冲

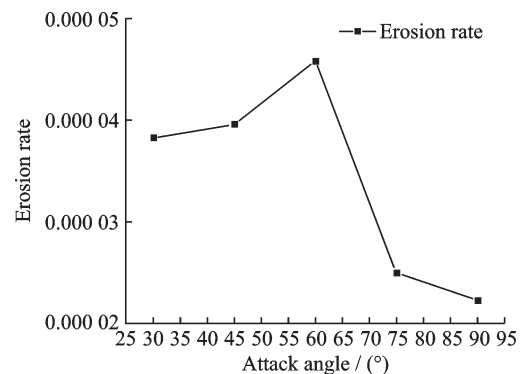


图 10 冲蚀角度对加工效果的影响

Fig.10 Influence of attack angle on machining results

蚀角度的增加而减小,最大冲蚀率发生在冲蚀角度 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间^[15-17]。由图10可知,对于低温磨料气射流加工PDMS,随着冲蚀角度的增加,冲蚀率先增大后减小,最大冲蚀率处于 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间。这表明,在低温下PDMS发生了塑脆转变,由塑性材料转变为脆性材料,但并不是完全的脆性材料,其材料去除机理既包括塑性去除又包括脆性去除,因此冲蚀率会随着冲蚀角度的改变而先增大后减小。

图11(a,b)分别为冲蚀角度 30° 时孔的三维形貌和横截面形貌。

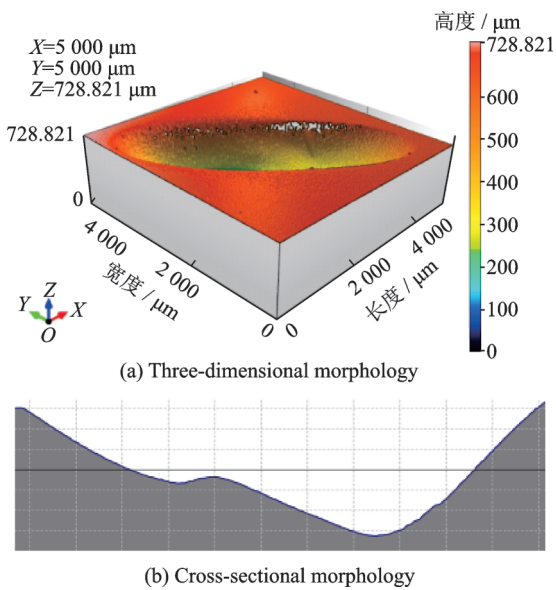


图11 冲蚀角度 30° 时孔的三维形貌和横截面形貌

Fig.11 Three-dimensional morphology and cross-sectional morphology of the hole machined at 30°

由图11可见,当冲蚀角度为 30° 时,射流是倾斜冲蚀工件表面,因此孔的形状为椭圆形而不是圆形。随着冲蚀角度的增加,孔的形状将逐步变成圆形。在冲蚀角度为 30° 时,孔的横截面形状不对称,孔深沿射流冲蚀方向增加。这是因为当射流倾斜冲蚀工件时,沿着射流方向一侧的壁面主要由射流直接冲蚀加工,而另一侧壁面则是由射流冲蚀和反弹磨料二次冲蚀综合作用形成。因此,通过改变冲蚀角度,可以获得复杂的三维结构。

2.4 磨料粒径对加工效果的影响

图12为磨料粒径对加工效果的影响。工艺参数为:加工时间40 s,加工距离5 mm,冲蚀角度 90° 。

由图12可知,随着磨料粒径的增大,冲蚀率和孔深均呈现出了先增大后减小的趋势。当磨料粒径较小时,其质量较小,导致射流束能量较低,对材料加工效果较弱,因此,随着磨料粒径的增大,冲蚀率和孔深会呈现增大的趋势。但由于本实验装置采用的是负压式,随着磨料粒径的增大,射流束中的磨料颗粒减少,同时由于磨料颗粒质量增加,以

及磨料颗粒之间的相互作用,导致磨料颗粒加速过程减慢,速度降低,因此当磨料粒径进一步增大时冲蚀率和孔深呈现出了下降的趋势。另外,磨料的粒径越小,其表面越锋利,对材料的切削能力越强,当磨料尺寸增大时,表面锋利程度下降,切削能力也随着降低。综合两方面的因素,存在着一个最佳磨料粒径,使冲蚀率和孔深达到最大。

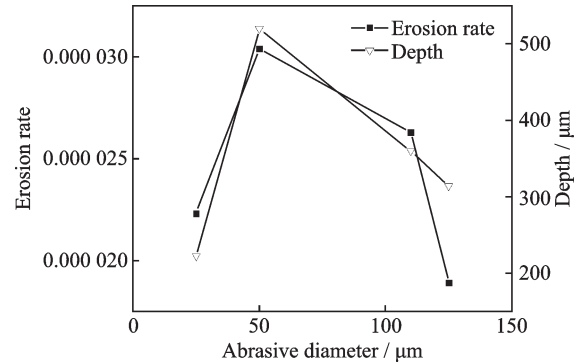


图12 磨料粒径对加工效果的影响

Fig.12 Influence of abrasive grain-size on machining results

3 结 论

本文在分析自研的低温磨料气射流加工装置及其工作原理的基础上,通过实验验证了低温磨料气射流可以加工PDMS材料,并研究了不同工艺参数对加工效果的影响,分析了低温磨料气射流加工PDMS材料去除机理,结论如下:

(1) 随着加工时间的增加,冲蚀率先增大后减小,当加工时间为50 s时,冲蚀率最大,增加加工时间还会使孔底部变平整,当加工时间在60 s以内,孔的横截面为碗状。

(2) 随着加工距离的增加,冲蚀率先增大后减小,当加工距离为3 mm时,冲蚀率最大,增加加工距离还会加剧磨料二次冲蚀作用,使孔的锥度增加。

(3) 当冲蚀角度处于 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间时,冲蚀率最大,这表明PDMS虽然在低温下发生了塑脆转变,但此时材料去除机理并不是完全的脆性去除,还包含了塑性去除,是塑性去除与脆性去除的结合。冲蚀角度还会影响孔的形状,随着冲蚀角度的增加,孔逐渐由椭圆形变圆形。

(4) 随着磨料粒径的增加,孔深和冲蚀率均先增大后减小,当磨料粒径为50 μm 时,冲蚀率最大,此时孔的深度也最大。

(5) 当冲蚀角度为 90° 时,磨料主要以脆性去除的方式加工PDMS,当冲蚀角度小于 90° 时,除了脆性去除,磨料冲击PDMS表面还会产生横向剪切应力,并以塑性去除的方式加工PDMS。

参考文献:

- [1] 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,2017,39(6):114-120.
LI Quanlai, LI Changlin, TAO Chunsheng. Surface waviness analysis on micro abrasive air jet machining technology [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017, 39(6): 114-120.
- [2] 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.
- [3] KUMAR A, HIREMATH S S. Improvement of geometrical accuracy of micro holes machined through micro abrasive jet machining [J]. Procedia Cirp, 2016, 46: 47-50.
- [4] PRASAD K N, BASHA D J, VARAPRASAD K C. Experimental investigation and analysis of process parameters in abrasive jet machining of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi method [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(10): 10894-10903.
- [5] 邱燕飞,王成勇,宋月贤,等.微磨料空气射流加工玻璃微流道结构研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2009,2009(3):32-37.
QIU Yanfei, WANG Chengyong, SONG Yuexian, et al. Micro channels machined on glass by micro abrasive jet machining [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 2009(3): 32-37.
- [6] 李全来.微磨料气射流成形加工表面粗糙度的研究[J].机械工程师,2014(12):7-10.
LI Quanlai. Surface roughness analysis on micro abrasive air jet forming technology [J]. Mechanical Engineer, 2014(12): 7-10.
- [7] ABE A, BLOCH D R. Polymer handbook [M]. New York: Wiley, 1989.
- [8] GETU H, SPELT J K, PAPINI M. Cryogenically assisted abrasive jet micromachining of polymers [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2008, 18(11):9.
- [9] GRADEEN A G, SPELT J K, PAPINI M. Cryogenic abrasive jet machining of polydimethylsiloxane at different temperatures [J]. Wear, 2012, 274: 335-344.
- [10] 张文超,武美萍,宋磊.磨料射流铣削工艺参数优化[J].表面技术,2017,46(11):190-197.
ZHANG Wenchao, WU Meiping, SONG Lei. Process parameters optimization for abrasive jet milling [J]. Surface Technology, 2017, 46(11): 190-197.
- [11] 姜春华,刘喜军,张哲.聚合物结构与性能[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016.
LOU Chunhua, LIU Xijun, ZHANG Zhe. Structures and properties of polymers [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2016.
- [12] DAVIES J T. Turbulence phenomena: An introduction to the eddy transfer of momentum, mass, and heat, particularly at interfaces [M]. New York: Elsevier, 2012.
- [13] 程谟栋.微磨料水射流加工装置设计与工艺研究[D].广州:广东工业大学,2007.
CHENG Modong. Micro abrasive water jets machining equipment design and processing [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007.
- [14] WENSINK H, ELWENSPOEK M C. Reduction of sidewall inclination and blast lag of powder blasted channels [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2002, 102(1/2): 157-164.
- [15] BITTER J G A. A Study of erosion phenomena [J]. Wear, 1963, 6(1): 5-21.
- [16] GETU H, GHOBEITY A, SPELT J K, et al. Abrasive jet micromachining of acrylic and polycarbonate polymers at oblique angles of attack [J]. Wear, 2008, 265(5/6): 888-901.
- [17] ORBANIC H, JUNKAR M. Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting [J]. Wear, 2008, 265(5): 821-830.

(编辑:陈璐)