

旋转超声-低频复合振动钻孔技术研究^{*}

孟庆荣, 侯书军, 李 慨, 曲云霞, 陈 涛

(河北工业大学机械工程学院 天津, 300130)

摘要 针对旋转超声钻用于建筑装修时, 噪声小而效率偏低的问题, 笔者进行了振动钻机构原理创新与试验研究。首先, 搭建了高低频复合旋转超声的试验振动样机, 可以实现稳定的高低频复合轴向振动钻孔作业; 其次, 以黏土砖为对象, 进行了钻孔效率试验与振动分析, 低频振动的引入, 虽然使超声锤击工件表面的时间缩短了 80%, 但在进给力基本不变的条件下, 钻孔速度提高了一倍左右, 噪声仍可控制在 60 dB(A); 最后, 结合振动特性分析可以推断, 在高低频复合振动钻孔过程中, 超声振动主要负责对脆性材料的破碎作业, 而低频振动主要负责将破碎后形成的颗粒快速离开切削区, 从而提高钻进速度。因此, 高低频复合振动钻进新原理, 可以发挥高频振动与低频振动的优势, 有望发展为一类新型钻孔装备。

关键词 旋转超声; 低频振动; 钻孔效率; 排屑机理; 噪声

中图分类号 TH113.1; TH122

引 言

当前建筑装修领域的噪声污染一直是影响人们居住质量的一大难题, 尤其电锤、冲击钻等在墙上打孔时产生的噪声水平一般达到 100~120 dB, 远超出国家标准规定的白天 75 dB、晚上 55 dB 的标准。建筑墙体所用材料主要为传统黏土砖、混凝土以及各种新型砌块, 均属于非金属硬脆材料。对于该类材料, 传统的振动冲击装置, 具有较高的破拆效率, 但其噪声难以控制。可以借鉴非金属硬脆材料的旋转超声加工方法对建筑墙体实现低噪声高效率地钻孔。

旋转超声加工作为一种复合加工技术, 是加工硬脆材料的有效方法^[1-2]。Azghandi 等^[3]通过试验对比传统钻孔和超声辅助钻孔, 发现超声辅助钻孔时沿刀具轴向的平均压力明显下降, 钻孔进程得到极大改善。Tsuboi 等^[4]进行了 SiC 的超声振动钻孔试验, 发现在超声振动和超声空化作用下刀具磨损下降、寿命提高, 加工精度也有了提高。Wiercigroch 等^[5]提出了一种计算超声激励下硬脆材料去除率(material removal rate, 简称 MRR)的方法, 该方法解释了试验中存在的较高静压力下

MRR 降低的现象, 且通过试验进行了验证。Yin 等^[6]研究了高频超声波振动下岩石的破碎机理, 并通过仿真和试验证明超声振动对硬岩的破碎有促进作用。基于超声加工硬脆材料的显著优越性, 课题组在前期工作中搭建了旋转超声钻孔试验台, 并进行了相关试验。试验表明旋转超声钻孔可使噪声得到有效控制, 但钻孔效率偏低, 不能满足装修的进度要求。Ishikawa 等^[7]通过在工作台上对工件施加低频振动(低于 100 Hz), 提高了旋转超声加工的效率。该研究证明, 增加低频振动对超声钻孔有积极影响。但此后的近 20 年间, 国内外少有人对此进行持续研究。主要原因在于工作台的振动不仅会降低加工质量, 而且也会在机床内部引起较大动载荷, 影响机床的寿命, 故不适合在精密加工中采用。在碳纤维/钛合金叠层材料的钻孔作业中, 轴向低频振动的引入成为一种有利的工具。法国 Mitis 公司进行了低频振动辅助钻孔工艺研究, 结果表明: 相比传统钻削, 低频振动辅助钻孔能有效地提高碳纤维增强复合材料孔的已加工表面质量, 且具有消耗功率少、生产效率高优势^[8-9]。杨浩骏等^[10]通过低频振动轴向钻孔试验发现低振振动加工能保证排屑通畅和一定的孔径精度。Pecat 等^[11]研究发现低频振动辅助钻孔可以降低钛合金钻孔时的钻削温度。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(11972145)

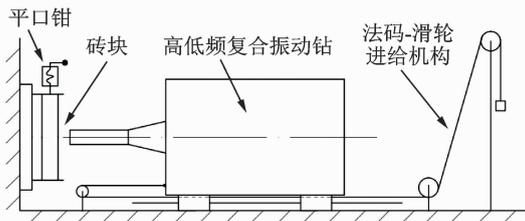
收稿日期: 2018-02-04; 修回日期: 2018-03-26

因此,超声振动在硬脆材料加工中有着显著优势,且噪声水平较低;低频振动在排屑等方面可优化钻孔性能。故笔者希望将旋转超声振动与低频振动复合在一起,发挥各自的优势,为钻孔装修工具的低噪声化与高效化奠定基础。

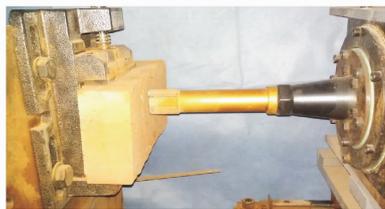
1 复合振动钻孔试验台及其空载动力学特性

1.1 试验台的搭建

钻孔试验均在图1所示自行研制的高低频复合振动设备上完成。将旋转超声钻孔装置通过橡胶弹簧,悬挂在一个可沿导轨进给的平台上,而后通过偏心激励实现低频振动。从而构成一个高低频复合振动钻孔试验台。为掌握该系统的实际动力学特性,采用比利时的LMS Test Lab. 16A振动信号采集分析系统和德国Polytec公司的OFV-505/5000高性能单点式激光测振仪,对该系统在空载情况下的动力学特性进行了简单分析。



(a) 结构简图
(a) Structure diagram



(b) 实物图
(b) Actual object

图1 试验设备

Fig. 1 Experimental apparatus

1.2 试验台空载状态的动力学特性分析

沿主轴方向,用橡胶锤敲击后,测得系统的固有频率 $f=6.40\text{ Hz}$, $\xi=0.096$ 。系统在偏心激励下的幅频特性的测试与分析结果如图2所示。

由图2可知,当激振频率处于 $30\sim 50\text{ Hz}$ 时,刀具的振幅基本稳定在 0.19 mm 左右,可以实现为系统提

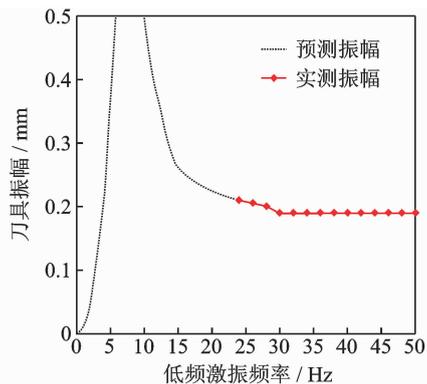


图2 设备幅频响应曲线

Fig. 2 Amplitude-frequency response curve

供低频振动,实施高低频复合振动钻孔的要求。其振幅的大小和频率的高低,可以根据需要进行调整。

2 复合振动钻孔的效率试验

选取尺寸 $240\text{ mm}\times 115\text{ mm}\times 53\text{ mm}$ 的标准黏土砖为试验材料。试验刀具为自制的钎焊金刚石钻孔刀具,如图3所示。



图3 试验刀具

Fig. 3 Experimental tool

2.1 试验参数设计

影响振动钻削效率的因素较多,本研究的主要目的在于探究在旋转超声钻孔过程中增加不同频率的低频振动会对钻孔过程带来什么影响。主轴转速、刀具顶紧力以及系统振动参数,均是影响旋转超声钻孔效率的主要因素。本研究试验参数设计如下:轴向静压力保持 100 N ;主轴转速分别为 $60, 140, 220\text{ r/min}$;低频振动频率分别为 $30, 35, 40, 45, 50\text{ Hz}$ 。

2.2 试验结果

在刀具的轴向压力保持为 100 N ,在不同高低频组合振动下的钻孔效率如图4所示。

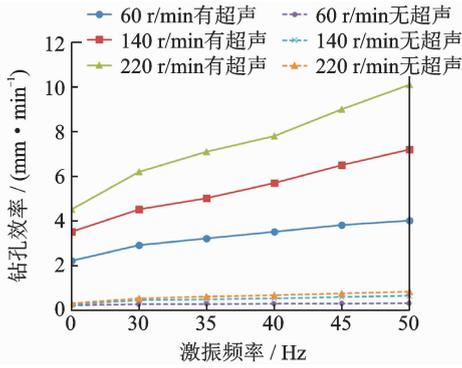


图 4 低频振动频率对钻孔效率的影响

Fig. 4 Effect of low frequency vibration on drilling efficiency

由此可以看出:①单纯增加低频振动时,钻孔效率很低,最大值约为 0.9 mm/min;②单纯增加超声振动时,钻孔效率比单纯低频振动有明显提高,达 4.2 mm/min;③在高低频振动都开通后,钻孔效率比单纯增加低频振动和单纯增加超声振动都有显著提高。而且在其他参数保持不变的情况下,钻孔效率随低频振动频率的增加而不断提高。如加入 50 Hz 的低频振动,可使钻孔效率提高 2 倍多。

在轴向静压力为 100 N、主轴转速为 60 r/min 的试验条件下钻孔,对比增加不同激振频率后所得钻屑的粒度分布,如表 1 所示。所得钻屑形态如图 5 所示;经过粒度分析,筛上质量所占总质量的百分比如图 6 所示。



图 5 钻屑

Fig. 5 Drilling chips

表 1 不同低频激振频率下的粒度分布

Tab. 1 Particle size distribution at different low- frequencies

频率 / Hz	目 数						
	40	100	160	250	300	400	>400
0	0	0.94	3.58	18.83	29.96	37.27	9.42
30	1.05	5.46	6.30	54.12	22.64	8.56	1.87
40	2.72	6.52	8.03	49.16	23.67	6.82	3.08
50	3.34	7.18	6.92	47.38	28.92	5.3	0.96

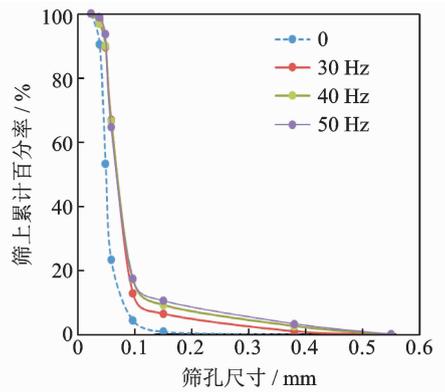


图 6 不同低频激振频率下的粒度分布

Fig. 6 Particle size distribution at different low- frequencies

由图 6 可知,单纯旋转超声钻孔时,切屑的粒度分布主要集中于 250~400 目之间,以 300 和 400 目的筛上质量所占比重较大;当高低频复合振动钻孔时,切屑颗粒的粒度分布主要集中于 160~300 目之间,以 250 和 300 目的筛上质量所占比重较大,而 40 和 100 目的筛上比重增加,400 目及其更高目数的筛上质量降低。也就是说,低频振动的引入,使得钻孔切屑的平均粒度增大,比表面积减小,比能耗降低,因此钻孔效率得到提高。

3 复合振动钻孔过程的噪声分析

利用振动提高钻孔效率,同时也会增加系统的噪声。本技术研究的目的,在于在保证噪声水平的基础上,进一步提高钻孔效率。为此采用 LMS. Test. Lab 声学测试系统,对其进行了噪声分析。根据《GB22337-2008 社会生活环境噪声排放标准》和《GB3096-2008 声环境质量标准》规定的 2 类声环境功能区的环境噪声限值,昼间不高于 60 dB(A)。故该设备噪音测试以 60 dB(A)为标准判断是否满足低噪声。

1) 空载情况下,单纯运行步进电机和振动电机,所测噪声谱如图 7(a)所示。可以看出,噪声主要集中在中低频段,其中以 1 376.00 Hz 频率时对应的 51.10 dB(A)值最大。

2) 空载情况下,启动步进电机、振动电机和超声电源,测得在高低频复合振动情况下的噪声谱如图 7(b)所示。对比图 7(a)可以看出,由于增加了超声振动,设备产生了频率高于 10 kHz 的噪声,且不同频率的噪声值大小均有变化。中低频段的最高值为 1 376.00 Hz,声压为 58.66 dB(A);而 19 808.00 Hz 的高频噪声峰值为 87.88 dB(A)。

3) 在正常钻孔状态下,以高低频复合振动进行钻孔作业,噪声谱如图 7(c)所示。可以看出该曲线趋势和图 7(b)图像基本一致。中低频段 1 376.00 Hz 的声压值为 57.42 dB(A),而超声段 19 808.00 Hz 的声压值达到 89.90 dB(A)。一般说来,此部分噪声,对于装修施工人员以及周围居民的影响不大。

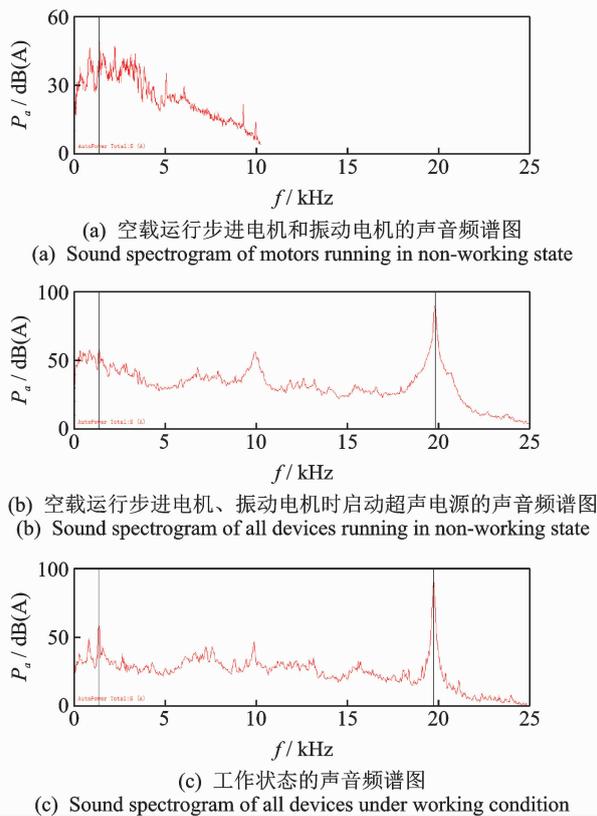


图 7 不同条件下设备声音频谱图

Fig. 7 Sound spectrogram under different conditions

4 复合振动钻孔技术的机理分析

由图 4 可知,引入低频振动后,旋转超声钻孔设备的钻孔效率有了明显提高。为深入分析高低频复合振动的钻孔机理,对切削区两端的刀具侧与工件侧的振动响应进行了测试,并对低频与超声复合振动钻孔中的分工与增强机制进行了分析。

4.1 刀具侧的振动响应分析

在刀具转速为 60 r/min,轴向静压力为 100 N 时,使用单点激光测振仪,采集不同条件下刀具侧设备节点处的振幅时域曲线。采集数据结果如图 8 所示。

由图 8 可知,不施加低频振动钻孔时设备位移大小为 0.06 mm。而高低频复合振动钻孔时的振

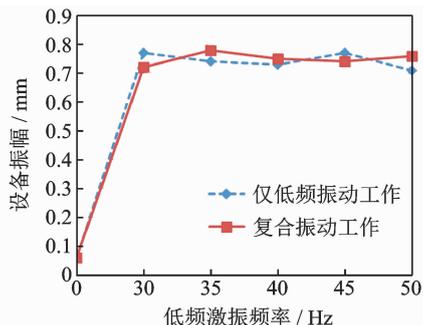


图 8 振动频率对刀具侧振幅的影响

Fig. 8 Effect of low frequency vibration on amplitude

幅大小为 0.75 mm 左右,是旋转超声钻孔时振幅的 11 倍多。低频振动钻孔振幅与高低频复合振动钻孔振幅大小相似,均为 0.75 mm 左右,即高低频复合振动钻孔设备工作时超声振动对工作的振幅几乎没有影响,而低频振动决定设备工作振幅。

4.2 工件侧的振动响应分析

使用 LMS 振动信号采集系统,对工件夹具的振动加速度,进行了测试分析。采样带宽为 51 200 Hz。保持转速 60 r/min 和静压力 100 N 不变,采集工件夹具在不同低频激振频率下的加速度信号如图 9 所示。

为了便于观测图像规律,分别截取 0.2 s 的时间段对图像进行分析。低频振动引入后,加速度时域信号里出现了明显的密集区和过渡区。根据图 9(c)时域图可以得出,每秒钟密集区数量正好与低频激振频率对应。在两个密集区的过渡区,理论上刀具与工件不接触,应为直线,测试不到加速度信号,但实际上由于设备刀具同轴度等原因,无法做到刀具往复运动时侧面不接触工件,故图像会出现部分微小波动,这并不影响图像的主要趋势。图 9(b)为旋转低频振动钻孔时工件侧的加速度信号时域图,可以看出加速度幅值仅为 3 g 多,在此基础上增加超声振动形成高低频复合振动,时域图如图 9(c)。可以看出加速度幅值为 50 g 左右,与图 9(a)仅旋转超声钻孔时加速度幅值大小基本一致,证明工件受到的撞击力主要来源于超声振动。即在高低频复合振动钻孔设备中,超声振动起主要的加工作用,可显著提高刀具对材料的锤击加工作用,提高钻孔效率。

统计复合振动钻孔时每秒钟加速度信号密集区的有效超声振动撞击次数,有效撞击按如下标准统计:加速度值不小于其所在密集区峰值的 $\sqrt{2}/2$ 倍的撞击。统计结果如表 2 所示。

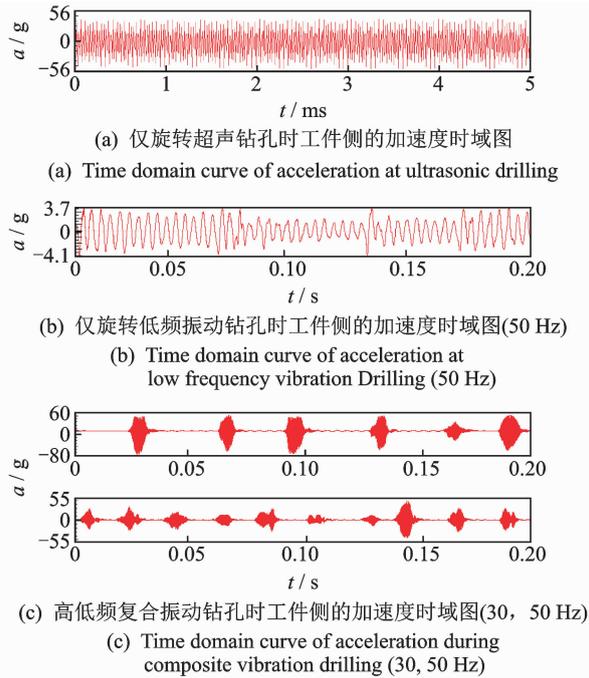


图 9 不同条件下工件侧的加速度信号图

Fig. 9 Acceleration signal curve on the side of workpiece under different conditions

表 2 不同频率下每秒钟高频撞击次数统计

Tab. 2 Times of high frequency impact at different frequencies

低频振动 频率/ Hz	每次振动中 高频撞击次数	每秒内 高频撞击次数
30	118~125	3 540~3 750
35	102~108	3 570~3 780
40	88~96	3 520~3 840
45	79~83	3 555~3 735
50	70~74	3 500~3 700

由表 2 可以得出,当低频振动频率处于 30~50 Hz 时,每秒钟高频撞击次数均为 3 650 次左右,约是每秒总超声撞击次数的 20% 左右,即高低频复合振动钻孔过程中,施加此范围内的低频振动对超声加工工件的锤击效率无影响。而钻孔效率之所以随着低振频率增加而增加,结合图 9(c) 分析可知是因为每秒钟排屑次数随低振频率增加而增加。由此证明,低频振动通过提高大振幅排屑次数可以提高钻孔效率。

4.3 复合振动脆性材料钻孔中的破碎与排屑机理分析

超声振动的振幅、频率分别为 10 μm 和

20 kHz,振动加速度峰值为 157 913.67 m/s²,速度峰值为 1.257 m/s。而低频振动的最高频率与振幅分别为 50 Hz 与 0.19 mm,振动加速度峰值为 18.75 m/s²,峰值速度为 0.059 7 m/s。超声振动的加速度和峰值速度,分别为低频振动的加速度和速度峰值的 8 422 倍和 21 倍,而其振幅仅为低频振动的 1/19。

对于脆性材料,10 μm 的超声振动产生的冲击作用,已足够将接触到的脆性材料破碎。不加低频振动时效率不高的原因在于大量的破碎颗粒来不及脱离破碎区,即在刀具的挤压与不断地冲击下,形成一层微小颗粒层,限制了刀具与新生工件表面的直接接触,而不能将振动转化成对新生表面的有效冲击,形成新的破碎。

低频振动引入钻孔机构后,如此小的振动冲击,不足以对脆性材料形成有效破碎。但其较大幅度的活塞运动,可以让新生成的破碎物,有更多的时间和更大的自由空间,去脱离破碎区,从而为超声振动的锤击,创造更好的力学条件,提高输送超声振动的破碎产物的效率。故增加低频振动可以使旋转超声钻从效率方面得到增强提高。

5 结 论

1) 增加低频振动可以使旋转超声钻提高效率。当旋转超声钻增加 30~50 Hz 的大振幅低频振动时,设备对黏土砖的钻孔效率随低频振动频率的增加而提高。于旋转超声设备的刀具增加不同频率的低频振动,在同等条件下钻孔效率最高为单一旋转超声钻孔的 2 倍多。

2) 在旋转超声复合低频振动钻孔设备中,当大振幅低频振动频率为 30~50 Hz 时,超声振动对工件起加工作用,低频振动起加剧排屑的作用。

3) 不考虑该试验超声设备工作频率正好处于人耳听界域附近,该设备满足低噪声钻孔要求,且噪声值低于 60 dB(A)。

4) 本设备证明了旋转超声复合低频振动钻孔技术用于建筑装修领域低噪声打孔的可行性,显著提高了旋转超声钻的钻孔效率,但相比电锤等高噪声开孔工具效率仍偏低。针对效率和噪声问题接下来可以从提高刀具转速、更换刀具材料和结构形式、提高超声波频率等方面进行改进。

参 考 文 献

- [1] 房丰洲, 倪皓, 宫虎. 硬脆材料的旋转超声辅助加工[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(3): 227-234.
FANG Fengzhou, NI Hao, GONG Hu. Rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2014, 12(3): 227-234. (in Chinese)
- [2] 冯平法, 王健健, 张建富, 等. 硬脆材料旋转超声加工技术的研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 3-21.
FENG Pingfa, WANG Jianjian, ZHANG Jianfu, et al. Research status and future prospects of rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3-21. (in Chinese)
- [3] AZGHANDI B V, KADIVAR M A, RAZFAR M R. An experimental study on cutting forces in ultrasonic assisted drilling [J]. Procedia Cirp, 2016, 46: 563-566.
- [4] TSUBOI R, KAKINUMA Y, AOYAMA T, et al. Ultrasonic vibration and cavitation-aided micromachining of Hard and brittle materials[J]. Procedia Cirp, 2012, 1: 342-346.
- [5] WIERCIGROCH M, NEILSON R D, PLAYER M A. Material removal rate prediction for ultrasonic drilling of hard materials using an impact oscillator approach[J]. Physics Letters A, 1999, 259(2): 91-96.
- [6] YIN S, ZHAO D, ZHAI G. Investigation into the characteristics of rock damage caused by ultrasonic vibration[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2016, 84: 159-164.
- [7] ISHIKAWA K, SUWABE H, NISHIDE T, et al. A study on combined vibration drilling by ultrasonic and low frequency vibrations for hard and brittle materials [J]. Precision Engineering, 1998, 22(4): 196-205.
- [8] LADONNE M, CHERIF M, LANDON Y, et al. Modelling the vibration-assisted drilling process: identification of influential phenomena [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 1657-1666.
- [9] JALLAGEAS J K, NEVEZ J Y, CHÉRIF M, et al. Modeling and optimization of vibration-assisted drilling on positive feed drilling unit [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5/8): 1205-1216.
- [10] 杨浩骏, 陈燕, 徐九华, 等. Ti/Al 叠层结构低频振动制孔试验研究[J]. 航空制造技术, 2017, 521(z1): 16-21.
YANG Haojun, CHEN Yan, XU Jiuhua, et al. Experimental research on low frequency vibration-assisted hole making of Ti/Al stacked structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 521(z1): 16-21. (in Chinese)
- [11] PECAT O, BRINKSMEIER E. Low damage drilling of CFRP/Titanium compound materials for fastening [J]. Procedia Cirp, 2014, 13: 1-7.



第一作者简介:孟庆荣,男,1991年8月生,硕士生。主要研究方向为振动的利用与控制。

E-mai: Mengqr222@163.com

通信作者简介:侯书军,男,1963年7月生,博士、教授、博士研究生导师。主要研究方向为振动的利用与控制。

E-mai: Shujun.hou@hebut.edu.cn