

CFRP/钛合金叠层板钻孔刀具研究进展

赵永锋,李鹏南,李树健,邱新义,邹适,李常平,牛秋林

湖南科技大学机电工程学院

摘要: CFRP/钛合金叠层结构材料具有轻质高强、能承受极端热力载荷等优点,广泛应用于航天航空关键承重部件的制造。在钻削加工 CFRP/钛合金叠层结构时,由于 CFRP 相和钛合金相具有不同的性能特征,导致刀具的磨损行为迥异,从而对 CFRP/钛合金叠层结构的钻孔精度及孔壁质量造成严重影响。为此,探究 CFRP/钛合金叠层结构钻削时的刀具作用机理和开发理想的加工刀具,对确保 CFRP/钛合金叠层结构高品质制孔具有重要意义。针对 CFRP/钛合金叠层结构钻削时存在的刀具磨损快、制孔质量差等问题,从刀具基体材料、刀具涂层材料和刀具结构三个方面,对 CFRP/钛合金叠层结构制孔损伤控制中的刀具开发与应用现状进行了综述,并对相关研究中存在的不足和研究趋势进行了分析和探讨。

关键词: CFRP/钛合金叠层;制孔刀具;刀具磨损;研究现状

中图分类号: TG52;TH16;TB332 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2021.02.001

Review on Research Status of Drilling Tool for CFRP/Titanium Alloy Laminated Structure

Zhao Yongfeng, Li Pengnan, Li Shujian, Qiu Xinyi, Zou Shi, Li Changping, Niu Qiulin

Abstract: CFRP/titanium alloy laminated structures are widely used in manufacturing the key load-bearing components in aerospace industry because of their high strength, low density and the ability to withstand extreme thermal loads. Due to the different material characteristics of CFRP and titanium alloy phases, the wear behavior of tools is very different when drilling, thus causing such defects as poor accuracy and serious wall damage of holes. Hence, investigating the mechanism of drilling the CFRP/titanium alloy stacks structure and developing an ideal tool have become an urgent need to ensure high-quality holes. In this paper, concerning the problems of fast tool wear and poor hole quality in drilling the stacks structure, the development and application status of drilling tools for CFRP/titanium alloy stacks structure are summarized from the aspects of substrate, coating and tool structure, and the shortcomings and research trends in the related researches are also discussed.

Keywords: CFRP/titanium alloy stacks; drilling tool; tool wear; research status

1 引言

由碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)和钛合金材料组成的叠层结构是制造飞行器关键承重结构件的一种创新结构形式^[1],其不仅能克服单一材料的性能缺陷,提高整体强度,降低整体质量^[2,3],还能更好地发挥 CFRP、钛合金材料的性能优势^[4]。

CFRP/钛合金叠层结构常通过螺栓连接等方式制成飞行器结构件,因此叠层结构制孔质量对飞行器结构件的服役寿命具有重要影响^[5]。然而,CFRP 和钛合金均为典型难加工材料,钻削时进出口会产生毛刺等缺陷。同时,由于加工过程排屑困难,切屑易对 CFRP 孔壁产生严重刮擦,并侵入界面区域,如图 1 所示^[3,4,6]。另外,由于钛合金与常用刀具材料

具有较高化学亲和力^[2],易使刀具过早失效。据统计,CFRP/钛合金叠层结构不合格孔中约 60% 是使用非最优加工刀具或非最佳加工参数造成^[7]。随着对 CFRP/钛合金叠层结构件强度、刚度、稳定性要求越来越高,提高制孔质量亟不可待。选择合适的加工刀具对抑制 CFRP 分层、钛合金进出口毛刺等缺陷具有重要意义。因此,探究 CFRP/钛合金叠层结构刀具钻削的作用机理,开发 CFRP/钛合金叠层钻孔刀具仍是当前研究的主题^[8,9]。

针对 CFRP/钛合金叠层结构钻削过程中产生的严重刀具磨损、CFRP 进出口分层、钛合金毛刺等难题,部分学者从切削参数、加工工艺、刀具技术与加工环境以及辅助加工技术等方面进行了研究。其中,刀具技术是解决上述问题的重点。

本文从 CFRP/钛合金钻孔刀具基体材料、刀具涂层材料和刀具结构三个方面,在总结国内外 CFRP/钛合金叠层结构钻孔刀具技术研究现状的基

础上进行系统综述,并对相关研究存在的不足及发展方向进行分析和探讨。

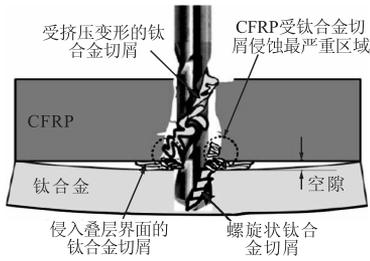


图1 CFRP/钛合金叠层钻削加工示意图^[4]

2 刀具基体材料

CFRP由纤维增强相和树脂基体复合而成,钛合金是均质金属材料,由两者构成的叠层结构具有完全不同的材料断裂机理^[4]。在CFRP/钛合金制孔过程极易出现分层、毛刺、孔壁损伤等缺陷,而具备高硬度、高韧性、高耐磨性等优异性能的刀具能明显抑制上述缺陷的形成。因此,许多学者针对刀具材料选择与开发进行了深入研究。

在CFRP/钛合金叠层结构钻削过程中,高速钢、硬质合金和超硬材料(PCBN或PCD)等多种刀具材料已被广泛研究。其中,Othman A. R.等^[10]使用高速钢麻花钻对CFRP的钻削特性进行分析,发现高速钢麻花钻在钻削20个孔后便发生了侧面磨损。张利新等^[11]对高速钢麻花钻加工钛合金时钻头刃磨参数和刀具磨损进行了综合研究,发现刃磨后角过大会导致刀具磨损加剧。Kim D.等^[12]研究了碳化钨(WC)麻花钻钻削CFRP/钛合金时刀具磨损规律,发现碳化钨麻花钻在高速钻削条件下会产生较大的侧面磨损和边缘磨损。王奔等^[13]针对硬质合金刀具钻削加工CFRP/钛合金叠层构件和钛合金时刀具崩刃失效问题进行了对比研究,结果表明,在相同条件下,硬质合金刀具在钻削钛合金时更易发生刀具崩刃失效现象,刀具寿命更短。Xu J.等^[14]研究了多晶金刚石刀具钻削加工CFRP/钛合金时的磨损特性。实验结果表明,多晶金刚石刀具在钻削钛合金时产生严重磨损是造成刃口磨损的主要原因,而微崩刃主要是由于CFRP/钛合金界面钻削中力的突变和多晶金刚石材料固有脆性造成。Park K. H.等^[15]研究发现,多晶金刚石(PCD)刀具由于高耐磨性和高导热性,在钻削碳纤维复合材料时,能够有效地减小或消除毛刺和分层等制孔缺陷,提高加工质量。

通过对以上钻削CFRP及其叠层结构的刀具材

料分析可以发现,由于碳纤维硬度较高,在加工过程中极易导致钻头的磨料磨损,使得钻削力、钻削温度迅速增加,分层、毛刺等缺陷明显增多。因此,对加工刀具的材料热稳定性、耐磨性、硬度、化学稳定性等都提出了更高的要求,传统高速钢和硬质合金在切削加工复合材料时的性能有待改进,超细晶粒硬质合金、高品质的超硬材料是未来刀具材料的重要发展目标。

3 刀具涂层材料

在刀具基体材料研究的基础上,针对涂层材料这一影响钻削质量和刀具寿命的重要因素,学者们进行了大量研究分析,结果表明,仅部分涂层刀具在加工叠层复合结构时才表现出优异的加工性能和较长的刀具寿命^[16-18]。

Wang X.等^[2]对比研究了在钻削CFRP/钛合金叠层结构时,超硬陶瓷涂层、纳米复合材料涂层等五种不同涂层对刀具切削加工性能的影响。结果表明,超硬陶瓷涂层和纳米复合材料涂层具有良好的抗磨损性能,TiAlCr/TiSi涂层的耐磨性优于TiAlN和TiSiN涂层。陈燕等^[19]研究发现,PCD涂层具有较高耐磨性,能有效减小在CFRP/钛合金叠层结构钻削过程中钛合金切屑的粘附力,从而提高钻孔质量。Isbili O.等^[20]发现,随着钻孔数量的增加,TiAlN涂层严重剥落,使钻头表面失去有效保护,钻孔质量显著下降。Pecat O.等^[21]对比研究了无涂层硬质合金钻头和AlCrN、AlTiN等4种涂层硬质合金钻头钻削CFRP/Ti6Al4V叠层结构时刀具磨损情况,如图2所示^[21],发现随着钻削长度增加,不同涂层的最大侧面磨损量存在显著差异,AlCrN和NHC涂层刀具的侧面磨损量最小,但未对不同涂层的硬度与侧面磨损量的关系做详细研究。

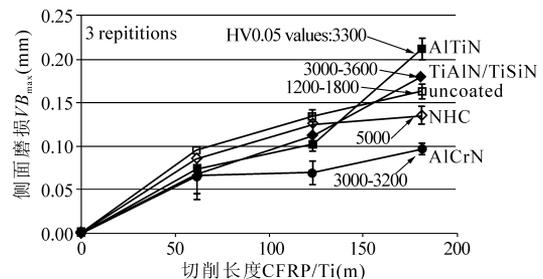


图2 不同涂层刀具钻削CFRP/Ti6Al4V的刀具后刀面磨损

由于钻削叠层结构时加工环境相较于单一材料更严苛,不仅要求刀具涂层具有较高的耐磨性、导热性、硬度以及抗氧化能力,而且对涂层材料抗剥落能力提出了更高要求。Li S.等^[22]指出金刚石涂层耐

热性较差,随着钻削温度升高,涂层与刀具基体的粘结强度降低,会加快涂层的剥落,使得刀具磨损加剧。同时, Soussia A. B. 等^[23]研究发现, Al_2O_3 涂层的导热性和硬度与刀具基体材料相差较大,在切削 CFRP 时易形成阻碍热量传输的热障,加快涂层剥落。Liu Z. J. 等^[24]发现,在 Al_2O_3 涂层和基体材料间添加能提高二者结合强度的 TiCN 作为连接层,能有效减缓涂层剥落。Xu J. 等^[25]使用无涂层钻头、PVD-TiAlN 涂层硬质合金钻头对 CFRP/钛合金叠层结构进行钻孔实验,结果发现无涂层钻头的刀具性能、制孔质量更好。蔡飞等^[26]采用 Si 层梯度设计方法对刀具基体材料进行表面改性处理。结果表明,此方法能有效提高涂层与刀具基体材料之间的结合强度。覃正海等^[27]总结了 TiCN 涂层研究现状后发现,多层涂层体系、多元合金化涂层、纳米多层涂层等新型技术均能有效提高涂层硬度、耐磨性、层间结合强度等性能,能极大减缓刀具磨损情况并延长刀具寿命。

综合国内外对复合材料及其叠层结构的刀具涂层研究可以看到,在致力于研发加工质量好、结合强度高的刀具涂层方面,科研工作者开展了大量积极有益的探索,取得了丰富的研究成果,但仍存在一定的不足,主要表现为:①目前并没有明确的理论对刀具侧面磨损量与刀具涂层维氏硬度之间的相关性进行解释。在今后的研究中有必要对不同类型涂层的硬度与磨损速度、磨损量之间的内在联系进行更加深入的研究。②刀具涂层的裂纹萌生和扩展机制研究尚未明了,在某些切削条件下,如钻削加工高温合金时涂层刀具的切削性能反而低于未涂层刀具。因此,理清涂层刀具裂纹萌生和扩展的机理,是实现 CFRP 叠层结构高质量钻削加工的必要条件。

4 刀具结构

在钻削 CFRP/钛合金叠层结构时,刀具几何特征(见图 3)是决定钻削加工质量的关键^[25]。因此,对钻头几何特征参数及刃型结构进行优化是提高钻孔质量的重要手段。

于书宇等^[29]采用不同“变顶角”结构的钻头进行钛合金/CFRP 叠层构件的钻孔实验,发现随着顶角的增大,转矩越小,孔壁质量越好。张利新等^[11]通过对钛合金进行钻削实验,发现顶角越大,越容易断屑,在横刃两端开切屑槽能够有效减小轴向力,延缓刀刃磨损,提高加工效率。Senthil Kumar M. 等^[30]通过研究 CFRP/钛合金叠层结构钻孔时刀具磨损情况

发现,钻头顶角为 130° 时,磨损更小,排屑效果更优。同样,文献[31-33]对比研究匕首钻和标准麻花钻加工 CFRP 的钻孔质量发现,由于匕首钻顶角和螺旋角相对较小,使得叠层构件毛刺缺陷少,分层损伤小,且具有较好的表面光洁度。陈明^[5]指出,在 CFRP 的切削加工中,大负前角的横刃使得切削加工时轴向力过大,从而引起分层损伤。因此,通常采用 X 型或 S 型修磨方式来改变横刃几何结构。

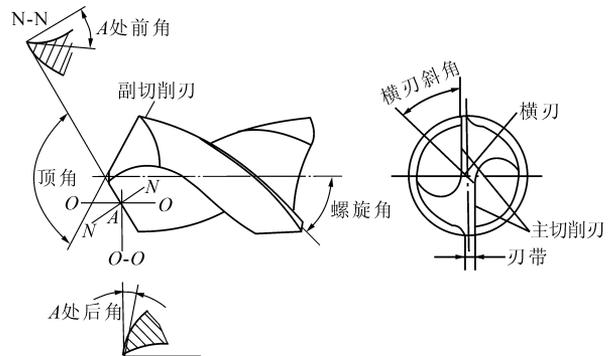
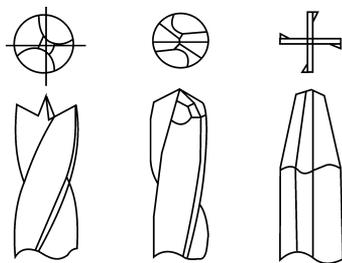


图 3 标准麻花钻结构示意图^[28]

钻头的几何形状由特征角、边缘几何特征等变量决定,其对刀-工的接触状态和切削过程产生直接作用,进而影响制孔质量^[34,35]。因此,特殊几何形状的钻头也具备加工高质量 CFRP/钛合金叠层孔的潜力。Qiu X. 等^[36,37]基于 CFRP 临界分层力和孔侧壁质量优化了阶梯钻第一阶梯直径与第二阶梯直径之比(D_1/D),结果表明 T3 的最大推力 $D_1/D = 0.5$ 时,最大轴向力最小。冷小龙等^[38]采用自主磨制的阶梯钻对 CFRP/钛合金进行钻削试验,实验结果表明,钻铰一体的复合刀具更适合 CFRP/钛合金叠层结构钻削。刘洋等^[39]通过使用双锋角钻头和普通麻花钻对 CFRP 进行钻削试验,发现双锋角钻头钻削 CFRP 时轴向力相较于普通麻花钻减小 20%,其制孔出口质量更好。Fei S. 等^[40]基于拉剪和切推效应,提出了一种减少 CFRP 分层的步进控制方案,设计了一种新型钻头。结果表明,该新型斜刃钻头能够成功实现拉剪和切推效应,显著降低工件损伤。

刘泉鹏等^[41]研究表明,横刃宽度是影响轴向力大小的最主要因素,而增加刃口数量可以显著减小最大轴向力。因此,陈明等^[42]使用自主设计的三尖钻和八面钻进行 CFRP 钻孔试验,获得了良好的孔壁形貌和孔出口质量。章伟等^[43]通过对比烛台钻和普通麻花钻加工 CFRP/钛合金后的孔壁质量,发现烛台钻加工质量更优。同样,Sheikh-Ahmad J. Y. ^[44]的研究表明,采用小刃宽钻头(见图 4)可使钻

孔过程中切削力变小,分层损伤变少,从而提高加工表面质量并延长刀具寿命。



(a) 烛台钻头 (b) 多面钻头 (c) 直槽钻头

图 4

此外,功能性设计的刀具几何结构,如 Kuo C. L 等^[45]提出的双顶角结构已被证明在加工复合材料/金属叠层结构时可取得良好的钻进效果。钻头的双顶角结构可提高“自动定心”能力,从而减少刀具偏转,保证良好的制孔精度。从上述 CFRP 及其叠层结构加工刀具的国内外研究现状可知,选择合适的刀具几何特征参数,能有效地提高 CFRP/钛合金叠层结构的加工质量。钻头横刃宽度是影响切屑分离过程中挤压变形作用面积的主要因素,对钻削轴向力有重要影响。

顶角和螺旋角决定钻头主切削刃长度、刀刃锋利度,为了减少钛屑排出时对复合材料造成的二次损伤,应采用高顶角和高螺旋角的几何设计。三尖钻、八面钻、烛台钻、双锋角钻、阶梯钻以及新型斜刃钻头等均能有效提高叠层结构钻削质量。

5 结语

本文针对 CFRP/钛合金叠层结构钻削加工时存在的严重刀具磨损等问题,从刀具基体材料、刀具涂层材料和刀具结构三方面,对现有的 CFRP/钛合金叠层结构高质量钻削进行了全面综述,在综合分析的基础上,对当前的研究现状进行总结并对今后的研究工作提出展望。

(1) 切削技术不断发展对刀具材料的热化学稳定性、耐磨性、硬度等都提出了更高的要求,超细晶粒硬质合金、高品质的超硬材料将会是未来刀具材料的发展方向。

(2) 由于 CFRP 具有极高的硬度和磨蚀性,会导致刀具表面磨损严重,出现涂层剥落等现象。因此,提高涂层与刀具基体材料间粘结强度是未来刀具涂层技术的重要研究方向。

(3) 在开发适用于 CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具方面的理论研究,目前仍缺乏系统性,缺少相关

理论指导,还需大力开展制孔刀具开发设计方面的基础理论研究。

(4) 未来刀具技术的发展方向是基于刀具基体材料、刀具涂层材料、刀具几何结构综合考量后的一体化刀具设计,进而实现高品质制孔及刀具长寿命服役。

参考文献

- [1] Xu J, Mansori M E. Finite element analysis when orthogonal cutting of hybrid composite CFRP/Ti [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 87: 12 - 16.
- [2] Wang X, Sturtevant C, Kwon P Y, et al. Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers [J]. Wear, 2014, 317 (1 - 2): 265 - 276.
- [3] 焦锋, 王东. CFRP/钛合金叠层材料制孔技术的现状与展望 [J]. 宇航材料工艺, 2019, 48 (6): 6 - 15.
- [4] 王昌赢. CFRP/钛叠层结构钻削损伤对孔壁质量和制孔精度作用机理与损伤抑制技术 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [5] 陈明, 徐锦洪, 安庆龙, 等. 碳纤维复合材料与叠层结构切削加工理论及应用技术 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019: 107.
- [6] Sharif S, Rahim E A. Performance of coated-and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy-Ti6Al4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185 (1): 72 - 76.
- [7] Wika K K, Sharman A R C, Goulbourne D, et al. Impact of number of flutes and helix angle on tool performance and hole quality in drilling composite/titanium stacks [R]. SAE Technical Paper, 2011.
- [8] Alberdi A, Artaza T, Suárez A, et al. An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86 (1 - 4): 691 - 704.
- [9] 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 (11): 177 - 185.
- [10] Othman A R, Hassan M H, Bakar E A, et al. Statistical analysis of the machining parameters in drilling of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) composite with various drill types [M]. Singapore: Intelligent Manufacturing and Mechatronics, 2018: 141 - 154.
- [11] 张利新, 沈兴全, 张晓, 等. 基于正交试验的麻花钻钻削钛合金的刃磨参数选择 [J]. 现代制造工程, 2013 (6): 8 - 11.
- [12] Kim D, Beal A, Kwon P. Effect of tool wear on hole quality in drilling of carbon fiber reinforced plastic-titanium alloy stacks using tungsten carbide and polycrystalline diamond

- tools[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*,2016,138(3):1006-1011.
- [13]王奔,印文典,王明海,等. CFRP/Ti 叠层构件钻削过程中硬质合金刀具磨损特性[J]. *组合机床与自动化加工技术*,2018(5):5-10.
- [14]Xu J,El Mansori M. Wear characteristics of polycrystalline diamond tools in orthogonal cutting of CFRP/Ti stacks[J]. *Wear*,2017;376-377,91-106.
- [15]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.
- [16]Park K H,Kwon P. Wear characteristic on BAM coated carbide tool in drilling of composite/titanium stack[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*,2012,13(7):1073-1076.
- [17]Shyha I S,Soo S L,Aspinwall D K,et al. Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*,2011,51(7-8):569-578.
- [18]Zitoun R,El Mansori M,Krishnaraj V. Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply[J]. *Wear*,2013,302(1-2):1560-1567.
- [19]陈燕,葛恩德,傅玉灿,等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. *复合材料学报*,2015,32(2):301-316.
- [20]Isbili O,Ghassemieh E. Comparative study of tool life and hole quality in drilling of CFRP/titanium stack using coated carbide drill[J]. *Machining Science and Technology*,2013,17(3):380-409.
- [21]Pecat O,Brinksmeier E. Tool wear analyses in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack material[J]. *Procedia CIRP*,2014,14:142-147.
- [22]Li S,Qin X,Jin Y,et al. A comparative study of hole-making performance by coated and uncoated WC/Co cutters in helical milling of Ti/CFRP stacks[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2018,94(5-8):2645-2658.
- [23]Soussia A B,Mkaddem A,El Mansori M. Effect of coating type on dry cutting of glass/epoxy composite[J]. *Surface and Coatings Technology*,2013,215:413-420.
- [24]Liu Z J,Liu Z K,Mcnerney C,et al. Investigations of the bonding layer in commercial CVD coated cemented carbide inserts[J]. *Surface & Coatings Technology*,2005,198(1-3):161-164.
- [25]Xu J,El Mansori M. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks[J]. *Composite Structures*,2016,157:461-482.
- [26]蔡飞,高营,蔡习军,等. 硬质合金刀具高能离子源增强多弧镀 AlCrTiSiN 梯度涂层制备及性能研究[J]. *机械工程学报*:2019,10(3):1-8.
- [27]覃正海,鲜广,赵海波,等. 切削刀具表面 TiCN 涂层的研究现状与发展[J]. *表面技术*,2016,45(6):125-133.
- [28]吴道全,万光珉,林树兴,等. 金属切削原理及刀具[M]. 北京:国防工业出版社,1994:167.
- [29]于书宇,秦旭达,李士鹏,等. CFRP/钛合金叠层构件钻孔刀具制孔质量对比研究[J]. *机械科学与技术*,2017(11):7-11.
- [30]Senthilkumar M,Prabukarthi A,Krishnaraj V. Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/Titanium alloy (Ti6Al4V) stacks[J]. *Procedia Engineering*,2013,64:582-592.
- [31]Xu J,An Q,Cai X,et al. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*,2013,14(10):1687-1696.
- [32]Xu J,An Q,Chen M. A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP[J]. *Composite Structures*,2014,117:71-82.
- [33]An Q,Cai X,Xu J,et al. Experimental investigation on drilling of high strength T800S/250F CFRP with twist and dagger drill bits[J]. *International Journal of Abrasive Technology*,2014,6(3):183-196.
- [34]明伟伟,王昌赢,魏莹莹,等. 纤维增强复合材料制孔刀具技术研究进展[J]. *航空制造技术*,2013,434(14):34-37.
- [35]贾振元,何春伶,付饶,等. 基于 CFRP 层合板钻削轴向力时变曲线的钻头几何形状分析[J]. *复合材料学报*,2016,33(12):2757-2765.
- [36]Qiu X,Li P,Niu Q,et al. Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2018,97(1-4):857-865.
- [37]Qiu X,Li P,Li C,et al. Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP[J]. *Composite Structures*,2018,203:404-413.
- [38]冷小龙,李鹏南,邱新义,等. 阶梯钻钻削钛合金实验[J]. *宇航材料工艺*,2018(4):75-79.
- [39]刘洋,李鹏南,陈明,等. 双锋角钻头钻削碳纤维增强树脂基复合材料研究[J]. *宇航材料工艺*,2015,45(6):53-59.
- [40]Fei S,Lei Z,Fujian S,et al. Novel drill bit based on the step-control scheme for reducing the CFRP delamination[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2018,262:157-167.

超声振动辅助电解磨削 GH3536 工艺试验研究

霍金星,尹瀛月,孟翔宇,马玉财,张建华

山东大学机械工程学院;

高效洁净机械制造教育部重点实验室,机械工程国家级实验教学示范中心

摘要: GH3536 锻造合金具有耐高温、高硬度、高抗拉强度等优点,是广泛应用于航空航天多种部件成型的关键材料之一,而传统的加工部件内孔方式极易造成刀具磨损,且难以高效得到极佳的表面质量。为获得较低粗糙度的 GH3536 内孔表面,提出一种超声波振动辅助的电解磨削复合工艺方法。通过单因素试验,重点探究了脉冲电压、进给速度、超声振幅对孔内壁表面粗糙度和平均锥度的影响规律。试验结果表明:在电压为 6V、进给速度 0.8mm/min、超声振幅 5 μ m 等参数条件下,可获得平均锥度 $\theta=0.65^\circ$ 、粗糙度 $R_a=0.51\mu\text{m}$ 的内孔表面。

关键词: GH3536 锻造合金;电解磨削;超声振动;粗糙度;平均锥度

中图分类号: TG580.6;TH162+.1 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2021.02.002

Experimental Research on Ultrasonic Vibration-assisted Electrolytic Grinding Process of GH3536

Huo Jinxing, Yin Yingyue, Meng Xiangyu, Ma Yucai, Zhang Jianhua

Abstract: The GH3536 wrought alloy is one of the key materials widely used for various key aerospace components due to its high temperature resistance, high hardness, tensile strength and other advantages. However, traditional machining methods of small holes are extremely easy to cause tool wear and thus difficult to obtain an ideal surface quality. For obtaining lower inner hole surface roughness of GH3536 parts, a composite process method of ultrasonic vibration assisted-electrochemical grinding is proposed. The effect of pulse voltage, feed rate, ultrasonic amplitude on inner hole surface roughness and average taper is studied through single-factor experiments. The results indicate that the surface of the inner hole with an average taper of 0.65° and a roughness of $R_a 0.51\mu\text{m}$ can be obtained under the condition of 6V pulse voltage, 50% power duty cycle, 0.8mm/min feed speed, and 5 μm ultrasonic amplitude.

Keywords: GH3536 wrought alloy; electrolytic grinding; ultrasonic vibration; roughness; average taper

1 引言

GH3536 锻造合金是现代航空工业中常用的高温合金之一,在高温下具有良好的力学性能,也是一

种难加工材料^[1]。工业中高温合金零部件加工方式主要包括:电火花加工、磨削加工、电解加工、激光加工等。

上述工艺在加工零部件的小孔(叶片气膜孔、化纤喷丝板孔等)时仍面临诸多问题。电火花加工具有加工效率高、操作稳定性好等优势,但因其加工表面

基金项目:国家重点研发计划资助(2018YFB1105900)

收稿日期:2020年8月

[41] 刘泉鹏,李树健,周柏健,等.碳纤维增强树脂基复合材料钻孔技术研究进展[J].工具技术,2019,53(1):5-9.

[42] 陈明,邱坤贤,秦声,等.高强度碳纤维增强复合材料层合板的钻削制孔过程及其缺陷形成分析[J].南京航空航天大学学报,2014,46(5):667-674.

[43] 章伟,黄威武,屈植华,等.碳纤维复合材料-钛合金叠层板钻孔工艺研究[J].硬质合金,2017,34(1):21-26.

[44] Sheikh-Ahmad J Y. Machining of polymer composites [M]. New York:Springer,2009.

[45] Kuo C L, Soo S L, Aspinwall D K, et al. Tool wear and hole quality when single-shot drilling of metallic-composite stacks with diamond-coated tools [J]. Proceedings of the

Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(10):1314-1322.

第一作者:赵永锋,硕士研究生,湖南科技大学机电工程学院,411201 湖南省湘潭市

First Author: Zhao Yongfeng, Postgraduate, College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

通信作者:李鹏南,教授,湖南科技大学机电工程学院,411201 湖南省湘潭市

Corresponding Author: Li Pengnan, Professor, College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China