

# 气氛对紫外激光非晶合金盲孔加工性的影响研究\*

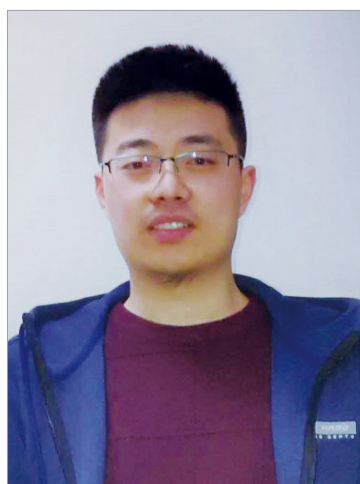
李元成,毛忠,王程浩,蔡敏,张伟,张晓兵

(中国航空制造技术研究院高能束流加工技术重点实验室,北京 100024)

**[摘要]** 为了获得不同气氛对紫外激光加工非晶合金盲孔的质量和效率的影响,采用波长 355nm 的纳秒激光对 Zr-Cu 非晶合金进行同心圆式旋切法盲孔加工试验,利用光学显微镜、扫描电镜、激光共聚焦显微镜等仪器对盲孔的显微形貌、粗糙度和加工效率进行了测试。结果表明,气氛的压力和种类影响着盲孔的底面形貌、加工质量和效率。气氛压力越小,盲孔底面粗糙度越低,材料的去除效率越高;相对于氮气、空气中的加工,氧气中表面粗糙度最小,且材料去除率最高。另外,加工表面未出现晶化现象,说明在一定激光参数下紫外纳秒激光可以实现非晶态合金的无晶化加工。

**关键词:** 紫外激光;纳秒激光;盲孔;激光加工;Zr-Cu 非晶合金;表面质量

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.08.061



李元成

工学硕士,助理工程师,主要从事激光精密加工方面研究。

近年来材料制备技术迅速发展,涌现出一大批如非晶态合金<sup>[1]</sup>、高熵合金<sup>[2]</sup>、复合材料<sup>[3]</sup>等性能优异的超材料。非晶合金因硬度大、强度高、耐腐蚀、低磁性等特点,具有很好的应用潜质,但它脆性大且受热易晶化,常规加工方式很难加工。激光加工具有无接触应力且不受材料硬度限制的优势,其中以超快激光和紫外激光这两类的热效应最小,非常适合加工脆硬性大、难加工材料<sup>[4-5]</sup>。与超快激光相比,紫外纳秒激光结构简单、购置及维护成本低、对工作环境要求低,成为其显著优势。开展紫外纳秒激光打孔等应用研究,分析紫外激光加工非晶合金的可行性,对非晶合金等难加工材料加工方式的扩展和补充具有积极意义。

本文以 Zr-Cu 非晶合金为研究对象,使用波长 355nm 的紫外纳秒激光,对非晶合金进行旋切打孔,研

究了不同气氛下盲孔的加工质量和效率。然后通过 XRD 衍射分析了非晶材料稳定性,同时在现有紫外纳秒加工机理的研究基础上,给出了紫外激光加工非晶合金时材料性能保持稳定的原因。

## 试验方法

材料为 1.2mm 厚的 Zr-Cu 非晶合金,表面抛光处理,见图 1。试验采用波长 355nm、平均功率 2.4W、激光脉宽 240ns、输出频率 50kHz 的紫外纳秒激光光源。电脑控制激光的输出,并且通过振镜控制激光的扫描路径。

不同于定点复制法的孔径和加工质量受制于光斑大小和光斑质量,旋切法加工的孔径可控,孔形优异<sup>[6]</sup>。若激光绕旋转中心作半径  $D/2$  的回转,则加工出孔径为  $D$  的孔,如图 2(a)所示。图 2(b)为在

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2018B090906002)。

旋切基础上发展起来的同心圆填充打孔方式,同心圆式直接利用圆周扫描,根据光斑尺寸,选择合适的填充间距,在目标位置上从里到外分别扫描,实现盲孔的加工<sup>[7-8]</sup>。紫外纳秒的焦斑半径为15 $\mu\text{m}$ ,通过30个间距10 $\mu\text{m}$ 的同心圆组合加工出直径600 $\mu\text{m}$ 的孔。

试验选用同心圆旋切法,研究不同气氛下的打孔效果,试验参数如表1所示。其中,指示压力为压力表的读数,文中无说明时为指示压力(MPa),绝对压力与指示压力的关系如下:

绝对压力 = 指示压力 + 0.1MPa (1)

各组均采用相同的加工参数,激光功率2.4W,脉冲频率50kHz,扫描速度100mm/s,打孔时间1min。光斑直径约30 $\mu\text{m}$ ,选择同心圆间距10 $\mu\text{m}$ 。激光制作盲孔过程中,其质量评价的参数有孔形状、底面粗糙度、去除量等。为了对比各气氛的加工效果,本文对其中几个参数进行了测量。

图3为环境提供系统示意图。空气压力试验实际上分别利用了空气压缩机提供的正压力、大气压力环境和真空泵来实现的负压力。其中负压力由密封罐和抽气机组成的抽真空系统提供(图3)。氧气和氮气环境由向已抽真空的密封罐通入氧气或氮气提供。

试验在不同气氛中进行,加工后的试样先经酒精超声清洗10min。使用OLYMPUS/BX41M型光学显微镜和Sigma HD/ULTRA型扫描电

镜进行形貌观测,使用OLYMPUS/OLS4100型3D测量激光显微镜测量样品表面粗糙度,使用KEYENCE/VHX-5000型超景深三维显微镜观察三维形貌。同时,使用BRUKER/D8 ADVANCE型X射线衍射仪进行XRD分析。

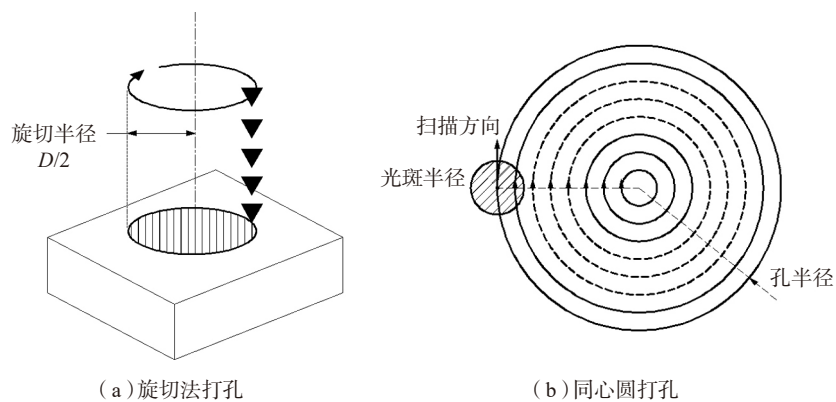


图2 打孔方式  
Fig.2 Drilling methods

表1 试验参数列表  
Table 1 List of test parameters

试验组号	气氛	指示压力 /MPa	绝对压力 /MPa
1	空气	0.45	0.55
2	空气	0.35	0.45
3	空气	0.25	0.35
4	空气	0.15	0.25
5	空气	0.05	0.15
6	空气	0	0.1
7	空气	-0.06	0.04
8	空气	-0.08	0.02
9	氧气	0.35	0.45
10	氮气	0.35	0.45

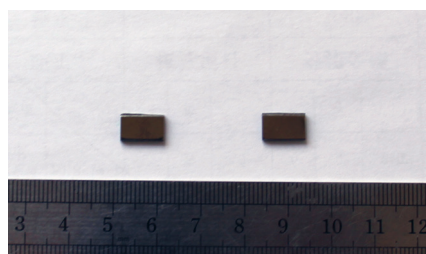


图1 非晶合金试样  
Fig.1 Amorphous alloy specimens

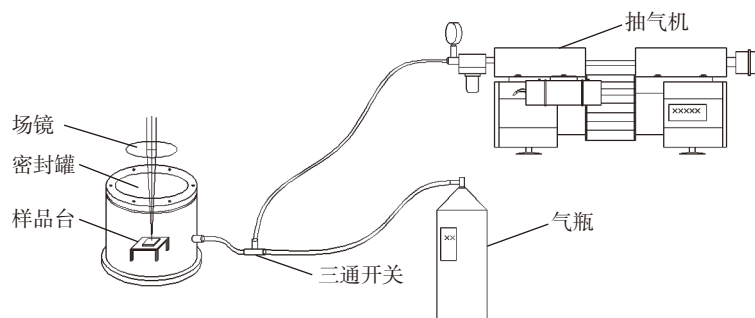


图3 环境提供装置  
Fig.3 Environmental provision equipment

“珊瑚状”表面和较低压力下的“鳞状”表面。图4(a)和(b)为0和-0.08MPa空气压力下盲孔的底面形貌。结果发现,大气及以上压力下形貌为镂空状的珊瑚结构,底面凹凸不平,且分布着一些微孔。真空中的底面形貌为同心环分布的鳞状结构,底面较为平整,同心环周期性间距约10 $\mu\text{m}$ 。

图5为不同空气压力下盲孔底面粗糙度的测量结果。试验中使用3D测量激光显微镜的粗糙度测试功能,测量样品底面的面粗糙度。可以看出,随着气压压力的逐渐增大,盲孔底面粗糙度逐渐增大。其中,气压从-0.08MPa增大到0.35MPa,面粗糙度从1.72 $\mu\text{m}$ 增大为7.23 $\mu\text{m}$ 。

图6为不同空气气压下打孔的材料去除率测量结果。试验中控制打孔时间均为1min,使用超景深三维显微镜测量孔内材料去除量,得到单位时间内材料效率。可以看出,随着气压逐渐增大,打孔去除率逐渐减小。其中,气压压力从-0.08MPa增大到0.45MPa,材料去除率从 $9.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 降为 $2.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。大气压力为-0.08MPa时材料去除率的测量结果见图7。

打孔方式和加工参数一定时,随着气压压力的增大,底面从较为平整的鳞状形貌转变为镂空状的珊瑚形貌,盲孔底面粗糙度逐渐增大,但材料去除率逐渐减少。

盲孔底面形貌成因十分复杂,与材料属性、光反应强度、气体环境等因素有关。对于不同气压下底面形貌的成因,有以下推测。真空中氧含量极低,氧化反应可以忽略,材料的去除主要靠激光辐照区域的急剧升温使材料瞬间气化或沸腾溅射实现。在脉冲能量稳定的情况下,单光斑材料去除量一致,由扫描速度和重频决定的光斑间距相同,且同心圆间距一致,形成了较为平坦的鳞状底面。对于空气中珊瑚状底面,氧气不充分时

各处光反应强度不同,材料去除率有微弱差别。随着扫描次数增大,不平衡性逐渐被放大,造成盲孔底面的凹凸不平。另外气压会影响等离子体的存在时间,真空中等离子体迅速消散,气压增大会导致等离子体衰减的速度变慢<sup>[9]</sup>。较高密度的等离子体起到聚焦的作用<sup>[10]</sup>,当等离子体存在时间超过脉冲间隔,则会改变下个激

光脉冲的加工状态,由于等离子体的密度、成分和分布不均衡,所以单脉冲材料去除量会有所偏差,最终形成凹凸不平的表面。表面的不平整导致激光不垂直于材料表面,后经不断反射、散射和干涉,诱导形成类似珊瑚状的多孔结构。据菲涅耳效应<sup>[11]</sup>,孔壁入射角越大,光能的吸收率和去除率越低,所以当盲孔底面呈珊瑚状

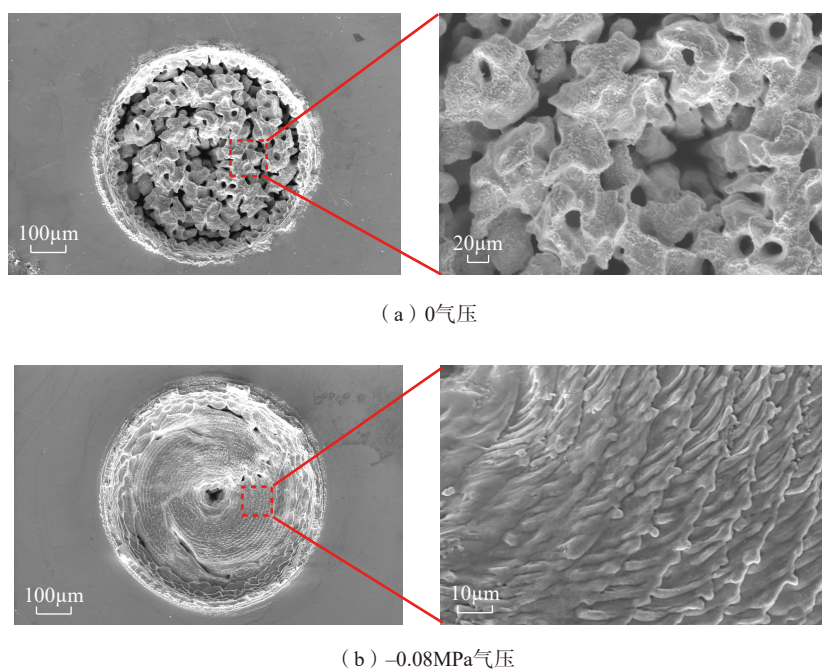


图4 不同空气压力下盲孔的底面SEM照片

Fig.4 SEM photographs of blind hole bottom under different air pressures

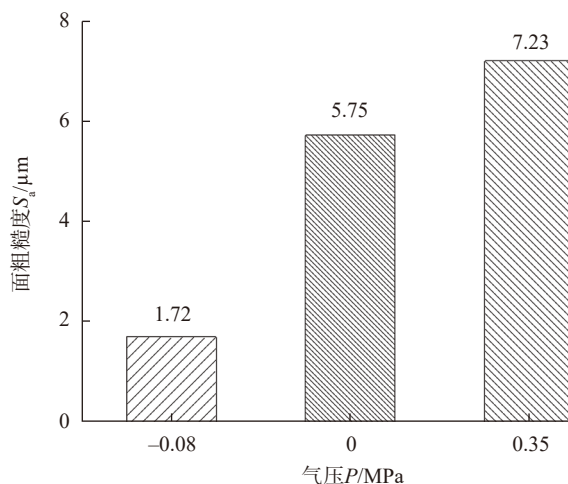


图5 不同空气压力下盲孔底面的面粗糙度

Fig.5 Surface roughness of blind hole bottom under different air pressures

时,材料去除率很低。

## 2 气氛种类的影响

气氛压力 0.35MPa 时,空气中盲孔底面为镂空状的珊瑚形貌,而氮气和氧气中形貌见图 8。氮气中底面为同心环式鳞状形貌,与真空中的表面形貌相似。氧气中底面为伴随着微细龟裂的重凝形貌,龟裂纹粒尺寸 2~5 $\mu\text{m}$ 。

图 9 为不同气氛中盲孔底面粗糙度的测量结果。试验中使用 3D 测量激光显微镜的粗糙度测试功能,测量样品底面的面粗糙度。可以看出,压力同为 0.35MPa 时,空气中盲孔的底面粗糙度最高,平均值为 7.23 $\mu\text{m}$ ;氧气中盲孔底面粗糙度最低,平均值为 1.56 $\mu\text{m}$ 。

图 10 为不同气氛中打孔的材料去除率测量结果。试验中控制打孔时间均为 1min,使用超景深三维显微镜测量孔内材料去除量,得到单位时间内材料效率。可以看出,压力同为 0.35MPa 时,氧气中材料去除率最高为  $2.34 \times 10^7 \mu\text{m}^3/\text{min}$ ,其次氮气中为  $1.96 \times 10^7 \mu\text{m}^3/\text{min}$ ,空气中最低为  $4.3 \times 10^6 \mu\text{m}^3/\text{min}$ 。

打孔方式和加工参数一定时,随着加工气氛种类的变化,底面形貌也有所不同。压力为 0.35MPa 时,空气中为多孔状珊瑚表面,氮气中为同心环式鳞状形貌,氧气中为伴随着微细龟裂的重凝形貌。

若在不同气体中激光与非晶相互作用机理相近的前提下,空气的效果预计在氧气和氮气之间。而实际加工中发现,空气中造型与氮气和氧气差别较大,推测其作用机理有所差异。试验中氧气和氮气为干燥气体,空气直接取自大气,未经干燥。因空气成分复杂,除占比 78% 的氮气和 21% 的氧气外,还有 0.939% 的稀有气体、0.031% 的二氧化碳和 0.03% 的其他气体及杂质存在。同时激光与材料相互作用机理还不十分明朗,所以不能简单地认为空气中的加工

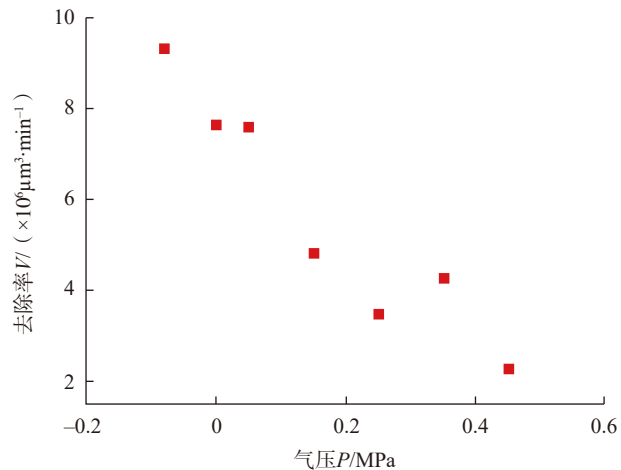


图6 不同空气压力下打孔的材料去除率

Fig.6 Material removal rate of drilling under different air pressures

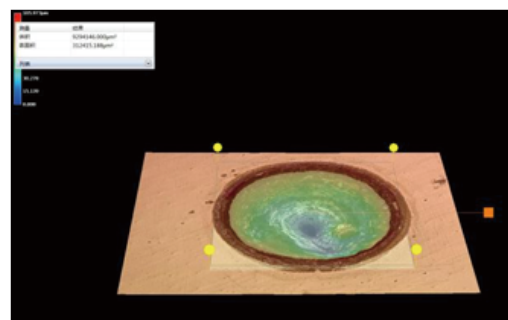
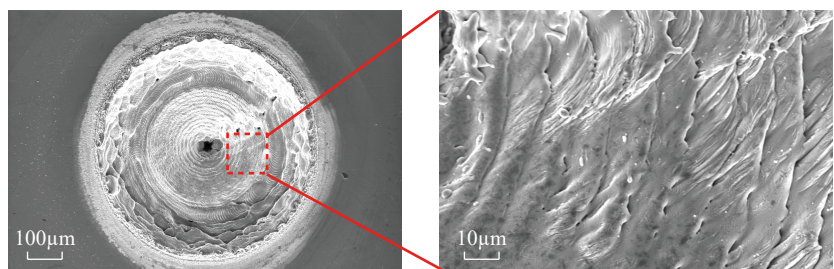
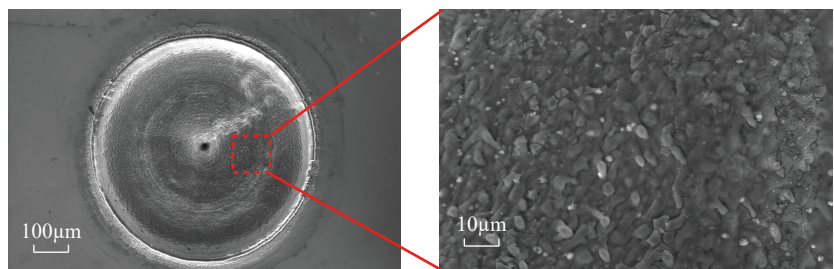


图7 空气压力为-0.08MPa时材料去除量测量图

Fig.7 Removal volume measurement of ultraviolet laser drilling under -0.08MPa air pressure



(a) 氮气



(b) 氧气

图8 不同气体下盲孔的底面SEM照片

Fig.8 SEM photographs of blind hole bottom under different gases

效果介于氧气和氮气之间。

形貌决定表面粗糙度,空气中加工形貌孔隙较多,具有较大的表面粗糙度,形貌成因已在上节探讨且需进一步研究。氮气中盲孔底面形貌与真空中近似,两者共同点为环境中几乎无氧,这与含氧环境加工形貌具有显著差别,因此侧证了氧参与了激光对材料去除过程并影响了加工形貌。在无氧环境中,稳定的脉冲能量和光斑分布决定了加工表面的平整度;而纯氧环境中,氧化反应充分,去除量一致形成平坦的龟裂重凝表面,所以在氮气和氧气中表面粗糙度均小于空气环境。根据菲涅耳效应<sup>[11]</sup>,平坦表面材料去除量大于粗糙表面材料,氧化释放的氧化热<sup>[12]</sup>也有助于材料的去除,所以氧气中材料的去除量最大,其次为氮气。

### 3 XRD 分析

非晶态金属原子排列呈短程有序、长程无序的状态,因此具有不同于一般晶态物质的力学、物理和化学性能。加工过程的热效应可能导致非晶材料的晶化<sup>[13]</sup>,从而引起变性失效,现使用X射线衍射分析紫外纳秒激光加工中非晶材料物相的稳定。图11为不同气氛下紫外激光加工表面的XRD测量结果。当非晶物质中出现较多晶态物质时,便会在漫散峰上叠加上明锐的结晶峰<sup>[14]</sup>。从XRD结果来看,衍射图均由漫散峰组成,无明显的结晶峰,初步判断加工后材料仍呈非晶态,无明显晶化。

经紫外激光加工的非晶合金仍保持非晶态,推测与紫外纳秒加工过程中瞬间的温升和温降有关。加工过程中,样品表面材料瞬间被加热到极高温,根据晏绪光等<sup>[15]</sup>研究,最高温度出现在单个激光脉冲持续作用过程中,脉冲结束时材料迅速冷却。根据华显刚等<sup>[16]</sup>研究,紫外纳秒激光加工时,表层材料的冷却速度可达 $10^{10}$ K/s以上。锆基合金非晶化的临界冷却速度较低<sup>[17]</sup>,具有极好

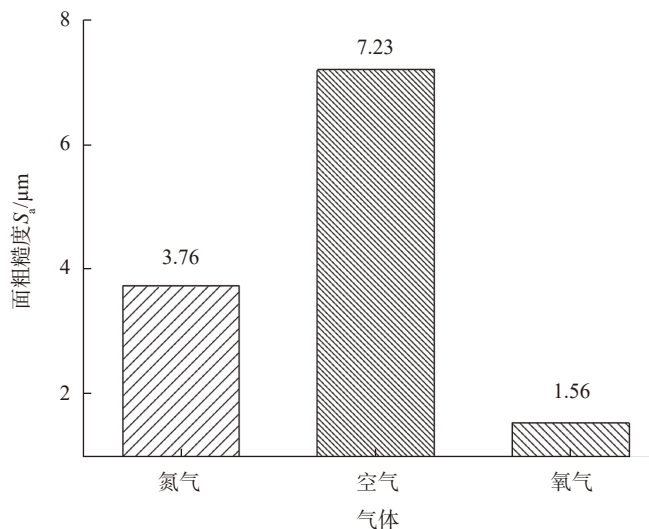


图9 不同气氛时盲孔底面的面粗糙度

Fig.9 Surface roughness of blind hole bottom under different gases

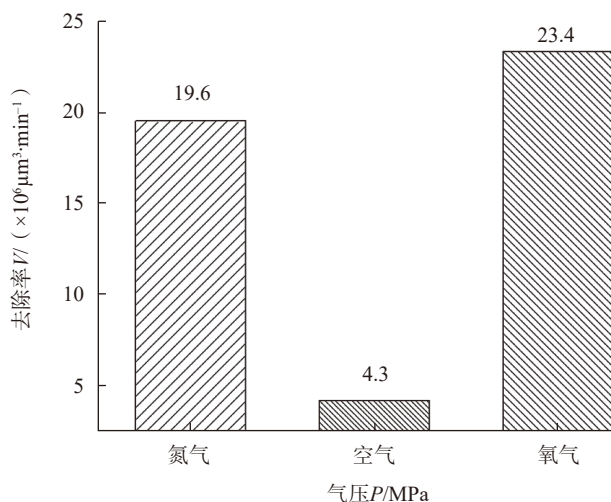


图10 不同气氛下打孔的材料去除率

Fig.10 Material removal rate of drilling under different gases

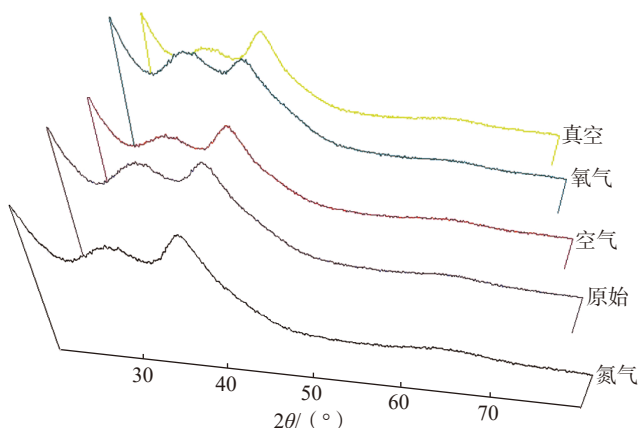


图11 不同状态下Zr-Cu合金的X射线衍射图(非晶态)

Fig.11 X-ray diffraction patterns of Zr-Cu alloys under different conditions

的玻璃形成能力,在极高的过冷度下容易重新形成非晶。

## 结论

使用同心圆方式在 Zr-Cu 非晶材料上打盲孔,研究了不同气氛对盲孔形貌、物相及加工性的影响,得到如下结果:

(1) 气氛压力影响着盲孔底面形貌、加工的质量和效率。空气中盲孔底面呈粗糙度较大的珊瑚状形貌,气压越大,盲孔底面越粗糙,材料去除率越低。真空中的底面形貌为同心环分布的鳞状结构,底面较为平整,鳞片分布及同心圆位置由扫描路径、扫描速度和重频特征决定。

(2) 气氛种类也影响着盲孔底面形貌、加工的质量和效率。气压相同时,氮气中盲孔底面为平坦的鳞状结构,氧气为有微细龟裂的重凝形貌。与氮气和空气相比,氧气中获得的表面粗糙度最低,且材料去除率最高。

(3) 在一定激光参数范围内,使用紫外纳秒激光加工非晶合金后未发现材料发生明显变性和晶化。紫外纳秒激光加工属于局部表层的极热极冷的瞬态过程,在单脉冲持续时间内材料温度达到最高值,然后迅速冷却,冷却速度高于铅基非晶合金的临界冷却速度,重新形成非晶。

## 参考文献

[1] 黄劲松,刘咏,陈仕奇,等. 铅基非晶合金的研究进展与应用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 1321-1332.

HUANG Jinsong, LIU Yong, CHEN Shiqi, et al. Progress and application of Zr-based amorphous alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(6): 1321-1332.

[2] ZHANG W R, LIAW P K, ZHANG Y. Science and technology in high-entropy alloys[J]. Science China Materials (English), 2018, 61(1): 2-22.

[3] 齐方方,王子钦,李庆刚,等. 超高温陶瓷基复合材料制备与性能的研究进展[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(1):

8-14.

QI Fangfang, WANG Ziqin, LI Qinggang, et al. Progress in preparation and properties of UHT ceramic matrix composites[J]. Journal of University of Jinan (Science & Technology), 2019, 33(1): 8-14.

[4] 张超,张庆茂,郭亮,等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光刻蚀工艺[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2751-2756.

ZHANG Chao, ZHANG Qingmao, GUO Liang, et al. Ablating process with 355nm laser for amorphous silicon thin-film solar cell[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(11): 2751-2756.

[5] NEDIALKOV N N, ATANASOV P A, SLIWINSKI G. Ablation of ceramics with ultraviolet, visible, and infrared nanosecond laser pulses[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 5120: 703-708.

[6] NADEEM H R. Femtosecond laser micromachining: current status and applications[J]. PIKEN Review, 2003, 50(9): 107-112.

[7] 郑亮,李良,张华,等. 基于激光旋切法的陶瓷材料盲孔加工方法研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(4): 62-66.

ZHANG Liang, LI Liang, ZHANG Hua, et al. Study on ceramic blind hole processing method based on laser rotation cutting[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(4): 62-66.

[8] 李喜琪,覃贤德,尹同芳,等. 紫外激光盲孔钻孔扫描方法研究[J]. 印制电路信息, 2013, 24(4): 170-175.

LI Xiqi, QIN Xiande, YIN Tongfang, et al. Study on the method of ultraviolet laser blind hole drilling and scanning[J]. Printed Circuit Information, 2013, 24(4): 170-175.

[9] 刘楠楠. 纳秒 YAG 脉冲激光烧蚀锗的等离子体特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.

LIU Nannan. Study on plasma characteristics of germanium ablation by nanosecond YAG pulse laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.

[10] 王伟民,郑春阳. 超强短脉冲激光在不同密度分布等离子体中的自聚焦[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 310-320.

WANG Weimin, ZHENG Chunyang. Self-

focusing of ultra-intense short laser pulses in plasmas with various density distributions[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 310-320.

[11] RUF A, BERGER P, DAUSINGER F, et al. Analytical investigations on geometrical influences on laser drilling[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(18): 2918-2925.

[12] 王威,林尚扬. 氧助激光切割钢板的氧分子离解新现象[J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 6-11.

WANG Wei, LIN Shangyang. Dissociation of oxygen molecules in oxygen assisted laser cutting steel plate[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 6-11.

[13] 李霞. Zr 基大块非晶合金弛豫和晶化过程研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.

LI Xia. Relaxation and crystallization of Zr based bulk amorphous alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.

[14] 周玉. 材料分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

ZHOU Yu. Material analysis method[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[15] 晏绪光,高文斌. 激光脉冲和工件参数对激光微孔加工质量的影响[J]. 应用激光, 1994, 14(3): 127-130.

YAN Xuguang, GAO Wenbin. The influence of laser pulse and workpiece parameters on the quality of laser micro hole machining[J]. Applied Laser, 1994, 14(3): 127-130.

[16] 华显刚,魏昕,周敏,等. 355nm 紫外激光加工 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的温度场和应力场仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 159-162, 165.

HUA Xiangang, WEI Xin, ZHOU Min, et al. Simulation analysis of temperature field and stress field of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics processed by 355nm UV laser[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2014 (12):159-162, 165.

[17] 黄东亚,陈晓虎,陈晓闽,等. 块状金属玻璃形成能力的研究与进展[J]. 稀有金属快报, 2006, 25(2): 1-5.

HUANG Dongya, CHEN Xiaohu, CHEN Xiaomin, et al. Research progress of bulk metallic glass forming ability[J]. Rare Metals Letters, 2006, 25(2): 1-5.

通讯作者: 李元成, E-mail: 1965204632@qq.com.

## Effect of Atmosphere on Processability of Blind Holes in Amorphous Alloys Processed by Ultraviolet Laser

LI Yuancheng, MAO Zhong, WANG Chenghao, CAI Min, ZHANG Wei, ZHANG Xiaobing  
(National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Processes, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** In order to obtain the effect of different atmospheres on the quality and efficiency of ultraviolet laser processing of blind holes in amorphous alloys, a concentric circular rotary cutting method was used to process blind holes in Zr–Cu amorphous alloys with nanosecond laser (355nm). The morphology, roughness and processing efficiency of blind holes were measured by optical microscopy, scanning electron microscopy and laser confocal microscopy. The results showed that the pressure and types of atmosphere affects the bottom morphology, processing quality and efficiency of blind hole. The smaller the pressure of atmosphere, the lower the surface roughness, and the higher the material removal efficiency. Compared with the processing in nitrogen and air, the surface roughness in oxygen is the smallest, and the material removal rate is the highest. In addition, there was no crystallization on the processed surface, which indicated that ultraviolet nanosecond laser can realize amorphous-processing of amorphous alloy.

**Keywords:** Ultraviolet laser; Nanosecond laser; Blind hole; Laser processing; Zr–Cu amorphous alloy; Surface quality  
(责编 思齐)

(上接第45页)

## Simulation and Experiments of Abrasive Assisted Electrochemical Jet Machining of SiC Reinforced Aluminum Matrix Composites

LIU Zhuang, QIU Yi, GUO Chao, GAO Changshui  
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** Silicon carbide reinforced aluminum matrix composites ( $\text{SiC}_p/\text{Al}$ ) exhibit excellent properties and performance in fields of aerospace, electronic packaging, precision instrumentation and automotive industry. The  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites are hard-to-machining materials due to different physical properties between reinforcement material and matrix material. This study investigated removal mechanism of the reinforcement in abrasive assisted electrochemical jet machining (AECJM) of  $\text{SiC}_p/\text{Al}$  composites through simulation and experiments. The results show that the lifetime of the bonding interface between SiC and matrix decreases in several orders of magnitudes with decrease of bonding area. The SiC reinforcement can be extracted out when bonding area drops off to a low level. This results in many micro pits left on the machining surface. The roughness of machining surface is highly relevant to numbers and size of these micro pits. Larger size or higher volume fraction of the reinforcement will result in rougher machining surface.

**Keywords:** Non-traditional machining; Compound machining; Abrasive assisted electrochemical jet machining; Silicon carbide reinforced aluminum matrix composites; Machining mechanism; Surface roughness  
(责编 思齐)