

# 淬火钢的高速铣削试验和机理研究\*

查文炜, 刘必荣

(盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224003)

**摘 要:** 高速铣削淬火钢可以显著的提高生产率及加工表面质量, 并在一定程度上可以取代磨削加工。但是因为淬火钢特殊的切削性能使得高速铣削淬火钢时的切屑形态、切削力、切削温度以及刀具的寿命有很大的变化。阐述了高速铣削淬火钢的切削机理、刀具的选择, 对高速铣削淬火钢的实际应用有一定的意义。

**关键词:** 淬火钢; 高速铣削; 切屑机理; 刀具选择

中图分类号: TG506

文献标识码: A

文章编号: 1671-532X(2004)04-0022-04

淬火钢是典型的耐磨性结构材料, 具有较高的硬度和强度, 而且具有良好的塑性和韧性。随着淬火钢在模具和汽车制造业的广泛应用, 以及现代制造业的快捷和高精度概念的提出, 使得淬火钢的高速铣削被许多企业所接受, 高速铣削加工和传统的铣削加工相比, 具有高生产效率, 减少切削力, 提高加工精度和表面质量, 降低生产成本的优点, 可以加工硬度 HRC(45~65) 的淬火热钢件<sup>[1,2]</sup>。因为淬火钢的高速铣削和传统的普通钢的铣削相比在切削机理、刀具选择以及切削参数选择都有很大的差异, 所以研究淬火钢的高速铣削很有必要。

## 1 高速铣削淬火钢的切削机理

### 1.1 高速铣削淬火钢的切屑形态

如图 1, 高速铣削淬火钢的切屑形态为锯齿状, 目前关于切屑形成的机理有两种看法 (a) 在切削刃口区, 切削层由于承受很高的压应力和高温作用会产生塑性变形, 而在距切削刃口一段距离的前刀面上某一位置, 当达到某一临界载荷时, 刀具与切削层金属之间就会处于非平衡状态, 从而产生突变性的局部剪切并进而发生锯齿状切屑。(b) 如果工件材料的应力和应变条件得到满足, 刀具与切削层金属之间的平衡状态就会由于自由表面上的压应力和热软化最小的某一位置萌

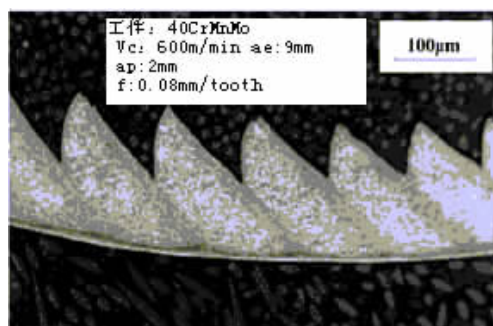


图 1 锯齿状切屑<sup>[3]</sup>

Fig.1 Sawtooth chip<sup>[3]</sup>

生裂纹而遭到破坏, 锯齿状切屑的形成是由于自由表面向切屑刃扩展的周期性整体断裂造成的<sup>[4]</sup>。

### 1.2 高速铣削淬火钢的切削力

高速铣削过程是一种断续切削过程, 切削力的主要来源除了切削层金属、切屑和工件表面层金属的弹性变形、塑性变形所产生的抗力, 以及刀具与切屑、工件表面间的摩擦阻力外, 还应该包括切削层金属自由表面裂纹萌生及扩展的抗力。如图 2 所示(工件为 40CrMnMo, 硬度为 HRC52; 刀具为超细晶粒硬质合金整体立铣刀, 刃数为 2, 直径为 10 mm,  $\beta$  为  $30^\circ$ ,  $\alpha_0$  为  $9^\circ$ ,  $\gamma_0$  为  $6^\circ$ ), 由于高速铣削的各个切削分力都呈高频率周期变化, 其中主切削力的振荡幅度最大, 切削合力呈上升趋势;

\* 收稿日期: 2004-06-28

作者简介: 查文炜(1974-), 男, 江苏建湖县人, 盐城工学院助教, 南京航空航天大学硕士研究生。

随着切削深度的增加,由于曲线切削层宽度增大将使得平均切削力增大;工件材料的硬度降低,平均切削力增大;采用负倒棱的刀具切削时,随着每齿进给量的增大,平均切削力呈下降趋势<sup>[5]</sup>。

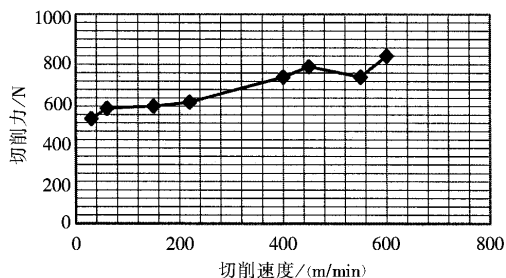


图2 切削速度对切削力的影响( $f_z = 0.05 \text{ mm}$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ )

Fig.2 Relation between cutting speed and cutting force( $f_z = 0.05 \text{ mm}$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ )

### 1.3 高速铣削淬火钢的切削温度

切削区的温度是由产生的热及其传出的热所决定的,影响切削温度的主要因素是工件材料的物理性能和切削用量,工件材料的强度、硬度越高,导热系数、比热容越小,切削温度越高。如图3(工件为40CrMnMo,硬度为HRC52;刀具为超细晶粒硬质合金整体立铣刀,刃数为2,直径为10 mm,  $\beta$  为  $30^\circ$ ,  $\alpha_0$  为  $9^\circ$ ,  $\gamma_0$  为  $6^\circ$ ) ,在高速铣削范围内,随着切削速度升高,切削的温度开始升高很快,但是到一定速度后,切削温度升高缓慢,过了一定的速度后又加快温度的升高。而每齿进给量和切削深度越大,切削温度越高,每齿进给量以及切削深度对切削温度的影响要比切削速度对切削温度的影响小<sup>[6]</sup>。

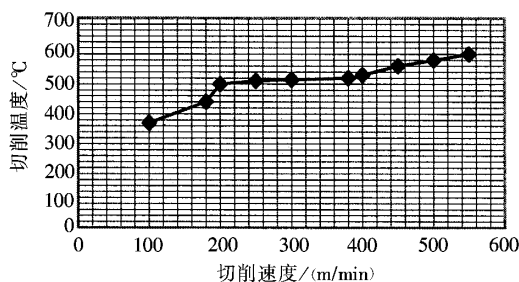


图3 切削速度对切削温度的影响( $f_z = 0.05 \text{ mm}$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ )

Fig.3 Relation between cutting speed and cutting temperature( $f_z = 0.05 \text{ mm}$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ )

### 1.4 高速铣削淬火钢的刀具磨损

高速铣削淬火钢时,刀具损坏形式主要是磨

损和破损。其损坏的原因随刀具材料和工件材料而不同,其损坏的主要原因是在切削力和切削热作用下的磨料磨损、粘结磨损、化学磨损(氧化、扩散和溶解等)、脆性破损和塑性变形等<sup>[7,8]</sup>。如图4,刀具的损坏主要是前刀面月牙洼磨损、后刀面磨损、边界磨损和微崩刃等磨损形态以及崩刃、剥落、碎断和塑性变形等破损形态<sup>[9,10]</sup>。对于涂层硬质合金铣削淬火钢时,刀具磨损的主要原因是:



图4 高速切削刀具主要磨损形态<sup>[8]</sup>

Fig.4 The main tool wear at high speed milling<sup>[8]</sup>

保护膜氧化过程和工件的氧化导致磨损加剧;工件的硬质氧化物导致磨损加剧;当保护膜剥落后,刀具的磨损随着切削力和切削温度的增加更加剧烈的磨损,甚至会导致崩刃。如图5(工件为40CrMnMo,硬度为HRC52;刀具为超细晶粒硬质合金整体立铣刀,刃数为2,直径为10 mm,  $\beta$  为  $30^\circ$ ,  $\alpha_0$  为  $9^\circ$ ,  $\gamma_0$  为  $6^\circ$ ) ,给出在高速铣削淬火钢时,刀具寿命和切削速度的关系,从图中可以看出在一定高速范围内,刀具寿命是随着切削速度的升高而增加的,并且有一个最佳切削速度范围。

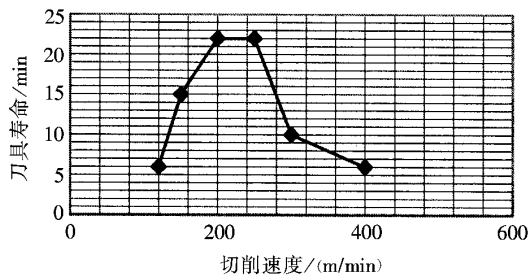


图5 切削速度对刀具寿命的影响( $f_z = 0.05 \text{ mm}$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ )

Fig.5 Relation between cutting speed and tool life( $f_z = 0.05 \text{ mm}$ ,  $a_p = 10 \text{ mm}$ ,  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ )

## 2 高速铣削淬火钢刀具的选择

## 2.1 刀具材料的选择

淬火钢的硬度一般在 HRC45 以上,加工时塑性变形差,切削阻力大,切削温度高。所以切削淬火钢的刀具材料应具备以下性能:导热系数高,耐磨损,热稳定性好,高硬度以及高的硬度与杨氏模量比。

### 2.1.1 硬质合金

硬质合金具有高的抗拉强度和断裂韧性,但是由于淬火钢的切削性能,只有采用涂层硬质合金或者超细晶粒硬质合金才能适合要求。

涂层刀具分为两大类:一类是“硬”涂层刀具,如 TiC、TiN 涂层刀具,主要优点是硬度高,可以达到 HRA90-94,接近陶瓷的水平,耐磨损性能和抗月牙洼磨损能力强,与工件的亲合力小,摩擦系数小,抗粘结能力强,有较高的耐热性能和抗氧化能力,化学稳定性好。因此,这类材料广泛用于高速铣削,速度可以比普通硬质合金高 50%。另一类是“软”涂层刀具,如  $\text{MoS}_2$ 、 $\text{WS}_2$  等,其表面摩擦系数低,可以减小摩擦,降低切削力和切削温度,适合加工淬火钢材料。

超细晶粒硬质合金强度和韧性高,而且抗热冲击性能好,适合于制造尺寸较小的整体复杂硬质合金刀具,可以大幅度提高切削速度。

### 2.1.2 陶瓷

陶瓷刀具具有很高的硬度、耐磨性能及良好的高温力学性能,与金属的亲合力小,不易与金属产生粘结,并且化学稳定性好。因此,陶瓷刀具适合于加工淬火钢材料。陶瓷刀具材料大多数为复合陶瓷,主要有氧化铝基陶瓷刀具材料和氧化硅基陶瓷刀具材料。

### 2.1.3 聚晶立方氮化硼

聚晶立方氮化硼具有很高的硬度和耐磨性、很高的热稳定性、优良的化学稳定性、良好的导热性能、较低的摩擦系数。适合于加工淬火钢(HRC45-65)工件材料。

## 2.2 刀具几何参数的选择

在刀具的选择中,刀具材料是最重要的因素,当刀具材料选定后,刀具几何参数对切削性能的影响也是十分重要的。切削过程中,切削力的大小,切削温度和刀具耐用度的高低,加工质量的好坏,无一不与刀具的几何参数有关。

### 2.2.1 前角的合理选择

前角是刀具上最重要的一个角度,它的大小直接影响着刀刃的锐利与牢固程度,影响着切割

作用与推挤作用的比例,决定刀具的切削性能。

淬火钢工件表层的硬度高脆性大,为了使工件材料增塑以便于切屑的形成,在切削刃附近必须对工件施加压应力,所以高速铣削淬火钢时一般采用负前角,同时利于增加切削刃口的局部强度<sup>[1]</sup>。前角的绝对值减小会导致单位切削面积上的主切削力降低<sup>[12]</sup>。

### 2.2.2 负倒棱的合理选择

负倒棱可以提高刀刃的强度和散热能力,从而避免刀刃发生不正常的损坏,延长刀具耐用度。采用负倒棱的刀具铣削工件时平均切削力要比采用有刃口钝圆的刀具铣削时切削力低,而且切削过程平稳<sup>[4]</sup>。所以,在高速铣削淬火钢时可以合理选择适当角度的负倒棱。

### 2.2.3 后角的合理选择

后角的作用主要是在切削过程中减小后刀面与工件表面之间的摩擦,并配合前角调整刀刃部分的锐利与牢固程度。高速铣削淬火钢的过程属于断续切削过程,为了保证刀刃部分有较高的强度,后角应适当小一些,通常取  $5^\circ \sim 20^\circ$ 。

### 2.2.4 主偏角的合理选择

主偏角的大小影响刀尖部分的强度与散热条件,影响铣削分力之间的比例,有时还决定工件表面的形状。减小主偏角,则刀尖的强度与散热条件都较好,同时由于切削厚度减小,切削宽度增大,故单位长度刀刃上的负荷也减小。在高速铣削淬火钢时通常选用较小的主偏角,一般在  $30^\circ \sim 75^\circ$ 。

### 2.2.5 副偏角的合理选择

副偏角的作用主要是减小副切削刃、副后刀面与工件已加工表面之间的摩擦。当副偏角减小时,刀尖部分强度提高,但是刀具与工件之间的摩擦以及径向切削力增加。在高速铣削淬火钢时,由于主要考虑刀刃的强度,所以副偏角一般取  $5^\circ \sim 15^\circ$ 。

### 2.2.6 螺旋角的合理选择

螺旋角的大小,影响刀刃的强度和切屑的流出方向和切削力的大小。螺旋角取得越小,切削力越大,而且切削路程越长,切削力增加越显著,另一方面当螺旋角取得小时,切削力的振幅增加,振动加速度增加,同时取小的螺旋角不利于切屑的流出,使得切削温度增加,所以在高速铣削淬火钢时应该适当的增加螺旋角。

### 3 结束语

高速铣削淬火钢时,切屑形态为锯齿状,切削力呈高频率周期变化,切削温度高,选择不同的刀具材料时刀具磨损的主要形态不一样,其磨损的机理也不一样。

选择刀具材料时主要考虑材料的硬度、强度、

耐磨损性能以及热稳定性等,同时每一品种的刀具材料对于铣削淬火钢时都有其最优的切削速度范围,要注意刀具材料和工件材料的性能匹配。

刀具的几何参数,如前角、后角、螺旋角等的合理选择对刀刃的锐利程度和强度以及切削力、切削温度和刀具的寿命都有影响。

### 参考文献:

- [1] Herbert Schulz. High - speed milling of dies and molds—cutting conditions and technology[J]. Annual of CIRP ,1995 44( 2 ) 637 - 644.
- [2] Dewes. The use of high machining for the manufacturing of hardened steel dies[J]. Transaction of NAMRI/SME ,1996 ,XXIV 21 - 26.
- [3] Poulachon G. Tool - wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tool[J]. Wear ,2001( 250 ) 576 - 586.
- [4] nshoff H K T. Cutting of hardened steel[J]. Annual of CIRP ,2000 49( 2 ) 547 - 565.
- [5] Elbestawi M A. High - speed milling of dies and molds in their hardened steel[J]. Annual of CIRP ,1997 46( 1 ) 57 - 62.
- [6] Dewes R C. Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel[J]. Journal of Materials Processing Technology ,1999 293 - 301.
- [7] 洛拉得泽. 切削刀具的强度和耐磨性[M]. 北京: 机械工业出版社,1988.
- [8] 刘战强. 高速切削刀具磨损寿命的研究[J]. 山东大学学报, 2001 35( 2 ) 3 - 7.
- [9] Dolin ek Slavko. Wear mechanisms of cutting tools in high - speed cutting processes[J]. Wear ,2001 ( 250 ) 349 - 356.
- [10] Liu Z Q. Wear patterns and mechanism of cutting tools in high - speed face milling[J]. Journal of Material Processing Technology , 2002 ( 193 ) 222 - 226.
- [11] Knig W. Turning versus grinding - A comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies[J]. Annual of CIRP ,1993 , 42( 1 ) 39 - 43.
- [12] Davies M A. On chip morphology ,tool wear and cutting mechanics in finish hard turning[J]. Annual of CIRP ,1996 45( 1 ) :77 - 82.

## The Mechanism Study of High Speed Milling of Hardened Steel

ZHA Wen - wei ,LIU Bi - rong

( Department of Mechanical Engineering of Yancheng Institute of Technology Jiangsu Yancheng 224003 ,China )

**Abstract** :High speed milling can remarkably improve the productivity and machining quality ,and replace grinding of hardened steel , which has a special cutting property affecting the chip formation , cutting force , cutting temperature and tool life. This paper analyzes the cutting mechanism and choice of tools in high speed milling , the result of which is applicable to actual cases.

**Keywords** :hardened steel ; high speed milling ; cutting mechanism ; choice of tools