

# 特型榫槽拉刀设计的研究

Research on the Design of Special Type Mortise Broach

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司工装制造厂 徐岩 张川



徐岩

现任中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司工装制造厂设计科技术专家,长期从事航空发动机零件难加工材料刀具设计研究工作,在拉刀及非标刀具设计中取得了一定的突破,成功解决了多项加工难题,获得实用发明专利。

发动机涡轮工作在高温、高速旋转条件下,涡轮盘与叶片之间产生的离心力很大,因此对盘与叶片之间的连接要求很高。而在涡轮盘机械加工中,工作量最大、难度最高的是涡轮轮盘榫槽的加工。榫槽的精度要求非常高、尺寸公差要求很严格,榫槽型面的表面质量要求也很高。特

由于拉刀在拉削过程中,切屑不可能从拉刀的齿间槽排出,而是要全部容纳在齿槽中,随着拉刀移动,将拉屑带出已加工表面,因此采用偏置前角拉削,有效提高拉刀强度,解决该特型榫槽拉屑排除问题,对容屑槽的设计显得格外重要。

别是近几年新型槽型不断增加,原拉刀的设计方法已满足不了需求,针对异形的榫槽需采取特殊的拉削方案。如某级涡轮盘由于直径较大,需在外径上拉削加工数百个特型榫槽,为确保涡轮盘每个榫槽与叶片的装配精度,使发动机推力不受影响,需研究制定特型榫槽最佳拉削设计方案,以满足科研生产需求,延长拉刀使用寿命,提高生产效率。

## 零件概述

### 1 零件特型榫槽结构

被拉削零件材料为GH4169镍基变形高温合金,型面精度要求非常高,工作面轮廓度很严。被加工零件槽型见图1所示。

在涡轮盘直径 $\phi 700$  mm的外圆上连续拉削160多个槽,拉削榫槽

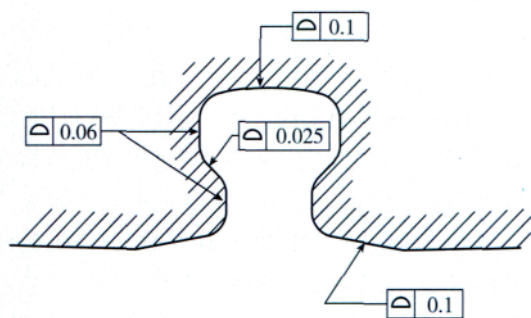


图1 被加工零件槽型示意图

数量多,槽口小,型腔大,型腔宽度大约是槽口宽度的2倍。拉削长度:10mm;拉削深度:7mm。

若按常规设计型腔开槽拉刀,拉刀的强度受制约,无法实现拉削加工成型。

### 2 零件材料理化性能分析

零件材料为GH4169镍基变形高温合金,其主要化学成分和锻件性能如表1、表2所示。

该材料主要特点是具有良好的高温性能,在切削时塑性变形功大,

表1 GH4169 化学成分

合金牌号	C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Fe
GH4169	≤ 0.08	17.0~21.0	50.0~55.0	≤ 1.0	2.80~3.30	0.30~0.70	0.75~1.15	余
	Nb	B	Mg	Mn	Si	P	S	Cu
	4.75~5.50	不大于						
	0.006	0.01	0.35	0.35	0.015	0.015	0.30	

表2 GH4169锻件性能

$\theta / ^\circ\text{C}$	拉伸性能				HB	持久性能		
	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\phi / \%$		$\sigma / \text{MPa}$	$\tau / \text{h}$	$\delta_5 / \%$
	不小于							
20	1030	1275	12	15	346~450	—	—	—
500	932	1128	12	16	—	—	—	—
650	863	1000	12	18	—	890	> 25	> 5

切削力大,导热性差,切削区温度高,加工硬化严重,易造成切削粘刀,形成积屑瘤,加快刀具磨损,使刀具寿命降低,影响加工表面质量及精度<sup>[1]</sup>。

## 拉刀设计方案及拉削方式

在金属拉削加工过程中,拉刀切削部分的工作条件往往是十分恶劣的。它不但要承受很大的拉削抗力和很高的切削温度,而且还要经受冲击载荷和机械摩擦<sup>[2]</sup>。因此对拉刀提出更严格的要求。

### 1 拉刀设计方案

拉刀设计中最重要的是确定拉削方案,它将直接影响拉刀的结构、拉刀制造的工艺性、拉削后的精度和光洁度、拉刀的耐用度和生产率的高低。

#### 1.1 方案一:单面齿拉削

零件槽口宽 3.7mm,粗开槽刀给精拉刀单面留较小的拉削余量,那么粗拉削槽口宽 3.5mm,开槽刀侧面有侧隙角,因此开到槽底宽为 3.1mm,剖面线为型腔拉削部分,单面拉削余量大约 2mm,如图 2 所示。

前面说过槽底开槽宽 3.1mm,考虑拉削时留有空刀,粗拉型腔时拉刀

宽取 2.8mm,在此宽度上要开刀齿容屑槽深 1.5mm,刀体厚只有 1.3mm,采用单面拉削,即先拉左边槽,再拉右边槽,沿  $P$  方向横向进刀,由于单面拉削受力不均,产生“让刀”,拉削余量大,无法实现拉削成型,如图 3 所示。

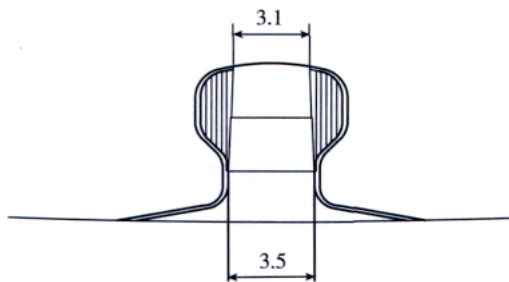


图2 开槽后型腔余量示意图

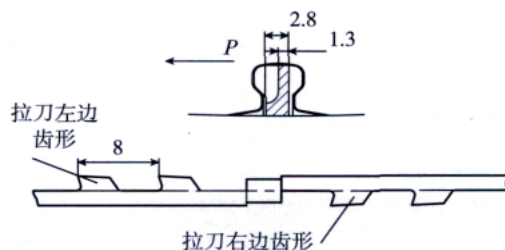


图3 单面齿拉削示意图

#### 1.2 方案二:双面开错齿拉削

两面沿横向  $T$  方向同时进刀拉削,虽然受力均匀,刀齿容屑槽深

1.05mm,刀体厚只有 1mm,容屑系数小,没有足够的容屑空间,拉刀强度低,易打刀划伤零件及生产安全隐患,重复刃磨使用性差,如图 4 所示。

双面开错齿拉削和偏置前角拉削 3 种拉削方案,经分析研究确定采用偏置前角拉削方案。

#### 1.3 方案三:偏置前角拉削

采用 3 把偏置前角拉刀解决了上述前 2 种方案存在的问题。垂直拉刀底面方向上开拉刀齿距及容屑槽,不但增加拉刀强度,同时增大容屑系数。该方案需要 8 把拉刀,1~3 把开槽拉刀,4~6 把偏置前角粗拉齿型拉刀,7~8 把精拉齿形拉刀,如图 5 所示。

## 2 拉削方式

在设计拉刀中,拉削方式的优劣将影响到拉刀的结构,拉刀的制造工艺性,拉削后的零件型面的几何精度、粗糙度以及拉刀调试时间的长短。

### 2.1 渐切法

粗开槽刀与粗拉齿型刀采用渐切法。这种拉削方式是将拉刀齿形修整,形成每个刀齿两侧表面具有侧隙角<sup>[3]</sup>,这样给拉刀创造了最有利的拉削条件,使之减少粘附,减少刀齿与被加工零件型面的摩擦。优点是制造比成形法简单,齿距小,拉刀长度短,拉刀切削刃有侧隙角,减少了拉刀齿侧面与被加工表面之间的磨擦,以避免金属粘符在刀齿两侧副切削刃上,提高了拉刀的耐用度。

### 2.2 成形法

拉刀每个齿切下的金属层与被拉削表面最后型面相似。优点是拉刀定型齿的型面精度决定被拉型面的加工精度,因此容易获得较高的几何精度。

根据上述原因,确定拉削方式为

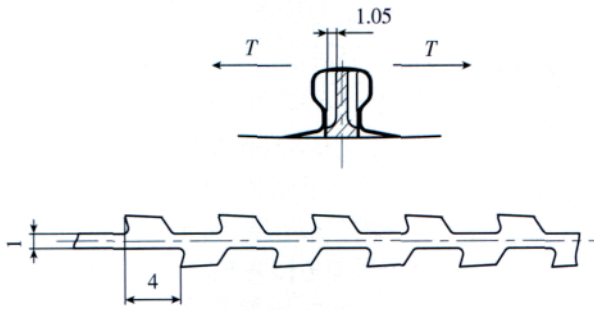


图4 双面开错齿拉削示意图

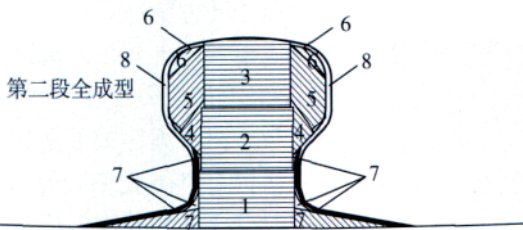


图5 偏置前角拉削示意图

精刀用成形法,粗拉型面用渐切法。

### 2.3 拉削顺序的确定

由于此槽型面尺寸小,在数控拉床6m长的最大行程一次完成型面的粗精拉削工作,前半部分安装粗拉刀(1~6把),后半部分安装成型精拉刀(7~8把)。目的是消除由于零件材料受拉削力的影响,产生材料的“弹性变形”,如图6所示。

### 2.4 拉削余量分配

拉刀余量分配的是否合理直接影响到拉削后零件型面几何精度、尺寸精度、及表面粗糙度高低,同时拉削余量的大小也是确定拉刀主要尺寸的依据。要留有适当的精拉余量,余量过大,将使拉刀齿数增多,拉刀

拉刀参数见表3。

粗开齿型刀是完成与最终精加工型面相似并给精拉削留有适当余量的拉刀,此刀设计是拉削整体设计重要的步骤。精拉余量大,拉削时,拉削力较大,零件型面变形大,零件尺寸精度达不到,不易合格,如果精拉余量留小,由于粗精拉刀装夹定位误差及其他原因,易造成精拉余量不足使型号转接不圆滑,零件表面质量差。根据上述原因分析,粗开

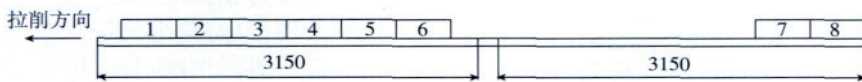


图6 拉削顺序示意图

表3 开槽拉刀参数

拉刀序号	刀长/mm	齿数/个	齿升量/mm	第一齿高/mm	最后齿高/mm	第一齿宽/mm	最后齿宽/mm	齿距/mm	齿槽深/mm	前角/(°)	后角/(°)
第一把	590	73	0.035	46	48.52	3.6	3.5	8	3	18	3
第二把	600	74	0.035	48.485	51.04	3.4	3.3	8	3	18	3
第三把	600	68	0.035	51.005	53.11	3.2	3.1	8	3	18	3

过长,但余量过小,则精拉不足以消除粗拉时分度误差造成的偏移以及残留的刀痕。根据实践经验,将粗拉齿刀给成型精刀单面留有一定的余量。

## 拉刀的设计

设计开槽刀首先根据型面深度、齿距、齿升量确定拉刀总长,考虑拉刀制造精度,开槽拉刀的长度应 $\leq 600\text{mm}$ ,粗开槽拉刀3把,刀体 $25\text{mm} \times 30\text{mm}$ ,开槽

齿型拉刀给型面精拉刀单面留适当的拉削余量。这样定3把粗开齿型拉刀。

### 1 (第4~6把)齿型开槽拉刀——偏置前角拉削

刀齿是垂直拉刀高度方向开的,刀齿深不受槽宽限制,增加足够的容屑空间,有效提高拉刀强度,重复刃磨使用性好,延长拉刀使用寿命,如图7所示。

在拉刀设计中,拉刀相邻两齿的高度差称为齿升,一般情况下,齿升方向是垂直拉刀底面或垂直拉刀侧面,形成切屑容在容屑槽内,偏置前角齿升方向是与拉刀底面成 $50^\circ$ 的夹角,左右两侧同时拉削加工,见图8(a)、(b)所示。图8(a)为第一刀齿型面,进刀量是沿着 $H'$ 方向

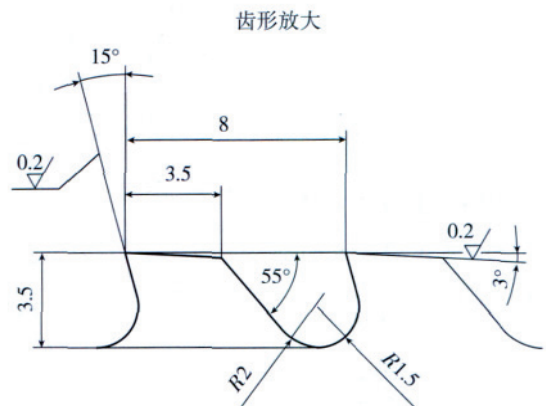


图7 偏置前角容屑槽示意图

进升的,齿升量零点几mm,在 $H'$ 进升的同时, $H$ 方向也随着增高,但不切屑(开槽已拉削完),刀宽也随着加宽,垂直 $40^\circ$ 方向的尺寸(从第一齿到最后一齿)是变化的,经过十几个齿的逐渐拉削,图8(b)为最后刀齿型面,完成第一把拉刀粗开齿型。后2把类同,完成整个型腔粗拉削加工。由于是多刀拉削,刀脖强度差,拉刀须进行强度计算。

### 2 拉刀强度验算

拉刀工作时,主要承受拉伸应力,可按下式进行校验:

$$F_{\max} \div A_{\min} \leq \sigma N/m^2 [4], \text{ 式中,}$$

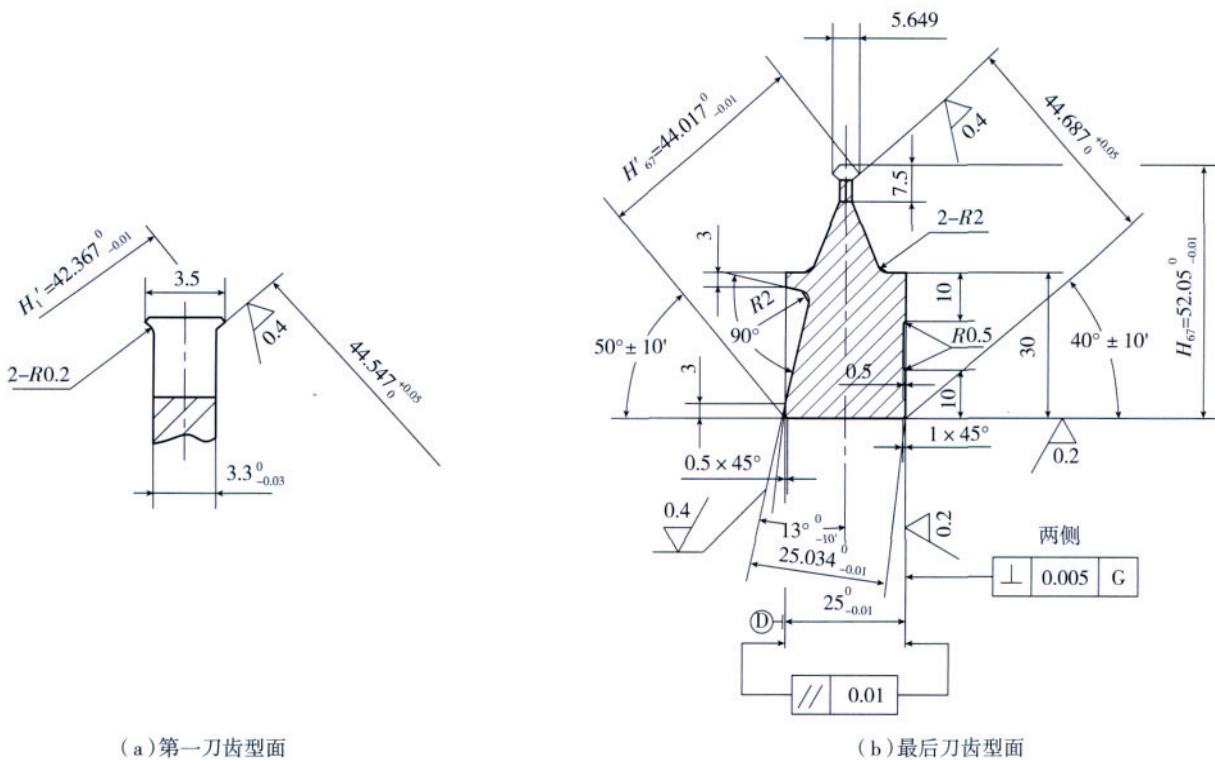
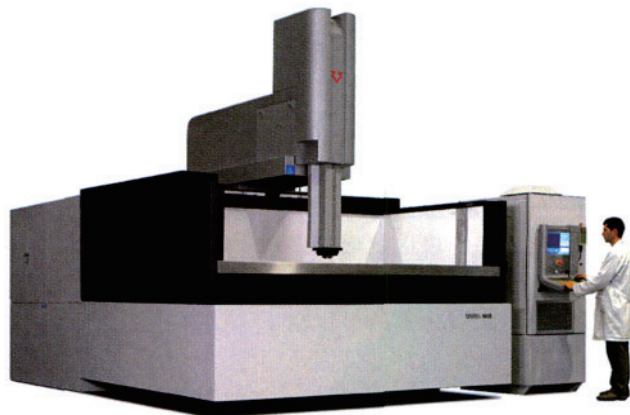


图8 偏置前角齿升方向示意图

$F_{max}$  为拉刀工作时的最大拉削力 (N);  $\sigma$  为拉刀材料的许用应力 (N/mm<sup>2</sup>);  $A_{min}$  为拉刀上的危险截面面积 (mm<sup>2</sup>)。从拉削方案图中可看出,第5把齿型开槽拉刀所承担拉削余量较大,



- 世界领先的火花机
- 世界领先的电加工机床用NC控制器
- 世界领先的模块化设计的火花机及线切割机床
- 世界领先的免维护过滤系统
- 世界领先的反电解加工
- 定位精度0.001mm
- 表面粗糙度Ra 0.1 μm
- 加工速度达600mm/min



西班牙欧纳机床股份公司

总部: 埃古斯基察区1. 48.200, 杜兰戈. 西班牙巴斯克自治区. Tel: +34 (94) 6200 800  
 中国代表处: 深南大道财富广场A座10楼A-B-C. 中国深圳. Tel: +86 (755) 8287 0500  
 独家授权代理: 北京林毅中大机械设备有限公司. 中国北京. Tel: +86 (10) 8074 2338



广告索引号 11-111

需在危险截面处进行强度验算,拉刀材料为 W2Mo9Cr4VCo8(M42), 许用应力  $\sigma$  约 35~40kg/mm<sup>2</sup>, 经查资料, 单齿单位长度上的拉削力 18.6kg/mm。

最大拉削力:  $F_{\max}=18.6 \times 5.97144$  (切削刃总长, mm)  $\times 3.275$  (同时工作齿数)=363.7502676kg;

危险截面:  $A_{\min}=3.3\text{mm} \times 4.23\text{mm}=13.959\text{mm}^2$ ;

危险截面拉刀强度:

$$F_{\max} \div A_{\min} = 363.7502676\text{kg} \div 13.959\text{mm}^2 = 26.058\text{kg/mm}^2 < \sigma = 35\sim 40\text{kg/mm}^2$$

经过计算可知,危险截面拉刀许用应力仅小于拉刀材料许用应力大约 1/3, 拉刀强度足够, 可进行设计, 如图 9 所示。

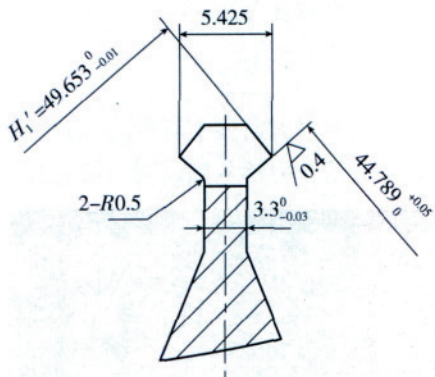


图9 拉刀危险截面强度验算示意图

### 3 精刀的设计

精刀是最终零件成型的拉刀, 是拉刀设计最关键的部分<sup>[5]</sup>, 设计精拉刀时要考虑如下 3 方面。

(1) 能拉削出高质量的型面。在精刀拉削时, 精刀是最后的成型刀具, 它的精度高低直接影响到零件的质量, 所以精刀要求有较高的设计精度, 保证能拉削出合格的零件型面及尺寸精度。

(2) 拉刀最大轮廓尺寸的确定。在拉削时, 由于零件受到不同方向拉削力的作用, 即使完全符合零件型面尺寸的拉刀也不一定加工出合格的零件型面, 所以设计拉刀时, 要根据

零件型面不同方向受力情况加一定量的补偿数值来确定拉刀的设计尺寸。

(3) 拉刀制造的工艺性。由于精刀是采用成形法拉削, 需要对每个齿单独进行铲磨, 铲磨时为了不碰伤后边刀齿, 便于砂轮的退出, 要增大齿距, 刀齿间的距离不能小于 12mm。精拉刀第 7~8 把, 齿距取 12mm, 同时能确保拉刀正常拉削, 铲磨后拉刀切削刃处要有足够大的拉削后角, 使之不产生积屑瘤, 如有拉削刃与铲方向平行, 还需要调整铲磨方向。

### 拉削试验

#### 1 选用设备及工艺参数

设备: 数控高速拉床;

拉削速度: 1.5m/min;

冷却油: 嘉实多。

#### 2 试验结果分析与讨论

特型榫槽拉刀的设计, 开槽 3 把, 偏置前角齿型粗拉刀 3 把, 精拉型面 2 把, 经拉削试件, 在投影板进行投影放大效果验证。结果表明: 型面转接圆滑, 无接刀痕, 表面精度高, 满足设计要求。偏置前角拉刀可重复修磨使用, 降低刀具成本。但整个型面投影比槽型最大型面(单面)大 0.02mm, 这是在设计中考虑材料的回弹、拉刀的制造与装夹等误差, 将精拉刀第 8 把的第二段型面尺寸加大一定量的“补偿值”。对于型面(单面)大 0.02mm, 解决的方法是通过修磨前刃面, 使拉刀型面尺寸减小, 再拉削投影检查, 直到投影检查合格。图 10 为拉削零件示意图, 在难加工材料直径  $\phi 700\text{mm}$  多的外圆上, 连续拉削 160 多个槽, 拉刀刃口锋利, 拉削平稳, 安全可靠, 加工精度高, 拉刀寿命长, 生产效率高。

试验表明: 对拉削 GH4169 材料特型榫槽时, 槽型浅、小, 受拉削力

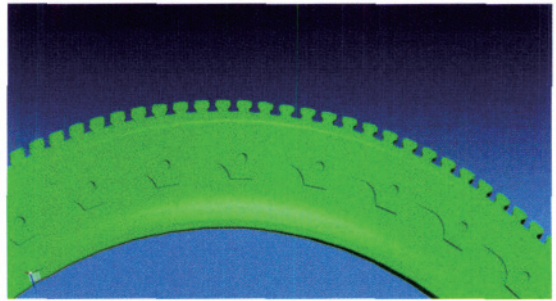


图10 拉削零件示意图

小, 弹性变量趋于零, 所以在成型精拉刀设计中, 不必加大型面尺寸的“补偿值”。

### 结束语

对特型榫槽的“型腔”拉削, 采用偏置前角两方向齿升拉削去余量, 改变了传统单一方向齿升拉削, 解决了型腔大, 槽口小, 拉屑无法排除及提高拉刀强度疑难问题, 从而使拉刀使用安全、可靠, 可重复修磨使用, 延长了刀具使用寿命, 满足了零件设计精度要求, 叶片与榫槽装配互换性好。

该设计的创新点: 由于拉刀在拉削过程中, 切屑不可能从拉刀的齿间槽排出, 而是要全部容纳在齿槽中, 随着拉刀移动, 将拉屑带出已加工表面, 因此采用偏置前角拉削, 有效提高拉刀强度, 解决该特型榫槽拉屑排除问题, 对容屑槽的设计显得格外重要。这种新颖的拉刀设计和制造是国内外拉刀领域中的创新, 该设计方案有推广价值。

### 参考文献

- [1] 韩荣第, 于启勋. 难加工材料切削加工. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] 杨荣福, 董申. 金属切削原理. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [3] 《航空工艺装备设计手册》编写组. 航空工艺装备设计手册 - 刀具设计. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [4] 楼希翱, 薄化川. 拉刀设计与使用. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [5] 刘杰华. 刀具精确设计理论与实践. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(责编 小城)