

4J29可伐合金超声振动辅助钻削试验研究

刘春青¹, 康仁科², 李志远², 董志刚², 邹明虎³, 王文汉¹, 杨强强¹

- (1. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065;
2. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;
3. 中国人民解放军 65183 部队, 辽阳 111200)

[摘要] 4J29 可伐合金由于具有和奥氏体不锈钢相近的难切削特点, 传统钻削制孔质量较差, 为了研究 4J29 可伐合金制孔质量的影响因素, 提高制孔质量, 对 4J29 合金进行了不同加工参数下的普通钻削和超声振动辅助钻削试验并对钻削轴向力、孔径误差、孔壁粗糙度进行了测量。试验发现: 4J29 可伐合金在不同加工参数下(切削速度 $v=0.314\sim 0.942\text{m/s}$, 进给速度 $f=10\sim 30\text{mm/min}$), 超声振动辅助钻削可降低钻削轴向力, 轴向力平均降低 35.37N, 降幅为 18.45%; 超声振动辅助钻削可提高制孔精度, 孔径误差平均减小 $17.9\mu\text{m}$, 降幅为 31.5%; 超声振动辅助钻削可提高表面质量, 对于轮廓算术平均偏差 R_a , 超声振动辅助钻削使其平均降低了 $0.4862\mu\text{m}$, 降幅为 28.4%, 微观不平度十点高度 R_z 平均降低了 $2.4940\mu\text{m}$, 降幅为 20.0%。试验表明超声振动钻削 4J29 可伐合金比传统钻削加工更具优势, 可获得质量更高的加工孔。

关键词: 4J29 合金; 超声振动辅助钻削; 轴向力; 孔质量; 孔径误差; 粗糙度

Experimental Study of Ultrasonic Vibration-Assisted Drilling on 4J29 Alloy

LIU Chunqing¹, KANG Renke², LI Zhiyuan², DONG Zhigang², ZOU Minghu³,
WANG Wenhan¹, YANG Qiangqiang¹

- (1. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China;
2. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. The PLA of 65183 Army, Liaoyang 111200, China)

[ABSTRACT] Due to the 4J29 Kovar alloy's similar character of difficulty to be cut with austenitic stainless steel, the quality of holes obtained by traditional drilling is poor. In order to study the factors affecting the quality of 4J29 Kovar alloy drilling and improve the quality of drilling, traditional drilling and ultrasonic vibration-assisted drilling experiments of 4J29 alloy under different processing parameters were carried out, and the drilling axial force, hole diameter error and hole wall roughness were measured. It is found that under different processing parameters (cutting speed $v=0.314\sim 0.942\text{m/s}$, feed speed $f=10\sim 30\text{mm/min}$), ultrasonic vibration-assisted drilling can reduce the drilling axial force by about 18.45%, with an average decrease of 35.37N. Ultrasonic vibration-assisted drilling can improve drilling accuracy, and the average hole diameter error is reduced about $17.9\mu\text{m}$, with a decrease by 31.5%. Ultrasonic vibration-assisted drilling can improve surface quality. For the arithmetic mean deviation R_a of contour, ultrasonic vibration-assisted drilling reduces the average surface quality by about 28.4%, which is $0.4862\mu\text{m}$, and the average maximum contour height R_z is decreased by 20.0% (about $2.4940\mu\text{m}$). The experiments have shown that ultrasonic vibration-assisted drilling of 4J29 Kovar alloy has more advantages than traditional drilling, and can contribute to higher quality drilling holes.

Keywords: 4J29 alloy; Ultrasonic vibration-assisted drilling; Thrust force; Quality of hole; Hole error; Roughness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.094

使用麻花钻进行钻削制孔是现代飞机装配领域最常用的孔加工工艺。随着现代航空科技和材料科技的飞速发展,为适应一些新生的航空难加工材料高效高质量孔加工要求,传统麻花钻制孔工艺亟待优化改进,而超声振动钻削技术正是近几年为适应这一需求重新兴起的一项技术^[1]。传统麻花钻在加工高强度、高硬度合金材料时,高钻削力导致的高温环境使得孔内壁和出入口处时常出现烧伤现象^[2-3];由于钻削过程中钻削力较大,导致麻花钻在钻孔过程中振动较大,材料孔内壁的粗糙度值较大,出、入口处的毛刺较多,同时钻头磨损严重^[4]。

日本的隈部淳一郎于20世纪中叶提出在刀具上复合振动的理论并开展了试验进行验证^[5]。近几年,国内外的学者围绕超声振动钻削技术理论^[6]、断屑理论^[7]、动力学模型仿真^[8-9]、钻削力控制^[8-9]、高低频振动^[10]、毛刺高度预测模型^[11]、切屑形貌和温度^[12-13]、深小孔加工^[14]、超声振动钻削有限元仿真分析^[15]等进行了大量研究。

Scott等于20世纪30年代研究出4J29可伐合金。4J29可伐合金的膨胀系数与硅硼硬玻璃较为接近,硅硼硬玻璃能够很好地浸润4J29合金表面的氧化膜,这可以保证封装器件的密封性。该合金的出现很快取代了难熔金属钨、钼等,并被广泛用于飞机、航天器上的真空仪表器件的密封结构材料。硬玻璃作为半导体晶体管封装的材料,其大量使用使4J29合金被广泛应用于晶体管、集成电路等器件制造业^[16],由于4J29构件在装配过程中需要以螺纹连接的方式与其他器件进行连接,高装配精度对制孔质量提出了较高要求。4J29合金切削特性和奥氏体不锈钢相似,在钻削过程中存在钻削力大、钻削温度高、切屑粘结不易折断及刀具磨损严重等问题。4J29合金的各元素成分见表1,性能参数见表2。

鉴于目前还没有对4J29合金进行钻削加工的研究,故考虑借鉴超声辅助钻削技术在加工难加工材料时的优点^[17-23],将该技术应用到4J29高弹性合金的加工中,开展4J29合金超声振动辅助钻削试验研究。

1 试验方案

本文试验中的超声振动系统由测力机构、超声振动系统、机床构成。超声振动系统由超声电源、超声振动单元、电能传输单元组成。其中,超声电源产生高频电信号,由电能传输单元传递到振动单元,最终使麻花钻上具有超声振动^[12]。超声振动辅助钻削系统各组成部分如图1所示。

本试验所使用的4J29合金样件直径为 $\Phi 50\text{mm}$,厚度为10mm,为减少初始缺陷对出口毛刺的影响,对合金样件进行了研磨抛光;试验中所使用刀具为由台州市英洛克工具有限公司生产(型号:2DT-6LD0600)的硬质合金麻花钻,超H涂层,麻花钻直径6mm。

试验在大连理工大学现代制造技术实验室的凝华三轴数控钻铣机床上进行,其主轴转速最高可达12000r/min,电主轴的回转精度分别为轴向跳动 $8.5\mu\text{m}$,径向圆跳动 $2.3\mu\text{m}$,X、Y、Z三轴的重复定位精度为0.001mm。本试验使用碳刷(通过碳刷架固定于机床主轴)-铜环(安装于超声刀柄外侧)装置实现接触式电能传输,超声刀柄采用本实验室自主研发的BT40型超声刀柄。该部分结构如图2^[24]所示。本试验采用日本KEYENCE公司生产的LK-H025型激光位移传感器对超声振幅进行标定,空载状态下超声振幅 $9.4\mu\text{m}$,超声振动频率25.4kHz。

钻削力采用Kistler9257B压电式三向测力仪进行

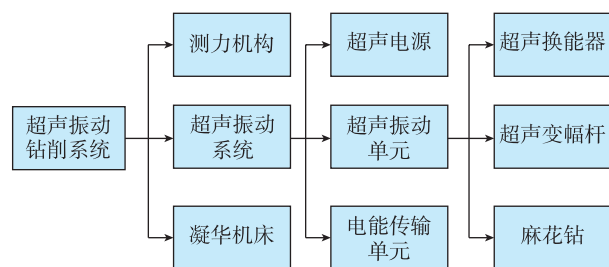


图1 超声振动钻削系统组成

Fig.1 Composition of ultrasound vibration-assisted drilling system

表1 4J29合金材料成分(质量分数)

Table 1 Composition of 4J29 alloy material

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Co	Fe
0.03	0.50	0.30	0.02	0.02	0.20	0.20	0.20	28.50~29.50	16.80~17.80	余量

表2 4J29合金的性能参数

Table 2 4J29 alloy performance parameters

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	硬度 $\text{HV}_{0.5}$	抗拉强度 σ_b / MPa	屈服强度 σ_s / MPa	线膨胀率 $\alpha_l / \text{}^\circ\text{C}^{-1}$
7.85	138	186.3	427	276	5.25

测定,经过 LN5861 型电荷放大器及 PCI9118 数据采集卡进行电荷放大和数据采集后,由本实验室自主研发的通用切削力测试系统(GDFMS)进行数据处理分析。超声振动钻削试验仪器如图 3 所示。

本试验通过在不同加工参数下进行超声振动辅助钻孔和普通钻孔的对比试验,利用日本 KEYENCE 公司 VHX-600E 型超景深三维显微镜、美国 ZYGO 公司 New View 5022 型表面轮廓仪、西北青量生产的三点式内径千分尺对加工试件进行孔壁形貌、孔壁表面质量、孔径尺寸等参数的观察和测量,测量仪器如图 4 和 5 所示。

为研究切削速度、进给量及超声作用对 4J29 合金制孔质量的影响规律,试验采用控制变量法,由于未见和 4J29 钻削参数相关内容的公开报道,故根据对之前相关牌号合金材料的钻削经验以及 4J29 的抗拉强度和硬度等参数确定了加工的切削速度、进给速度等参数^[14,19,24],如表 3 所示。

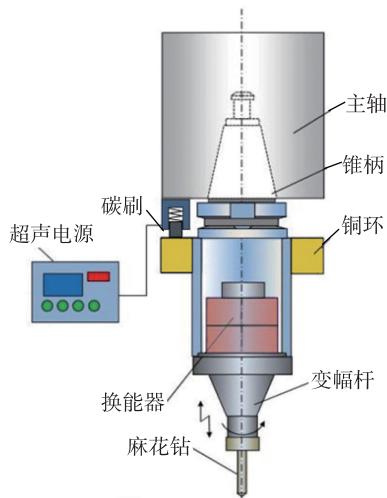


图2 超声振动钻削系统示意图

Fig.2 Sketch map of ultrasonic vibration-assisted drilling system

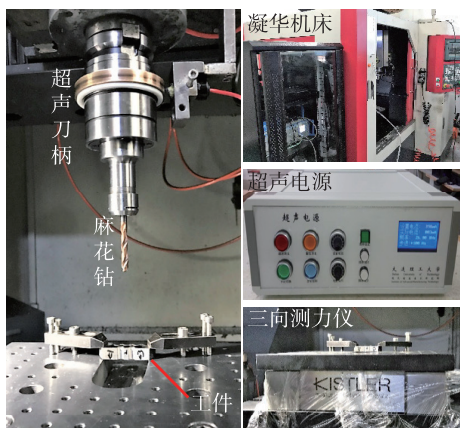


图3 超声振动钻削试验仪器

Fig.3 Experimental instrument for ultrasonic vibration-assisted drilling

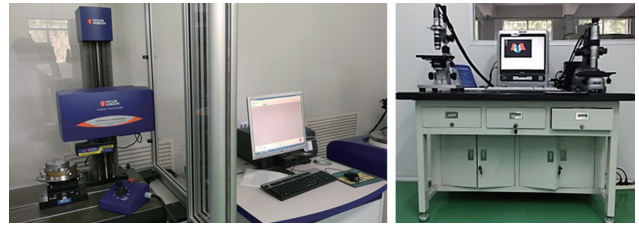


图4 表面轮廓仪与超景深显微镜

Fig.4 Surface profiler and ultra-depth-of-field microscope



图5 内径千分尺

Fig.5 Inside diameter micrometer

表3 试验加工参数

Table 3 Test processing parameters

序号	切削速度 / (m·s ⁻¹)	进给量 / (mm·r ⁻¹)	超声
1	0.314	20	0
2	0.471	20	0
3	0.628	20	0
4	0.785	20	0
5	0.942	20	0
6	0.314	20	1
7	0.471	20	1
9	0.628	20	1
10	0.785	20	1
11	0.942	20	1
12	0.628	10	0
13	0.628	15	0
14	0.628	25	0
15	0.628	30	0
16	0.628	10	1
17	0.628	15	1
18	0.628	25	1
19	0.628	30	1

注: 栏头为“超声”一列中,0 代表不加超声,1 代表加超声。

2 试验结果与分析

2.1 试验切削力对比分析

以轴向切削力为纵坐标,分别以切削速度、进给速度为横坐标绘制曲线(图6和7)。

从图6和7中可以明显得到,切削速度在0.314~0.942m/s区间、进给速度在10~30mm/min区间内变化时,普通钻削轴向力在136~299N范围内变化,超声振动辅助钻削的轴向力在116~243N范围内变化,超声振动辅助钻削的轴向切削力均小于普通钻削,经计算可得超声钻削的轴向切削力在分别以切削速度和进给速度为变量时平均减少了39.58N、31.15N,降幅分别约19.8%、17.1%,原因是对于超声振动辅助钻削,高频超声振动使得麻花钻的横刃由原来的对孔底部的挤压作用改为冲击作用,相当于增加了麻花钻的切削性能,故而降低了切削力。也可以发现轴向切削力随着切削速度的增加而减少,随着进给速度的增加而增加。这是由于在相同进给速度的前提下,切削速度增加后,进给量会减小,这使得切削层厚度降低,即刀具单个旋转周期内材料去除体积下降,进而减小了轴向切削力。而进给速度的增加使得未变形切屑厚度增加,进而增大钻削力。

2.2 试验钻孔孔径对比分析

分别测量普通钻削和超声振动辅助钻削孔的直径,以试验对应的切削速度作为横坐标,所测得的孔径为纵坐标,4J29合金的钻孔结果如图8所示;以试验对应的进给速度作为横坐标,所测得的孔径为纵坐标,4J29合金的钻孔结果如图9所示。

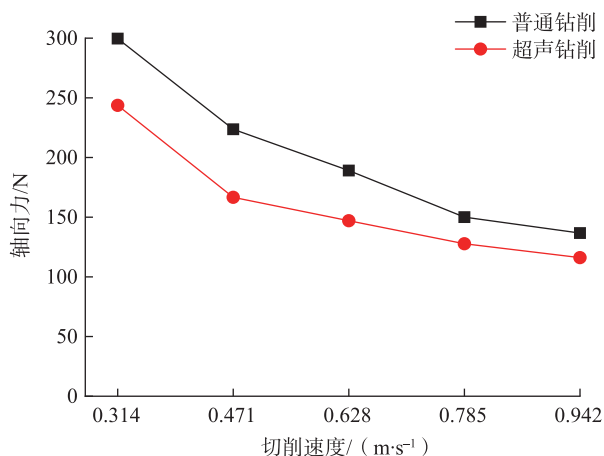


图6 不同切削速度下的切削力对比 ($f=20\text{mm/min}$)

Fig.6 Comparison of cutting forces at different cutting speed ($f=20\text{mm/min}$)

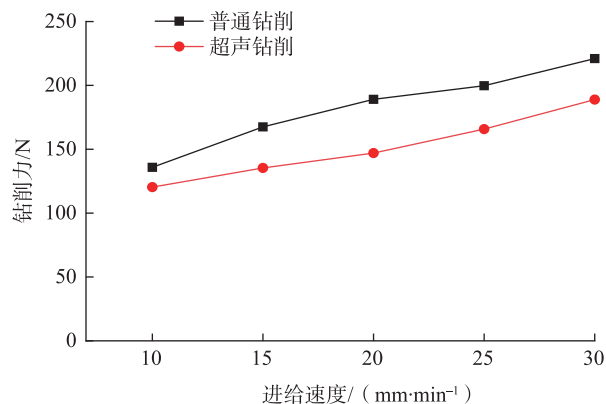


图7 不同进给速度下的切削力对比 ($v=0.628\text{m/s}$)

Fig.7 Comparison of cutting forces at different feed velocities ($v=0.628\text{m/s}$)

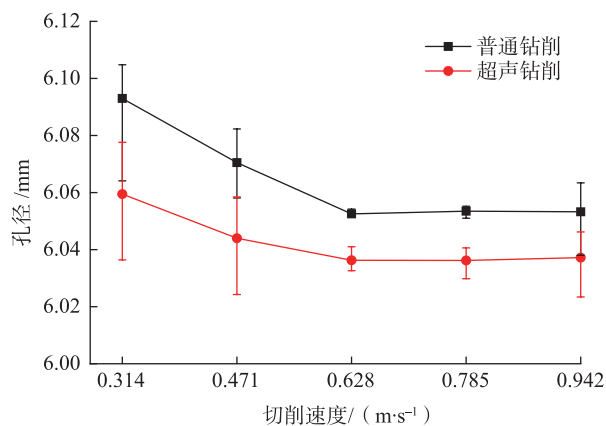


图8 不同切削速度下的孔径对比 ($f=20\text{mm/min}$)

Fig.8 Comparison of aperture at different cutting speeds ($f=20\text{mm/min}$)

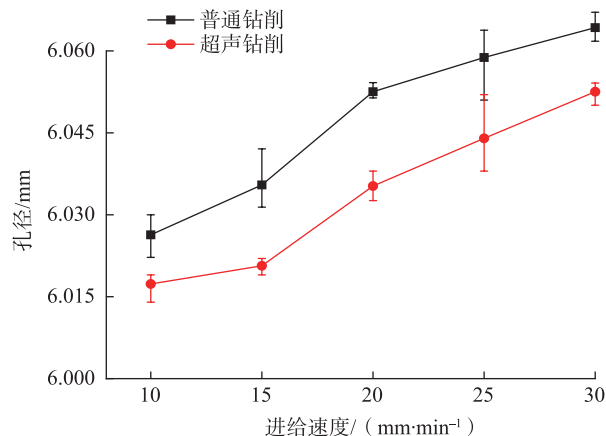


图9 不同进给速度下的孔径对比 ($v=0.628\text{m/s}$)

Fig.9 Comparison of aperture at different feed speeds ($v=0.628\text{m/s}$)

观察图 8 与图 9, 超声振动辅助钻削孔径的孔径误差要好于普通钻削。当切削速度在 0.314~0.942m/s 区间、进给速度在 10~30mm/min 区间内变化时, 普通钻削孔的孔径误差在 6.0533~6.0930mm 范围内变化, 超声振动辅助钻削孔的尺寸精度在 6.0173~6.0525mm 范围内变化, 超声振动辅助钻削孔的孔径误差均小于普通钻削, 经计算可得超声钻削的孔径误差在分别以切削速度和进给速度为变量时平均减少了 22.2 μ m、13.5 μ m, 降幅分别约 34.5%、28.5%。当切削速度大于 0.628m/s 时, 无论超声振动辅助钻削还是普通钻削, 孔的尺寸误差变化基本很小。在普通钻削中, 钻头刚入钻的时候定心能力较差, 麻花钻存在偏移的情况; 而在超声振动钻削中, 隈部淳一郎教授提出的钻头静止化和刚性化理论认为超声振动辅助钻削相比于传统钻削可有效提高钻头刚度, 提高入钻精度^[5], 超声振动使得麻花钻在每个超声振动的周期内有回撤的时间, 这使得麻花钻轴线可以恢复原来的定心位置, 进而提高入钻精度; 同时高频的超声振动使得麻花钻的颤振得到抑制, 钻削过程更加稳定^[24]。所以, 超声振动钻削比普通钻削具有更高的加工尺寸精度。

2.3 孔内壁表面粗糙度的对比分析

本试验对比分析的数据有轮廓算术平均偏差 R_a 和微观不平度十点高度 R_z 。

本文采用泰勒表面轮廓仪(接触式)进行粗糙度测量, 测量前将孔壁沿轴线方向进行剖切, 测量时仪器探针与孔壁直接接触获取粗糙度数值。孔壁形貌采用超景深显微镜进行观测, 如图 10 所示。

普通钻削和超声振动辅助钻削样件的孔壁形貌如图 11 所示。图中可见超声振动钻削时刀具轴向振动留下的刀纹, 对孔壁表面的粗糙度进行了测量。以钻削进给速度作为横坐标, 以实际测量的普通钻削和超声振动辅助钻削孔壁表面粗糙度的 R_a 、 R_z 值为纵坐标, 试验结果如图 12~13 所示; 以切削速度作为横坐标, 以实际测量的普通钻削和功率超声振动钻削表面粗糙度的 R_a 、 R_z 值为纵坐标, 试验结果如图 14~15 所示。

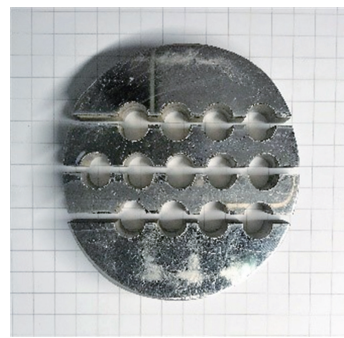
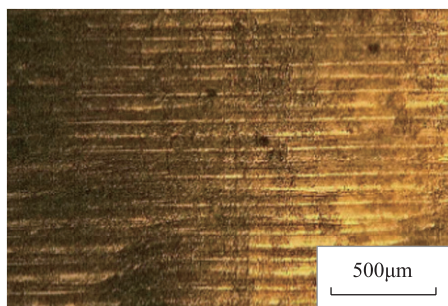
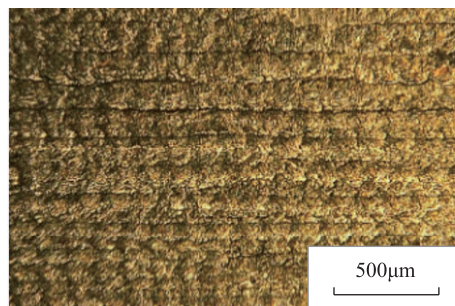


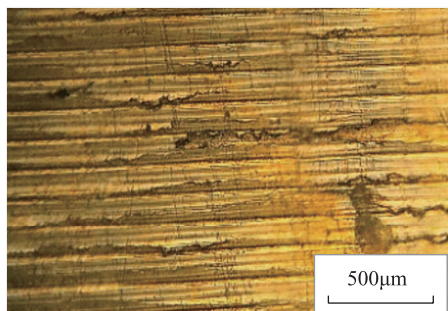
图10 线切割后工件
Fig.10 Workpiece after WEDM



(a) 普通钻削 ($f=20\text{mm/min}$, $v=0.628\text{m/s}$)



(b) 超声振动辅助钻削 ($f=20\text{mm/min}$, $v=0.628\text{m/s}$)



(c) 普通钻削 ($f=30\text{mm/min}$, $v=0.628\text{m/s}$)



(d) 超声振动辅助钻削 ($f=30\text{mm/min}$, $v=0.628\text{m/s}$)

图11 不同进给速度下的孔壁对比图
Fig.11 Comparison of hole walls at different feed speeds

由图12~15可以发现,超声振动辅助钻削的表面粗糙度总是小于普通钻削的表面粗糙度,当切削速度在0.314~0.942m/s区间变化时,普通钻削孔的轮廓算术平均偏差 R_a 在1.0456~2.5733 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的轮廓算术平均偏差 R_a 在0.8025~1.6532 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的轮廓算术平均偏差 R_a 在以切削速度为变量时平均减少了0.5773 μm ,降幅约23.1%,普通钻削的微观不平度十点高度 R_z 在11.5414~14.7563 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的微观不平度十点高度 R_z 在8.6693~11.2356 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的微观不平度十点高度平均减少了2.4153 μm ,降幅约19.3%。

当进给速度在10~30mm/min区间内变化时,普通

钻削孔的轮廓算术平均偏差 R_a 在1.2435~2.6153 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的轮廓算术平均偏差 R_a 在1.0785~1.7033 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的轮廓算术平均偏差 R_a 在以切削速度为变量时平均减少了0.3951 μm ,降幅约23.1%,普通钻削的微观不平度十点高度 R_z 在10.5684~15.0752 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的微观不平度十点高度 R_z 在8.6755~10.8233 μm 范围内变化,超声振动辅助钻削孔的微观不平度十点高度平均减少了2.5726 μm ,降幅约20.8%。

这是由于超声振动辅助钻削过程中,刀具周期性的轴向振动使得刀具主切削刃的刀尖部位对孔壁存在周期性刮擦碾压作用,从而减小了孔壁粗糙度。此外,由

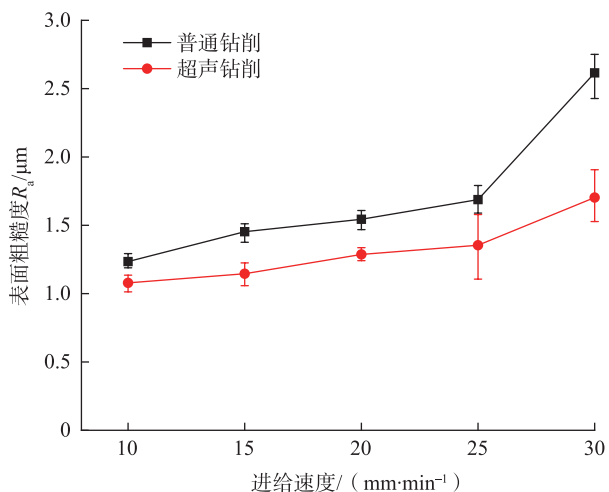


图12 不同进给速度下的 R_a 值对比 ($v=0.628\text{m/s}$)

Fig.12 Comparison of R_a values at different feed speeds ($v=0.628\text{m/s}$)

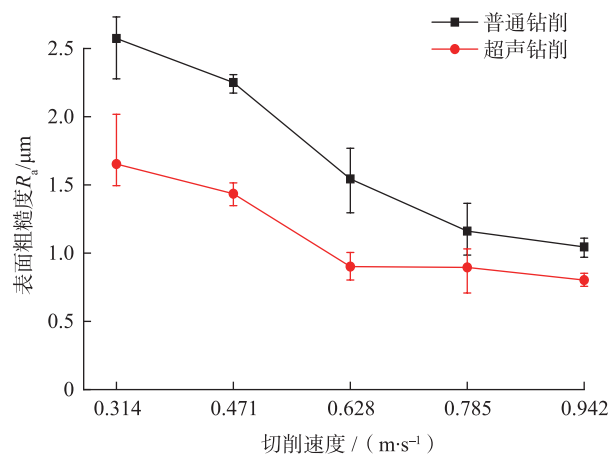


图14 不同切削速度下的 R_a 值对比 ($f=20\text{mm/min}$)

Fig.14 Comparison of R_a values at different cutting speeds ($f=20\text{mm/min}$)

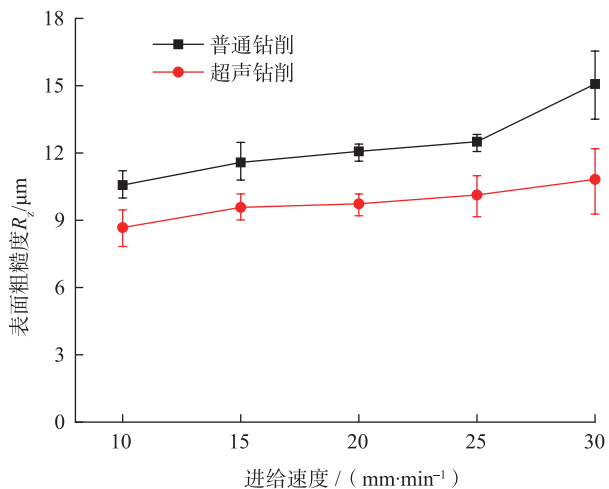


图13 不同进给速度下的 R_z 值对比 ($v=0.628\text{m/s}$)

Fig.13 Comparison of R_z values at different feed speeds ($v=0.628\text{m/s}$)

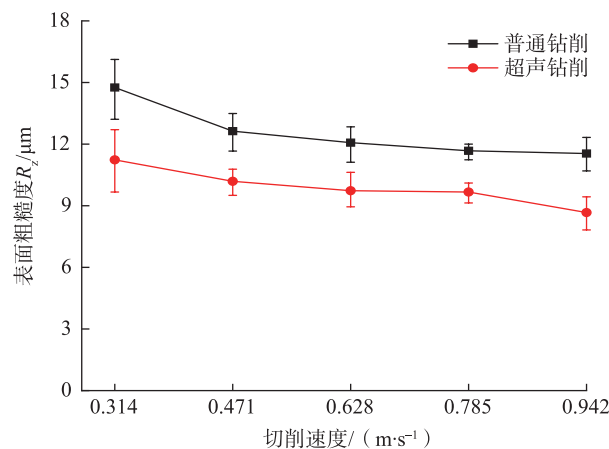


图15 不同切削速度下的 R_z 值对比 ($f=20\text{mm/min}$)

Fig.15 Comparison of R_z values at different cutting speeds ($f=20\text{mm/min}$)

于超声振动相比于普通钻削有着较好的断屑效果^[25],从而降低了切屑对孔壁的划伤,进而提高了孔壁的表面质量。

3 结论

本文对 4J29 可伐合金在不同加工参数下(切削速度 $v=0.314\sim 0.942\text{m/s}$,进给速度 $f=10\sim 30\text{mm/min}$)分别进行了普通钻削和超声振动辅助钻削试验,通过对钻削轴向力、孔径误差以及孔壁粗糙度进行测量分析,得到以下结论:

(1) 超声振动辅助钻削可降低钻削轴向力。超声振动辅助钻削加工相比普通钻削,轴向钻削力平均降低了 35.37N,降幅为 18.45%。

(2) 超声振动辅助钻削可提高制孔精度。相比与普通钻削,超声振动辅助钻削使得孔径误差平均减小 $17.9\mu\text{m}$,降幅为 31.5%。

(3) 超声振动辅助钻削可提高表面质量。对于轮廓算术平均偏差 R_a ,超声振动辅助钻削使其平均降低了 $0.4862\mu\text{m}$,降幅为 28.4%;对于微观不平度十点高度 R_z ,超声振动辅助钻削孔壁的微观不平度十点高度 R_z 平均降低了 $2.4940\mu\text{m}$,降幅为 20.0%。

综上所述,试验发现超声振动钻削 4J29 可伐合金比传统钻削加工更具优势,可获得质量更高的加工孔。

参考文献

[1] 康仁科,杨国林,董志刚,等.飞机装配中的先进制孔技术与装备[J].航空制造技术,2016,59(10):16-24.
KANG Renke, YANG Guolin, DONG Zhigang, et al. Advanced hold machining technology and equipment for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 16-24.

[2] 卜泳,许国康,肖庆东.飞机结构件的自动化精密制孔技术[J].航空制造技术,2009,52(24):61-64.
BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automatic precision drilling technology of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(24): 61-64.

[3] 孙鑫.航空材料自动化精密制孔工艺研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
SUN Xin. Research on automatic precision drilling process of aeronautic material[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[4] 刘勇兵,张明喆,周宏,等.无涂层高速钢刀具钻削压铸铝合金时的磨损机理图[J].摩擦学学报,2000,20(5):326-330.
LIU Yongbing, ZHANG Mingzhe, ZHOU Hong, et al. Wear mechanism study of uncoated high speed steel twist drill cutting diecast aluminium alloy[J]. Chinese Journal of Tribology, 2000, 20(5): 326-330.

[5] 隈部淳一郎.精密加工振动切削(基础与应用)[M].北京:机械工业出版社,1985.
KYMABE Junichiro. Finishing machining and vibration cutting—fundamentals and application[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.

[6] ADACHI K. Study on vibratory drilling (1st Report)[J]. The Japan Society for Precision Engineering, 1976, 42(12): 1133-1138.

[7] 张德远,王立江.振动钻削的局部断屑特性[J].应用科学学报,1993,11(4):337-344.
ZHANG Deyuan, WANG Lijiang. Investigation of chip in vibration drilling[J]. Journal of Applied Sciences, 1993, 11(4): 337-344.

[8] 王昕.振动钻削新钻削力模型及定、变参数振动钻削的研究[D].吉林:吉林大学,2004.
WANG Xin. Study on new drilling force model of vibration drilling and vibration drilling with invariable parameter and variable parameter[D]. Jilin: Jilin University, 2004.

[9] 王立平,杨兆军,王立江.三区段振动钻削动态轴向力和扭矩的计算机仿真[J].工具技术,1999,26(8):29-31.
WANG Liping, YANG Zhaojun, WANG Lijiang. Study on three-section dynamic axial force and torque in vibration drilling by simulation[J]. Chinese Tool Engineering, 1999, 26(8): 29-31.

[10] AZARHOUSHANG B, AKBARI J. Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7-8): 1027-1033.

[11] 王立江,邱少波.振动与毛刺的关联性[J].科学通报,1989(8):628-630.
WANG Lijiang, QIU Shaobo. The relationship between vibration and burrs [J]. Chinese Science Bulletin, 1989(8): 628-630.

[12] ZHANG D Y, WANG L J, ZHANG M. Penetrating characteristic of chisel edge in ultrasonic vibration microdrilling[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(10): 865-869.

[13] ZHANG D Y, WANG L J. Investigation of chip in vibration drilling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(3): 165-176.

[14] 姜鹏飞,潘祥生,张德远.超声振动钻削小深孔实验研究[J].机床与液压,2007(9):63-64.
JIANG Pengfei, PAN Xiangsheng, ZHANG Deyuan. Experimental study on ultrasonic vibration drilling of small deep holes[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007 (9): 63-64.

[15] 郭昉,田欣利,张保国,等.超声振动在非金属材料加工中的应用[J].新技术新工艺,2009(9):20-25.
GUO Fang, TIAN Xinli, ZHANG Baoguo, et al. The applications of ultrasonic vibration on machining technologies for nonmetal hard and brittle mat[J]. New Technology & New Process, 2009(9): 20-25.

[16] 谢蓓玲.3J₁,3J₃高弹性合金焊接研究[J].上海钢研,1989(5):23-30.
XIE Beiling. Study on welding of high elastic alloys 3J₁, 3J₃[J]. Shanghai Steel & Iron Research, 1989(5): 23-30.

[17] 张园,康仁科,刘津廷,等.超声振动辅助钻削技术综述[J].机械工程学报,2017,53(19):33-44.
ZHANG Yuan, KANG Renke, LIU Jinting, et al. Review of ultrasonic vibration assisted drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 33-44.

[18] 邵振宇,李哲,张德远,等.钛合金旋转超声辅助钻削的钻削力和切屑研究[J].机械工程学报,2017,53(19):66-72.
SHAO Zhenyu, LI Zhe, ZHANG Deyuan, et al. Study on the Thrust force and chip in rotary ultrasonic-assisted drilling of titanium alloys (Ti6Al4)[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 66-72..

[19] 张欢唱.难加工材料微小孔超声振动钻削技术的研究[D].西安:西安石油大学,2013.

ZHANG Huanchang. Exoerimental study on ultrasonic vibration drilling of difficult-to-cut material micro-hole[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.

[20] 肖子英, 陈学永. 超声振动钻削技术综述[J]. 机电技术, 2009, 32(S1): 1-4.

XIAO Ziyang, CHEN Xueyong. Review of ultrasonic vibration drilling technology[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2009, 32(S1): 1-4.

[21] BREHL D E, DOWT A. Review of vibration assisted machining[J]. Precision Engineering, 2008, 32(3): 153-172.

[22] 王爱玲, 祝锡晶, 吴秀玲. 功率超声振动加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

WANG Ailing, ZHU Xijing, WU Xiuling. Power ultrasound vibration machining technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[23] 李祥林, 薛万夫. 振动切削及其在机械加工中的应用[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1985.

LI Xianglin, XUE Wanfu. Vibration cutting and its application in machining[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1985.

[24] 李晓峰. 铝合金与钛合金超声振动辅助钻削工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

LI Xiaofeng. Process study of ultrasonic assisted vibration drilling aluminum and titanium alloys[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[25] 蔡晓江, 张余升, 刘普林, 等. 超声振动钻削 SiC_p/Al 的表面形成机理研究[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 124-126.

CAI Xiaojiang, ZHANG Yusheng, LIU Pulin, et al. Research on surface formation mechanism in ultrasonic drilling SiC_p/Al[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(2): 124-126.

通讯作者: 董志刚, 博士, 副教授, 研究方向为难加工材料高效加工技术与装备/精密/超精密加工技术与装备, E-mail: dongzg@dlut.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第78页)

[4] GUO S, ZHOU Q, KONG J, et al. Effect of beam offset on the characteristics of copper/304 stainless steel electron beam welding[J]. Vacuum, 2016, 128: 205-212.

[5] KOU S, 闫久春. 焊接冶金学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.

KOU S, YAN Jiuchun. Welding metallurgy[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.

[6] 廖传清, 宿国友, 高艳芳, 等. 7075/5A06 异种铝合金 TIG 焊接头的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015(1): 43-48.

LIAO Chuanqing, SU Guoyou, GAO Yanfang, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075/5A06 dissimilar aluminum alloy TIG welded joints[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015(1): 43-48.

[7] 郭顺, 彭勇, 周琦, 等. 2195 铝锂合金和 TC4 钛合金异种金属电子束焊接行为研究[J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(2): 81-86.

GUO Shun, PENG Yong, ZHOU Qi, et al. Elec-tron beam welding behavior of dissimilar metals in 2195 Al-Li alloy and TC4 Titanium alloy[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2018, 38(2): 81-86.

[8] 都强, 倪家强, 刘艳梅, 等. TA15 大厚度电子束焊接头组织及性能分析[J]. 工具技术, 2016, 5(4): 65-67.

DU Qiang, NI Jiaqiang, LIU Yanmei, et al. TA15 large thickness electron beam welding head micro-structure and performance analysis [J]. Tool Technology, 2016, 5(4): 65-67.

[9] 张秉刚, 王廷, 陈国庆, 等. 大厚度 TC21 钛合金电子束焊接试验[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 5-8, 113.

ZHANG Binggang, WANG Ting, CHEN Guoqing, et al. Large thickness TC21 titanium alloy electron beam welding test [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2009, 30(11): 5-8, 113.

[10] 关峰, 倪家强, 刘广鑫, 等. 大厚度 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头微观组织和力学性能研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(3): 74-80.

GUAN Feng, NI Jiaqiang, LIU Guangxin, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy electron beam welded joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(3): 74-80.

[11] 宋庆军. 大厚度 TC4ELI 钛合金 EBW 质量控制及球壳变形预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

SONG Qingjun. Large thickness TC4ELI titanium alloy EBW quality control and spherical shell deformation prediction [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[12] 左从进, 李晋炜, 余伟, 等. 高温钛合金 Ti-55 与 Ti-60 电子束焊接头力学性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 103-106.

ZUO Congjin, LI Jinwei, YU Wei, et al. Mechanical properties of Ti-55 and Ti-60 electron beam welded joints of high temperature titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Society, 2011, 32(4): 103-106.

[13] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1468-1488.

[14] SUJATA M, BHARGAVA S, SANGAL S. On the formation of TiAl₃, during reaction between solid Ti and liquid Al[J]. Journal of Materials Science Letters, 1997, 16(14): 1175-1178.

[15] DAVIS J R. ASM metals handbook, welding, brazing and soldering[M]. Ohio: ASM International, 1993.

[16] WANG T, LI X, ZHANG Y, et al. Regulating the interfacial morphology of electron beam welded pure Ti/2024Al dissimilar joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 227-231.

[17] REN J W, LI Y J, FENG T. Microstructure characteristics in the interfacezone of Al/Ti diffusion bonding[J]. Materials Letters, 2002, 56(5): 64-52.

[18] CHANG S Y, TSAO L C, LEI Y H, et al. Brazing of 6061 aluminum alloy/Ti-6Al-4V using Al-Si-Cu-Ge filler metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 8-14.

[19] 孙军浩, 曹睿, 陈剑虹. 铝/钛异种金属冷金属过渡熔钎焊接头分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(3): 51-55.

SUN Junhao, CAO Rui, CHEN Jianhong. Analysis of aluminum/titanium dissimilar metal cold metal transition fusion brazed joints [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2015, 36(3): 51-55

[20] ZENG H, LUO G Q, SHEN Q, et al. Preparation of TC4-LY12 joint by vacuum diffusion welding[J]. Advanced Materials Research, 2009, 66(66): 242-245.

通讯作者: 许海鹰, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子束源技术, E-mail: xhyxy@126.com.

(责编 大漠)