

钛合金深孔钻削刀具磨损试验分析

许宁¹, 武鹏^{1,2}, 张柱银², 李亮^{1,3}, 薛虎¹, 王鹏^{1,2}, 王静文¹

(1.盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051; 2.湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 3.南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

摘要: 目的 探索枪钻钻削 Ti6Al4V 钛合金刀具的磨损特性, 探讨刀具磨损对钻削轴向力的影响。**方法** 设计深孔钻削试验, 每孔钻深 575 mm, 每钻削一个孔, 使用共聚焦显微镜对刀具磨损特性及磨损值进行分析, 并使用测力仪对轴向力信号进行提取。通过显微镜观测, 对刀具的磨损形式进行分析, 结合刀具实际磨损情况, 给出刀具的磨损等级。通过对轴向力的分析, 研究刀具磨损量对于钻削轴向力的影响。**结果** 由刀具磨损曲线可知, 在整个钻削试验过程中, 磨损过程可分为三个阶段: 初期磨损、正常磨损、剧烈磨损。外刃第一后刀面的平均磨损量及最大磨损量在磨损的三个阶段中始终大于前刀面。当钻削深度达到 11 m 以后, 刀具整体磨损速率上升, 进入剧烈磨损阶段; 当钻削深度达到 14 m 以后, 外刃第一后刀面最大磨损量急剧增加。轴向力变化曲线呈现初期磨损阶段基本保持不变, 正常磨损阶段平稳增加, 剧烈磨损阶段趋于稳定的变化趋势。**结论** 刀具的主要磨损形式为前刀面和外刃第一后刀面的表面烧灼及粘结磨损, 外刃和侧刃的破损及崩刃, 导向面的大面积剥落继而形成凹坑, 三种情况共同导致刀具失效。刀具剧烈磨损阶段, 刀具磨损速率迅速增加, 切削力较大, 因此实际加工过程中应在剧烈磨损阶段之前对刀具进行重磨。

关键词: Ti6Al4V 钛合金; 枪钻; 刀具磨损; 深孔加工

中图分类号: TG115.5+8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0278-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.042

Experimental Analysis of Tool Wear in Deep Hole Drilling of Titanium Alloy

XU Ning¹, WU Peng^{1,2}, ZHANG Zhu-yin², LI Liang^{1,3}, XUE Hu¹, WANG Peng^{1,2}, WANG Jing-wen¹

(1.School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2.School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 3.Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the wear properties of Ti6Al4V titanium alloy tool in gun drilling and discuss the effect of tool wear on drilling axial force. Deep hole drilling test was designed and each holes was drilled to 575 mm. After drilling a hole, the tool was analyzed for wear properties and wear values by focus microscope and the dynamometer was used to extract the axial force signal. The tool wear form was analyzed through observation by microscope and the tool wear grade was

收稿日期: 2017-10-12; 修订日期: 2017-12-30

Received: 2017-10-12; Revised: 2017-12-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51505409); 江苏省高校自然科学基金 (15KJB460018); 江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金项目资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51505409), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China(15KJB460018) and Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology Open Fund.

作者简介: 许宁 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高精加工, 建材机械。

Biography: XU Ning(1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: high precision machining and building materials machinery.

通讯作者: 张柱银 (1962—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为固体废弃物处理与资源利用。

Corresponding author: ZHANG Zhu-yin(1962—), Male, Master, Professor, Research focus: solid waste treatment and resource utilization.

given according to actual wear of tool. Based on the analysis of the axial force, the influence of tool wear on the axial force of drilling was studied. From the tool wear curve, the wear process could be divided into three stages during the whole drilling test: initial wear, normal wear and severe wear. The average wear amount and the maximum wear amount of the first flank face on the outer blade were always greater than that of the rake face in the three stages. When the drilling depth reached 11 m, the overall wear rate of the tool increased, and the tool entered the severe wear stage. When the drilling depth reached 14 m, the maximum wear of the first flank on the outer edge increased rapidly. In addition, the axial force curve showed that the initial wear stage remained unchanged, the normal wear stage increased steadily and the severe wear stage tended to be stable. The main wear forms of tool are burning wear and adhesive wear on the rake face and the first flank of the outer blade, breakage and tripping on outer edge and side edge, peeling of large area on guide surface. Thus, pits are formed. These three cases can cause the failure of tool. In the severe wear stage, the tool wear rate increases rapidly and the cutting force is large. Therefore, the tool should be re-ground before the severe wear stage during actual process.

KEY WORDS: Ti6Al4V titanium alloy; gun drill; tool wear; deep-hole machining

深孔加工是现代航空制造业中常用的加工方式,如舱门轴和航空发动机空心长轴零件的加工^[1-2]。Ti6Al4V 是钛合金材料中应用最为广泛的一种,由于其具有耐腐蚀、比强度高、热稳定性好等优良性能,广泛应用于航空航天、船舶、汽车和医疗器械等领域^[3-6]。Ti6Al4V 钛合金材料属于典型的难加工材料,由于其具有化学亲和力好、材料回弹大等加工特点,导致加工过程中刀具磨损快、粘刀现象严重,直接影响零件的加工质量和成本^[7-8]。因此,揭示在深孔枪钻钻削 Ti6Al4V 钛合金过程中刀具的磨损形式,提高加工质量,降低制造成本,一直是航空制造领域研究的重要内容。

针对钛合金材料机械加工过程中刀具的磨损,国内外学者做了大量研究。Kuttolamadom 等^[9]基于逆向工程软件 Rapidform XOR/Redesign 提出了采用逆向工程技术求解刀具磨损体积的方法。Erween 等^[10]研究表明,采用麻花钻,钻削过程中的粘结磨损、扩散磨损以及加工过程中的塑性变形作用导致钻头的主要磨损形式为不均匀的后刀面磨损和微崩刃。Jawaid 等^[11]使用涂层硬质合金刀具研究了铣削钛合金时刀具的寿命及磨损机理,结果表明,非均匀的后刀面磨损是主要的磨损模式,切削刃过度剥落和前刀面上的剥落及碎裂是主要的失效模式。陈燕^[12]等根据钛合金车削时的刀具磨损机理,借助有限元方法对车削钛合金时硬质合金刀具的磨损进行了仿真,通过试验验证了所建立的有限元模型能够较准确地预测刀具前刀面磨损及其磨损形貌。王凯^[13]等定量研究了细晶粒硬质合金刀具车削钛合金 TC4 过程中,不同切削参数对月牙洼磨损演变速率和磨损体积的影响,研究结果表明,切削速度是影响月牙洼磨损体积的主导因素。石莉^[14]等采用 H13A 无涂层硬质合金刀具对 TC4 钛合金进行高速正交车削和铣削试验,分析了刀具磨损破损能态、磨损机理以及刀具寿命,结果表明,采用

正交车铣加工可以获得更长的刀具使用寿命。综上所述,众多的研究成果基本上都是基于钛合金车削及铣削加工过程中刀具的磨损研究,钛合金钻削加工刀具的磨损分析则少有报道,深孔枪钻钻削刀具磨损形貌的分析至今尚未见到。

针对以上现状,文中对枪钻钻削 Ti6Al4V 钛合金材料加工过程中刀具的主要磨损形貌、刀具磨损曲线进行分析,研究了枪钻的磨损机制以及磨损过程。提出将外刃第一后刀面最大磨损量作为枪钻需要进行重磨的重要依据,此外还分析了枪钻磨损对轴向力的影响。

1 试验条件和方法

试验材料选用 Ti6Al4V 钛合金,材料成分见表 1,材料尺寸为 30 mm×40 mm×600 mm,钻孔位置如图 1 所示。每个工件加工两孔,每孔钻深为 575 mm,最小壁厚为 3.75 mm。采用耐斯机械钻深为 1600 mm 的深孔钻机床以及 $\phi 15.1$ mm 的 Sandvik 标准枪钻进行加工,枪钻的几何参数见表 2。每加工完一个孔,采集一次切削力信号。信号采集方法为:采用相同的加工参数,钻削安装有测力仪的同材质工件 10 mm。测力仪采用型号为 kistler 9129AA 压电式测力仪。然后使用共聚焦显微镜对刀具的磨损进行检测分析。试验加工参数取 $v=35$ m/min, $f=0.028$ mm/r。该试验参数通过实际加工经验获得,在该参数下,枪钻钻削平稳,切屑尺寸较小,适合作为刀具磨损试验参数。

表 1 钛合金 Ti6Al4V 化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ti6Al4V titanium alloy

元素	C	Fe	N	O	Al	V	H	Ti
质量分数/%	0.1	0.3	0.05	0.02	5.5~6.8	3.5~4.5	0.015	余量

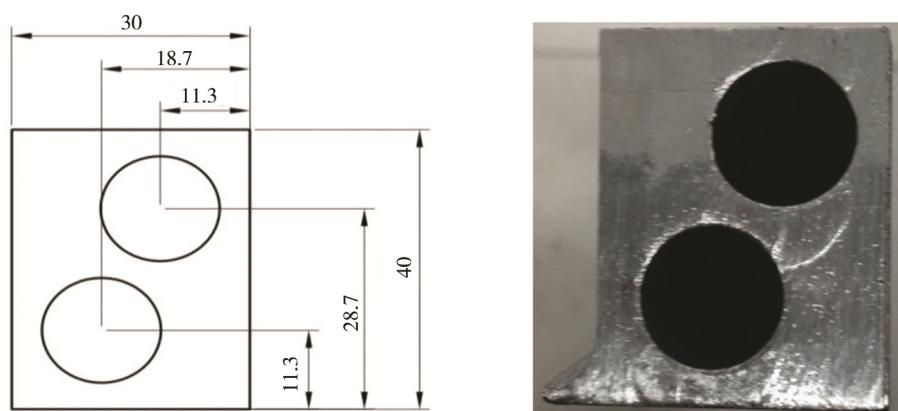


图 1 钻孔位置
Fig.1 Location of holes

表 2 刀具几何参数
Tab.2 Geometry parameter of tool

外刃锋角/(°)	内刃锋角/(°)	外刃第一后角/(°)	外刃第二后角/(°)	内刃后角/(°)	刀尖后角/(°)	导流面后角/(°)	钻心距
30	20	12	20	12	25	30	$D/4$

2 试验结果与分析

2.1 刀具的磨损形貌分析

刀具在切削过程中,前刀面和后刀面分别同切屑和工件相接触,并有相对滑动,产生摩擦。切削过程中的摩擦导致刀具材料逐渐磨耗,刀口切削部分的尺寸及形状发生改变,这就是刀具的磨损^[15]。在不同的刀具材料、切削方式和切削用量等具体条件下,刀具的磨损形态也各不相同。

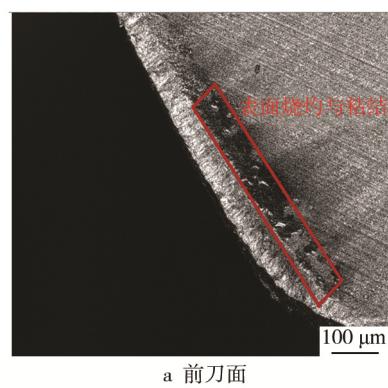
Ti6Al4V 钛合金材料在深孔枪钻钻削过程中表现出切削力大、切削温度高、加工硬化现象严重等特性,导致刀具在强烈的机械磨损和热化学磨损的作用下产生崩刃、工件材料粘结及大面积剥落等现象。

2.1.1 表面烧灼与粘结磨损

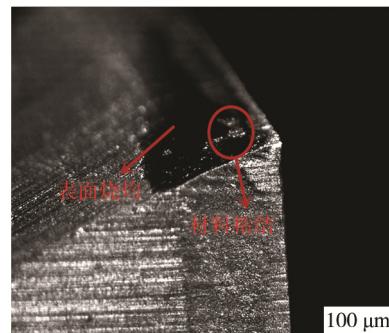
钻削 Ti6Al4V 钛合金时,在枪钻前刀面靠近外刃处出现表面烧灼与粘结磨损,具体如图 2a 所示。原因在于:枪钻外刃作为主切削刃,承担绝大部分的切削工作,在切削加工过程中,切屑沿前刀面流出,与前刀面之间产生剧烈摩擦,在高温高压作用下,刀具材料向切屑扩散,刀具本身强度降低,导致扩散磨损现象以及前刀面表面烧灼现象;钛合金对刀具材料的化学亲和性强,当切削温度高,刀具与切屑单位接触面积压力大时,钛合金切削及被切表层材料易与刀具材料咬合,产生严重的粘刀现象,由于有相对运动,粘结点将破裂而被对方带走,引起刀具前刀面粘结磨损。

枪钻外刃第一后刀面的磨损是 Ti6Al4V 钛合金钻削加工过程中刀具的主要磨损形式,具体如图 2b 所示。枪钻外刃后刀面分为第一后刀面和第二后刀面,

第二后刀面距离外刃较远,且外刃第二后角略大于外刃第一后角,故第二后刀面无明显磨损现象。第一后刀面靠近外刃,钛合金在加工过程中回弹量大,导致外刃第一后刀面与被切层回弹材料之间产生剧烈的摩擦,摩擦产生的热量引起第一后刀面发生烧灼现象。随着加工时间的延长,第一后刀面磨损量逐渐增加,第一后刀面与工件之间的接触面积变大,摩擦产



a 前刀面



b 外刃第一后刀面

图 2 表面烧灼与材料粘结
Fig.2 Surface cauterization and material bonding

生的切削热持续增加, 外刃第一后刀面与工件接触处切削温度急剧增加, 导致烧灼现象进一步加重。此外, 钛合金加工粘刀特性使外刃第一后刀面也有大量金属粘结, 导致后刀面粘结磨损。

2.1.2 崩刃

外刃作为枪钻的主切削刃, 随着切削时间的增加, 切削刃口不断磨损, 导致切削刃的强度被削弱。当刃口所承受的切削力大于刀具材料的断裂强度时, 刀具刃口产生崩刃。当出现较大的崩刃时, 刀具即失效。钻削 Ti6Al4V 钛合金时, 崩刃现象主要出现在外刃和侧刃上, 内刃无明显崩刃现象, 如图 3 所示。

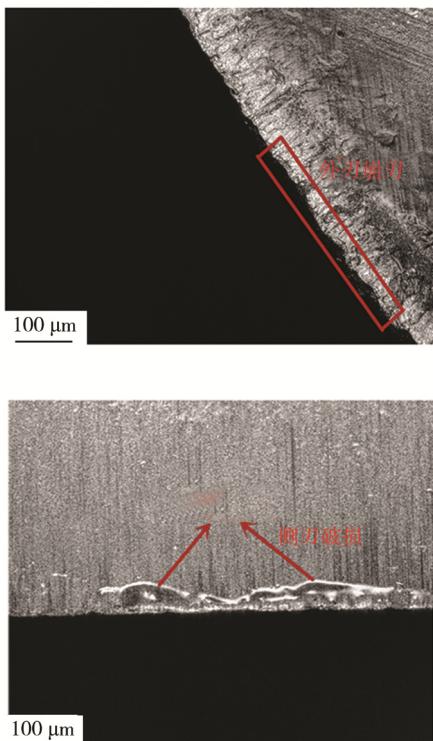


图 3 刀口崩刃与破损
Fig.3 Breakage and tripping of cutting edge

2.1.3 导向带片状剥落和裂纹

枪钻加工过程中, 导向带不仅起到导向和支撑的作用, 还对已加工孔壁起到挤光作用。导向带与已加工孔壁挤压摩擦, 导致导向带在机械应力和热应力的综合作用下产生裂纹。在热应力疲劳和接触疲劳的作用下, 裂纹蔓延, 继而导致了导向带片状剥落与凹坑的形成, 如图 4 所示。

2.2 刀具磨损曲线分析

在加工过程中, 借助共聚焦显微镜对加工各个阶段枪钻的形貌进行观测, 并对前刀面平均磨损量 K_B 、前刀面最大磨损量 K_B' 、外刃第一后刀面平均磨损量 V_B 、外刃第一后刀面最大磨损量 V_B' 以及刀尖磨损量 W_L 进行测量, 绘制刀具磨损曲线, 如图 5 所示。由

磨损曲线可以看出, 在整个钻削过程中, 刀具磨损分为三个阶段: 初期磨损(累计钻深 $< 2 \text{ m}$)、正常磨损($2 \text{ m} < \text{累计钻深} < 11 \text{ m}$)、剧烈磨损($\text{累计钻深} > 11 \text{ m}$)。初期磨损阶段, 刀具刃口锋利, 加工过程中刃口与工件的接触面积小, 单位面积受力大, 导致刀具磨损速率快; 当刀具刃尖磨圆, 刀口磨损量到达一定值以后, 刀具与工件的接触面积增大, 单位面积受力减小, 刀具磨损速率下降, 刀具进入正常磨损阶段; 随着刀具磨损量的增加, 刀具刃口逐渐钝化, 切削刃强度降低, 局部出现崩刃, 刀具刃口情况的恶化导致切削力和切削温度急速增加, 在机械应力和热应力的作用下, 刀具磨损速率急速增加, 刀具进入剧烈磨损阶段。

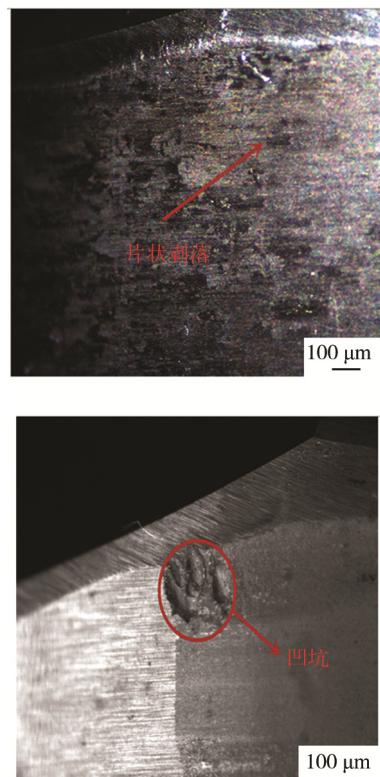


图 4 片状剥落与凹坑
Fig.4 Flaking and pit

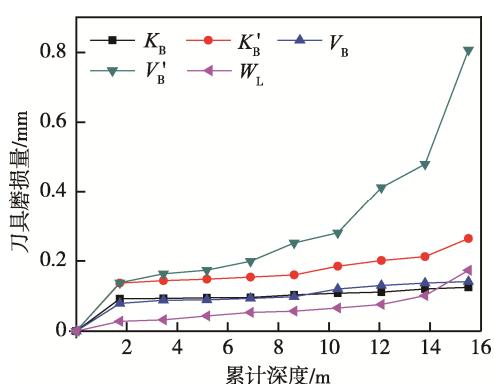


图 5 枪钻磨损量随钻孔深度的变化
Fig.5 Change of tool wear along with drilling depth

对比图5中各项参数的磨损量曲线发现,在整个钻削过程中,枪钻外刃第一后刀面的磨损量始终大于前刀面,且随着钻削时间的延长,外刃第一后刀面的磨损速率明显增加,前刀面磨损速率变化较小,因此刀尖磨损量在同等加工情况下,外刃第一后刀面先达到剧烈磨损阶段。在初期磨损和正常磨损阶段,均低于前刀面和外刃第一后刀面的平均磨损量,刀尖磨损值较小。到剧烈磨损阶段,刀尖的磨损量急剧增加,超过了前刀面和外刃第一后刀面的平均磨损量,但仍低于前刀面和外刃第一后刀面的最大磨损量。由以上分析,结合刀具各项参数的可测量性,提出将外刃第一后刀面最大磨损量 V_B' 作为枪钻需要进行重磨的重要依据。

2.3 刀具磨损对轴向力的影响

随着刀具磨损量的增加,在刀具磨损的不同阶段,钻削轴向力发生了明显变化。钻削轴向力随钻孔深度的变化曲线如图6所示,由稳定切削状态下轴向力值拟合曲线可以看出,钻孔初期阶段(累计钻深<2 m),切削刃磨损程度较小,轴向力基本保持不变;正常磨损阶段(2 m<累计钻深<11 m),轴向力稳定增大;剧烈磨损阶段(累计钻深>11 m),轴向力逐渐趋于稳定。初期磨损阶段,刀具磨损量较小,刀具刃口锋利,加工硬化现象不明显,切削力较小。随着刀具磨损增大,后刀面与工件待加工表面接触区域增大,刃口圆弧半径增大导致刀具变钝,加工硬化现象增强,切削力增大。同时,刀具与工件待加工表面接触区域增大导致两者之间的摩擦力也增大,继而导向面正压力增大,从而使得轴向摩擦力也增大。当磨损量继续增大时,外刃进一步钝化,侧刃刀尖被磨圆生成较大圆角,使得外刃实际参与切削的切削刃长度增加,平均外角增大,切削量减小,导致轴向力有减小的趋势,故轴向力增幅逐渐趋于平缓。

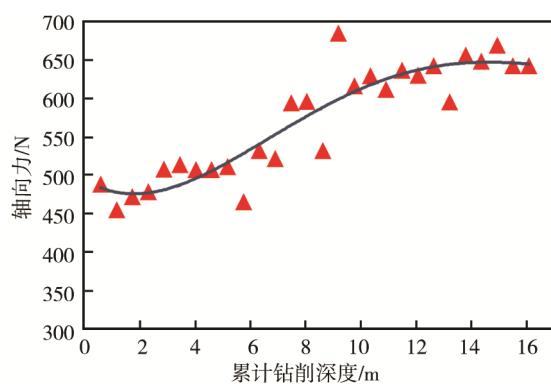


图6 轴向力随钻孔深度的变化

Fig.6 Change of axial force along with drilling depth

3 结论

通过枪钻对 Ti6Al4V 钛合金材料的深孔钻削试

验,分析了枪钻深孔钻削过程中刀具的磨损形式及规律,探讨了刀具磨损对切削轴向力的影响规律,得出以下结论:

1) 枪钻深孔钻削 Ti6Al4V 钛合金,刀具的主要磨损形式为前刀面和外刃第一后刀面表面烧灼及粘结磨损,外刃及侧刃出现破损或崩刃,导向面出现大面积剥落继而形成凹坑,三种情况共同导致刀具失效。

2) 枪钻深孔钻削 Ti6Al4V 钛合金,刀具磨损有明显的阶段划分。在初期磨损、正常磨损及剧烈磨损三个阶段,外刃第一后刀面平均磨损量、最大磨损量始终大于前刀面。外刃第一后刀面磨损量在剧烈磨损阶段急剧增加,继而造成加工效率严重下降、加工质量差,结合刀具各项参数的可测量性,提出将外刃第一后刀面最大磨损量作为枪钻需要进行重磨的重要依据。

3) 在枪钻深孔钻削过程中,轴向力呈现初期阶段较小且基本保持不变,正常磨损阶段平稳增加,剧烈磨损阶段趋于稳定的变化趋势。

参考文献:

- [1] 王峻. 现代深孔加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
WANG Jun. Modern Deep Hole Machining Technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.
- [2] 王世清. 深孔加工技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
WANG Shi-qing. Deep Hole Machining Technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2003.
- [3] 李梁, 孙健科, 孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19-24.
LI Liang, SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun. Application State and Prospects for Titanium Alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(5): 19-24.
- [4] 陈国琳, 吴鹏炜, 冷文军, 等. 钛合金的发展现状及应用前景[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(12): 110-113.
CHEN Guo-lin, WU Peng-wei, LENG Weng-jun, et al. The Development Prospect and Current Status of Titanium Alloys[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(12): 110-113.
- [5] 訾群. 钛合金研究新进展及应用现状[J]. 钛工业进展, 2008, 25(2): 23-27.
ZI Qun. New Development of Titanium Alloy and Its Application Actuality[J]. Titanium Industry Progress, 2008, 25(2): 23-27.
- [6] 刘莹, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(5): 47-50.

- LIU Ying, QU Zhou-de, WANG Ben-xian. Research of Development and Application of Ti6Al4V Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(5): 47-50.
- [7] 洪浩. 钛合金深孔钻削的工艺分析及研究[J]. 机电技术, 2009, 32(2): 66-68.
- HONG Hao. Analysis and Study of Deep Hole Drilling Technology for Titanium Alloy[J]. Mechanical & Electrical Technology, 2009, 32(2): 66-68.
- [8] 彭海, 刘战锋, 朱林. 钛合金材料深孔钻削工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2002(8): 16-18.
- PENG Hai, LIU Zhan-feng, ZHU Lin. The Trial Investigation of Deep-holes Drilling Technics of Titanium Alloy[J]. New Technology & New Process, 2002(8): 16-18.
- [9] KUTTOLAMADOM M A, MEARS M L, KURFESS T R. On the Volumetric Assessment of Tool Wear in Machining Inserts with Complex Geometries—Part 1: Need, Methodology, and Standardization[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134(5): 051002-051009.
- [10] ERWEEN A R, SAFIAN S. Investigation on Tool Life and Surface Integrity When Drilling Ti-6Al-4V and Ti-5Al-4V-Mo/Fe[J]. JSME International Journal, 2006, 49(2): 340-345.
- [11] JAWAID A, SHARIF S, KOKSAL S. Evolution of Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools when Face Milling Titanium Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1-3): 266-274.
- [12] 陈燕, 杨树宝, 傅玉灿, 等. 钛合金 TC4 高速切削刀具磨损的有限元仿真[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2230-2240.
- CHEN Yan, YANG Shu-bao, FU Yu-can, et al. FEM Estimation of Tool Wear in High Speed Cutting of Ti6Al4V Alloy [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2230-2240.
- [13] 王凯, 孙剑飞, 杜大喜, 等. 硬质合金刀具月牙洼磨损定量化实验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1578-1585.
- WANG Kai, SUN Jian-fei, DU Da-xi, et al. Quantitative Experimental Analysis on Crater Wear of Cemented Carbide Tools [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1578-1585.
- [14] 石莉, 姜增辉. 硬质合金刀具高速车铣和铣削 TC4 钛合金磨损试验对比[J]. 工具技术, 2017, 51(7): 36-38.
- SHI Li, JIANG Zeng-hui. Wear Contrast of Carbide Tools on Turn-milling and Milling Titanium Alloys at High Speed Cutting[J]. Tool Engineering, 2017, 51(7): 36-38.
- [15] 张幼桢. 金属切削原理及刀具[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- ZHANG You-zhen. Principles and Tools of Metal Cutting [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.