

# 钻削飞机钛合金结构维修孔的钻头横刃优选试验

吕勤云<sup>1</sup>, 许爱军<sup>2</sup>, 黄浩然<sup>3</sup>, 高昆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>空军航空维修技术学院; <sup>2</sup>中航工业长沙五七一二飞机工业有限责任公司;

<sup>3</sup>空军工程大学

**摘要:** 针对飞机钛合金薄壁结构维修工艺孔的手工钻削特点,选取了三种不同横刃形状的麻花钻头,通过所构建的微量复合油雾喷射润滑(CMJ)条件下的钻削试验系统,开展了钻头横刃形状对钻削性能影响的对比试验,优选出适合战伤抢修环境下使用的飞机钛合金蒙皮钻削的钻头形状,以期提高飞机钛合金结构的修理质量和效率。试验表明,横刃形状为S型钻头最适合飞机钛合金薄壁结构维修工艺孔钻削,虽然S型和短横刃型的钻头均可有效降低钻削轴向力,提高孔口圆度,但短横刃钻头因横刃区域面积小,磨损较为严重。

**关键词:** 飞机结构修理;钛合金钻削;钻削轴向力;钻头横刃;横刃磨损

**中图分类号:** TG713+.1;TH161

**文献标志码:** A

## Optimum Experimental Study on Drill Chisel of Drilling Aircraft Titanium Alloy Structure Maintenance Hole

Lv Qinyun, Xu Aijun, Huang Haoran, Gao Kun

**Abstract:** Aiming at the hand drilling characteristics of structure maintenance hole on aircraft Titanium alloy thin-walled structure, three twist drills with different chisel shapes are selected. Through the drilling test system under CMJ condition, in order to improve the quality and efficiency of aircraft Titanium alloy repairs, a comparative test on the influence of drill chisel shape on drilling performance is conducted, and the shape of drill bit suitable for the drilling of aircraft Titanium alloy used in war damage repair is optimized. Experiments show that the drill of S-shaped chisel is the most suitable for the drilling of Titanium alloy thin-walled structural maintenance holes in aircraft. Although the S-type and short-chisel type drills can effectively reduce the axial force of drilling and improve the roundness of the orifice, however, the short chisel drill due to horizontal edge area is small, more serious wear and tear.

**Keywords:** aircraft structure repair; Titanium alloy drilling; drill axial force; drill chisel; chisel wear

### 1 引言

平时训练中,军机的钛合金尾喷罩承受着很大的交变热应力<sup>[1]</sup>,易出现疲劳裂纹损伤,战时遭受打击后,其后机身段钛合金蒙皮、桁条等薄壁件会出现各种撕裂状破孔等结构战伤<sup>[2]</sup>。采用手持气钻

在裂纹末端钻出 $\phi 1.5 - 2\text{mm}$ 的止裂孔来阻止裂纹扩展或钻削 $\phi 3 - 4\text{mm}$ 铆钉孔后进行铆接帮强是常用修理手段<sup>[2,3]</sup>。但钛合金材料的钻削轴向力大,钻头磨损严重,使钻削费时费力。文献表明,采用 $130^\circ - 140^\circ$ 顶角<sup>[4]</sup>、X或W等形状切削刃的硬质合金钻头可有效降低钛合金钻削抗力<sup>[5]</sup>,提高切削效率。然而,飞机外场因缺少专用钻头刃磨设备难以靠手工刃磨方式获得形状复杂的小直径钻头,且手

基金项目: 军内科研资助项目(KJ2015023400B1126)

收稿日期: 2018年3月

[8] Zheng Lijuan, Wang Chengyong, Zhang Xin, et al. The entry drilling process of flexible printed circuit board and its influence on hole quality[J]. Circuit World, 2015, 41(4): 147 - 153.

[9] Wang Linfang, Zheng Lijuan, Wang Chengyong, et al. Experimental study on micro-drills wear during high speed of drilling IC substrate[J]. Circuit World, 2014, 40(2): 61 - 70.

[10] Li Shan, Zheng Lijuan, Wang Chengyong, et al. Micro drilling quality of the Cu/BT laminate for IC substrate[J]. Circuit World, 2016, 42(2): 55 - 62.

第一作者: 李之源, 硕士研究生, 广东工业大学机电工程学院, 510006 广州市

First Author: Li Zhiyuan, Postgraduate, School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

通信作者: 郑李娟, 博士, 副教授, 广东工业大学机电工程学院, 510006 广州市

Corresponding Author: Zheng Lijuan, Doctor, Associate Professor, School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

工钻削方式极易折断细小硬质合金钻头等原因,最终只能采用韧性较好的高速钢钻头进行简易修磨,致使上述工艺措施难以适用于实际维修工作,钛合金薄壁结构维修孔的钻削始终是困扰新机钛合金结构维修的难题。

专用钻孔工具和微量复合油雾喷射润滑(CMJ)虽可稳定钻心,减少钻头磨损,提高钛合金蒙皮止裂孔钻削质量与效率<sup>[6,7]</sup>,但选用合适形状的高速钢钻头对进一步降低钻削力、改善钻削性能也非常重要<sup>[8,9]</sup>。本文采用简单手工刃磨易获得的三种形状高速钢钻头,通过所构建的复合油雾喷射润滑钻削力试验测试系统,开展高速钢钻头横刃的对比钻削试验研究,优选出适合飞机外场维修环境下的钛合金蒙皮止裂孔、铆钉孔的钻头横刃形状,以期提高新机钛合金结构维修能力。

## 2 钻削试验

### 2.1 试验系统

如图1所示,为排除手工钻削时人为因素干扰试验结果的准确性,试验系统主要由Z52K数控钻床、CMJ微量润滑箱和钻削轴向力测试系统等组成。CMJ微量润滑箱<sup>[10,11]</sup>可产生油、水、气三相微量润滑介质,用于钻削中的复合油雾喷射润滑。钻削轴向力采集系统主要由测力仪(Kistler 9272)、信号放大器(Kistler 5019)、采集器(HIOKI,8860-50)等组成,用于采集与存储切削力,试验数据最终导入计算机进行处理。采用工具显微镜(Nikon MM-400)检测刀具磨损。

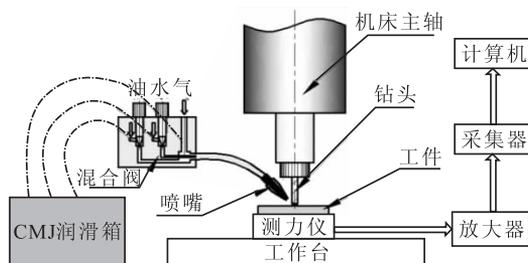


图1 试验系统结构

### 2.2 试验器材

以铆钉孔钻削为例,选取三种钻头直径均为4mm,顶角均为 $135 \pm 2^\circ$ ,钻头材料及其物理力学性能见表1<sup>[12]</sup>。三种钻头横刃分别为标准HSS直线型横刃、S型横刃和短横刃型等三种易于通过手工刃磨获得的形状(见图2)。

试验材料为航空用钛合金(TC4),厚度为2mm,裁剪为60mm×60mm,TC4室温力学性能见表2。

表1 三种钻头材料物理力学性能对照表

种类	材料牌号	硬度 HRC 室温 600℃	抗弯强度 $\sigma_{bb}$ (GPa)	冲击韧性 $\sigma_k$ (MJ/m <sup>2</sup> )
直线	W6Mo5Cr4V2	63-6648	3.43-3.92	0.294-0.392
S型	W6Mo5Cr4V2Al	67-7055	2.84-3.82	0.025-0.294
短型	W2Mo9C4VCo8	67-7055	2.65-3.72	0.025-0.294

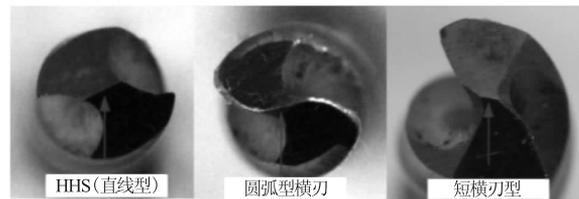


图2 三种钻头的结构形状比较

表2 试验用Ti6Al4V(TC4)的力学性能

屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	伸长率 $\delta$ (%)	面缩率 $\Psi$ (%)	硬度 (HBS)
875	965	14	45	320-360

### 2.3 试验方法与参数

试验方法:以轴向钻削力、钻头横刃磨损和钻孔精度为评价标准,采用单因素对比方法,评价不同横刃形状钻头的切削性能和钻削质量。

具体方法:分别使用三种钻头在相同切削和润滑条件下连续钻削30个孔。选择前2次所测量的钻削轴向力平均值来评价横刃形状对钻削轴向力的影响效果;对比完成30次钻削后横刃的磨损情况,主要评价不同横刃形状对钻头耐磨性的影响;统计与对比三种形状横刃钻头的钻孔质量,进而优选出适合手工方式在飞机钛合金蒙皮钻孔的钻头。

试验参数:钻削试验时,钻头转速均为600r/min,进给量 $f$ 分别为0.04、0.06、0.09和0.12mm/r等四种;润滑方式采用微量复合油雾喷射润滑,润滑参数为雾化气压0.4MPa,供油量60ml/h,供水量80ml/h。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 钻削轴向力对比

图3为三种钻头在转速 $n$ 为600r/min、采用不同进给量 $f$ 钻削所获得的钻削轴向力对比情况。可知同等条件下,S型和短横刃型钻头的钻削轴向力比标准直线型钻头都小,其中,在较大进给量0.12mm/r时,S型钻头的钻削轴向力相对减少了28%,短横刃型钻头相对减少了19%。

横刃产生的切削力几乎占据整个钻削轴向力的一半<sup>[12]</sup>,而在钻头顶角相同、刀具尚未磨钝时,试验测量的钻削轴向力差值应是横刃差异所导致。钻削时,横刃几乎完全靠楔劈挤压切入材料,而钛合金的

弹性模量低,回弹大,进一步加大了横刃切入所需的轴向力。标准直线型横刃长度最长,其横刃负前角区域最大,因而楔劈挤压力最大,特别是在进给量增大之后,钻削轴向力将会迅速增加(见图4a)。短横刃钻头虽然通过减少横刃的直线长度降低了横刃挤入时的楔劈力,但却增加了钻头两个主切削刃的整体长度,部分增加了主切削刃引发的钻削轴向力(见图4c)。而S型钻头的横刃后角为负值的区域也较小,虽然主切削刃长度也略有增加,但其钻削轴向力略微小于短横刃钻头的原因可能是S形状有利于横刃的楔劈挤压(见图4b)<sup>[4]</sup>。

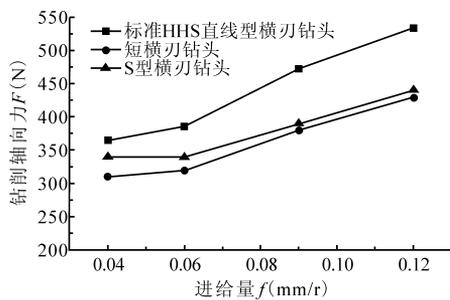


图3 三种钻头的钻削力对比

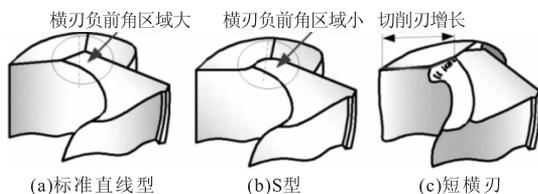


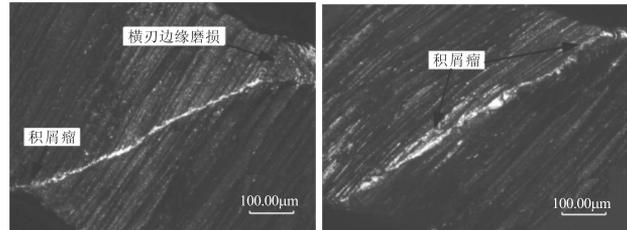
图4 三种横刃对钻削力的影响分析

### 3.2 钻头横刃磨损对比

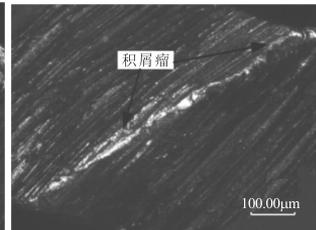
W6Mo5Cr4V2 标准直线型、W6Mo5Cr4V2Al S型和W2Mo9C4VCo8短横刃型钻头在完成30个孔钻削后其横刃的磨损情况对比见图5。由图可见,标准直线型横刃的边缘磨损量最大,短横刃型磨损区域最大,而S型横刃状态较好,仅在边缘处存在一些积屑瘤。

横刃处承受极大挤压力,且钛合金导热性差,润滑油无法到达该处,致使切削温度高,切削条件极为恶劣<sup>[5]</sup>。如图5a所示,标准直线型横刃的钻头材料为W6Mo5Cr4V2,是较为常用的钨钼系高速钢,在横刃处高温高压力的作用下,因材料的红硬性较差会引发磨损(见表1)。另外,该横刃结构形状也加剧了磨损,这是因为横刃较长,外缘处具有一定线速度,加大了该处与钛合金孔底的摩擦,使横刃一端出现了较大磨损,另一端有严重的切屑粘黏。S型圆弧和短横刃钻头材料分别是W6Mo5Cr4V2Al超硬高速钢和W2Mo9C4VCo8高钴高速钢,其红硬性基

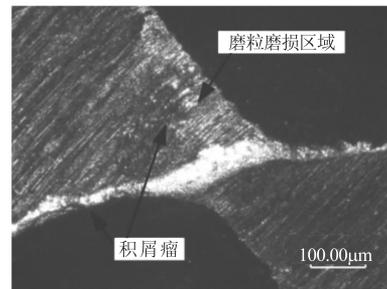
本相同(见表1),但短横刃的磨损量和磨损区域明显超过了S型横刃(见图5b和图5c),说明耐磨性主要是因横刃结构形状所导致的差异。这可能是短横刃区域面积小,加之钛合金回弹量大,单位面积上承受更大的挤压力,且造成横刃区域的磨粒磨损增大<sup>[5]</sup>,并附着较多的积屑瘤。S型圆弧横刃钻头边缘的过渡曲线有助于减少摩擦和挤压,切屑粘黏虽较严重,但并没有出现直线型横刃边缘磨损现象。



(a) W6Mo5Cr4V2 标准直线型



(b) W6Mo5Cr4V2Al S型



(c) W2Mo9C4VCo8 短横刃型

图5 三种横刃形状钻头的磨损情况对比

### 3.3 孔口圆度对比

图6是采用三点差值测量法获得的30个孔口的平均圆度值。可看出采用S型和短横刃钻头的孔口圆度较好,比标准直线型横刃钻头圆度误差分别降低了58.9%和51.8%。图7a是用单反相机对比了三种钻头钻孔后的孔口宏观形状,图7b是在工具显微镜下选取对应典型孔口的放大形状,标准直线型钻头出现三角形孔口形状。

飞机钛合金薄壁的铆钉孔圆度越高,铆钉墩粗所形成的干涉配合越均匀,则连接强度越高,对强度恢复也越有利。在主轴回转精度相同的条件下,钻头横刃挤入工件时,钻心的稳定度直接影响孔口圆度。S型和短横刃钻头在与工件接触时,其横刃接触面较小,一旦钻入工件表面后能够保持稳定,所以产生的圆度误差较小。而标准直线型横刃的钻头产生较大圆度误差的主要原因是横刃为较长的直线段(0.125-0.15d, d为钻头直径),在钻入初期,较大的轴向力会使钻心处于不稳定的摆动状态所造成的。由于飞机结构原位修理时不允许对飞机蒙皮打样冲眼定位<sup>[1]</sup>,长横刃钻头不利于定心,可选用S

型横刃或短横刃型钻头较佳。

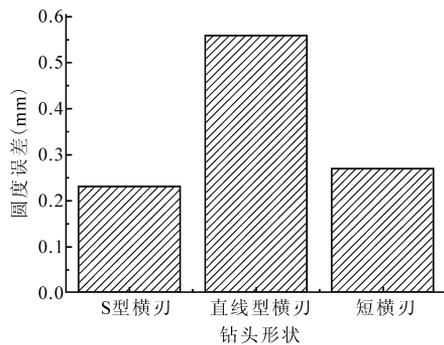
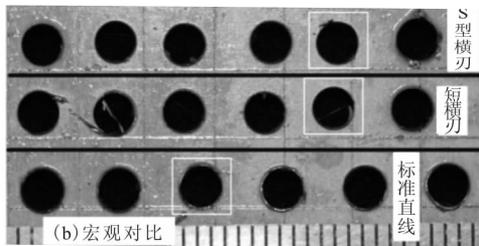
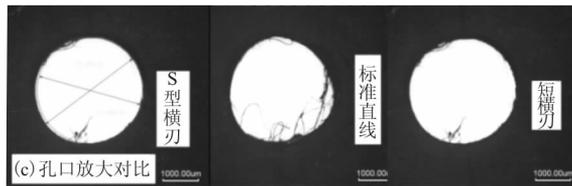


图6 三种横刃钻头钻孔的平均圆度值对比



(a) 宏观对比



(b) 孔口放大对比

图7 三种横刃钻头典型孔口形状对比

#### 4 结语

(1)在相同钻削和润滑条件下,S型和短横刃型钻头分别比标准直线型钻头的钻削轴向力小28%和19%,所获得的孔口圆度误差分别降低58.9%和51.8%。

(2)钻削钛合金时,钻头横刃区域面积过小会增大单位面积的挤压强度,从而加大横刃区域磨损,而S型横刃结构较为合理,磨损量最小。

(3)试验表明:采用横刃结构形状为S型的高速钢钻头最适应于手工操作的飞机钛合金结构钻孔,可有效降低钻削轴向力,提高刀具耐用度。

#### 参考文献

- [1]苏二七飞机修理技术手册,第一册,飞机机体结构修理[S].2003.
- [2]Crum K, Dierker R, Grody J, et al. Aircraft battle damage assessment and repair (ABDAR). volume 2: program methodology[J]. Aircraft Battle Damage Assessment & Repair, 2000.

- [3] Guijt C B. Method of repairing cracked aircraft structures [Z]. Google Patents, 2004.
- [4] Cantero J L, Tardío M M, Canteli J A, et al. Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(11): 1246-1255.
- [5] Li R, Shih A J. Tool temperature in Titanium drilling[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2007, 129(4): 740-749.
- [6] 高昆, 齐乐华, 郁大照, 等. 基于复合油雾喷射润滑的飞机钛合金蒙皮原位钻削技术研究[J]. 机械工程学报, 2005, 51(15): 198-204.
- [7] Tasdelen B, Wikblom T, Ekered S. Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200(1-3): 339-346.
- [8] Ezugwu E O, Bonney J, Yamane Y. An overview of the machinability of aero engine alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2): 233-253.
- [9] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability: a review[J]. Journal of materials processing technology, 1997, 68(3): 262-274.
- [10] Gao K, Qi L, Yu D, et al. Design and Experimental research of microquantity lubrication device used in the in situ cutting of aircraft Titanium alloy structural damage[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014.
- [11] 高昆, 齐乐华, 罗俊, 等. 用于飞机战伤抢修切割的微量润滑装置开发及切削润滑试验[J]. 机械科学与技术, 2016, 36(5): 805-808.
- [12] 陆剑中, 孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

第一作者: 吕勤云, 硕士, 讲师, 空军航空维修技术学院, 410124 长沙市

First Author: Lv Qinyun, Master, Lecturer, Airforce Aviation Repair Institute of Technology College, Changsha 410124, China

通信作者: 高昆, 博士, 讲师, 空军航空维修技术学院, 410124 长沙市

Corresponding Author: Gao Kun, Doctor, Lecturer, Airforce Aviation Repair Institute of Technology College, Changsha 410124, China