

CFRP/ 钛合金叠层构件低温钻削的轴向力与成孔质量研究*

刘书暖,夏文强,王 宁,刘永强,叶忠义

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

[摘要] CFRP 和钛合金叠层构件以其优异的性能广泛应用于航空、航天、汽车等领域。二者由于材料加工特性的差异,需要采用不同的钻削工艺参数才能获得满意的加工质量。为保证孔同轴度和加工效率,通常采用同一参数一体钻孔。一体钻孔会导致孔的界面烧伤、复材表面划伤、孔径一致性差等问题。为解决上述问题,提出一种低温钻孔工艺,通过钻削试验,研究低温条件下 CFRP/ 钛合金叠层构件钻孔的轴向力、孔径一致性和表面质量。试验表明,低温条件下 CFRP/ 钛合金叠层构件钻孔的轴向力增加,孔径一致性和表面质量均得到改善,证明了低温下 CFRP/ 钛合金叠层构件一体钻孔的可行性。

关键词: CFRP/ 钛合金叠层; 低温; 钻孔轴向力; 加工质量

Research on Thrust Force and Hole Quality of Drilling CFRP/Ti Stacks in Low Temperature

LIU Shunuan, XIA Wenqiang, WANG Ning, LIU Yongqiang, YE Zhongyi

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and titanium (Ti) stacks are used widely in aviation, aerospace, automobile and other fields owing to the excellent performance. Because of the difference of material processing characteristics, different parameters are applied in drilling process of CFRP and Ti for satisfactory processing quality. However, CFRP and Ti are usually drilled together for the coaxiality of holes and machining efficiency. There are a lot of problems when drilling CFRP/Ti stacks, such as interface burns of holes, scratch of CFRP and the worse aperture consistency. In order to solve the above problems, a low temperature drilling process was proposed, and the drilling thrust, aperture consistency and surface quality of CFRP/Ti stacks in low temperature were studied by drilling experiments. The results show that the thrust force of CFRP/Ti stacks increases while aperture consistency and surface quality are improved in low temperature, which prove the feasibility of drilling CFRP/Ti stacks in low temperature.

Keywords: CFRP/Ti stacks; Low temperature; Drilling thrust force; Machining quality

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.082

碳纤维增强型复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)和钛合金具有比强度高、热强度高、重量轻、抗腐蚀等优点,二者的叠层构件广泛应用于航空、航天、汽车等领域^[1-3]。实际生产中,CFRP/钛合金叠层构件主要采用螺栓或铆钉连接方式,因此连接孔的质量极大地影响着装配质量^[4]。CFRP 钻孔一般采用高转速和小进给量,钛合金则采用低转速和适量进给量。为了提高 CFRP/ 钛合金叠层构件的孔同轴度和加工效率,通

常采用一道工序同时加工 CFRP 和钛合金两种完全不同切削特性的难加工材料^[5-7]。因工艺参数存在巨大差别,一体化钻孔会面临很多问题,如加剧刀具磨损,产生大量的切削热,进而导致孔的界面烧伤、复材表面划伤、孔径一致性差等问题^[8]。

目前绝大多数研究人员通过优化工艺参数、改进加工工艺、采用不同形状和几何角度的刀具、对刀具进行涂层等方式来实现 CFRP/ 钛合金叠层构件的高质量钻孔。Ozden^[4]、南成根^[9]等通过试验研究分析了主轴转速和进给量对钻孔质量的影响,结果表明低进给量、高主轴转速能够改善 CFRP 的分层缺陷; Xu 等^[10]分别采

* 基金项目: 国家自然科学基金(51475379); 陕西省重点研发计划项目(2017GY-101)。

用无涂层和有 PVD TiAlN 涂层的硬质合金麻花钻进行钻孔试验,发现有涂层的刀具由于涂层的存在能够改善孔壁粗糙度,降低孔径误差,而无涂层的刀具由于几何形状的原因获得了较低的 CFRP 分层缺陷和钛合金钻出毛刺宽度等^[10]; He^[11]、董辉跃^[12]等采用螺旋铣孔的工艺方法提高了制孔精度,避免了复合材料加工时产生的孔壁损伤,入口撕裂得到明显改善,钛合金孔的出口也没有毛刺。虽然这些研究对于减少刀具磨损、提高孔质量等有很大的贡献,也取得了许多成果,但是环境温度对加工影响的研究较少。

CFRP 材料本身的导热性能较差,钻削过程中切削热难以及时排出,严重时还会烧焦基体或者使基体材料软化,所以加工中可能出现材料分层、撕裂、毛刺和刀具磨损严重、使用寿命低等情况^[13]。钛合金钻削过程中发热严重,温度过高时还会产生切屑自燃的现象,造成材料严重氧化^[14]。目前已经有一些学者研究了冷却条件对加工的影响。孟春等^[15]将液氮作为冷却介质直接喷向切削区来进行钛合金的车削加工,结果表明低温条件下主切削力有所增大,但进给方向力减小,刀具磨损状况与表面质量均得到改善,断屑相对容易; Bhattacharyya 等^[16]研究了低温条件下对钻削复合材料的影响,发现低温条件可以改善刀具性能和工件质量,但同时也提高了轴向力和扭矩。

目前 CFRP 和钛合金在低温条件下一体钻削的相关研究很少,因此本文提出采用一种低温钻孔工艺,改善 CFRP/钛合金叠层构件钻孔质量。通过试验,研究低温条件下 CFRP/钛合金叠层构件钻孔轴向力、孔径一致性和表面质量。

1 试验设计

1.1 试验条件

试验机床为南京第二机床厂生产的 XKN713 型立式数控加工中心,其主轴最高转速 4500r/min。钻头为整体硬质合金麻花钻,公称直径为 6mm,顶角为 118°,螺旋角为 30°。

CFRP 为铺层方向为 [0°/90°] 的编织型碳纤维树

脂基复合材料,厚度为 3.5mm,宽度为 30mm,长度为 120mm。钛合金为 Ti-6Al-4V,厚度为 3mm,宽度为 30mm,长度为 120mm。详细材料特性见表 1 和表 2。

试验冷却介质为干冰(-78℃)和液氮(-196℃)。干冰装在保温箱里可以使 CFRP/钛合金叠层构件温度降低到 -40~-50℃,液氮通过自喷式液氮枪喷出,能使 CFRP/钛合金叠层构件温度降低到 -120~-140℃。

本试验测力系统主要包括 9257A 型压电式传感器、KISTLER 5073 电荷放大器、HBM GEN2i 数据采集器、采集软件 Perception。试验孔径测量工具采用哈尔滨量具刀具集团的 810-01 型内径千分表。

1.2 试验方案

1.2.1 试验系统

本次试验选用从 CFRP 侧钻入、钛合金侧钻出的顺序钻孔,因此 CFRP 板在钛合金板上方。同时,在钛合金板下方放置垫块,防止钻头与测力仪碰撞。在钻削过程中,为了防止低温对测力仪的精确度造成影响,在测力仪和垫块之间增加一层树脂板隔热层,保证测力仪的精确度。钻孔过程中,压电式传感器实时测量轴向力,并将这些力信号转换成电信号,电信号经电荷放大器放大处理后,传输到数据采集器中被记录下来,最后利用采集软件 Perception 进行处理和分析。试验系统示意图如图 1 所示。

1.2.2 冷却方案

(1) 干冰冷却方案。

固体干冰无法在切削过程中直接喷覆在切削区域表面,因此采用预先冷却的方法来实现干冰降温。在加工之前,先将试件和刀具预先放入存放有干冰的存储箱中,待试件和刀具冷却以后取出试件并安装在工作台上进行加工。因为钻孔过程中会产生大量的切削热,为了保持工件和刀具的低温状态,每钻 1 个孔,就用干冰给刀具短暂降温,每钻 3 个孔,就将试件和刀具再次放入干冰箱中冷却。

(2) 液氮冷却方案。

液氮为液态冷却剂,通常有浇注、浸泡和直接喷淋 3 种使用方法。本试验采用浸泡和直接喷淋两种方法

表1 CFRP材料特性

Table 1 Material properties of CFRP

纤维名称	拉伸强度 /GPa	拉伸模量 /GPa	断裂应变 /%	密度 / (g·cm ⁻³)	纤维直径 /μm
T300	3.35	230	1.5	1.76	7

表2 钛合金材料特性

Table 2 Material properties of Ti alloy

化学成分	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	热导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度 / (g·cm ⁻³)	硬度 HB
Ti-6Al-4V	900	110	7.5	4.43	320

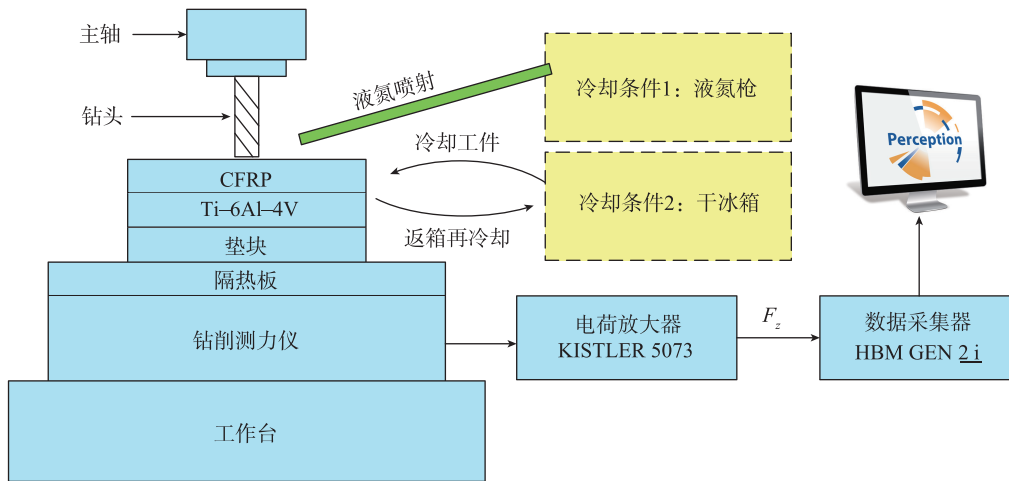


图1 试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

相结合的形式进行冷却。浸泡是将工件和垫板均放入液氮中并静置 3~5min,使整体温度达到与液氮近似的温度。而喷淋则是通过液氮喷头将液氮喷射在加工区域,主要是为了减少加工过程中摩擦对工件和刀具温度升高的影响。

1.2.3 试验参数

考虑切削效率和钛合金的切削速度,钻削 CFRP/钛合金叠层构件时,选取转速为 1000r/min,进给速度为 20mm/min、40mm/min、60mm/min、80mm/min、100mm/min。

2 试验结果与讨论

2.1 低温对CFRP/钛合金叠层构件钻孔轴向力的影响

轴向力是研究 CFRP/钛合金叠层构件钻孔的重要指标之一,对于刀具磨损、加工孔的质量等都有很大影响。经试验,进给速度 40mm/min、转速 1000r/min 时 3 种冷却条件下(常温、干冰、液氮)钻削 CFRP/钛合金叠层构件的轴向力随时间的变化相似,如图 2 所示,轴向力由大到小的顺序为:液氮、干冰和常温。可以发现,低温使得钻削轴向力增大。下面分别分析低温下 CFRP 和钛合金的钻削轴向力。

2.1.1 低温对CFRP钻孔轴向力的影响

在 3 种冷却条件下钻削 CFRP 时,最大轴向力的变化规律如图 3 所示(转速为 1000r/min)。可知,在进给速度相同条件下,最大轴向力随温度的变化趋势相同,都随着温度的降低而升高;并且温度对最大轴向力的影响较明显,通常进给速度的提高会使轴向力明显增大,而液氮冷却条件下、进给速度为 20mm/min 时的最大轴向力比常温条件下、进给速度为 60mm/min 时的最大轴向力还要大。发生这种现象的主要原因是,通过干冰和

液氮冷却降温,CFRP 的强度提高,因此在钻削时会产生更大的轴向力。虽然轴向力变大了,但由于钛合金的支撑作用,CFRP 却并未产生分层。同时也可以发现,在同一冷却条件下,随着进给速度增加,单位时间材料切削量增加,最大轴向力总体上也有增加的趋势。

2.1.2 低温对钛合金钻孔轴向力的影响

在 3 种冷却条件下钻削钛合金时,最大轴向力的变

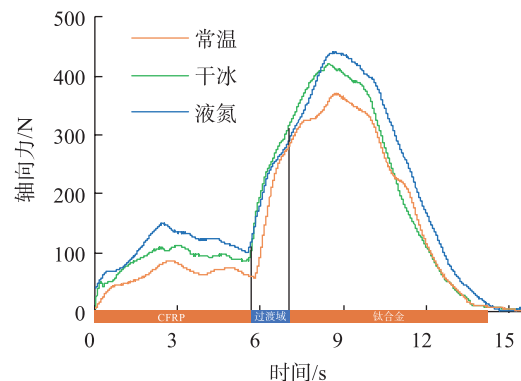


图2 不同冷却条件下的钻削轴向力

Fig.2 Thrust force at different cooling conditions

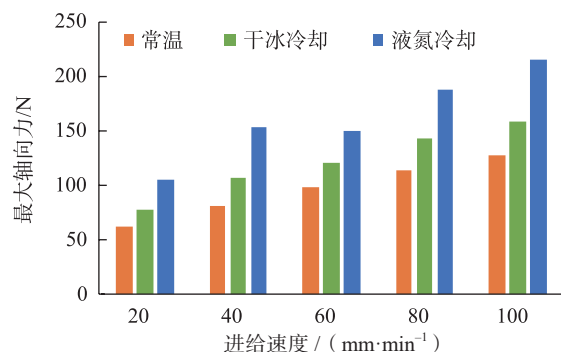


图3 不同冷却条件下钻削CFRP的最大轴向力

Fig.3 Maximum thrust force of drilling CFRP at different cooling conditions

化规律如图4所示(转速为1000r/min)。可以看出,在不同的进给速度下,最大轴向力随温度的变化趋势基本相同,都随温度的降低而升高,原因与CFRP类似,即温度的降低使材料的强度提高,从而在钻削时产生更大的轴向力。同时可以发现,轴向力升高的趋势并不明显,这是因为在钻削钛合金时会产生大量的热,影响了冷却效果;而当进给速度为80mm/min和100mm/min时,甚至干冰冷却条件下的最大轴向力比常温条件下的还要小,这是因为当进给速度较大时,产热量进一步加大,而试验中干冰冷却效果有限,无法对工件持续降温,出现了类似“姆潘巴现象”的情况,即当温差达到一定程度时,干冰冷却后温度较低的钛合金反而比常温下钛合金升温更快。另外,在同一冷却条件下,进给速度的增加导致单位时间材料切削量增加,最大轴向力也随之增加。

2.2 低温对孔径一致性的影响

在CFRP/钛合金叠层构件钻孔工艺中孔径一致性是钻孔质量的重要评价标准之一。由于材料具有一定弹性,钻孔后一般会出现回弹现象,回弹量的大小与材料本身的弹性模量有关^[17]。通常弹性模量小的材料加工时的弹性变形大,回弹量也较大,钻孔后孔径偏小。CFRP中树脂基体的弹性模量小,而钛合金的弹性模量大,这就导致加工后CFRP孔径小于钛合金孔径。因此,CFRP/钛合金叠层构件钻孔中会出现孔径不一致的现象,这导致连接干涉量不均匀,严重影响装配质量。图5和图6分别为同一切削参数(40mm/min、1000r/min)、不同冷却条件下钻削CFRP/钛合金叠层构件后CFRP和钛合金的孔径变化图和孔径差值图。

从图5可以发现,CFRP/钛合金叠层构件钻孔出现了明显的孔径不一致性,钛合金的孔径大于CFRP的孔径。同时,由图6可知,除去第64个孔和第96个孔的异常数据,随着温度的降低,CFRP和钛合金之间的孔径差值总体上是减小的,即孔径一致性得到改善。两个异常点源于试验中的操作误差或者测量误差。因为在低温下,CFRP的模量增大,在加工过程中变形小,故孔径较常温增大。而低温下钛合金的孔径变化不明显,故CFRP和钛合金之间的孔径差值减小,即CFRP/钛合金叠层构件钻孔的孔径一致性得到了提高。

2.3 低温对表面质量的影响

出口毛刺和烧蚀是CFRP/钛合金叠层构件钻孔中常见的表面质量缺陷。钻孔过程中,钛合金受到轴向力的作用发生塑性变形,随着刀具持续的进给,便会发生外翻现象,从而形成出口毛刺。出口毛刺关系到材料表面质量的好坏以及零件的连接性能,一旦出现这类缺陷必须采取二次打磨等措施将其去除,从而影响了生产效率。出现烧蚀缺陷的主要原因是钛合金钻削过程中

会产生大量的切削热,而钛合金的导热性差,难以将热量及时排出,严重时就会发生烧蚀现象,从而影响材料的性能和表面质量。图7显示了同一切削参数(40mm/min、1000r/min)、不同冷却条件下钻削CFRP/钛合金叠层构件的出口样貌。通过观察可以发现,随着温度的降低,出口毛刺和烧蚀现象减少,表面质量有明显的改善。原因是随着温度的降低,材料的脆性提高,从而产生的塑性变形较少,因此在钻头钻出时材料更容易被去除,不易形成出口毛刺;同时在低温条件下,钻削产生的切

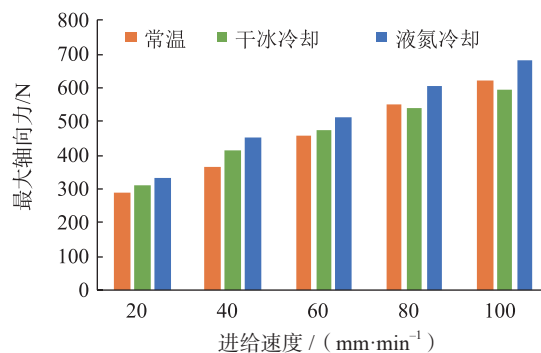


图4 不同冷却条件下钻削钛合金的最大轴向力变化

Fig.4 Maximum thrust force of drilling Ti at different cooling conditions

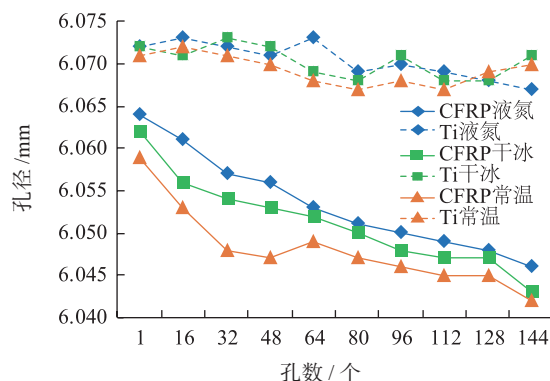


图5 不同冷却条件下的孔径变化

Fig.5 Hole diameter variation at different cooling conditions

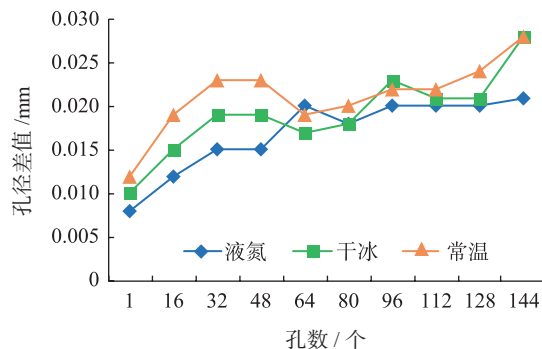


图6 不同冷却条件下的孔径差值

Fig.6 Hole diameter difference at different cooling conditions

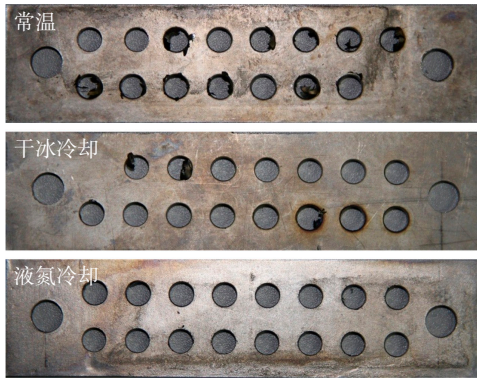


图7 不同冷却条件下出口样貌
Fig.7 Export appearance at different cooling conditions

削热更少,从而抑制了烧蚀现象的发生。

3 结论

本文在常温、干冰冷却、液氮冷却3种冷却条件下钻削CFRP/钛合金叠层构件,研究了低温条件下CFRP/钛合金叠层构件的轴向力、孔径一致性和表面质量,并得出以下结论:

- (1)在低温下,CFRP和钛合金的钻孔轴向力均增加。
- (2)在低温下,CFRP孔径增大,钛合金孔径变化不明显,CFRP/钛合金叠层构件的孔径一致性得到了提高。
- (3)低温能够改善出口毛刺和烧蚀现象。

虽然低温钻削轴向力增大,但孔径一致性得到明显改善,并且CFRP出口毛刺和钛合金烧伤减少,孔的质量得到提高,这证明了低温下CFRP/钛合金叠层构件钻孔的可行性。

参考文献

[1] BEAL A, KIM D W, PARK K H, et al. A Comparative study of carbide tools in drilling of CFRP and CFRP-Ti stacks[C]// ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Vroallis, 2014.

[2] PRABUKARTHI A, SENTHILKUMAR M, KRISHNARAJ V. Study on drilling of CFRP/Ti6Al4V stack with modified twist drills using acoustic emission technique[J]. Steel & Composite Structures, 2016, 21(3): 573-588.

[3] KRISHNARAJ V, ZITOUNE R, COLLOMBET F, et al. Challenges in drilling of multi-materials[J]. Materials Science Forum, 2013, 763: 145-168.

[4] 南成根, 吴丹, 马信国, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔质量研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(11): 177-185.

NAN Chenggen, WU Dan, MA Xinguo, et al. Study on the drilling quality of carbon fiber reinforced plastic and titanium stacks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 177-185.

[5] 张选龙. 碳纤维复合材料/钛合金叠层装配制孔技术研究

[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

ZHANG Xuanlong. Research on drilling of carbon fiber reinforced plastics(CFRP) and titanium alloy stacks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.

[6] PARK K H, BEAL A, KIM D, et al. Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools[J]. Wear, 2011, 271(11/12): 2826-2835.

[7] XU J, MKADDEM A, MANSORI M E. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: a state-of-the-art review[J]. Composite Structures, 2016, 135(1): 316-338.

[8] WANG B, GAO H, CAO B, et al. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(7): 698-706.

[9] OZDEN I, ELAHEH G. Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill [J]. Machining Science & Technology, 2013, 17(3): 380-409.

[10] XU J, MANSORI M E. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks[J]. Composite Structures, 2016, 157: 461-482.

[11] HE G, LI H, JIANG Y, et al. Helical milling of FRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters[J]. Transactions of Tianjin University, 2015, 21(1): 56-63.

[12] 董辉跃, 陈光林, 周兰, 等. CFRP 复合材料/钛合金叠层螺旋铣孔工艺[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 540-549.

DONG Huiyue, CHEN Guanglin, ZHOU Lan, et al. Processing research on orbital drilling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(3): 540-549.

[13] KARNIK S R, GAITONDE V N, RUBIO J C, et al. Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model[J]. Materials & Design, 2008, 29(9): 1768-1776.

[14] 陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2010, 53(15): 26-30.

CHEN Wuyi, YUAN Yuefeng. Research development of cutting technology for titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(15): 26-30.

[15] 孟春, 李淑娟. 液氮低温切削钛合金实验研究 [J]. 机械工程师, 2012(3): 30-32.

MENG Chun, LI Shujuan. Experimental study on cryogenic cutting of titanium alloy with liquid nitrogen cooling[J]. Mechanical Engineer, 2012(3): 30-32.

[16] BHATTACHARYYA D, HERRIGAN D P W. A study of hole drilling in Kevlar composites[J]. Composites Science & Technology, 1998, 58(2): 267-283.

[17] DENKENA B, BOEHNKE D, DEGE J H. Helical milling of CFRP-titanium layer compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology, 2009, 1(2): 64-69.

通讯作者: 刘书暖, 博士, 副教授, 研究方向为难加工材料切削加工、复合材料与结构切削加工工艺, E-mail: liushun@nwpu.edu.cn。

(责编 大漠)