

激光切割加工叶型孔工艺研究

宋一凡 丁殿强

(北京航天三发高科技有限公司, 北京 100074)



摘要: 以激光切割技术加工航天涡扇发动机内外壳体叶型孔为背景, 通过对补偿方式、拐角烧伤、锥度控制以及切口质量等工艺问题设计实验, 得到较优的工艺方法及工艺参数, 利用此工艺实现了叶型孔尺寸精度和切口质量的双重控制, 且叶型孔的加工成功率高, 在后续与叶型钎焊工序中焊接质量好。

关键词: 激光切割; 叶型孔; 尺寸精度; 切口质量

Research of Laser Cutting Technology for Leaf-shaped Holes

Song Yifan Ding Dianqiang

(Beijing Sanfa High Technology Co. of CASIC, Beijing 100074)

Abstract: Laser cutting technology is widely employed to process the leaf-shaped holes on the internal and external shells of aerospace turbfan engines. In this work, the compensation method, the burn of corner, the control of conical degree and the cutting quality are taken into consideration to design the experiments and the optimum processing methods and parameters are obtained for this laser cutting technology. Both the dimensional precision and the cutting quality of the leaf-shaped holes are achieved by the optimized technology and a high processing rate is achieved as well. Furthermore, excellent welding quality was kept during the subsequent leaf-shaped soldering and welding.

Key words: laser cutting; leaf-shaped hole; dimensional precision; cutting quality

1 引言

机匣类零件大多是由内外壳体与叶片钎焊构成的, 内外壳体零件上大量叶型孔需要加工后与叶片钎焊。某静子机匣零件的结构特点如图1所示, 其叶型孔的结构特点和主要尺寸如图2所示。

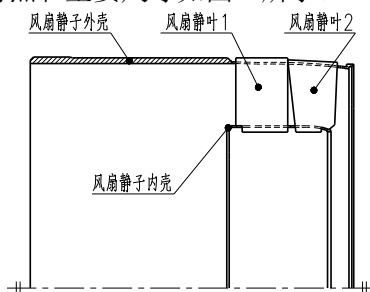


图1 静子机匣结构图

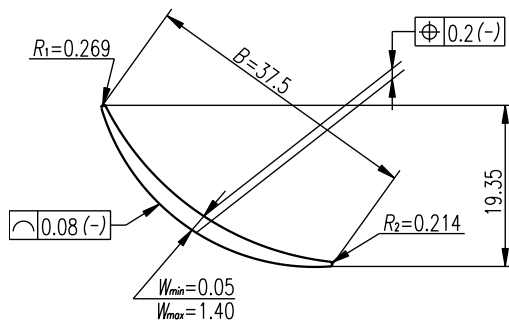


图2 静子机匣叶型孔典型结构及主要尺寸要求

叶型孔的传统加工方法采用冲孔法、数控冲压法以及线切割加工。冲孔法存在叶型孔前后缘处互换性

差的缺陷；数控冲压法则存在最小冲压曲率半径难以满足现代发动机叶片需求以及冲头易磨损的缺陷；线切割则存在重铸层厚度难以控制，加工效率低的缺陷。而激光切割因其精度高、速度快的优点，正在逐渐得到广泛运用。

叶型孔在技术指标上要满足线轮廓度不大于 0.03mm 以及重铸层不大于 0.03mm 的要求。通过实验来研究激光切割加工叶型孔的工艺，并实现叶型孔的尺寸精度和切口质量的双重控制。

2 实验材料及设备

实验设备采用 CNC 激光加工单元，该设备配有 5 轴加工机床和 P50 型激光器，激光器平均功率为 250W。实验材料牌号及厚度选用分别为：1Cr11Ni2W2MoV/1.0mm、GH648/1.0mm、TC11/1.0mm。

3 实验方法及结果分析

3.1 尺寸精度实验

3.1.1 补偿方式和补偿量

激光切割中常用的补偿方式有变量补偿、公式补偿、刀具补偿。变量补偿在程序中最容易实施，但难以保证复杂型面的一致性。公式补偿适用于对零件变形进行补偿，不适用于叶型孔加工。因此采用刀具补偿方式。

为了选择合适的补偿量，在程序中设定 9 个补偿量，在试片上一次完成切割，选取满足装配间隙要求的补偿量记录下来，此即完成了初次补偿量选择；然后以此补偿量为基础在实验件上进行微调实验确定最终补偿量，补偿量实验试片见图 3。



图 3 叶型孔补偿量实验试片严示意图

3.1.2 拐角烧伤问题解决

拐角烧伤的控制主要在于拐角处切割速度与激光功率之间的匹配。由于电机本身加速度限制，导致拐角处切割速度难以达到非拐角处切割速度，激光功

率如不随之调整，此处的能量输入必然增加，加之拐角处散热较差，且此处冷却效果不理想，从而导致拐角处出现烧蚀。设备具备一种称为“光滑作用”的功能，采用命令语句“G86”设定光滑作用的个数和拐角直径最大误差值，使设备根据降低后的切割速度自动调整设备功率（主要是调整激光频率）使二者达到协调一致，最终选择的值为：G86N35D0.01。

3.1.3 锥度控制实验

锥度控制取决于两个因素，一是透镜本身焦深是否满足要求，设备配有 127mm 和 200mm 两种透镜，焦深分别为 8mm 左右和 15mm 左右，均满足切割厚度要求。通过理论分析和对比实验，发现透镜焦距越小，光斑能量密度越高，切口质量越好，所以我们选择 127mm 透镜；二是偏焦量 (Δf) 的选择，所谓偏焦量是工件表面与透镜焦平面的距离，焦平面在工件表面上方的 Δf 为正，否则为负。偏焦量不但影响锥度，而且影响零件表面的光斑功率密度，对切口质量有明显影响。选择合适偏焦量的前提在于准确测量透镜焦距。常用的几种测焦方法包括：打印法、斜板法、蓝色火化法等。实验采用打印法：选取一块标准试块（1mm 厚不锈钢板），从理论焦距（5mm）起始，喷嘴到平板距离以 0.5mm 为间隔逐渐提升打点，选取孔径最小孔，此时喷嘴到平板距离即为焦距。实验过程中应逐步减少移动范围和移动间隔，直至找出满意焦距为止。找准焦距之后，需进一步确定偏焦量（即焦点位置），切口锥度与焦点位置之间关系见图 4，可以看出对于 2mm 以内薄板切割焦点位置选择相对宽松，最终焦点位置确定以喷嘴距离零件表面距离（在切口质量控制实验中确定）为准。

3.2 切口质量控制实验

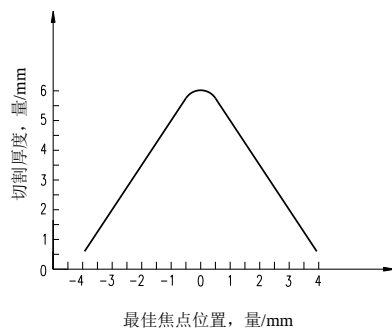


图 4 切口锥度与焦点位置关系示意图

影响激光切割切口质量因素众多，包括透镜焦距、辅助气体（种类、压力）、喷嘴距零件表面距离、

激光参数（焦耳能量、脉冲频率、脉冲宽度、光束直径等）、切割速度等。透镜焦距和辅助气体种类对切口质量的影响，采用简单对比实验法确认，实验发现在其它因素不变的前提下，透镜焦距越小切口质量越好；氩气作为辅助气体表面重铸层最小。最终选定使用 127mm 透镜，综合考虑切割效率以及切口毛刺和挂渣等因素，决定使用氧气作为辅助气体。其它因素的优化选择采用正交实验法。其中脉冲频率、脉冲宽度、光束直径、切割速度等因素可以综合为“点距”一个因素，其数学关系式如下：

$$d1=d0\times(1-s/(60\times p\times d0))$$

其中 $d0$ ——光斑直径， $d1$ ——点距（即两个脉冲之间的距离）， p ——脉冲频率， s ——切割速度（mm/min）。

而 $d0$ 又由以下公式决定：

$$d0=(4\lambda/\pi)\times(f/D)$$

其中 λ 代表激光波长（实验设备为 1.06μm）， f 代表透镜焦距（实验透镜为 127mm）， D 代表光束直径（可以自行设定），此外脉冲宽度也直接影响光斑直径 $d0$ 。经过理论处理之后只剩下点距、脉冲能量、喷嘴距离零件表面距离、辅助气体压力 4 个因子（分别以 A、B、C、D 代表），同时根据经验为这 4 个因子分别设定了 3 个水平因素，具体见表 1。

表 1 实验因子及水平表

因子 水平	点距 A/mm	脉冲 能量 B/J	喷嘴距零件表 面距离 C/mm	辅助气体 压力 D/MPa
1	0.105	2.3	0.5	0.4
2	0.09	3.5	1.0	0.6
3	0.075	4.7	1.5	0.8

据此我们选用了 L9(34)正交实验表，共需进行 9 次实验，L9(34)实验表见表 2，本次实验实验方案及实验结果见表 3。从表 3 中我们可以得出以下结论：

- a. 组合 2 和组合 3 本身是较优组合，满足要求；
- b. 最优组合为 A₁B₃C₃D₂；
- c. 在 4 个因子中，其中点距和喷嘴距离零件表面距离对重铸层影响最大，而辅助气体压力和脉冲能量影响次之。

表 2 L9(34)实验表

行号	列号			
	1	2	3	4
	水平			
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	1	1

表 3 实验方案及实验结果

实验号	水平组合	实验条件				实验结果 重熔层/mm
		点距 A/mm	脉冲能量 B/J	喷嘴距零 件表面距 离 C/mm	辅助气体 压力 D/MPa	
1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	0.105	2.3	0.5	0.4	0.04
2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	0.105	3.5	1.0	0.6	0.02
3	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	0.105	4.7	1.5	0.8	0.015
4	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	0.09	2.3	1.0	0.8	0.05
5	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	0.09	3.5	1.5	0.4	0.04
6	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	0.09	4.7	0.5	0.6	0.05
7	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	0.075	2.3	1.5	0.6	0.04
8	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃	0.075	3.5	0.5	0.8	0.08
9	A ₃ B ₃ C ₁ D ₁	0.075	4.7	0.5	0.4	0.03

4 结束语

以机匣类零件为背景，通过实验对激光切割工艺进行研究，得到合理的工艺方法及工艺参数，加工得到的叶型孔能够保证较高的尺寸精度和较好的切口质量，而且叶型孔的加工成功率高，在后续与叶型钎焊工序中焊接质量好。

参考文献

1 张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京：化学工业出版社，2006

2 杜翔. 航空发动机叶型孔的激光切割方法[J]. 航空制造技术，1995(1): 26~27