

# D406A 超高强度钢的钻削性能研究

肖继明<sup>1</sup> 李言<sup>1</sup> 吴玉生<sup>1</sup> 张立武<sup>2</sup> 李俊峰<sup>2</sup>

(1 西安理工大学,西安 710048)

(2 航天动力机械厂,西安 710025)

**文摘** 针对 D406A 超高强度钢的性能特点,选用了五种麻花钻进行钻削试验。结果表明, HSP15 含钴超硬高速钢麻花钻较适于经热处理强化后 D406A 超高强度钢的钻削加工,且在钻头几何参数和钻削用量选择合理、使用合适切削液的情况下,可有效地改善 D406A 超高强度钢的钻削性能。

**关键词** 超高强度钢,钻削试验,刀具材料

## Drilling Performance Research on D406A Super-High Strength Steel

Xiao Jiming<sup>1</sup> Li Yan<sup>1</sup> Wu Yusheng<sup>1</sup> Zhang Liwu<sup>2</sup> Li Junfeng<sup>2</sup>

(1 Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

(2 Xi'an Aerospace Power Machine Factory, Xi'an 710025)

**Abstract** According to the features of D406A super-high strength steel, five twist drills of different cutting tool material are selected to carry out the drilling tests. The results show that HSP15 super-hardness high-speed steel is better cutting tool material for drilling D406A. Its drilling performances are effectively improved when the twist drills' geometric parameters and cutting parameters are suitably selected, and a suitable cutting fluid is used.

**Key words** Super-high strength steel, Drilling tests, Tool materials

### 1 前言

D406A 超高强度钢具有良好的综合性能,但切削加工十分困难<sup>[1]</sup>。在其化学成分中,含碳量虽不高,但合金元素种类较多。其中, Si、Mn 两元素能分别保证回火稳定性和淬透性,提高硬度和强度。但 Si 元素又使材料的导热性变差,当形成硬质点  $SiO_2$  时,会使可切削性变差,刀具发生磨粒磨损,切削温度随之增加; Cr、Mo、V 三元素中 Mo、V 元素虽分别起到抑制回火脆性和细化晶粒的作用,但三者都使钢的力学性能提高,切削加工性能下降。特别是这些合金元素与钢中的碳形成稳定的碳化物时,会使它的切削性能明显变坏,如 VC、CrC 的硬度高达 2 094 HV,在切削加工时,加快刀具磨损,降低刀具寿

命。它的金相组织为针状马氏体和板条状马氏体的混合物。

基于此, D406A 超高强度钢经热处理强化后,硬度高 (51 ~ 52 HRC), 强度大 ( $\sigma_b = 1.6 \text{ GPa}$ ), 刀具磨损特别明显; 塑性较低, 切屑与刀具前刀面的接触长度很短, 切削力和切削热都集中在刀刃附近很小的区域, 使单位面积上的力负荷和热负荷大大提高, 很容易使刀刃产生剥落或崩损。导热性差, 热导率只有 45# 钢的五分之一左右。切削加工, 尤其是钻孔及攻丝等半封闭式加工时, 大量的切削热难以排出, 集中于刀刃附近, 切削温度很高, 加速了刀具磨损。因此, 如何有效地对 D406A 超高强度钢进行钻孔及攻丝等是当前亟待解决的问题。本文通过试

收稿日期: 2005 - 01 - 11

作者简介: 肖继明, 1961 年出生, 副研究员, 主要从事精密加工、深孔加工及振动切削技术等方面的教学和科研工作

验选出适合钻削 D406A 超高强度钢的刀具材料以及钻头几何参数和钻削用量等加工条件,对提高其加工效率及加工质量具有重要的意义。

## 2 刀具材料选择

针对经热处理强化后 D406A 超高强度钢的加工特性,要求刀具材料必须具有很高的弯曲强度、冲击韧性、红硬性和耐磨性等。这些要求对同一种刀具材料很难同时兼顾。强度和韧性较高的刀具材料,如高速钢,其耐磨性或高温硬度(常温硬度也一

样)就较低;而耐磨性或高温硬度较高的刀具材料,如硬质合金,则其强度或韧性又较低。本次试验选择了适于钻削 D406A 超高强度钢的麻花钻材料,选择范围既有普通高速钢 W18 与高性能高速钢 HSP15,又有硬质合金 YG6X 和 YT15,还有兼有普通高速钢 M2 基体材料强度和韧性及涂层硬膜硬度和耐磨性的涂层高速钢。表 1 列出本次试验所用几种刀具材料的性能<sup>[2]</sup>。

表 1 试验用几种刀具材料的性能

Tab 1 Performances of some tool materials used in tests

刀具材料	硬度	弯曲强度 / GPa	冲击韧性 / $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	600 硬度 (HRC)	耐热温度 /
W18Cr4V (W18)	63 ~ 66 HRC	3 ~ 3.4	180 ~ 320	48.5	-
W10Mo4Cr4V3Co10 (HSP15)	67 ~ 69 HRC	约 2.35	约 100	55.5	-
W6Mo5Cr4V2 (M2) <sup>1)</sup>	63 ~ 66 HRC	3.5 ~ 4.0	300 ~ 400	47 ~ 48	-
YG6X	91 HRA	1.35	约 20	-	900
YT15	91 HRA	1.15	7	-	900

注:1)高速钢表面有复合涂层。

## 3 试验条件

试验设备为 Z5125 立钻,主轴转速用交流变频器控制实现无级调速。钻头直径 5 mm,其中: HSP15 含钴超硬高速钢麻花钻,钻芯厚度比值  $r_0/R = 0.65/2.5$ ,螺旋角  $= 20^\circ$ ;横刃斜角  $= 55^\circ$ ;M2 高速钢麻花钻为全磨制标准麻花钻,用 Teer-UDP850/4 闭合场非平衡磁控溅射离子镀设备涂覆了 CrAlTiN 多元复合涂层,涂层特性见表 2;其他钻头为国产高速钢和硬质合金标准麻花钻。钻头磨损和破损用 30 倍的工具显微镜静态观察测量。主要通过测量钻头后刀面最大磨损量  $VB_{\max}$  来评定钻头的切削性能,磨钝标准  $VB_T = 0.15 \text{ mm}$ 。试件材料为经热处理强化后的 D406A 超高强度钢板,厚度 10 mm,调质硬度 51 ~ 52 HRC。

表 2 CrAlTiN 多元复合涂层的特性

Tab 2 Characteristics of CrAlTiN multicomponent coatings

厚度 / $\mu\text{m}$	硬度 (HV <sub>0.5</sub> )	临界载荷 / N	平均磨损率 / $\text{m}^3 \cdot (\text{N}\cdot\text{m})^{-1}$	平均动摩擦因数	耐热温度 /
3.59	2.838	60	$2.56 \times 10^{-16}$	0.60	约 900

## 4 结果及分析

### 4.1 钻头寿命

— 50 —

图 1 所示为几种刀具材料的麻花钻在干式切削条件下钻削 D406A 超高强度钢时的钻头寿命比较。

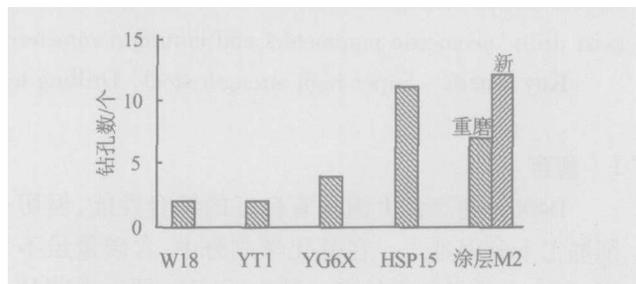


图 1 不同刀具材料钻头寿命比较

Fig 1 Drills life comparison of different tool materials

钻削条件:  $d = 5 \text{ mm}$ ;  $f = 0.056 \text{ mm/r}$ ,干式切削;

W18和 HSP15,;涂层 M2,  $n = 180 \text{ r/min}$ ;

YT15和 YG6X,  $n = 500 \text{ r/min}$ .

W18 高速钢麻花钻由于硬度特别是高温硬度较低、磨损很快,每次刃磨平均钻孔 2 个左右;YT15 和 YG6X 硬质合金麻花钻,虽可用较高的钻削速度进行钻孔,且切屑为长螺卷状,钻孔精度高,表面粗糙度小,但其脆性较大,极易产生崩刃现象(尤其 YT15 麻花钻),每次刃磨分别平均钻孔 2 个和 4 个左右;HSP15 含钴超硬高速钢麻花钻,不但具有比

宇航材料工艺 2006年 第 1期

W18高速钢麻花钻高的常温硬度和高温硬度,且具有比YT15和YG6X硬质合金麻花钻高的强度和韧性,因而其耐磨性、耐热性和抗破损能力均较高,每次刃磨平均钻孔11个左右。

涂层M2高速钢麻花钻,虽兼有M2高速钢基体材料的强度和韧性与CrAlTiN多元复合涂层硬膜的硬度和耐磨性,在钻削时也可适当提高钻削速度,切屑为长螺卷状,钻孔精度较高,表面粗糙度较小,新钻头第一次使用时平均钻孔12个左右,但一经重磨,由于后刀面失去涂层保护,平均钻孔降至7个左右。对其失效原因的分析结果表明,主要是由于M2高速钢基体硬度,特别是高温硬度较低,钻削时因热效应而使基体软化变形,不能给涂层以强有力的支撑,导致涂层开裂和脱落而失效。如果通过强化M2高速钢基体,如离子氮化等<sup>[3~5]</sup>,或改用高性能高速钢,如含钴、含铝超硬高速钢,甚至粉末冶金高速钢基体,再进行适当涂层。用于钻削加工D406A超高强度钢,将会取得更好的效果<sup>[2,6]</sup>。这方面研究有待进一步的试验分析。综上分析,在本试验所用几种刀具材料中,HSP15含钴超硬高速钢是较适于钻削加工经热处理强化后D406A超高强度钢的麻花钻材料。

#### 4.2 钻削条件优化

由切削理论知,当刀具材料和刀具结构确定后,合理选择刀具几何参数、切削用量和冷却润滑液等是保证加工质量、提高效率和降低成本的有效途径。本试验着重对HSP15含钴超硬高速钢麻花钻几何参数和钻削用量进行试验优化,并对切削液及冷却润滑方式等加工条件进行了选择。

##### 4.2.1 钻头几何参数优化

钻尖角的大小直接影响钻头的定心作用、排屑情况和寿命长短。厂家提供钻头钻尖角为110左右,但加工高强度钢或高合金钢时,为了减少钻头与孔壁的摩擦,一般推荐钻尖角为130°~140°<sup>[21]</sup>。实验中我们对钻尖角在110°~150°之间进行了钻削试验,结果如图2所示。钻尖角在110°左右时钻头寿命分散性较大;在140°~150°时钻头寿命下降很快,每次刃磨只能钻孔1~2个,且易产生崩刃或折断现象;而在130°左右时钻削过程平稳,钻头寿命最长。因此钻尖角宜用130°左右。

钻头后角较大时,会使楔角减小,散热条件变

差,切削刃强度降低,钻削时易产生崩刃和振动;后角较小时,切削刃刚度好,但后刀面与刃带磨损加快,切削温度升高,钻头寿命降低。试验表明,钻头后角为6°~8°比较合适。

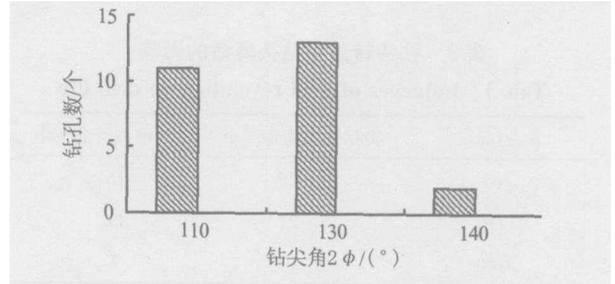


图2 钻尖角对钻头寿命的影响

Fig 2 Influence of drill point angle on drills life  
钻削条件:  $d=5\text{ mm}$ ;  $n=63\text{ r/min}$ ;  $f=0.056\text{ mm/r}$ ; 干式切削。

此外,对钻头横刃、前刀面及外缘转角等进行适当修磨,既可提高钻削速度和钻孔效率,且改善钻头的耐磨性,延长使用寿命,见图3曲线。

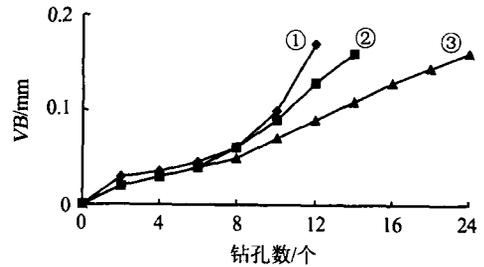


图3 钻头磨损曲线

Fig 3 Drills wear curves

钻削条件:  $d=5\text{ mm}$ ,  $f=0.056\text{ mm/r}$ ;  
①  $=110^\circ$ ;  $n=63\text{ r/min}$ ; 干式切削;  
②  $=130^\circ$ ;  $n=110\text{ r/min}$ ; 干式切削;  
③  $=130^\circ$ ;  $n=110\text{ r/min}$ ; 湿式切削。

##### 4.2.2 钻削用量优化

钻削用量的大小直接影响钻孔效率,但随着钻削用量的提高,钻削力增大,钻削温度升高,钻头磨损加快,寿命下降。试验表明,钻削D406A超高强度钢时,钻削用量的适应范围很窄。进给量在所用钻床上仅0.056 mm/r一档可用,若提高一档到0.112 mm/r,无论怎样改变钻头转速,切削过程极不稳定,钻削力波动很大,有时甚至一个孔也加工不出来(即使钻头扭断)。钻头转速在63~110 r/min时,切削力波动较小,切削温度较低,钻头寿命也较

为稳定;若继续提高钻头转速则会使钻头磨损加快,钻头寿命缩短,甚至扭断。表 3 为钻头转速对钻头寿命的影响。因此,钻削用量在兼顾钻孔效率的情况下宜选  $n = 110 \text{ r/min}$ ,  $f = 0.056 \text{ mm/r}$ 。

表 3 钻头转速对钻头寿命的影响<sup>1)</sup>

Tab 3 Influence of drill revolution on drill life

$n / \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	实际钻头寿命 / 个	平均钻头寿命 / 个
63	9 ~ 25	15
110	7 ~ 21	11
140	2 ~ 17	7

注: 1)  $f = 0.056 \text{ mm/r}$ , 2)  $\alpha = 130^\circ$ ; 干式切削。

### 4.2.3 切削液的选择

实验表明,切削液可成倍地延长刀具寿命,减少刀具磨损。切削高强度钢或高合金钢时,要求切削液具有高的润滑性能和冷却性能,并具有较好的渗透性和洗涤性能。因此,一般推荐采用在切削液中添加氯化物或硫化物做为极压添加剂。本试验选用硫化切削油,并采用连续浇注的方式,以便充分冷却润滑。结果表明,钻头磨损明显改善,与干式钻削相比,钻头平均寿命提高约 60%,如图 3 中曲线和所示。

## 5 结论

(1)用所选几种刀具材料麻花钻,在钻削经热

处理强化后的 D406A 超高强度钢时, HSP15 含钴超硬高速钢麻花钻的切削性能优于其他刀具材料。

(2)用 HSP15 含钴超硬高速钢麻花钻钻削 D406A 超高强度钢时,钻头几何参数宜用钻尖角 130 左右,后角  $6^\circ \sim 8^\circ$ ;并适当修磨横刃、前刀面及外缘转角等;切削用量宜选  $n = 110 \text{ r/min}$ ,  $f = 0.056 \text{ mm/r}$ ;切削液宜用硫化(或氯化)切削油。

## 参考文献

- 仇启源, 庞思勤编著. 现代金属切削技术. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 肖诗钢编著. 刀具材料及其合理选择. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 胡树兵, 梅志, 李志章. M2 钢离子氮化与离子镀 TN 复合涂层的高温滑动磨损特性. 摩擦学学报, 2000; 20(3): 165 ~ 169
- Takayasu Sato, Kenichi Sugai, Shizuyo Ueda et al. Development of a hybrid coating process as an advanced surface modification for cutting tools and moulds. Surface and Coatings Technology, 2003; 169 ~ 170: 45 ~ 48
- Khinura H, Ishii Y, Rodrigo A. Hardness analysis of duplex coating. Surface and Coatings Technology, 2003; 169 ~ 170: 735 ~ 738
- Mills B. Recent developments in cutting tool materials. Journal of Materials Processing Technology, 1996; 56: 16 ~ 23

(编辑 李洪泉)

# 新型铁基烧结摩擦材料

本成果按下述质量分数组成: 70% Fe、12% 石墨、3%  $\text{MoS}_2$ 、3% Pb、4% Sn、4%  $\text{SiO}_2$ 、4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

本配方特点是加入适量、适粒度的片状天然石墨,添加适量的  $\text{MoO}_3$ 、调节摩擦因数,得到分级混合和多阶式加压烧结工艺流程的参数。它是不含铜、不添加合金元素的耐磨性强、静摩擦因数高、综合性能优良的铁基摩擦材料,并与 30CrSMoV 钢匹配成理想摩擦副。

本成果可用于刹车制动、传递扭矩和过载,以保护传动装置,已用于国内飞机刹车装置,使用效果良好。

(北京航空材料研究院,北京 010 - 62556622)

·李连清·