

# 硬质合金热熔钻制孔试验研究

吕德瑾 严景峰 王必永\*

国宏工具系统(无锡)股份有限公司, 中国·江苏 无锡 214192

**摘要:** 硬质合金热熔钻是一种高温无屑成形孔加工技术。针对 3C 加工领域, 复杂孔的结构与可靠连接, 使钛合金制孔存在刀具寿命低、加工表面质量差、材料变形不稳定问题。采用硬质合金热熔钻进行制孔试验, 建立纵扭复合超声加工系统, 分析不同加工参数下孔壁质量, 得出最佳的切削参数。试验对比分析, 刀具表面处理对刀具磨损和刀具寿命的影响。试验结果表明, 在超声加工参数下, 刀具经毛轮处理后, 可获得较高的刀具寿命。

**关键词:** 热熔钻; 钛合金; 加工表面; 刀具磨损; 刀具寿命

## Experimental Study on Drilling by the Cemented Carbide Friction Drill

Ly Dejin, Yan Jingfeng, Wang Biyong\*

Guohong Tool System (Wuxi) Co., Ltd., China Jiangsu Wuxi 214192

**Abstract:** Cemented carbide friction Drilling is a high-temperature, chip-less forming hole processing technology. In the field of 3C processing, the structure and reliable connection of complex holes lead to problems such as low tool life, poor machined surface quality, and unstable material deformation when drilling titanium alloys. Drilling experiments were conducted using cemented carbide thermal drills. A longitudinal-torsional composite ultrasonic machining system was established to analyze the hole wall quality under different processing parameters, achieve the optimal cutting parameters. This study compared the effects of tool surface treatment on wear and life. The results indicate that ultrasonic machining, combined with buff wheel treatment, provides a substantially enhanced tool life.

**Keywords:** Friction drilling; Titanium alloy; Machined surface; Tool wear; Tool life

## 0 引言

硬质合金热熔钻是通过钻头对工件表面产生挤压摩擦, 使被加工材料在高温软化作用下产生塑性变形, 用于提高孔及其螺纹等连接刚性。在 3C 领域, iPhone 手机边框采用钛-铝叠层材料, 制孔后需要螺纹连接。传统钻头钻出后容易产生材料分层, 很难实现钛-铝叠层材料的可靠连接。采用硬质合金热熔钻, 通过材料的热塑性变形, 形成钛-铝叠层材料相互融合, 提高加工效率, 保证加工质量<sup>[1,2]</sup>。由于热熔钻在钻削过程中, 高温下刀具表面很容易产生粘屑、氧化、侵蚀磨损<sup>[3]</sup>, 刀具寿命大大降低。加工表面也会因高温塑性变形不稳定, 产生孔壁缺陷<sup>[4]</sup>。本文通过试验研究, 通过降低刀具与工件间摩擦, 减少钻削过程中切削温度, 实现钛合金热熔制孔的可加工性。

硬质合金热熔钻过程中, 采用纵扭复合超声辅助加工方式, 与传统加工方式相比可显著降低刀-工之间的接触摩擦, 可降低切削温度的产生。大量学者研究表明, 航空航天领域钛合金加工中刀具的耐磨性研究中, 超声振动

加工使刀-工摩擦系数和磨损体积损失降低了 20%, 这有效提高了刀具寿命<sup>[6]</sup>。朱永伟<sup>[7]</sup>等人利用超声振动改变刀具切削刃与工件之间的切削机理, 刀具和工件周期性地分离和接触, 可提高刀具使用寿命、加工质量、加工效率。

本文采用硬质合金热熔钻, 配合纵扭复合超声辅助加工, 进行钛合金制孔试验, 分析了刀具材料、刀具表面抛光对刀具磨损、刀具寿命和加工表面的影响。

## 1 试验方案

本试验采用汇专纵扭复合超声辅助加工对钛合金进行钻孔试验, 完成刀具磨损分析、刀具寿命评价和刀具表面质量分析。

### 1.1 试验刀具

采用硬质合金材料试制热熔钻, 其结构如图 1 所示。刀具结构由刀体部分, 过渡锥部分, 钻头部分。钻头部分设计 120° 锥尖形, 锥面上无切削刃。刀具柄径为  $\phi 4$  mm, 刃径为 1.6 mm, 刃长为 5.4 mm; 总长为 50 mm; 无涂层。

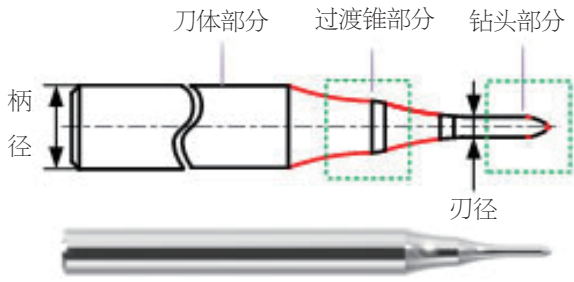


图1 硬质合金热熔钻结构

通过系统分析硬质合金材料特性，经过大量试验测试，选用：进口某品牌材料 12%Co，晶粒：0.8 μm，其材料物理和化学特性如表 1 所示。

表1 硬质合金材料B物理和化学特性 ( wt. % )

材料	C	Cr	Co	W	硬度 HV30 kg/mm <sup>2</sup>	断裂韧性 KIC MPa·m <sup>1/2</sup>	弯曲 强度 N/mm <sup>2</sup>	晶粒
WC	5.87	0.54	13.68	79.91	1680	10	4000	0.5-0.8

### 1.2 热熔钻表面处理

热熔钻表面处理是采用毛轮在刀具表面进行抛光，将刀具表面磨削纹路进行去除，降低刀具表面粗糙度，减少刀具表面与被加工表面摩擦，提高孔壁质量。本文采用羊毛轮对刀具表面进行抛光，如图 2 所示。刀具做旋转运动，羊毛轮做进给运动。羊毛轮具有一定的致密性，通过调整毛轮与刀具表面接触深度，控制抛光的状态，抛光时间约 1min，羊毛轮直径：100 mm，毛轮转速：3000 r/min，刀具旋转速度：300 r/min，对比抛光处理前和抛光处理后，可明显看出抛光后热熔钻表面呈现高光高亮效果。

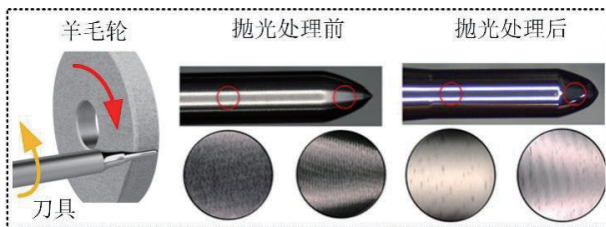


图2 热熔钻表面毛轮抛光工艺

### 1.3 试验装置

试验机床采用三轴 Fanuc 加工中心，机床主轴安装纵扭复合超声刀柄，纵扭超声加工系统由超声波发生器，超声波换能器，变幅杆和刀具组成。超声波发生器将工频交流电转换成与超声波换能器相匹配的高频交流电信号。超声波换能器将高频电能转变为高频率的机械震荡。如图 3 所示，纵扭超声加工系统试验装置。

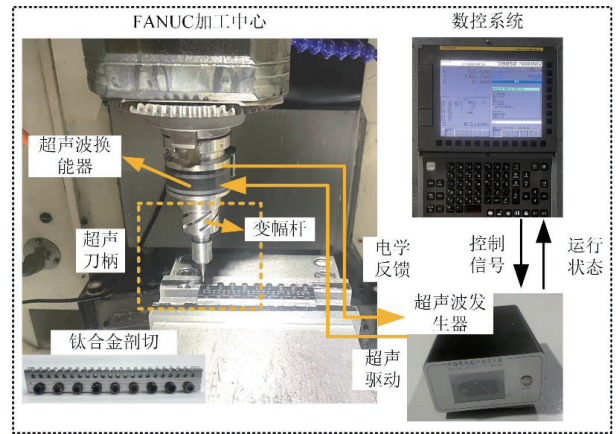


图3 纵扭超声加工系统

### 1.4 试验参数

硬质合金热熔钻孔，采用不同超声参数进行切削测试，采用四种不同制孔加工参数，钻深 5mm，超声频率为 30KHz，超声功率为 20%。在本次试验中，采用乳化液冷却方式，加工参数如表 2 所示。硬质合金热熔钻，主要在钛合金 TC4 表面制孔，钛合金塑性变形填充在铝合金的凹槽中形成钛 - 铝叠层材料的连接。热熔钻钻削示意图，如图 4 所示。

表2 热熔钻制孔试验参数

序号	测试方案	主轴转速 (r/min)	进给速度 (mm/min)	超声频率 (Hz)	输出百分 比(%)	振幅 (μm)
1	无超声	1500	20	/	/	
2	超声参数1	2500	20	30kHz	20%	2 μm
3	超声参数2	2500	30			
4	超声参数3	2000	20			

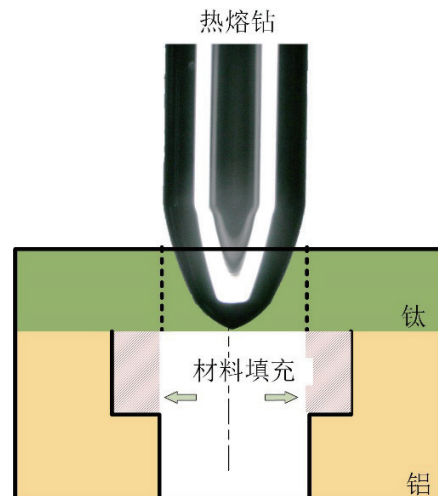


图4 热熔钻钻削示意图

## 2 试验结果与分析

### 2.1 钛合金塑性变形分析

硬质合金热熔钻削钛合金，包括以下五个阶段，如图 5 所示。第一阶段，热熔钻与钛合金表面初次接触，材

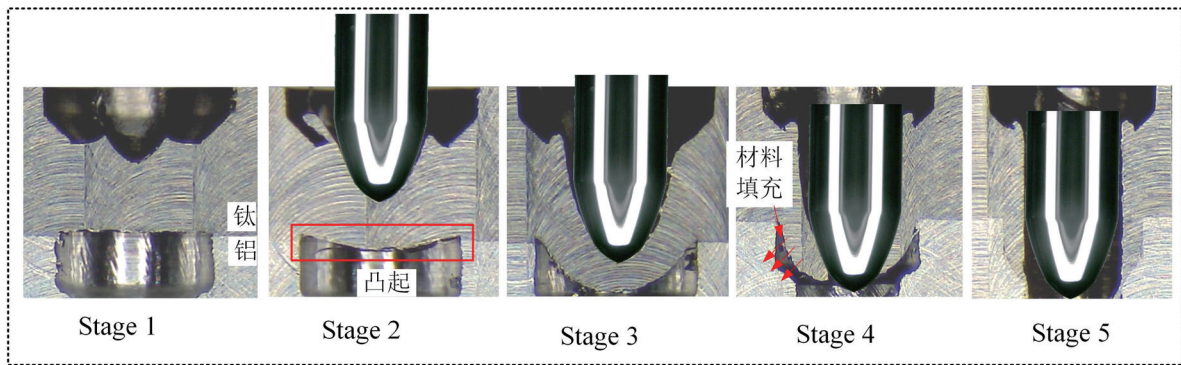


图5 热熔钻削钛合金塑性变形阶段

表3 超声加工参数优化

方案 加工参数	示意图	无超声 S1500 F20	超声参数1 S2500 F20	超声参数2 S2500 F30	超声参数3 S2000 F20
加工表面质量					

料变形出现应力的峰值点。在第二阶段，钛合金被高速旋转的热熔钻软化、挤压和向上推动，钛合金下表面的开始凸起。在第三阶段，热熔钻即将穿透钛合金层厚，圆锥形区域被熔融和软化的材料包围。在第四阶段，热熔钻钻出钛合金厚度区域，钛合金继续产生塑性变形与铝合金型腔进行填充。最后，在第五阶段，热熔钻与钛合金材料之间的接触界面从锥形变为圆柱形时，孔壁形成完成热熔钻削过程。

### 2.2 超声参数优化

热熔钻过程中，为了控制保证孔质量，改善钻削温度对钛合金变形过程中影响，提高钻孔效率，应根据钻孔参数匹配超声加工参数。从表3可以看出，不同加工参数下孔壁状态。在该无超声参数下，从孔壁颜色可以看出，钻孔形成区域温度升高，钛合金塑性变形过程因粘屑导致孔壁存在较大缺陷。超声参数1，在增加转速下使得钛合金材料变形区温度升高，孔壁成型速度快，孔壁直线度较好，但存在孔壁微撕裂和凹陷。超声参数2，在相同转速下增加进给速度，在钻出形成转折处，因热钻粘屑导致孔壁带走多余材料，存在内凹，孔壁直线度差。超声参数3，采用 S2000F20 加工参数，获得最好的孔壁直线度。

### 2.3 热熔钻磨损分析

热熔钻削过程中，主要磨损为粘结磨损和氧化磨损。热熔钻挤压变形过程中钛合金导热系数小，导致钻削过程产生较高的切削温度，工件材料很容易与刀具产生粘结和

冷焊现象，产生粘结磨损。如图6所示，热熔钻加工50孔时，钻头和被加工材料两个相互滑动表面之间接触产生热量，并在高速旋转作用下，刀具表面与钛合金材料产生高温、高压，产生粘结现象，导致钛合金材料粘附在钻头表面，产生粘结磨损，如图6位置1。而且随着钻削温度的升高，粘结现象和氧化现象会逐渐的加剧，工件-刀具界面中产生的高温增加了钻头表面氧化的可能性。由于切削区温度相对较高，钛合金中的钛元素和硬质合金刀具中的钨元素和钴元素会与大气中的氧元素发生反应，形成氧化钛、氧化钨和氧化钴的化合物。从图还可以看出，在钻尖和直径处，出现钛合金高温下变色，产生氧化磨损，如图6位置2。

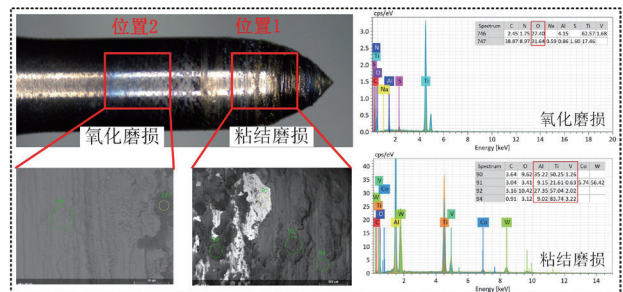


图6 热熔钻削50孔时，刀具粘结和氧化磨损

热熔钻的破损主要由两个方面产生，一方面：刀具粘屑不均匀剥落，另一方面：刀具达到寿命，疲劳断裂。如图7a 磨损初期，热熔钻表面随着粘屑增加，产生积屑瘤夹杂着硬质合金材料产生剥落，在钻削温度最高的位置钻尖

处开始。随着钻孔数量增加, 钻尖逐渐被粘结的钛合金带走, 逐渐失去钻削力, 如图 7b 钻尖磨损。随着钻尖磨损, 钻头的钻削力会逐渐增加, 直至热熔钻产生疲劳断裂, 失去工作能力, 达到寿命极限, 如图 7c 刀具断裂。

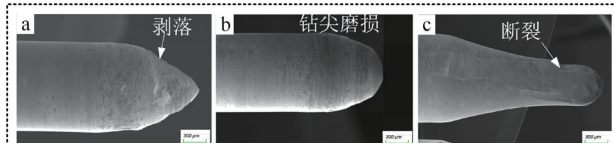


图7 热熔钻削时刀具破损分析

### 3 结语

本文针对硬质合金热熔钻进行钛合金钻孔试验, 通过对热熔钻进行表面处理, 结合纵扭复合超声加工系统, 分析不同加工参数下孔壁质量。通过钻削磨损试验, 分析热熔钻磨损和失效模式, 得出如下试验结论:

(1) 毛轮抛光可以显著降低热熔钻表面纹路, 提高刀具表面光洁度, 减少钛合金粘屑磨损。

(2) 通过加工参数优化, 对比无超声和超声条件下孔壁质量, 得出参数 S2000 F20 获得最好的孔壁质量。

(3) 分析热熔钻钻削过程中主要磨损形式为粘结和氧化磨损; 失效模式从硬质合金剥落到钻尖磨损直至刀具断裂, 从而刀具失效。

#### 参考文献:

[1] 洪意飞, 洪杰伟, 温彤等. 薄壁件热熔钻孔技术及发展现状[J]. 模具工业, 2018, 44(11): 1-8.

[2] 陈学文. 热熔钻孔 / 攻丝技术原理及其应用[J]. 工具技术, 2007, 07: 101-102.

[3] DEGHAN S, SOURY E, ISMAIL MISB. A

comparative study on machining and tool performance in friction drilling of difficult-to-machine materials AISI304, Ti-6Al-4V, Inconel718[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61(9-12): 128-152.

[4] MILLER S F. Experimental Analysis and numerical modeling of the friction drilling process[J]. Dissertation Abstracts International, 2006, 129(3): 531-538.

[5] LEE S M, CHOW H M, HUANG F Y, et al. Friction drilling of austenitic stainless steel by uncoated and PVD AlCrN- and TiAlN-coated tungsten carbide tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(1): 81-88.

[6] PENG Z L, ZHANG X Y, ZHANG Y, et al. Wear resistance enhancement of Inconel 718 via high-speed ultrasonic vibration cutting and associated surface integrity evaluation under high-pressure coolant supply[J]. Wear, 2023, 530-531.

[7] 朱永伟, 陈美伶, 韩昇等. 超声辅助 / 复合多能场加工技术研究综述[J]. 航空制造技术, 2025, 68(Z1): 38-53.

作者简介: 吕德瑾 (1990.10-), 女, 汉族, 山东省临沂市人, 博士, 中级职称, 研究方向: 硬质合金铣削刀具研发与性能测试。

通讯作者: 王必永 (1984.11-), 男, 汉族, 江苏省连云港市人, 本科, 高级工程师, 研究方向或从事工作: 切削工具研发。