

蜂窝板预埋件优质高效制孔研究

刘连军 张余升 唐春英 王伟锋

(上海航天设备制造总厂, 上海 200245)



摘要: 从钻孔方式、切削参数、刀具选用等方面对蜂窝板制孔加工进行研究, 并在数控机床上进行实验验证。通过对切削温度、埋件鼓出量、加工效率三方面进行考量, 最终找出蜂窝板制孔最优的加工方式。

关键词: 蜂窝板; 制孔; 切削参数; 加工效率

Research for Drilling Holes on Embedded Parts of Honeycomb Board with High Quality and Efficiency

Liu Lianjun Zhang Yusheng Tang Chunying Wang Weifeng

(Shanghai Aerospace Equipment Manufactory, Shanghai 200245)

Abstract: Drilling holes on embedded parts of honeycomb board is researched from several aspects, such as drilling methods, cutting parameters, tool selection and so on. Experiments are carried out on the numerical control machine tool on consideration of the cutting temperature, the amount of bulge of embedded parts and the production efficiency. The optimal method for drilling holes on embedded parts of honeycomb board was finally found out.

Key words: honeycomb board; drill hole; cutting parameters; processing efficiency

1 引言

蜂窝板是由上下面板和蜂窝芯子胶结而成, 面板主要有碳面板和铝面板两种类型, 具有质量轻、强度高、抗冲击、隔热等优点^[1~3], 在航天领域得到大量应用, 例如运载有效载荷整流罩、太阳能电池翼基板、卫星平台框架等^[4~6]。

蜂窝板主要为相关仪器设备提供机械接口, 设备仪器通过机械接口安装在平台结构上。需在蜂窝板接口位置处安放预埋件, 设备安装孔的孔位及孔径精度较高, 而预埋件位置精度较差, 无法满足使用要求, 现只能通过后续机加工的方式满足最终要求。

蜂窝板面板一般选用 0.3mm 厚的铝面板或 0.3mm 厚的碳纤维面板, 安装孔径一般在 $\Phi 8\text{mm}$ 以下。在钻孔过程中, 因零件刚性较差, 在切削力的作用下, 很容易导致预埋件从反面鼓出、跟转等现象。而零件一旦出现以上问题, 整块蜂窝板轻则返修, 重

则报废, 该问题已成为制约蜂窝板加工质量与加工效率的瓶颈。在零件结构无法改变的情况下, 为解决该问题, 只能通过提高主轴转速、降低进给速度来达到降低切削力的目的, 也因此进一步降低了加工效率。

2 机加工制孔实验方案

2.1 蜂窝板埋件制孔特点

蜂窝板的预埋件制孔与普通金属件制孔相比, 主要特点:

a. 蜂窝板所有预埋件上均预钻有 M3 初孔, 孔深 8mm。该孔为蜂窝板制作时埋件定位孔, 不可省去。而该孔位置精度差, 一般在 0.3mm 左右, 无法作为钻头引导孔。需在理论位置上重新制导引孔, 并想办法避免原预钻孔对钻头的导引作用。

b. 蜂窝板外形尺寸通常较大, 部分尺寸达 4m 以上, 加工过程中中间部位刚性差, 震动十分严重, 一

作者简介: 刘连军 (1985-), 硕士, 机械制造专业; 研究方向: 航天复合材料机械加工。

收稿日期: 2014-07-29

旦切削频率与蜂窝板固有频率发生共振，极有可能出现蜂窝板内部缺陷，同时也影响孔的加工质量。

c. 蜂窝板需要机加工的孔，少则几十个，多则上千个，目前采用的加工策略是将进给速度降低至10mm/min 左右，加工效率极其低下，很大程度上增加了零件加工成本，所以在保证质量的前提下，效率的提升显得尤为重要。

d. 蜂窝板加工过程中不得使用切削液或者煤油等冷却方式，虽然可采用吹气冷却，但冷却效果远不如常规冷却方式，而固定埋件大多采用 J78 发泡胶，该发泡胶软化温度为 90°，一旦发泡胶软化将导致预埋件产生松动。

2.2 实验方案制定

实验选用某卫星型号的铝合金蒙皮蜂窝板为实验对象，蜂窝板整体厚度为 30mm，面板厚度 0.3mm，加工内容为直径 Φ8mm 深 28mm 的孔，蜂窝板上已有 M3 深 8mm 预钻孔，现制定以下几种加工方案：

方案一：使用平底钻直接钻孔。平底钻无定位尖点，钻孔时不受预钻孔引偏，因此无须制作导引孔，蜂窝板的加工效率将能得到很大提升。而平底钻钻削过程中两条切削刃直接接触工件，大多数平底钻是由麻花钻通过手动复磨改制而成，无法保证切削刃的平面度，导致接触工件后平底钻打滑，制孔直径容易变大。本试验采购一批平底钻，不使用复磨改制的，刀具材料选用硬质合金。参数实验选用单因素试验法，具体参数如表 1。

表 1 方案一试验参数表

刀具轴向进给速度 F=15/(mm min ⁻¹)					
刀具主轴转速 S/(r min ⁻¹)	1000	2000	3000	4000	5000
刀具主轴转速 S=2000/(r min ⁻¹)					
刀具轴向进给速度 F/(mm min ⁻¹)	5	15	30	45	70

方案二：使用螺旋铣削方式制孔。螺旋铣孔可以很好地保证孔径尺寸，铣削代替钻削，铣削的平稳性较好，螺旋铣削孔径内壁表面质量较高^[7]，并且螺旋铣削的轴向切削力小于钻削，能够很好地避免预埋件鼓出现象。选用直径 Φ6mm 刀具为硬质合金立铣刀，采用螺旋铣削的方式进行加工。

该实验方案采取与方案一相同的最外侧线速度与加工效率，可以在加工效率和周向切削力相同的情况下，比较两种方案加工效果。螺旋铣削铣刀最外侧线速度为：

$$V_m = \frac{S_z D_m}{a} + \frac{F_g D}{a}$$
 (1)

式中：S_z——刀具自转速度；F_g——螺旋线公转速度；D_m——刀具直径；D——孔径；a——固定常数传统钻孔外侧线速度为：

$$V_d = \frac{S_d D_d}{a}$$
 (2)

而当两者加工效率相同时螺旋制孔与钻削制孔刀具运动速度之间的关系为：

$$F_d = F_g \times a_p$$
 (3)

式中：F_g——螺旋线公转速度；a_p——螺距。

根据以上三个公式可计算出当螺距为 0.5mm 时，每组参数对应的螺旋铣转速、刀具进给速度。对应的参数见表 2。

表 2 方案二实验参数表

公转进给速度 F _g =30/(mm min ⁻¹)					
刀具主轴转速 S _z /(r min ⁻¹)	1308	2641	3975	5308	6642
刀具主轴转速 S _z =2641/(r min ⁻¹)					
螺旋线公转速度 F _g /(mm min ⁻¹)	10	30	60	90	140

方案三：采用立铣刀与麻花钻配合制孔。为避免使用麻花钻制孔被 M3 预钻孔引偏，首先在理论位置上加工导引孔，然后再使用麻花钻的加工方式。刀具选用硬质合金立铣刀和硬质合金钻头。以 Φ8mm 孔为例，首先使用 Φ5mm 的立铣刀钻深 6mm 的导引孔，导引孔制作过程中因加工深度浅，该阶段从未出现预埋件鼓出和跟转等现象，选取经验值 S=4000r/min，F=20mm/min。Φ8mm 麻花钻完成后续加工，麻花钻实验参数与方案一一致。

3 实验结论

影响蜂窝板预埋件鼓出及跟转的主要因素为轴向切削力、切削温度。轴向切削力主要受轴向进给速度影响，进给速度越快，切削力越大，埋件从反面鼓出量越大。切削温度主要由机床主轴转速决定，转速越高，发热越大，本次试验中采用红外热像仪测量孔径外侧区域温度最高值。

3.1 方案一实验结果

采用平底钻直接加工，当主轴转速恒定，进给速度提高时，对切削温度影响较小，但会增加轴向切削力导致埋件鼓出。如图 1 所示，当进给速度增至

45mm/min 时,预埋件开始从反面鼓出。但进给速度为超低速 5mm/min 时预埋件也从反面有轻微鼓出,而此时刀具前角磨损严重,鼓出原因经分析应为刀具磨损后刀具变钝,导致轴向切削力增大。从而可知不可一味地降低进给速度来减小切削力。

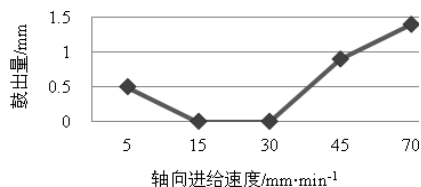


图1 方案一埋件鼓出量与进给速度关系

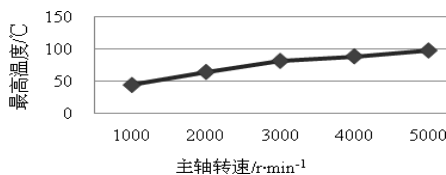


图2 方案一主轴转速与最高切削温度关系

机床进给速度不变,主轴转速提高的情况下,轴向切削力越来越小,切削温度越来越高。如图2所示,切削温度随着转速的增加而提高,当转速升至4000r/min时,温度已经达到80°,已接近发泡胶软化温度。转速增加至5000r/min时,出现预埋件跟转现象。

经过实验总结加工参数最合理的组合为 $S=2000\text{r/min}$; $F=30\text{mm/min}$, 最终加工完成的孔径为 $\Phi 8.03\text{mm}$ 。孔深28mm,耗时76s。

3.2 方案二实验结果

采用螺旋铣削的加工方式,如图3所示,主轴转速不变,轴向进给速度增加后,埋件鼓出量有增加趋势,但明显优于平底钻直接钻孔的加工方式,并且在超低速下也没有出现埋件鼓出的现象。

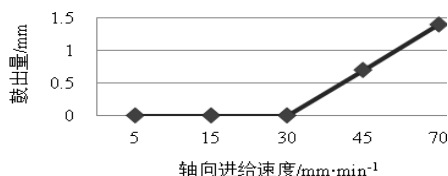


图3 方案二埋件鼓出量与进给速度关系

如图4所示,在进给速度不变,转速增加时,温度随着转速的增加而增加,但相同外侧线速度的情况下温度比平底钻高。原因为铣削过程中主轴转速高于平底钻直接加工,并且立铣刀排屑不畅,热量无法被铝屑带走,而是堆积在小孔内,导致切削温度更高。

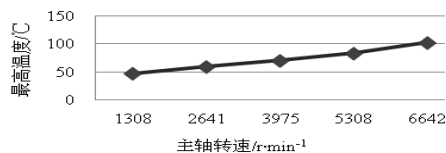


图4 方案二主轴转速与最高切削温度关系

螺旋铣削加工方式对孔径控制较好,可通过修改刀补的方式补偿刀具周向磨损量,最终孔径为 $\Phi 8.01\text{mm}$ 。但加工中出现多次立铣刀折断的现象,原因为排屑不畅,堆积在小孔内,而刀具长径比较高,导致刀具极易折断。最优的切削参数为 $S_z=2462.5\text{r/min}$; $F_g=30\text{mm/min}$ 。加工深度为28mm的螺纹底孔,耗时56s左右。

3.3 方案三实验结果

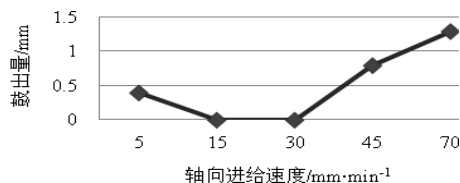


图5 方案三埋件鼓出量与进给速度关系

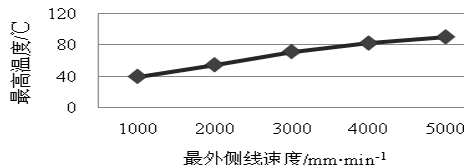


图6 方案三主轴转速与最高切削温度关系

在埋件鼓出与切削温度方面,方案三与方案一基本一致。但麻花钻在加工导引段处时切削震动十分严重,深度超过导引段后,切削趋于平稳。

经测量,方案三孔口直径明显大于底部直径,孔口直径为 $\Phi 8.07\text{mm}$,底部直径 $\Phi 8.03\text{mm}$,经分析,孔口直径的增加主要原因为导引段钻削加工时出现明显切削震动,将孔加工超差。该方案最合理的参数组合为 $S=2000\text{r/min}$; $F=30\text{mm/min}$,切削时间为76s,每个孔制作导引孔时间为30s,合计耗时106s。

4 讨论

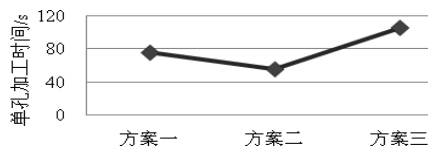


图7 三种方案加工效率对比

根据图 7 可知加工效率最高的为螺旋铣削, 但铣削过程中细长刀容易折断, 而一旦出现刀具折断在蜂窝板内部, 将导致蜂窝板报废, 并且该方案无法加工深孔, 立铣刀长径比达到 5 以上时, 切削十分困难。方案三加工效率最低, 并且孔口直径超差问题无法避免, 也不是可取方案。

选用平底钻直接加工效率较高,通过实验得出最优优化参数为 $S=2000\text{r/min}$, $F=30\text{mm/min}$,在该参数下切削平稳,可以很好地避免埋件鼓出跟转等问题。该加工方法已在多个型号的蜂窝板内已得到了验证,可以高效地完成蜂窝板制孔工作。

5 结束语

a. 通过三种加工方法的比较, 得出使用平底钻制孔为蜂窝板预埋件制孔最佳方案。

b. 通过实验得出最优的切削参数为机床主轴转速 $S=2000\text{r/min}$, 进给速度 $F=30\text{mm/min}$ 。与之前首先使用立铣刀制导引孔, 之后使用麻花钻低进给加工的方

(上接第 43 页)

对 1Cr18Ni9Ti, 计算滚压用量, 条件是要求表面粗糙度 $R_a=0.32\mu\text{m}$, $R_z=1.6\sim 0.8\mu\text{m}$, 根据《金属机械加工工艺人员手册》表 5-43^[5]查得: 滚压前球体表面粗糙度 $H_0=5\mu\text{m}$, 滚珠直径 $d=8\text{mm}$, 滚压力 $P=300\text{N}$ 。

计算滚压力: 已知球体直径 $D=130\text{mm}$, 滚珠直径 $d=8\text{mm}$, $D/d=16.25>10$, 则滚压力可由式 (8) 计算^[5]:

$$P = \left[\frac{D\rho}{0.054E \left(\frac{D}{d} - 1 \right)} \right]^2 \rho \times 10 \quad (8)$$

式中, ρ 为最大接触应力, N/mm^2 , $\rho=(1.8\sim 2.1)\sigma_s$, 所以:

$$P_{\min} = \left[\frac{130 \times 1.8 \times 205}{0.054 \times 2.09 \times 10^5 \times 15.25} \right]^2 \times 1.8 \times 205 \times 10$$

$$= 286.6 \text{ N}$$

$$P_{\max} = \left[\frac{130 \times 2.1 \times 205}{0.054 \times 2.09 \times 10^5 \times 15.25} \right]^2 \times 2.1 \times 205 \times 10$$

$$= 455.2 \text{ N}$$

从计算结果来看, 滚压力计算值最小为 286.6N, 最大为 455.2N, 与查表得到的 $P=300\text{N}$ 的结果相符,

案相比，效率提高三倍左右，刀具寿命增长2倍左右。

c. 钻孔过程中进给速度的降低不一定会减小切削力, 反而因为刀具磨损加快, 容易导致切削力的突然增加。

参考文献

- 1 陈昌亚, 宋汉文, 王德禹, 等. 卫星结构铝蜂窝板非线性振动试验与参数辨识研究. 振动与冲击, 2004
- 2 刘玉军, 蒋荃, 胡云林. 铝蜂窝复合板的发展及标准制定. 标准研讨, 2010
- 3 韩转英. 复合材料结构连接形式与强度研究. 航天技术与民品, 1998
- 4 马立, 田浩. 超高模量碳面板/铝蜂窝结构板后埋孔机加方法. 航天制造技术, 2003
- 5 潘玲英, 孙宏杰. 共固化复合材料/铝蜂窝夹层结构性能. 宇航材料工艺, 2012
- 6 黄晓斌, 叶玉刚. 铝蜂窝的性能特点及其加工方法. 机械管理开发, 2005
- 7 王奔, 高航, 毕铭智, 等. C/E 复合材料螺旋铣削制孔方法抑制缺陷产生的机理. 机械工程学报, 2012

因此, 可以初步设定滚压力的大小为 300N。

4 结束语

旋转滚压是一种新的滚压硬化工艺,具有一般滚压加工所具备的工艺简单、加工成本低、效率高的特点。其特殊的几何运动轨迹能够满足球面的滚压加工。本文通过分析其运动方式对加工的球体表面粗糙度进行了分析,初步确定了滚压转速,并对滚压力进行了计算,为旋转滚压工艺的工装设计和实际的滚压加工试验提供了参考。

参考文献

- 1 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 2 夏国顶. 金属密封球阀硬化工艺概述[J]. 机械研究与应用, 2010(1): 108~109
- 3 程通模. 滚压和挤压光整加工[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 4 赵婧, 夏伟, 李风雷, 等. 滚压表面强化机理的研究现状与进展[J]. 工具技术, 2010(44): 3~8
- 5 赵如福. 金属机械加工工艺人员手册[M]. 上海科学技术出版社, 1990