

航空钛合金加工专用高速钢钻头设计

顾立晨,孟漪,马哲斌

上海工具厂有限公司

摘要: 钛合金具有比强度大、耐热性好以及耐低温等优点,广泛应用于航空零部件。本文对手持风动工具加工航空钛合金专用高速钢钻头的材料及结构进行了分析和设计,并通过加工现场的切削试验,验证了该刀具设计的合理性。

关键词: 航空业;钛合金;手持式风动工具;高速钢钻头

中图分类号: TG713.1;TH122

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.016

Design of High Speed Steel Drill for Aeronautical Titanium Alloy

Gu Lichen, Meng Yi, Ma Zhebin

Abstract: Titanium alloys have the advantages of great specific strength, heat and low temperature resistances, which are widely used in aeronautical structural parts. The material and structure of the special drills used on handheld tools for titanium drilling are analyzed and designed, and the rationality of the design is verified by cutting experiment in the workshop.

Keywords: aeronautical industry; titanium alloy; handheld tool; high speed steel drill

1 引言

在航空工业领域,钛合金主要用于制造喷气发动机的压气机盘、涡轮盘、叶片和机匣等部件,以及用于制造大型主起落架支撑梁、机身后段及转向梁等结构件。因钛合金具有比强度高和耐高温等特点,用于制造飞机发动机和机体能够有效提高发动机推重比和机体机构效率,有利于缓解热障现象。近年来军用飞机上所用钛合金材料的比例不断增加,钛合金材料的应用水平已成为衡量飞机先进性的重要标志之一。

钛合金属于难加工材料,其材料加工有以下特点:①材料强度高且硬度大;②材料变形系数小,在切削过程中容易增加刀尖或者切削刃的磨损;③材料导热系数低,切削时切削热不易传出,导致切削温度高,影响加工质量;④材料在加工时容易产生硬化,刀具产生粘结磨损,从而加剧刀具磨损。因此,钛合金材料的难加工性严重影响了钛合金材料结构件的加工效率^[1]。

本文针对牌号为 TC4 的钛合金,对手持式风动工具使用的含钴高速钢钻头进行材料与结构设计,形成了能满足航空领域钛合金专用的钻头产品,从而提升了本公司在航天航空领域的技术水平与产品市场占有率。

2 航空钛合金加工专用高速钢钻头设计

在金属切削中,孔加工的比重较大,需要使用各种孔加工刀具,其中以两刃钻头居多。钻头是一种钻孔刀具,其两个刀齿靠钻芯联接,用两条主切削刃进行切削^[2,3]。近年来,通过对航空领域制造企业的技术服务了解到,手持式风动工具消耗量最大的刀具是钛合金手动制孔上使用的含钴材料钻头。由于钛合金的难加工性,客户现场的工人在使用此类钻头平均加工 7~8 个孔后就要更换或修磨刀具。而机身上的钛合金材料制孔数则多达数以万计,此类钻头消耗量非常巨大。

刀具的设计决定刀具质量以及刀具的应用效果,对生产过程的稳定性、可靠性以及加工生产成本控制有着重要意义。通常,刀具设计主要包括刀具材料设计和刀具几何结构设计两个方面。其中,刀具材料设计包含刀具的基体材料设计和刀具的涂层设计,刀具几何结构设计包含刀具的几何形状、刀具前角、后角以及刀具的刃口处理等。具体刀具设计流程见图 1。

2.1 刀具材料设计

刀具的切削性能取决于刀具材料,因此合理选择刀具材料是刀具设计制造的第一步,也是决定刀具使用性能的先决条件。首先根据具体的刀具品种并结合具体的加工对象来选择合适的切削刀具材料,同时根据已知刀具材料的性能选择合适的切削

参数,以获得最佳的切削效果。目前应用较多的刀具材料包括高速钢、硬质合金、金属陶瓷、陶瓷、立方氮化硼(CBN)和金刚石等。常见刀具材料高温硬度与韧性对比见图2。

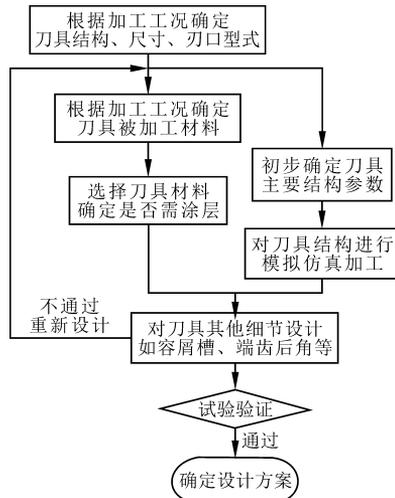


图1 刀具设计流程

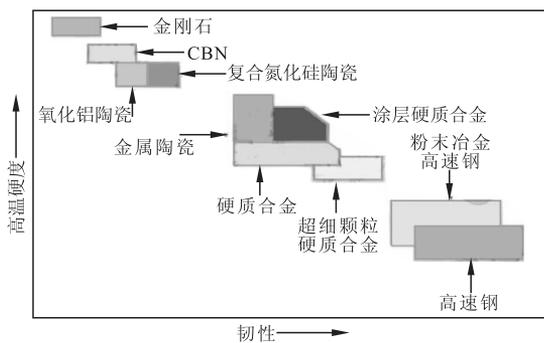


图2 刀具材料高温硬度和韧性对比

通过加工现场得知,航空企业的钛合金通常以TC4居多。此钛合金是一种 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金,包含 α 和 β 两项稳定元素,具有组织稳定、韧性和塑性好、高温强度高的特点,同时还具有良好的低温韧性和抗腐蚀能力,因此 $\alpha + \beta$ 型钛合金的综合性能非常优异。在实际加工中,因TC4钛合金的强度和硬度高,刀具也应具有较高的强度和硬度。此外,加工现场的设备为手持式风动工具,该工具灵活性较高,常用于航空领域复杂与曲面结构件加工。但此工具由操作人员手工操作(见图3),加工稳定性差,加工过程中容易出现断刀现象,且刀具加工转速较低,切削效率不高。

根据钛合金材料的加工特性以及生产现场的实际加工方式,选择刀具材料为不涂层含钴高速钢,材料牌号为M42,即W2Mo9Cr4VCo8。含钴高速钢是一种含钴量 $\geq 4.5\%$ 的高性能高速钢,其中M42高速钢是含钴高速钢的典型牌号。Co元素的主要作

用是增加高速钢材料的红硬性和抗压强度,是材料的非碳化物形成元素。因此,与普通高速钢热处理后达到63~66HRC的硬度相比,M42含钴高速钢材料的热处理后硬度高于普通高速钢,可达到66~68HRC^[4,5]。与硬质合金材料脆性大、低速加工容易崩刃相比,含钴高速钢材料硬度高,又具有一定韧性,因此更适宜于低速手持工具使用。



图3 生产现场加工方式

2.2 刀具几何结构设计

刀具的几何结构设计决定刀具的质量以及刀具的应用效果,合理的刀具结构设计对刀具的使用与切削寿命起着至关重要的作用。因此,需要针对手持风动工具使用的钛合金加工专用含钴高速钢钻头进行结构设计。

(1) 螺旋角

刀具的槽型结构通常可分为直槽和螺旋槽。直槽刀具的螺旋角 $\beta = 0^\circ$,视为直角切削;螺旋槽刀具的螺旋角 $\beta \neq 0^\circ$,为斜角切削。直角切削中切削刃垂直于主运动方向,而斜角切削中切削刃不垂直于主运动方向。刀具切削时,螺旋角通常起到控制切削流出方向与分散切削力大小的作用,因此螺旋角的大小直接影响切削刃的长度和平稳性^[6]。

通常,钻头设计均采用如图4所示的螺旋槽结构。螺旋角即钻头在轴向剖面内主切削刃的前角 γ_0 。钻头在轴向剖面内主切削刃上任意点的前角的相应计算公式为^[6]

$$\tan \gamma_0 = \frac{\tan \beta}{\sin \chi_r} + \tan \lambda_{st} \cos \chi_r \quad (1)$$

式中, β 为螺旋角; γ_0 为轴向剖面内主切削刃的前角; χ_r 为切削刃上任一点的主偏角; λ_{st} 为切削刃上任一点的端面刃倾角。

由式(1)可知,钻头前角与螺旋角关系密切,螺旋角越大,钻头在轴向剖面内的前角也越大。由于前角的增大,可使钻头切削刃越锋利,切削更轻快。但螺旋角加大会影响切削刃强度及刀具散热,加工普通材料的高速钢钻头,其螺旋角通常在 30° 左右。

由于钛合金材料硬度较高、加工时切削热较多等原因,航空钛合金加工专用钻头的螺旋角小于普通高速钢钻头。本文设计的钻头螺旋角取值约为 26° ,既能保证切削刀具的锋利性,又能满足刀具散热条件。同时,由于螺旋角的适当减小,还能减小钻头在轴向剖面内的前角,避免刀具因前角过大而引起的崩刃与磨损。

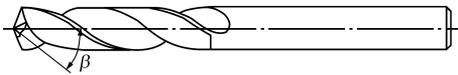


图4 刀具容屑槽结构

(2) 钻头顶角

如图5所示,钻头钻尖的顶角 ϕ 是两条主切削刃预期平行平面上的投影夹角。普通标准高速钢钻头顶角 $2\phi = 118^\circ$ 。

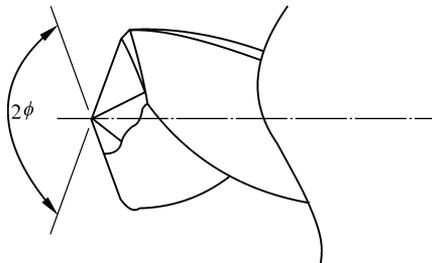


图5 钻头顶角

通过分析钻头结构可知,钻头顶角大小决定钻头切削刃的长度与单位长度上的切削负荷。经试验可知,适当增大钻头顶角,可使钻头轴向抗力增大,切屑变厚,切屑变形减小,从而使切削扭矩减小^[7]。本文含钴高速钢钻头加工的材料为TC4钛合金,其硬度较高、韧性较好,加工过程中容易出现材料硬化,因此对其加工用的钻头采用增大顶角的设计方案,可保证切削过程中顺利断屑,减小切屑变形。

由于含钴高速钢材料硬度高于普通高速钢,相比普通高速钢钻头,含钴高速钢钻头在切削时更容易发生脆性折断。因此,增大顶角可以减小刀具在切削过程中的切削扭矩,防止刀具折断。但是,顶角取值过大又会使钻尖变大,导致刀具在切削时不易散热。由于钛合金材料在加工时会产生大量热量,因此顶角不宜过大,否则将影响加工质量。

综合考虑刀具切削特性以及被加工材料特性,本文含钴高速钢钻头的顶角取值为 $2\phi = 130^\circ$,既能保证刀具散热,又能保证刀具在加工时的刚性。

(3) 横刃

标准高速钢钻头的两个刀齿靠钻芯联接,两条主切削刃不通过钻头中心,而是相互距离一个钻芯直径的距离。图6为普通高速钢钻头钻尖的横刃型

式。合理的钻头横刃设计直接决定钻头寿命。通过参考国内外研究文献以及根据多次产品试制累积的经验,借鉴硬质合金钻头的设计理念来完成钛合金加工专用高速钢钻头的设计^[8]。硬质合金钻头加工的材料通常硬度较高,切削过程中产生的热量多于普通高速钢钻头,这与切削钛合金材料比较相似。

在本文航空钛合金专用钻头的设计中,钻尖横刃设计与普通高速钢钻头不同,而采用如图7所示的钻尖横刃型式,使钻芯直径与切削刃形成一个角度。采用此种结构设计的高速钢钻头,在加工硬度高、切削热多的钛合金材料时,可使钻头定位精度高,被加工孔的圆度好,切削过程轻快,排屑顺畅,钻尖处切削热少、散热好。

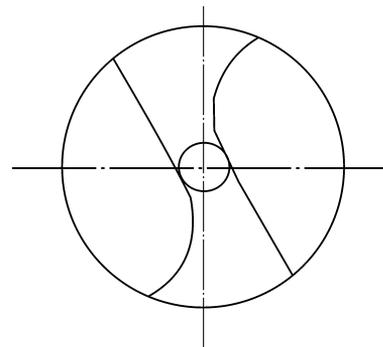


图6 普通钻头钻尖横刃

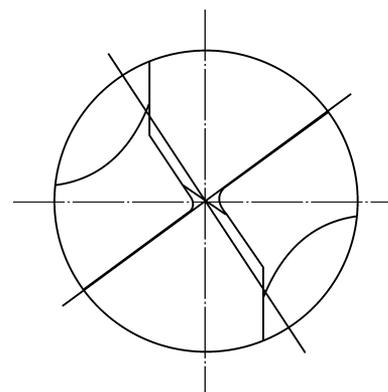


图7 钛合金加工专用钻头钻尖横刃

3 切削试验验证

为了验证航空钛合金加工专用含钴高速钢钻头在手持风动工具上的使用效果,在国内某知名飞机制造企业生产现场对该类刀具的切削性能进行试验验证。

被加工试坯材料为TC4钛合金,刀具规格为 $\phi 2.5 \times 76\text{mm} \times 152\text{mm}$ (英制尺寸为 $\phi 0.0984 \times 3'' \times 6''$),数量2支。由刀具规格可知,刀具直径为 $\phi 2.5$,刃长为76mm,长径比约1:30左右。此规格

刀具刃部直径较小、刃长较大,属于典型的难切削刀具。若采用此结构,普通高速钢钻头容易产生折断和崩刃等现象。加工硬度韧性高、切削热多的钛合金材料时,采用此结构刀具更易产生折断和崩刃现象。因此,生产现场选取此规格进行切削试验更具代表性。钛合金加工专用 $\phi 2.5$ 高速钢钻头切削参数见表1。

表1 钛合金加工专用高速钢钻头切削参数

规格	转速 (r/min)	单齿吃刀量 (mm)	进给速度 (mm/min)	切削深度 (mm)	装夹 方式	切削 方式
$\phi 2.5$	1500	0.02	30	5	钻夹头	钻削

如图8所示,刀具在切削过程中排屑断屑良好,未出现缠屑及粘刀现象,铁屑也无挤压变形情况产生,属于正常的钛合金加工出屑状态。图8a和图8b分别为含钴高速钢钻头在加工过程中产生的铁屑形貌。刀具加工10个孔后,刀具刃口磨损情况良好,未见明显的崩刃现象(见图8c和图8d),刀具还能继续切削加工。图8e和图8f为生产现场的被加工工件。可见,航空钛合金加工专用含钴高速钢钻头能满足在手持风动工具上对钛合金材料结构件进行加工。

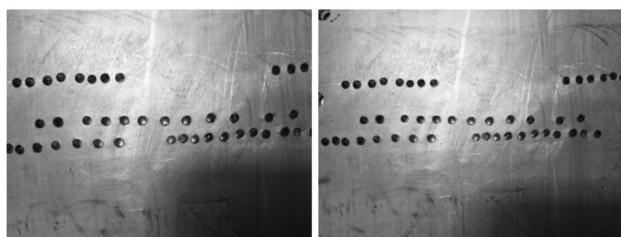
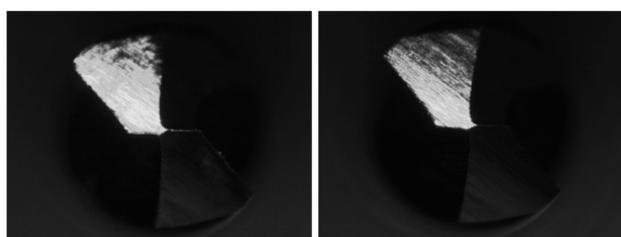
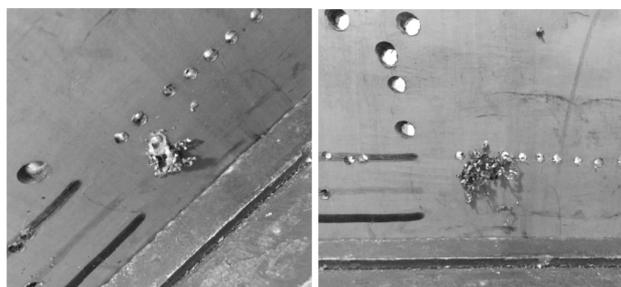


图8 生产现场切削试验

4 结语

通过对手持工具加工钛合金材料的钻头结构进行设计以及选取M42含钴高速钢材料,与普通高速钢钻头相比,本文设计的刀具散热性能较好,切削刃口粘屑磨损现象明显改善,是适用于钛合金加工的理想刀具。由飞机制造厂现场切削结果可知,设计的航空钛合金加工专用高速钢钻头能满足钛合金材料的切削要求。

参考文献

- [1]刘艳琳.钛合金零件加工工艺方法分析[J].山东工业技术,2016(10):6.
 - [2]赵建敏,查国兵.常用孔加工刀具[M].北京:中国标准出版社,2014.
 - [3]查国兵,赵建敏.高效高精度孔加工刀具[M].北京:中国标准出版社,2014.
 - [4]刘玉华.M42高速钢刀具的抗弯强度试验及分析[J].工具技术,2001,35(5):14-15.
 - [5]赵步青.航空钻头棒料热处理工艺[J].机械工人(热加工),2006(3):64.
 - [6]华南工学院,甘肃工业大学.金属切削原理及刀具设计[M].上海:上海科学技术出版社,1983.
 - [7]袁哲俊,刘华明.刀具设计手册[M].北京:机械工业出版社,1999.
 - [8]吕勤云,许爱军,黄浩然,等.钻削飞机钛合金结构维修孔的钻头横刃优选试验[J].工具技术,2018,52(11):28-31.
- 第一作者:顾立晨,工程师,上海工具厂有限公司,200093上海市
First Author:Gu Lichen,Engineer,Shanghai Tool Works Co.,Ltd.,Shanghai 200093,China