

基于激光旋切法的陶瓷材料盲孔加工方法研究

郑 亮, 李 良, 张 华, 黄红耀
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 介绍了激光打孔的基本原理, 对激光能量、离焦量、轨迹在激光旋切法加工盲孔过程中对孔形和表面质量的影响进行了分析和试验验证, 并给出了一般规律。依据试验结果确定了合理工艺参数, 采用旋切法在碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 (C/SiC) 上打出了孔径为 1 mm, 孔深为 1.1 mm, 锥度小于 15° 的盲孔。

关键词: 激光打孔; 旋切法; 碳化硅陶瓷; 盲孔

中图分类号: V261.8-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 04-0062-05

Study on ceramic blind hole processing method based on laser rotation cutting

ZHENG Liang, LI Liang, ZHANG Hua, HUANG Hong-yao
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The basic principle of laser drilling is introduced in this paper. The influence of laser energy, defocusing amount and trajectory during the ceramic blind hole processing on hole shape and surface quality was analyzed and verified in experiments. A general law is given. The rational process parameters were determined according to the test results. The rotation cutting was adopted to make the blind hole on C/SiC, whose diameter is 1 mm, depth is 1.1 mm and taper is less than 15°.

Keywords: laser drilling; rotation cutting; silicon carbide ceramic; blind hole

0 引言

碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 (C/SiC) 具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化、抗热烧蚀及质量轻等优点, 已开始应用于大推力液体火箭发动机喷管延伸段和姿轨控发动机推力室身部的制造。根据某型号发动机设计要求, 需在陶瓷基复合材

料上加工出孔径为 1 mm, 孔深为 1 mm, 锥度小于 15° 的盲孔。陶瓷基复合材料具有高硬性和高脆性特点, 机械加工性能差, 需要采用高能量的激光束进行非接触式加工。

激光是在空间上高度集中的光子流束, 应用光学聚焦技术可将激光聚焦在微米量级的极小范围内, 从而获得功率密度为 $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的激光束, 如此高的功率密度几乎可以对任何材料进

收稿日期: 2013-01-06; 修回日期: 2013-04-19

作者简介: 郑亮 (1986—), 助理工程师, 研究领域为精密、超精密加工

行激光打孔。这一技术早在 20 世纪 60 年代就应用在钻石打孔中, 后来有学者研究了不锈钢材料的激光打孔技术。但是利用激光在陶瓷基复合材料上打盲孔的研究未见报导, 因此有必要对陶瓷基复合材料的激光打盲孔技术进行研究, 使加工的盲孔满足使用要求。

1 激光打孔原理

激光打孔一般采用脉冲激光器, 高能量脉冲激光束通过聚焦系统聚焦在工件上, 在焦点处产生 $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ 的高功率密度的光斑, 该光斑照射到工件表面, 使照射区温度急剧升高, 材料熔化、汽化形成小孔。

采用脉冲激光器进行打孔, 激光的功率密度 I 是时间 t 的函数, 即:

$$I=f(t) \quad (1)$$

设材料对激光的反射系数为 R , 则材料吸收激光的热流密度为:

$$H=(1-R) \cdot I=(1-R) \cdot f(t) \quad (2)$$

随时间变化而变化。设 $t=0$ 时刻激光照射到工件表面, 根据固体热传导原理, 任意时刻 t , 材料表面以下深度为 x 处的温度为^[1]:

$$T(x,t)=\frac{\sqrt{\beta}}{k\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t'}} H(t-t') e^{-\frac{x^2}{4\beta t'}} dt' \quad (3)$$

式中: β 为扩散系数; k 为热导率; 函数 $H(t)$ 为随时间变化的热流密度; t' 为时间变量。为计算方便, 假定激光脉冲是持续时间为 τ , 峰值功率处在脉冲时间中点 $\tau/2$ 处的等腰三角形脉冲, 根据 (3) 式计算出工件表面 $x=0$ 处所能达到的最高温度为:

$$T_{\max}=\frac{3\sqrt{\beta}}{2k\sqrt{\tau}} E K \quad (4)$$

式中: $E=H_0\tau/2$ 为脉冲能量; H_0 为热流密度峰值, 即 $H_0=(1-R) \cdot I_0$; $K=0.819$ 为等腰三角形脉冲波的波形因子。

公式 (4) 表明: 激光加热工件的最高表面温度决定于材料常数 (k, β), 脉冲能量 E , 脉冲持续时间 τ 和波形因子 K 。最高温度 T_{\max} 与脉冲

能量 E 成正比, 与脉冲持续时间 τ 成反比。

激光打孔方法分为定点冲击法和旋切法。定点冲击法加工时, 激光束不变, 工件位置不变, 打出孔的孔径和深度受到激光能量和光斑大小的限制, 一般适用于加工直径小于 0.2 mm 的微型孔。旋切法加工时, 孔径不受限制, 可以加工孔径较大的孔。旋切法打孔的一般过程是激光束绕旋转中心做半径为 $D/2$ 的回转, 回转一圈或者多圈, 便在工件上切下一个孔径为 D 的通孔。旋切法打孔示意图见图 1。

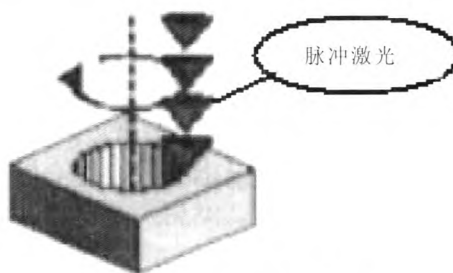


图 1 旋切法打孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of punching blind hole by rotary cutting method

2 旋切法参数对打孔质量的影响

激光旋切法常用于加工通孔, 为了利用旋切法在碳化硅陶瓷基复合材料上打出符合要求的盲孔, 需要研究激光能量、离焦量及轨迹对盲孔形状和质量影响的一般规律。

本文采用激光加工机 JKM-IGX-100P 进行打孔实验, 通过旋转光路系统中楔形棱镜使激光束绕中心线旋转来加工工件。激光功率为 0~15 J 可调, 激光脉冲频率为 200~500 Hz 可调, 脉冲宽度为 0.3 ms, 聚焦透镜的焦距为 50 mm, 辅助气体为氮气, 气压为 0~0.8 MPa 可调。加工试件材料为碳化硅陶瓷复合材料。加工后, 沿轴截面剖开, 用显微镜观察孔径、孔深和孔的锥度。

2.1 激光能量对打孔质量的影响

保持激光器电压、频率、离焦量和轨迹等参数不变, 以激光能量为变量, 研究激光能量对打孔质量的影响。激光能量分别调为 7 J, 9 J, 11 J, 13 J 及 15 J, 打出的盲孔实物图见图 2, 孔深和

孔径随激光能量变化曲线如图 3 所示。

采用旋切法打盲孔，激光能量是一个非常重要的参数，从图 2 可看出，孔深和孔径均随激光能量增大而增大。在其他参数不变的情况下，激光能量越大，激光束功率密度越大，根据公式(4) 计算可知材料表面最高温度越高，材料的汽/

液相比例也越大，在高温蒸汽作用下，蒸汽带着孔内液相熔融物从孔口喷出，使孔深不断增大^[2-3]。孔径也随激光能量的增大而增大，但是变化幅度没有孔深随激光能量变化明显，这是由于采用旋切法打盲孔，孔径主要由打孔轨迹决定。因此，可以通过减小激光能量来降低打孔深度。

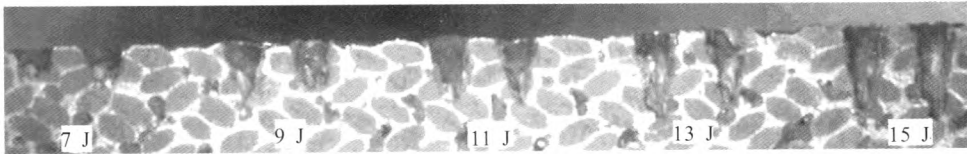


图 2 激光能量变化时,盲孔实物图
Fig. 2 Physical figure of blind hole when laser energy is changing

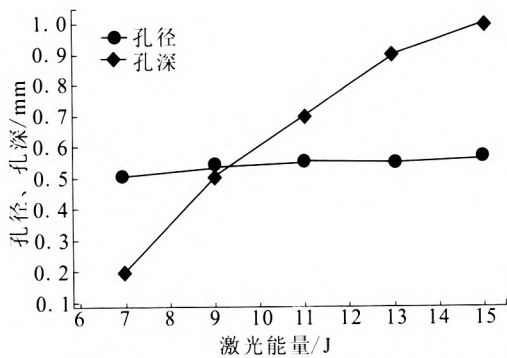


图 3 孔深、孔径随激光能量的变化曲线
Fig. 3 Variation of hole depth, aperture with laser energy

激光能量对孔口和孔壁的表面质量也有较大影响。当激光能量较低时，汽/液相比比例小，蒸汽的作用不足以使孔内的熔融物全部排除，熔融物会在孔口和孔壁二次凝固形成重铸层。重铸层的存在使孔口和孔壁表面粗糙度增加，甚至使孔形状发生变化，因此，要严格控制激光能量以减少重铸层对孔质量的影响。

2.2 离焦量对打孔质量的影响

在激光打孔中，材料表面与聚焦透镜焦点之间的距离称为离焦量。焦点在材料表面之上为正离焦量，焦点在材料表面之下为负离焦量。采用旋切法在陶瓷基复合材料上打盲孔，离焦量对孔深的影响也很大。图 4 为离焦量分别为 0.1 mm，0 mm，-0.1 mm，-0.2 mm 及 -0.3 mm 时，盲孔实物图，图 5 为孔深随离焦量变化曲线图。由试验得出：孔深随离焦量的变大而减小。当离焦量为负时，打出的孔较深；当离焦量为正时，打出的孔较浅。因为当聚焦透镜焦点处在材料表面以上时，材料吸收的光能较少，一般只因热传导产生轻微熔化，因此打出的孔较浅；当聚焦透镜焦点处于材料表面以下时，材料吸收的光能多，汽/液相比比例大，排除的熔融物多，因此孔较深。但是，当正离焦量过大或者负离焦量过大时，照射到材料表面的光斑尺寸很大，能量密度很低，材料表面温度达不到熔点，因此打不出孔。

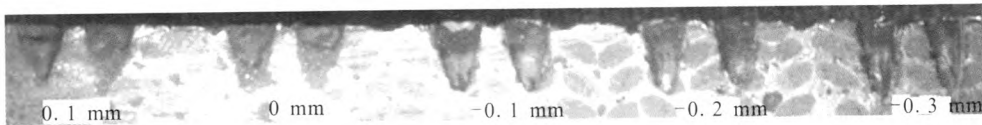


图 4 离焦量变化时,盲孔实物图
Fig. 4 Physical figure of blind hole when defocusing amount is changing

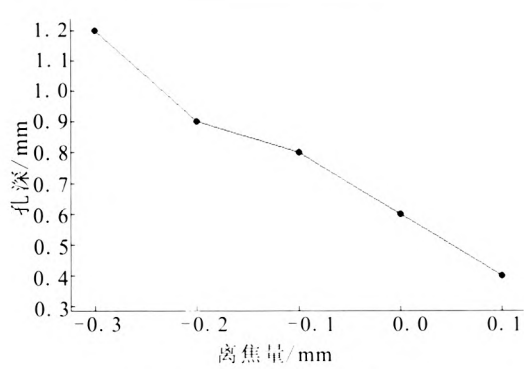
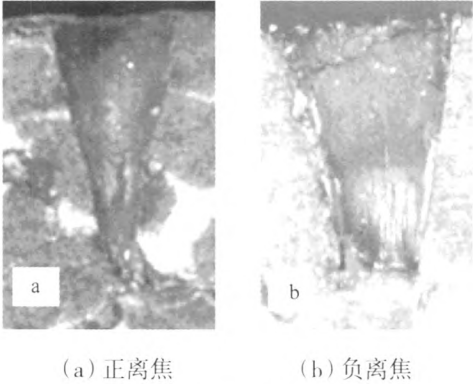


图 5 孔深随离焦量的变化曲线
Fig. 5 Variation of hole depth with defocusing amount

盲孔的锥度主要由离焦量来决定。当离焦量为正时，打出的盲孔锥度较大；当离焦量为负时，打出的盲孔锥度较小。这是因为激光焦点处的能量密度最大，激光能量以该点为中心向周围辐射，当焦点在材料表面以上时，能量从焦点处向下辐射的部分使材料发生熔化、汽化，激光能量逐渐衰减，最终形成较大锥度的孔；当焦点在材料表面以下时，能量以焦点为中心，近似对称的向上向下辐射的能量均使材料发生熔化、汽化，打出的孔的锥度较小。因此，可以通过采用负离焦来减小盲孔锥度。图 6 为分别在正离焦和负离焦情况下打出的盲孔实物图。



(a) 正离焦 (b) 负离焦
图 6 正负离焦量锥角对比
Fig. 6 Comparison of taper angles of positive and negative defocusing amount

2.3 轨迹对打孔质量的影响

采用激光旋切法打盲孔，孔径大小主要由激光束旋转轨迹决定。假定要求打孔直径为 0.5 mm，在理想状态下，即激光束直径可以忽略不计，激

光束绕直径为 0.5 mm 的圆旋转一圈，便可以切出直径为 0.5 mm 的环形孔，然后去除中间的残料，即可得到直径为 0.5 mm 的盲孔，如图 7 所示。实际中，激光束总是存在一定直径，同时考虑到热传导，实际旋转半径要小于 0.5 mm。

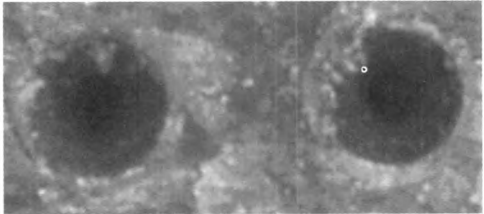
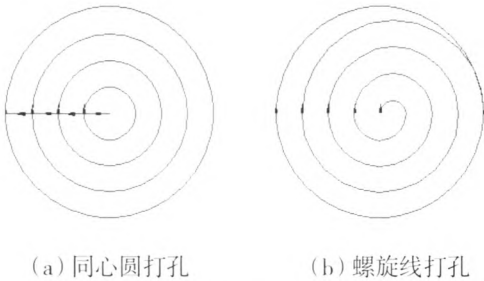


图 7 陶瓷试片上的盲孔实物图
Fig. 7 Blind holes on ceramic specimen

对于打圆形的盲孔，激光束旋转轨迹主要有同心圆和螺旋线两种，如图 8 所示。本文以同心圆轨迹编程进行打盲孔试验。同心圆轨迹编程需要优化在每一个圆上的旋转圈数，旋转速度、同心圆的密度等参数。旋转圈数影响盲孔深度和孔壁表面粗糙度，旋转圈数越多，孔越深，孔壁越光滑；旋转速度和同心圆密度影响整个材料的去除效果，因为材料熔化需一定的反应时间，旋转速度过快，材料来不及熔化就已经结束导致材料无法去除；同心圆密度过低，相邻圆之间的材料不能完全去除。此外，同心圆中最小圆的直径影响最终孔底质量，当最小圆直径过小时，激光近似在一点对材料进行烧蚀，这样容易出现孔底尖角。因此，可以根据材料特性和其他参数，合理选择最小圆直径，避免孔底出现尖角。图 9 为不同情况下打孔效果：图 9 (a) 旋转速度过快；图 9 (b) 同心圆密度过低；图 9 (c) 各参数均合适。



(a) 同心圆打孔 (b) 螺旋线打孔
图 8 激光束轨迹
Fig. 8 Trajectory of laser beam

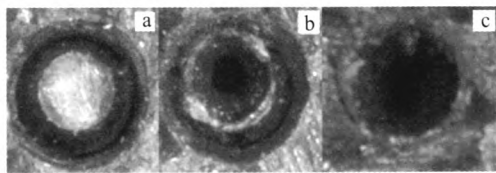


图 9 不同情况下打盲孔效果

Fig. 9 Blind holes made under different conditions

3 实验及结果

根据以上分析,本文采用激光旋切法在碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 (C_f/SiC) 上进行了打盲孔实验,要求盲孔孔径为 1 mm。深度为 1 mm,锥度小于 15° 。

F1.2	F0.9
G0 X0 Y0	G0 X-0.15 Y0
M11	G2 X0.15 Y0 I0 J0
G0 X-0.2 Y0	G2 X0.-15 Y0 I0 J0
M12	F0.6
G4 X0.5	G0 X-0.1 Y0
G2 X0.2 Y0 I0 J0	G2 X0.1 Y0 I0 J0
G2 X-0.2 Y0 I0 J0	G2 X-0.1 Y0 I0 J0
G2 X0.2 Y0 I0 J0	M22
G2 X-0.2 Y0 I0 J0	M21
G2 X0.2 Y0 I0 J0	M2
G2 X-0.2 Y0 I0 J0	

图 10 旋切法打孔程序

Fig. 10 Punching steps of rotation cutting

孔径—1 mm; 孔深—1.1 mm; 锥度— 12°

图 11 盲孔剖视图

Fig. 11 Section view of blind hole

实验时,首先调整离焦量使孔的锥度满足要求,然后调整激光能量使孔深满足要求,最后设计打孔轨迹使孔径满足使用要求。由于打孔轨迹

不仅影响孔径,还影响孔深,因此当打孔圈数增加时,要适当降低激光能量,使孔深保持不变。按照以上步骤最终确定的参数为:激光能量为 13 J,离焦量为 -0.2 mm,激光脉冲宽度为 0.3 ms,激光频率为 320 Hz,电压为 600 V,吹气气体为氦气,气压为 0.6 MPa,打孔轨迹为同心圆,程序见图 10,打出的盲孔剖视图见图 11。

4 结论

1) 本文对激光能量、离焦量及轨迹在激光旋切法加工盲孔过程中对孔形和表面质量的影响进行了分析和试验验证。

2) 依据试验结果对激光旋切法打盲孔的工艺参数进行优化,在碳纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料 (C_f/SiC) 上打出孔径为 1 mm,孔深为 1.1 mm,锥度小于 15° 的盲孔,满足了使用要求。

参考文献:

- [1] SCHULZ-DUBOIS E O, STITCH M L. Laser handbook[M]. [S.l.]: North-Holland Publishing Company, 1973.
- [2] 张银江,方鸣岗.陶瓷激光精密打孔工艺研究[J].激光与红外,2001 (3): 161-162.
- [3] 史进,张晓兵,杨贺来.陶瓷喷嘴 Nd:YAG 激光精密打孔应用研究[J].机械制造,2005 (8): 36-38.
- [4] 朱企业.激光精密加工[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [5] 水金城,陈武军.微米级微孔激光打孔的研究[J].应用激光,1994 (3): 124-126.
- [6] 晏绪光,高文武,杨水其.激光脉冲和工作参数对激光微孔加工质量的影响[J].应用激光,1994 (3): 127-130.
- [7] 魏柯,麦捷夫.激光工艺与微电子技术[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [8] 史进,杨贺来,张晓兵.陶瓷小孔激光精密加工新方法应用研究[J].应用激光,2005 (3): 132-135.
- [9] 郭昉,田欣利,杨俊飞.非金属硬脆材料的先进孔加工技术研究进展[J].工具技术,2010 (10): 35-38.
- [10] 荣烈润.激光微细孔加工技术及应用 [J].机电一体化,2003 (6): 120-124.
- [11] 郭文渊,王茂才,张晓兵.镍基超合金激光打孔再铸层及其控制研究进展[J].激光杂质,2003 (4): 151-153.

(编辑:马杰)