

# Ti/Al叠层结构低频振动制孔 试验研究\*

杨浩骏<sup>1,2</sup>, 陈燕<sup>1,2</sup>, 徐九华<sup>1,2</sup>, 张永升<sup>1,2</sup>

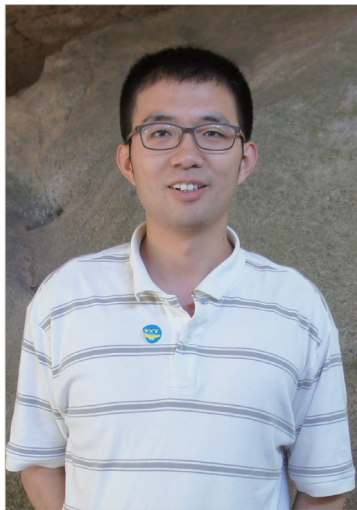
(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

**[摘要]** 钛合金与铝合金叠层构件的装配孔制备过程中存在孔壁质量差、尺寸超差等问题,为解决该问题,开展了低频轴向振动扩孔、铰孔与传统扩孔、铰孔的对比试验,重点分析了其在切屑形态、加工质量等方面的差异。结果表明,振动制孔技术能够产生C形或发条形切屑,利于切屑排出,减小铝合金孔壁的划伤。使用振动辅助技术进行一次扩孔与一次铰孔后,钛合金与铝合金孔壁粗糙度均可低于 $R_a 0.6 \mu\text{m}$ ,孔径精度可满足H7公差等级,出口毛刺高度小于 $200 \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 叠层结构; 钛合金; 铝合金; 制孔

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.016



杨浩骏

南京航空航天大学机电学院博士研究生,主要研究方向为高效精密制孔技术。

作为飞机结构最常见的两种材料,钛合金与铝合金的材料使用量占飞机总重量的50%左右,其中钛合金与铝合金装配孔是在叠层状态下进行加工。螺栓连接可在维修时快速进行结构拆分,所以这是飞机装配过程中常见的连接方式。飞机装配过程中,重要部件的装配精度直接影响着飞机的疲劳强度与可靠性,因此装配孔的孔位精度、孔径精度和表面质量要求较高,需要通过扩孔与铰孔配合的精加工工艺进行制备。由于主承力结构装配孔直径一般大于10mm,孔深超过50mm,因此现行工艺方法需要装配之前预钻底孔,装配时需要多次扩孔与铰孔以满足表面粗糙度、孔径公差的精度要求,然而这种方法不仅耗时,而且坚硬的钛合金切屑极易划伤铝合金表面,造成制孔质量差的问题,有时切屑甚至会堵塞排屑槽逼停主轴<sup>[1]</sup>。

振动辅助制孔技术自20世纪中

旬出现以来,得到了广泛的研究。作为振动切削的一个重要分支,它与普通钻削的区别在于制孔过程中通过振动装置使钻头与工件之间产生可控的相对运动。其中,轴向振动易于实现,工艺效果良好,在振动制孔中占主导地位。Sanda<sup>[2]</sup>采用超声振动的方法,分别对碳纤维增强复合材料(CFRP)与TC4材料进行制孔加工。结果表明:相比传统钻削,超声振动钻削能够有效降低两者的钻削力,并提高CFRP的加工质量、降低了TC4的出口毛刺。Dahnel<sup>[3]</sup>对比了在切削速度为25m/min、50m/min和75m/min,进给量为0.05mm/r,振幅为 $5.7 \mu\text{m}$ ,频率为39kHz时,超声振动辅助钻削与传统钻削在加工CFRP/TC4叠层结构的加工质量与刀具磨损方面的差异,其认为相比传统钻削,超声振动辅助钻削能够减少刀具磨损、降低轴向力。法国Mitis公司进行了低频振动

\*基金项目: 辽宁省航空联合基金(2014028024)资助; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16\_0318)资助; 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20160514)。

辅助钻孔(Low Frequency Vibration-Assisted Drilling, LfVAD)工艺研究,结果表明:相比传统钻削,LfVAD能有效地提高CFRP孔的已加工表面质量,且具有消耗功率少、生产效率高优势<sup>[4-5]</sup>;此外,Pecat<sup>[6-7]</sup>对TC4/CFRP/TC4叠层结构进行了LfVAD的研究,研究表明LfVAD能够在微量润滑情况下,使得钛合金的钻削温度从173℃降低为98℃,钛合金切屑形态得到较好控制,孔壁损伤情况减少明显,并且由于其钻削温度的降低,使得刀具表面的钛合金粘附也大幅减少。张翼振<sup>[8]</sup>与邢立华<sup>[9]</sup>分别就振动铰孔技术对表面粗糙度的影响进行了探讨,研究表明:对于356-T6铝合金铸件与45钢而言,在适合的振动参数下,振动铰孔技术能够有效地改善被加工工件的表面粗糙度与孔径精度。

本研究的主要目的是评价振动加工对Ti/Al叠层结构精密制孔质量的影响。考虑到低频振动技术在切屑形态控制方面的特点,本文首先对振动加工与传统加工在切屑形态上的差异进行了比较,明确了振动加工的稳定断屑能力;进而对比分析了低频振动制孔与传统制孔在加工质量方面的差异及低频振动制孔对加工质量改善的作用机理,最终得出了低频振动辅助制孔技术能够有效提高Ti/Al叠层结构制孔质量的结论。

### 试验设备及工件

钻削试验采用TC4钛合金与2B06铝合金作为试验材料,材料属性见表1。钻削试验工装如图1所示,40mm厚钛合金材料置于上层,10mm厚铝合金材料位于下层。

表1 试验材料性能表

材料	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	延伸率/%
钛合金-TC4	950	113	4.43	10
铝合金-2B06	427	72.4	2.79	15

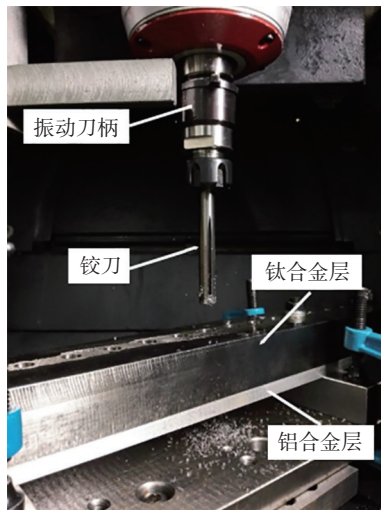


图1 工装形式  
Fig.1 Experimental setup

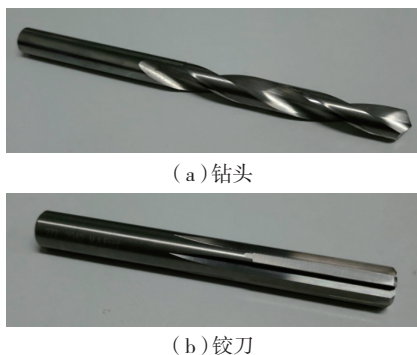


图2 制孔工具  
Fig.2 Hole-making tools

钻削试验在DMG-ultrasonic 20 liner五轴精密加工中心上进行,该机床主轴功率为15kW,最大转速为42000r/min,最大进给速度为5m/min。振动发生装置为MitisPG-3017振动刀柄,叠层结构扩孔前底孔直径为9mm,钻头采用整体硬质合金钻头(图2(a)),钻头直径9.7mm;整体硬质合金铰刀(图2(b)),直径10.008mm。加工过程中不使用冷却液。钻削毛刺高度、孔壁划伤采用SENSOFAR NEOX 3D轮

廓投影仪进行测量;孔径公差采用TESASTAR-M三坐标测量机进行测量;切屑形态采用Hirox KH-7700三维视频显微镜进行观察;表面粗糙度采用Marsurf PS1粗糙度仪测量。

试验在9mm底孔基础上进行,采用扩孔加工将9mm底孔扩至9.7mm,进而在9.7mm底孔基础上进行铰孔加工,扩孔加工与铰孔加工分别进行传统扩孔、振动扩孔与传统铰孔、振动铰孔,扩孔与铰孔的主轴转速均为700r/min,进给量均为0.12mm/r,振动加工所采用的振幅为0.1mm,频率17.5Hz。

### 切屑形态分析

对于振动制孔的变化,刀具瞬时切厚( $H_{cut}$ )也随刀具旋转角度( $\theta$ )产生改变,由于 $H_{cut}$ 的改变,因此能够带来切屑与工件的分离,进而产生断屑效果。传统钻削参数主要包括主轴转速( $N$ )与进给速度( $f$ ),而振动钻削则引入了振动幅值( $A$ )与振动频率( $\nu$ )来描述加工过程。文中低频轴向振动通过Mitis振动刀柄实现,其原理为滚子沿着凸轮运动而实现刀具受迫轴向振动,刀具振动曲线可假设是完全正弦曲线<sup>[5]</sup>,刀具进给曲线函数 $z_{tool}(\theta)$ 为:

$$z_{tool}(\theta) = -\left(\frac{f}{2\pi}\theta + A \sin\left(\frac{\nu \times \theta}{N}\right)\right) \quad (1)$$

若刀具切削刃数量为 $n$ ,各相邻刃口的相位差为 $2\pi/n$ ,则切削刃的进给曲线函数 $z_n(\theta)$ 为:

$$z_n(\theta) = -\left(\frac{f}{2\pi}(\theta + 2\pi/n) + A \sin\left(\frac{\nu \times (\theta + 2\pi/n)}{N}\right)\right) \quad (2)$$

根据以上切削轨迹公式,不同切削刃由于均存在着轴向往复运动,因而其运动轨迹相互重叠<sup>[10]</sup>,即切削刃是在已加工曲面上叠加上振动曲线,第 $t$ 个切削刃的理论切削厚度 $H_{cut}(t)$ 为:

$$H_{cut}(t) = \begin{cases} -(z_i(\theta) - \text{Min}|z_{i-1}(\theta)|) & (- (z_i(\theta) - \text{Min}|z_{i-1}(\theta)|) \geq 0) \quad i-1 \geq n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

### 1 扩孔切屑形态

在传统扩孔加工过程中,由于切削余量较大,切屑不能及时通过排屑槽排出,造成排屑槽堵塞,发生了严重的刀具卡阻现象(图3),并伴随有火花与浓重焦味,机床功率达到了正常值的4~5倍,并在退刀过程中由于加工扭矩超过主轴所能提供的扭矩,造成主轴停机。传统扩孔加工中的切屑形态如图4(a)所示,切屑大部分呈现团状卷曲,少部分呈现带状。

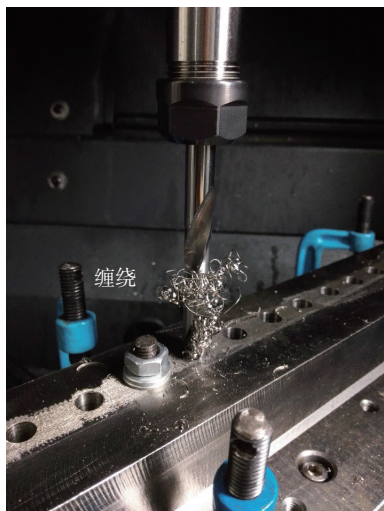


图3 传统扩孔过程中切屑堵塞排屑槽  
Fig.3 Chip blocking up inside the tube in traditional boring

振动扩孔的切屑如图4(b)所示,为C型卷曲切屑,切屑长度约为10mm,卷曲直径约为4mm,稳定的碎屑能够保证切屑随着排屑槽顺利排出<sup>[11]</sup>。

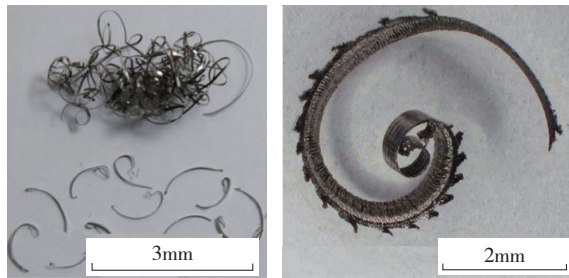
### 2 铰孔切屑形态

由于铰孔质量决定了最终的孔质量,因此其对切屑划伤的敏感程度也比扩孔要高,因此需要格外注意提高铰孔过程的断屑与排屑效果。图5与图6为Matlab数值计算得到的振动铰孔切削刃轨迹与铰孔切厚,通过计算可以发现,在此种切削条件下铰孔,刀具与工件在加工过程中会产

生分离,能够产生断续切削的后果。

图7(a)为传统铰孔形成的切屑形状,由图可见切屑呈团状卷曲,在加工过程中切屑堵塞在排屑槽中,无法顺畅排出,需待加工结束后手工清除。传统铰孔过程中,切屑厚度保

持不变,并且为了保证加工质量,铰孔时的每齿进给量必须控制在较小范围之内(0.02mm/z),但由于切屑厚度较小,一般会获得连续性切屑,由于铰孔的排屑槽一般较小且为直槽,因此切屑极易卷曲缠绕铰刀排屑槽内。图7(b)为振动铰孔形成的发条状切屑,切屑长度约为7.5mm,与图6所示的理论切屑长度8mm吻合,



(a)传统扩孔 (b)振动扩孔

图4 扩孔切屑形态

Fig.4 Chip morphology of boring

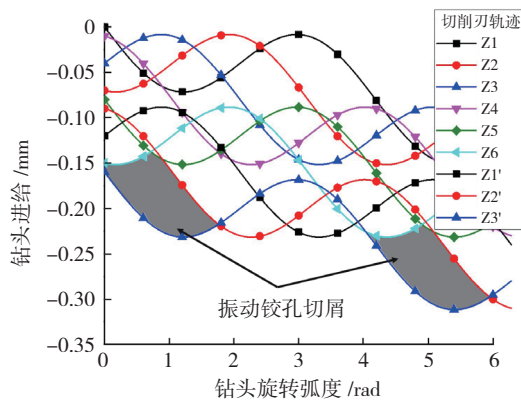


图5 振动铰孔切削刃运动轨迹及切屑形态

Fig.5 Cutter trajectory and chip morphology of vibration-assisted reaming

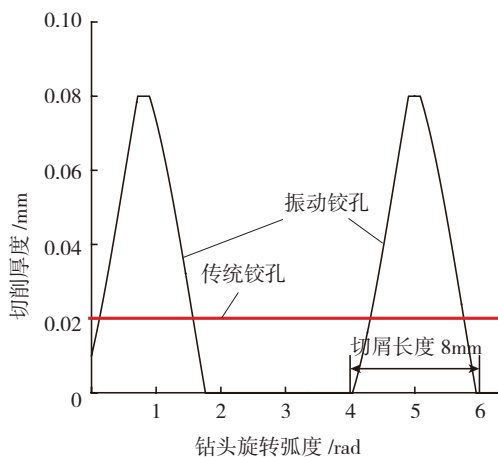


图6 振动铰孔与传统铰孔切屑厚度对比

Fig.6 Chip thickness for traditional reaming and vibration-assisted reaming

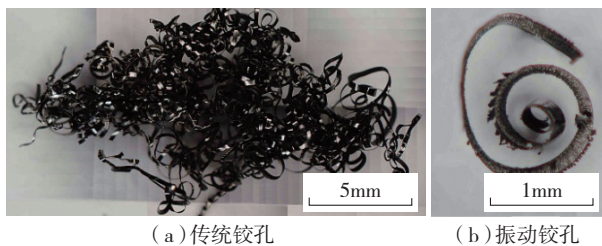


图7 铰孔切屑形态  
Fig.7 Chip morphology of reaming

并且切屑卷曲直径小于2mm,这种切屑易于排出。

### 加工精度和表面质量

#### 1 孔径尺寸

传统扩孔由于存在着严重的切屑卡阻现象(图3),切屑与孔壁发生严重摩擦,因而切削热大量集聚,带来工件材料、工具材料的热膨胀,最终造成材料严重的过切。如图8所示,钛合金孔径偏大 $70\mu\text{m}$ ,铝合金孔径更是偏大 $128\mu\text{m}$ ;振动扩孔则不存在传统扩孔中所面临的排屑困难问题,此外振动加工技术能够有效地降低切削热量的聚集<sup>[6-7]</sup>。所以,尽管在没有冷却的情况下,孔径有所偏大,但总的来说孔保持着很好的尺寸精度,钛合金与铝合金的孔径尺寸偏差分别为 $9\mu\text{m}$ 与 $29\mu\text{m}$ 。

相比于传统铰孔,振动铰孔展示出更好的孔径精度,在钛合金层,振动铰孔后的孔径尺寸为 $10.010\text{mm}$ ,仅比刀具直径( $10.008\text{mm}$ )偏大 $2\mu\text{m}$ ,加工回弹量与热膨胀导致的过切量几乎相互抵消,铝合金层的孔径为 $10.017\text{mm}$ ,也仅比较刀直径大 $9\mu\text{m}$ ,因此孔径精度可满足H7公差等级;而传统铰孔在加工Ti/Al叠层结构时,钛合金孔径比较刀直径高出 $9\mu\text{m}$ ,铝合金孔径比较刀直径高出 $26\mu\text{m}$ ,孔径精度仅可满足H9公差等级。由于传统加工为连续切削,切削热较大<sup>[6-7]</sup>,并且传统铰孔的排屑并没有振动制孔顺畅,切屑随着刀具旋转的过程中划擦孔壁带产生更多热量,工件受热膨胀造成过切,

因而传统铰孔孔径偏大。

#### 2 毛刺高度分析

在通孔加工过程中,孔的边缘通常会形成毛刺,制孔毛刺的存在严重

影响着装配精度与可靠性,因此必须对毛刺尺寸加以控制。由于出口毛刺一般要远大于入口毛刺,因此本文将出口毛刺定为主要研究对象,并且选用出口毛刺高度作为毛刺尺寸的评价指标,毛刺高度采用截面法进行测量,其测量方法如图9所示。

由于刀具本身结构形式存在差异,并且扩孔与铰孔的材料去除量不同,毛刺形成过程也有所差异,因此如图10所示,振动工艺对铰孔毛刺与扩孔毛刺的影响规律并不统一。

扩孔阶段,对于钛合金层,振动

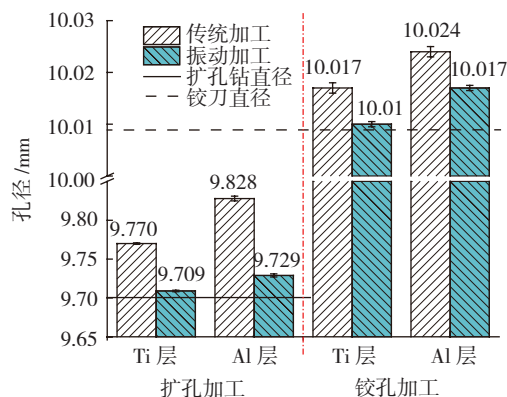


图8 振动加工与传统加工的孔径比较  
Fig.8 Hole diameter for traditional hole-making and vibration-assisted hole-making

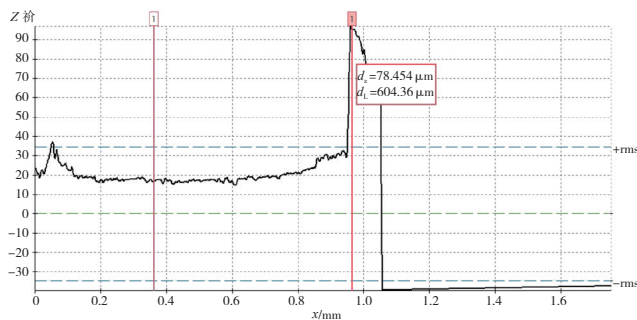
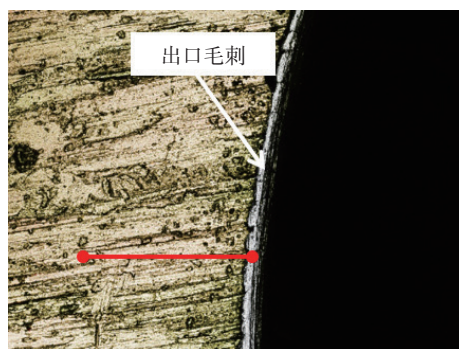


图9 出口毛刺截面高度测量示意图  
Fig.9 Schematic of burr height measurement on exit side

扩孔所带来的出口毛刺比传统制孔下降 74%，仅为 70 μm，几乎没有明显的可见毛刺，其原因可能有以下两个方面：首先，振动扩孔的切削温度较低，降低了钛合金的延性；其次，

由于振动扩孔过程中存在冲击作用，其使得钛合金毛刺更易在形成过程中折断；在铝合金层，振动技术使得出口毛刺高度增加 30%，由 208 μm 增加至 271 μm，这是由于铝合金(断

裂延伸率 15%)相比钛合金更不易折断，冲击作用不仅没有使得毛刺断裂，而且使得毛刺得到了一定伸长。铰孔时，在钛合金层，传统铰孔与振动铰孔的出口毛刺高度差别不大，传统铰孔为 153 μm，振动铰孔为 158 μm 左右，但毛刺形态有所不同，传统铰孔出口为均匀毛刺，振动铰孔出口毛刺部分从根部脱落，未脱落部分为均匀毛刺，这是由于铰孔加工余量小且每齿进给量也较小，振动冲击作用没有扩孔时明显，造成了部分毛刺从根部断裂，未断裂部分毛刺高度与传统铰孔相同的现象；在铝合金层，振动铰孔表现出较大的优势，振动铰孔 193 μm 的毛刺高度相比传统铰孔的 365 μm 减少了 50%，且毛刺形态均匀、规则。这是由于，铰孔过程中，单边切削余量为 150 μm 左右，而传统铰孔后铝合金层的出口毛刺高度达到了 365 μm，显然该毛刺是在高度为 208 μm 的扩孔毛刺基础上进一步形成的；振动铰孔过程中，振动的瞬时冲击作用使得毛刺在扩孔形成的毛刺处断裂，避免了在铰孔毛刺上叠加扩孔毛刺，使得铝合金铰孔出口毛刺高度得到有效控制。

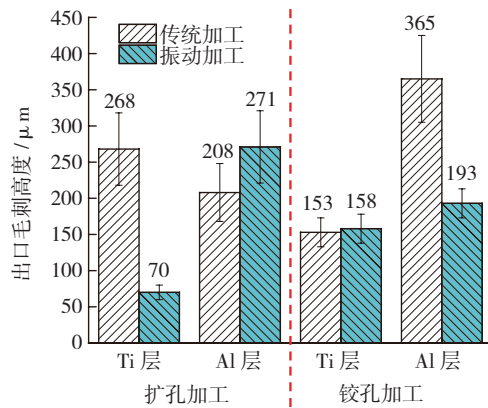


图10 振动加工与传统加工的出口毛刺高度比较

Fig.10 Burr height for traditional hole-making and vibration-assisted hole-making

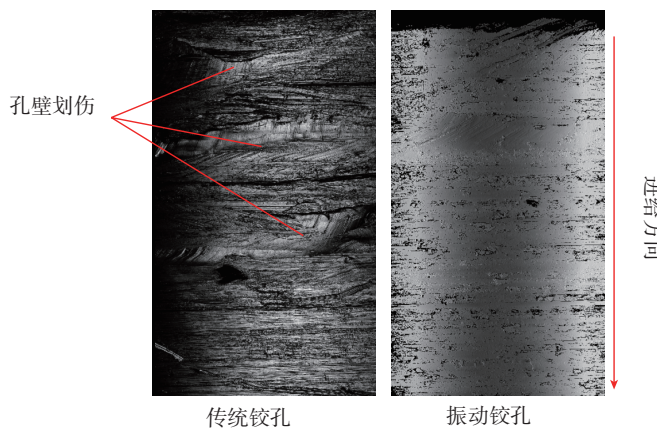


图11 铝合金铰孔孔壁表面质量

Fig.11 Surface microstructure of Al alloy layer for traditional reaming and vibration-assisted reaming

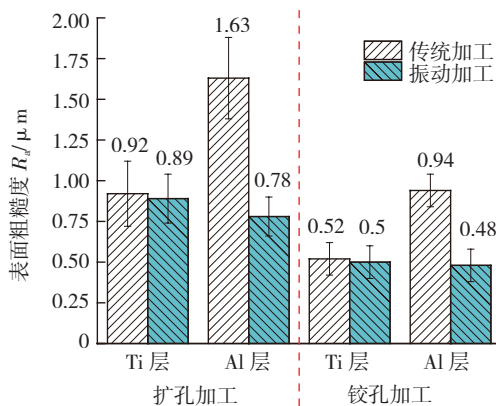


图12 振动加工与传统加工的表面粗糙度比较

Fig.12 Surface roughness for traditional hole-making and vibration-assisted hole-making

### 3 表面质量分析

在传统铰孔中，由于切屑呈现团状(图 7 (a))，卡阻在排屑槽中，无法顺利排出，因而极易造成硬度较低的铝合金孔壁出现划伤现象，对表面质量带来严重影响，如图 11 所示。图 12 为振动加工与传统加工的表面粗糙度比较，在钛合金层，无论是扩孔和铰孔，振动加工所制得的孔壁粗糙度好于传统加工；而在铝合金层，传统加工获得的孔壁粗糙度要比振动加工高出 1 倍。由于铰刀有 6 个切削刃，而扩孔钻有 2 个切削刃，因而铰刀的每齿平均切厚为 0.02mm/s，仅为扩孔时的 1/3，此外由于铰刀副刃的挤压作用，其加工铰孔所获得的孔壁粗糙度要优于扩孔，振动铰孔后

钛合金孔壁粗糙度达  $R_a 0.5 \mu\text{m}$ , 铝合金孔壁粗糙度达  $R_a 0.48 \mu\text{m}$ 。

## 结论

(1) 使用低频振动加工方法, 能够在 Ti/Al 叠层结构振动扩孔与振动铰孔阶段获得 C 形与发条形切屑, 保证了排屑通畅, 避免切屑划伤铝合金表面, 带来更精准的孔径尺寸、表面粗糙度以及更小的出口毛刺。

(2) 在孔壁粗糙度方面, 使用振动扩孔后, 钛合金层孔壁粗糙度  $R_a$  可以达到  $0.89 \mu\text{m}$ , 铝合金层孔壁粗糙度  $R_a$  可以达到  $0.78 \mu\text{m}$ ; 使用振动铰孔后, 钛合金层孔壁粗糙度  $R_a$  可以达到  $0.5 \mu\text{m}$ , 铝合金层孔壁粗糙度  $R_a$  可以达到  $0.48 \mu\text{m}$ 。

(3) 在孔径尺寸方面, 使用振动扩孔后, 钛合金层孔径精度至少可满足 H7 公差等级, 铝合金层孔径精度亦可满足 H9 公差等级; 使用振动铰孔后, 钛合金层孔径精度至少可满足 H7 公差等级, 铝合金层孔径精度亦可满足 H7 公差等级。

(4) 在出口毛刺方面, 使用振动扩孔后, 钛合金层毛刺高度可控制在  $70 \mu\text{m}$  以内, 铝合金层毛刺高度可控制在  $271 \mu\text{m}$  以内; 使用振动铰孔后,

毛刺高度可控制在  $158 \mu\text{m}$  以内; 铝合金层毛刺高度可控制在  $193 \mu\text{m}$  以内。

## 参考文献

[1] 台春雷, 单丹丹. 钛合金与铝合金叠层结构铰孔精加工工艺研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015(5): 63-67.

TAI Chunlei, SHAN Dandan. Research on finish machining process of reaming titanium alloy and aluminum alloy sandwich structure[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015(5): 63-67.

[2] SANDA A, ARRIOLA I, GARCIA N V, et al. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti6Al4V[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 22: 169-176.

[3] DAHNEL A N, ASCROFT H, BARNES S. The effect of varying cutting speeds on tool wear during conventional and ultrasonic assisted drilling (UAD) of carbon fibre composite (CFC) and titanium alloy stacks[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 420-423.

[4] LADONNE M, CHERIF M, LANDON Y, et al. Modelling the vibration-assisted drilling process: Identification of influential phenomena[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 1657-1666.

[5] JALLAGEAS J, K NEVEZ J, CHÉRIF M, et al. Modeling and optimization of vibration-assisted drilling on positive feed drilling unit[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5): 1205-

1216.

[6] PECAT O, BRINKSMEIER E. Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening[J]. Procedia CIRP, 2014, 13(13): 1-7.

[7] PECAT O, BRINKSMEIER E. Tool wear analyses in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack material[J]. Procedia CIRP, 2014, 14(14): 142-147.

[8] 张翼振. 振动对铰孔粗糙度和精度的影响[J]. 航空工艺技术, 1986(3): 43-44.

ZHANG Yizhen. Influence of vibration on reaming roughness and precision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1986(3): 43-44.

[9] 邢立华, 潘祥生, 陈翔, 等. 低频振动铰削对表面粗糙度的影响[J]. 航空制造技术, 2007(10): 84-86.

XING Lihua, PAN Xiangsheng, CHEN Xiang, et al. The influence of low-frequency vibration reaming on surface roughness[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(10): 84-86.

[10] DEYUAN Z, LIJIANG W. Investigation of chip in vibration drilling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(3): 165-176.

[11] BRINKSMEIER E, PECAT O, RENTSCH R. Quantitative analysis of chip extraction in drilling of Ti6Al4V[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 93-96.

通讯作者: 陈燕, 博士、教授, 主要研究方向为难加工材料的高效精密加工技术, E-mail: ninaych@nuaa.edu.cn.

## Experimental Research on Low Frequency Vibration-Assisted Hole Making of Ti/Al Stacked Structure

YANG Haojun<sup>1,2</sup>, CHEN Yan<sup>1,2</sup>, XU Jiuhua<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** There are still some problems in assembly holes making of the titanium and aluminum stacks (Ti/Al stacks), such as the poor holes surface quality and out-of-tolerance diameter. In this article, low frequency vibration-assisted boring and reaming of Ti/Al stacks were investigated in compared with the traditional ones. Both chip morphology and processing quality were analyzed. It was found that distinctive mechanical damage of the Aluminum holes surface could be significantly reduced due to the improved extraction of the small chip segments. After one operation of boring and reaming with low frequency vibration assisted processing, The average surface roughness of both titanium and aluminum can reach  $R_a 0.6 \mu\text{m}$ . The hole diameter can meet a tolerance of H7 and the burr height on exit side can be reduced below  $200 \mu\text{m}$ .

**Keywords:** Stacked structure; Titanium alloy; Aluminum alloy; Hole-making

(责编 大漠)