

20Cr 钢的干切削性能研究

岳启斌,何辉波,李华英,张显银,李渊明,江雪

西南大学

摘要: 选用 TiN 涂层 YT15 刀具和与之几何参数相同的未涂层 YT15、YW2 硬质合金刀具,利用单因素控制变量法改变切削用量参数对 20Cr 钢进行干切削试验,得到了三种刀具的切削试验结果,并对切削温度、切削力与切削用量之间的规律进行分析。在 Deform-3D 软件中建立 20Cr 钢的材料模型,对其切削过程进行仿真试验,比较并分析仿真值与试验值。结果表明:影响切削力的最大因素是背吃刀量,其次是进给量和切削速度;而影响切削温度的最大因素是切削速度,其次是进给量和背吃刀量;TiN 涂层能够有效降低切削过程中产生的切削力和切削温度;切削力仿真结果与试验数据的误差在 2.1% - 11.8% 之间,验证了用有限元仿真软件对 20Cr 钢干切削切削力的预测是可行的。

关键词: 20Cr 钢;切削力;切削温度;切削用量

中图分类号: TG712;TH142.1

文献标志码: A

Study on Machinability of 20Cr Steel in Dry Turning

Yue Qibin, He Huibo, Li Huaying, Zhang Xianyin, Li Yuanming, Jiang Xue

Abstract: A study on the dry turning process of 20Cr steel on the CA6140A lathe is carried out by using TiN coating YT15 tool and with the same geometric parameters of uncoated YT15 and YW2 cemented carbide tool. The influences of the three cutting parameters on cutting force and cutting temperature are investigated and the cutting test results of the three different cutting tools are obtained. Then the three-dimensional finite element simulation software—Deform 3D is used to simulate the dry turning process of 20Cr steel. The simulation results of cutting force are compared with the previous dry turning test results. The analysis demonstrates that the greatest influence on the cutting force of 20Cr steel is cutting depth, followed by feeding rate and cutting speed. The greatest influence on the cutting temperature is cutting speed, followed by feeding rate and cutting depth. The TiN coating can effectively reduce the cutting force and cutting temperature. The error between the simulation results of the cutting force and the test results of dry turning is in 2.1% - 11.8%. It is proved that by using the finite element simulation software is feasible to predict the cutting force of the 20Cr steel.

Keywords: 20Cr steel; cutting force; cutting temperature; cutting parameter

1 引言

干切削加工是指在切削时不使用任何切削液的加工方法,具备绿色环保的特点^[1]。因没有使用切削液,大大减少了对环境的污染,同时不需要购买和处理切削液,进一步降低了生产成本,所以干切削加工正逐渐成为现代切削加工的主要方式之一^[2]。

切削力和切削温度是反映切削过程的重要因素,切削用量的选取对切削力和切削温度的结果有着十分重要的影响,并且最终将影响到工件的表面加工质量、刀具寿命、加工精度及机床动力消耗等,所以研究切削用量与切削力、切削温度的变化关系的规律,对于分析切削加工过程及保证加工质量等都具有十分重要的意义^[3]。

20Cr 钢是一种强度和韧性均良好的低淬透性渗碳钢,用于制造机床齿轮、凸轮、蜗杆等,汽车、柴油机的变速箱齿轮也常使用 20Cr 钢制造^[4]。现阶段对 20Cr 钢的研究大多侧重于其材料特性,切削性能方面的研究较少,所以有必要对 20Cr 钢的切削性能作进一步研究。

选用 TiN 涂层的 YT15 刀具和与之几何参数相同的未涂层 YT15、YW2 硬质合金刀具对 20Cr 钢进行干切削试验,得到切削 20Cr 钢的较优刀具及切削用量三要素对切削力和切削温度的影响程度。在 Deform-3D 中建立 20Cr 钢的材料模型,对其切削过程模拟仿真。通过比较分析仿真的切削力数值与试验值,判断利用有限元软件对切削 20Cr 钢过程中切削力预测的可行性。

2 试验设备与试验方法

工件:20Cr 钢,基本尺寸为 $\phi 54.5\text{mm} \times 400\text{mm}$,

采用调质热处理,20Cr 钢的化学成分见表 1,力学性能见表 2^[5];刀具:采用型号均是 T31605F 的 YW2 车刀和 TiN 涂层、未涂层的 YT15 车刀,具体几何参数见表 3;机床:采用 CA6140A 普通车床进行加工,其最大可加工工件尺寸为 $\phi 400\text{mm} \times 900\text{mm}$,主轴转速范围为 10 - 1400r/min;切削力和切削温度测量设备:采用由重庆迪佳科技有限公司生产的 DJ - CL - 1 型切削力测量系统和 DJ - CW - 1 型切削温度测量系统。

表 1 20Cr 钢的化学成分 (wt%)

化学元素	C	Si	Mn	Cr
含量	0.18 - 0.24	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	0.7 - 1.0

表 2 20Cr 钢力学性能

σ_b (MPa)	σ_s (MPa)	$\delta 5$ (%)	Ψ (%)	HBS100/3000
≥ 835	≥ 540	≥ 10	≥ 40	≤ 179

表 3 刀具几何参数 (°)

前角	后角	副后角	主偏角	副偏角	刃倾角
15	8	8	75	5	-4

在车床上对 20Cr 钢进行干切削试验,采用单因素控制变量法来改变切削参数(背吃刀量 a_p 、切削速度 v 、进给量 f),利用实验设备采集切削力和切削温度数值,对切削过程中的切削三向力(切向力、轴向力、径向力)及切削温度进行研究。

3 试验结果与分析

3.1 切削力分析

(1) 改变背吃刀量对切削力的影响

取 $f = 0.14\text{mm/r}$, $v = 85.61\text{m/min}$,而 a_p 选取不同的数值,切削力试验结果见图 1。

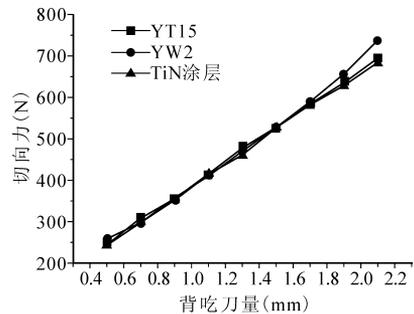
从图 1 的切削力变化曲线可以发现, a_p 变大时,切向力的变化最大,其增长幅度大于轴向力和径向力,表明背吃刀量的改变对切向力的影响高于轴向力和径向力。主切削力即切向力变化最明显,是因为当 v 、 f 不变而 a_p 增大时,切削层宽度、横截面积及切削变形系数均未改变^[6],切削力理论公式为

$$F_c = \tau_s a_p f (1.4\xi + C) \quad (1)$$

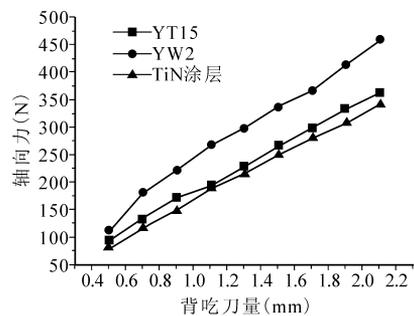
式中, F_c 为切向力; τ_s 为工件材料的剪切屈服强度; a_p 为背吃刀量; f 为进给量; ξ 为切削变形系数; C 为与前角有关的系数^[7]。

根据式(1)的切削力理论公式可知切向力也会同比增大。但当背吃刀量超过某一数值区间时,背吃刀量和切向力则会逐渐呈现非线性关系^[8]。背

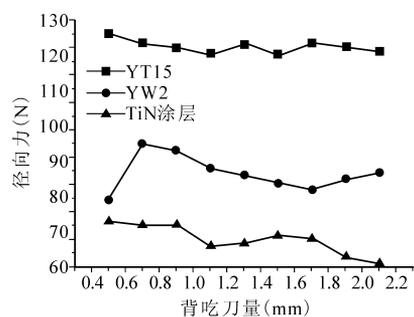
吃刀量 a_p 增大使轴向上的切削面积变大,轴向上的抗力也变大,因此使轴向力增大。而径向力随 a_p 的增大无明显变化,则证明了径向力对切削力合力的贡献较小^[9]。在加工过程中发现,工件的已加工表面随 a_p 的增大而变得粗糙,这是因为 a_p 变大时,切削力与工件的变形也增大,从而使机床产生振动,加工稳定性下降,最终导致表面质量下降。



(a) 切向力的变化



(b) 轴向力的变化



(c) 径向力的变化

图 1 背吃刀量对切削力的影响

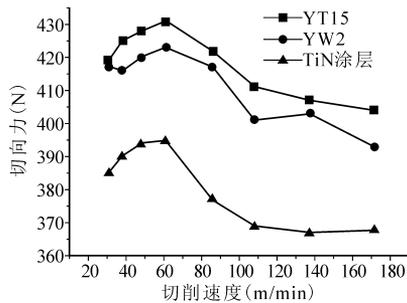
试验结果表明:增大背吃刀量 a_p 使切削力增大,且 a_p 较大时会使工件表面质量变差。但在实际加工中,增大背吃刀量可以增加每次走刀切削的金属量从而提高切削效率。所以结合本实验参数,在粗加工时,为了尽可能地提高切削效率应适量选择较大的背吃刀量,建议选择 1.4 - 1.8mm;半精加工时,可选择 0.7 - 0.9mm;而精加工时,为保证较高的表面质量建议选择背吃刀量在 0.5mm 以下。

对比三种刀具的切削结果发现,在 a_p 从 0.5mm 增大到 2.1mm 过程中, TiN 涂层刀具的主切削力小

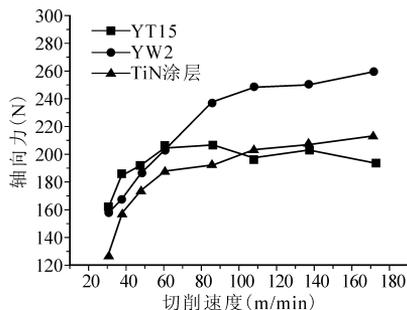
于 YT15 车刀和 YW2 车刀的主切削力。故试验选用涂层刀具切削 20Cr 钢更优。

(2) 改变切削速度对切削力的影响

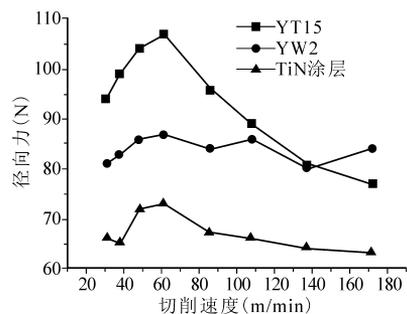
取 $a_p = 1.1\text{mm}$ 、 $f = 0.14\text{mm/r}$ ，而 v 选取不同的数值，切削力试验结果见图 2。



(a) 切向力的变化



(b) 轴向力的变化



(c) 径向力的变化

图2 切削速度对切削力的影响

如图 2a 和图 2c 所示，在切削 20Cr 钢的过程中，当切削速度 v 逐渐增大时，切向力和径向力呈现出相同的变化趋势：在 $v = 30 - 70\text{m/min}$ 时增大，当 $v > 70\text{m/min}$ 后开始减小。这是因为 20Cr 钢在中低速范围内切削时刀尖处产生了积屑瘤，初始阶段，积屑瘤的高度随 v 的提高而逐渐增大，使刀具实际前角增大，而切削变形减小，故切削力减小，随着 v 的继续增大，积屑瘤开始减小，刀具实际前角又变小，故切削力有一定幅度的上升^[10]。而 v 进一步增大后，切削会产生大量的热量使工件表面软化，减小了切削变形，使切削力又减小。

在切削过程中，TiN 涂层刀具的主切削力始终

小于 YT15 和 YW2 刀具，这说明 TiN 涂层使刀具与工件及切屑表面的摩擦系数变小，使切削力降低^[11]。另外还观察到，在 $v = 30 - 70\text{m/min}$ 切削时，工件表面出现大量振纹，比较粗糙，慢慢提高切削速度，振纹逐渐减少，当 v 达到 130m/min 后，工件表面几乎看不到振纹。

试验结果表明：高速切削可以使切削力降低，并能提高工件表面加工质量，但是过高的切削速度会产生大量的切削热使切削温度急剧上升，另外还会造成刀尖快速磨损。且 v 超过 130m/min 之后，主切削力变化趋势保持稳定。所以结合本文所选参数，建议在切削 20Cr 钢时，在粗、半精、精加工三种阶段分别采用 100m/min 、 150m/min 、 180m/min 的切削速度进行切削加工。

对比 3 种刀具，TiN 涂层刀具的主切削力明显小于 YW2 和 YT15 刀具，故选用涂层刀具更优。

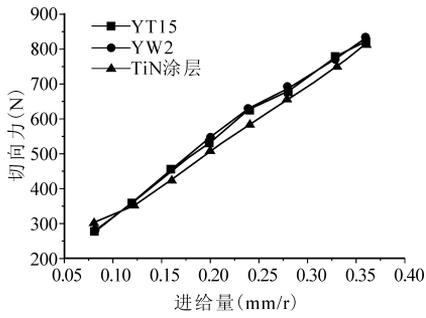
(3) 改变进给量对切削力的影响

取 $a_p = 1.1\text{mm}$ 、 $v = 85.61\text{m/min}$ ， f 选取不同的数值，切削力的试验结果见图 3。

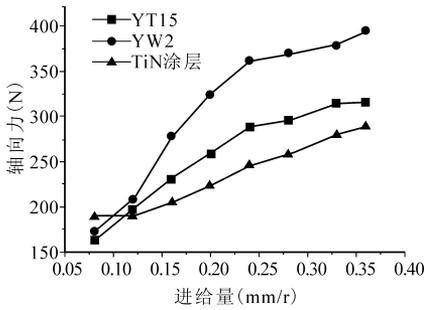
由图 3 可看出，当进给量变化时，三种力受到的影响不同。受影响程度最大的是切向力，其次是径向力，最小的是轴向力。进给量 f 变大时，切削的金属层也变大，使切削力变大。而轴向力随 f 的增大先逐渐增大后趋于平稳，原因是大进给量切削时工件表面会出现金属残留，并且会对刀具施加挤压力， f 继续增大时，金属残留增大使挤压力变大，导致轴向力的增大幅度变缓。在切削过程中，可以观察到当 $f = 0.08 - 0.16\text{mm/r}$ 时，工件表面切削质量较好；当 f 逐渐增大到 $0.16 - 0.36\text{mm/r}$ 时，工件表面出现少许螺纹状的残留物，表面质量逐渐变差；当 $f > 0.36\text{mm/r}$ 后，残留面积的高度显著增加，使工件表面变得十分粗糙。

试验结果表明：20Cr 钢在低进给量下切削可以获得较好的切削质量，而较大的进给量会使切削力变大且表面质量降低。在实际生产加工中，选用较大的进给量可以让每次加工切除的金属更多，从而提升加工效率。在粗加工阶段，在保证达到工件表面要求的情况下建议采用较大的进给量，可选择 $f = 0.36\text{mm/r}$ ；半精加工阶段，由于其表面质量要求较高，建议选择 $f = 0.24\text{mm/r}$ ；精加工阶段则选择 $f = 0.12\text{mm/r}$ 左右进行切削加工。

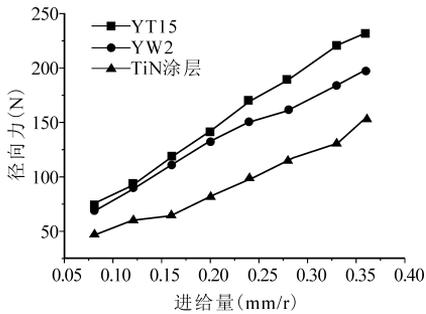
保持其他参数不变，只改变进给量时，三种刀具中涂层刀具的主切削力最小，所以试验选择 TiN 涂层刀具更优。



(a) 切向力的变化



(b) 轴向力的变化

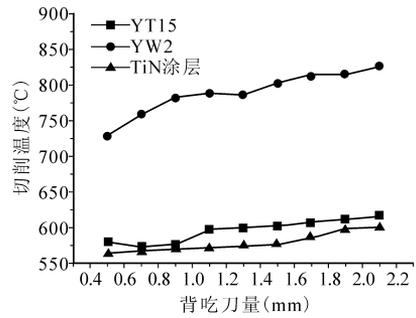


(c) 径向力的变化

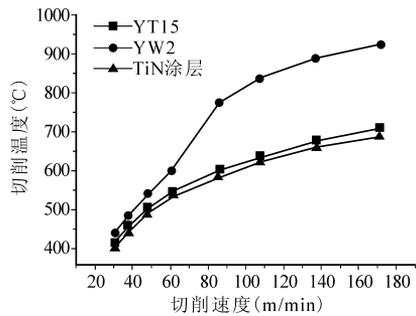
图3 进给量对切削力的影响

3.2 改变切削用量对切削温度的影响

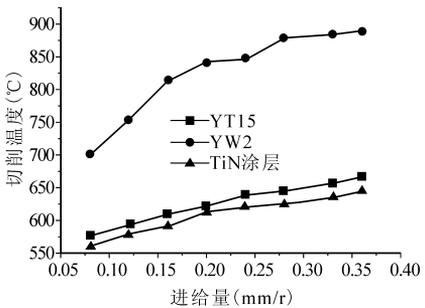
用三种刀具切削 20Cr 钢时切削用量对切削温度的影响情况如图 4 所示。由图可见,切削速度 v 变化时,切削温度增长幅度最大,而背吃刀量 a_p 变化时,切削温度增长最小。 a_p 增大时,三种刀具的切削温度呈小幅增长,这是因为增大 a_p 使切削热增多的同时也使切削刃的切削尺寸增加,散热更快,所以切削温度的增长幅度不大;而当切削速度 v 变大时,切削温度增长迅速,原因是 v 增大会提高金属切除率,整个系统做功增大,切削热增加,使切削温度变高^[9]。从图中可以发现,当 $v > 85\text{m}/\text{min}$ 后切削温度的增长幅度变缓,这是因为 v 继续增大时,主切削力开始降低,产生的热量随之减少,而且切屑排出更快,一部分热量随着切屑的掉落而散失,所以切削温度的增长幅度下降。进给量 f 变大使每次走刀切削的金属变多,从而提高了切削时的功耗,使热量增加,切削温度逐渐变大。



(a) 背吃刀量对切削温度的影响 ($f = 14\text{mm}/\text{r}, v = 85.61\text{m}/\text{min}$)



(b) 切削速度对切削温度的影响 ($f = 14\text{mm}/\text{r}, a_p = 1.1\text{mm}$)



(c) 进给量对切削温度的影响 ($v = 85.61\text{m}/\text{min}, a_p = 1.1\text{mm}$)

图4 切削用量对切削温度的影响

对比三种刀具, TiN 涂层刀具切削时产生的切削热低于 YT15 和 YW2 刀具产生的切削热,这是因为 TiN 涂层刀具的导热系数小于未涂层刀具,且涂层化学性能较稳定,与工件化学亲和力小,使得切削力减小,因此能有效降低第 II 变形区的切削热^[8]。

4 切削过程的有限元仿真

4.1 建立切削仿真模型

工件材料选用 Deform 材料库中的美国标准牌号 AISI- 5120, 对应国内的 20Cr 钢, 刀具选用 TNMA332, 模型直径为实际工件直径 54.5mm, 热交换系数设为 $50\text{N}/(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^\circ\text{C})$, 切屑与刀具之间的摩擦系数设为 0.4。工件采用绝对方式划分网格, 最小的单元格尺寸设置为进给量的 25%, 刀具采用相对划分方式, 网格数为 25000, 模型如图 5 所示。仿真步数设置 500 步且每隔 20 步储存一次, 工件弯曲

角度为 20° 。

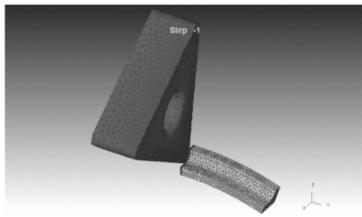


图5 切削仿真有限元模型

4.2 仿真结果及分析

采用单因素控制变量法,分别改变背吃刀量 a_p 、切削速度 v 、进给量 f 对 20Cr 钢切削过程进行模拟仿真,仿真结果分别见表 4、表 5 和表 6。

表4 改变背吃刀量仿真值 ($v=85.61\text{m/min}, f=0.14\text{mm/r}$)

背吃刀量(mm)	0.5	0.9	1.3	1.7	2.1
仿真平均值(N)	216	392	497	613	723

表5 改变切削速度仿真值 ($a_p=1.1\text{mm}, f=0.14\text{mm/r}$)

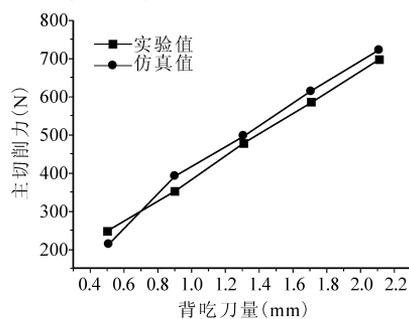
切削速度(m/min)	30.82	47.94	85.61	136.97	171.22
仿真平均值(N)	409	421	406	391	384

表6 改变进给量仿真值 ($v=85.61\text{m/min}, a_p=1.1\text{mm}$)

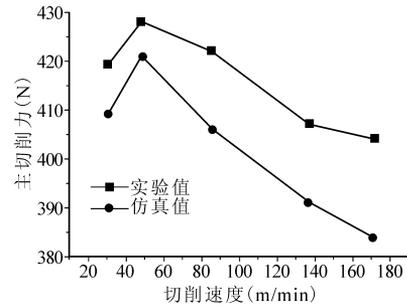
进给量(mm)	0.08	0.16	0.24	0.33	0.36
仿真平均值(N)	251	430	607	746	793

仿真数值和试验数值对比结果见图 6。可见,仿真结果与试验值略有不同,但二者随切削用量改变的变化趋势大致相同,当 a_p 和 f 变大时,切削力也增大,当 v 变大时,切削力的变化表现为先增大后减小。仿真值与试验值相比存在一定的误差,这是因为有限元软件中的刀具和工件模型都是简化生成,仿真过程中刀具与工件的接触状态为理想化状态,加工条件与实际相比更稳定,并且忽略了车床一刀具一工件的系统刚度等问题,另外刀具与工件模型的网格划分密集程度及网格数对仿真结果也有一定影响^[9]。

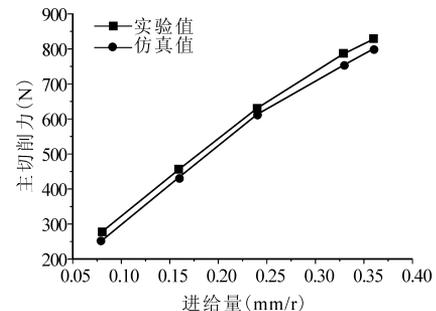
通过仿真值与试验值的比较,两者的误差在 2.1% - 11.8% 之间,在合理的误差范围之内,且变化趋势一致,故采用有限元软件对 20Cr 钢切削过程切削力的预测是可行的。



(a) 背吃刀量对主切削力的影响 ($v=85.61\text{m/min}, f=0.14\text{mm/r}$)



(b) 切削速度对主切削力的影响 ($a_p=1.1\text{mm}, f=0.14\text{mm/r}$)



(c) 进给量对主切削力的影响 ($v=85.61\text{m/min}, a_p=1.1\text{mm}$)

图6 仿真结果与试验结果对比

5 结语

(1) 同一种刀具切削 20Cr 钢时,切削用量三要素中影响切削力最大的因素是背吃刀量,其次是进给量、切削速度;而对切削温度影响最大的因素是切削速度,其次是进给量、背吃刀量。

(2) 切削 20Cr 钢时,为获得较高的加工质量及较小的切削力、切削温度,应尽量选择较小的背吃刀量、进给量及较高水平的切削速度。

(3) TiN 涂层可以减小刀具在切削过程中的切削力进而降低切削温度,故试验选用的三种刀具中, TiN 涂层刀具切削 20Cr 钢最好, YTi15 刀具和 YW2 刀具次之。

(4) 在 DEFORM-3D 中对 20Cr 钢切削过程进行模拟仿真试验,主切削力仿真值较试验值的误差为 2.1% - 11.8%,在合理误差范围内,验证了用有限元仿真软件对 20Cr 钢切削过程中的切削力预测是可行的。

参考文献

- [1] 秦录芳,孙涛. 干切削技术的研究和应用进展[J]. 组合机床和自动化加工技术, 2013(4): 9 - 12.
- [2] 吴克忠,陈永洁,朱丹丹. 干式切削及其刀具技术[J]. 硬质合金, 2005, 22(1): 47 - 50.
- [3] 刘鹏,徐九华,冯素玲,等. PCD 刀具高速铣削 TA15 钛合金切削力的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 224 - 229.

金刚石涂层刀具微细铣削硬质合金的试验研究

吴贤,李亮,何宁,赵国龙

南京航空航天大学

摘要: 硬质合金由于其优良性能被应用于精密模具和耐磨、耐腐蚀零件,是典型的难加工材料。CBN、金刚石等超硬刀具的出现,使得直接切削加工硬质合金成为可能。本文采用金刚石涂层刀具进行微细铣削硬质合金的试验研究,分析了加工过程中的切削力、表面质量以及刀具磨损。

关键词: 金刚石涂层刀具;硬质合金;微细铣削;铣削力;刀具磨损

中图分类号: TG54;TH161

文献标志码: A

Experimental Research on Micro Milling of Cemented Carbide Diamond Coated Tool

Wu Xian, Li Liang, He Ning, Zhao Guolong

Abstract: Because of its excellent performance, cemented carbide is used to manufacture precision mould, wear-corrosion resistance parts. Cemented carbide is also a kind of typical difficult-to-machine material. The appearance of ultra-hard tool, such as CBN and diamond, makes it possible to cut cemented carbide directly. According to an experimental research on micro milling of cemented carbide with diamond coated tool. The cutting force, surface quality and tool wear during micro milling are analyzed.

Keywords: diamond coated tool; cemented carbide; micro milling; milling force; tool wear

1 引言

硬质合金具有硬度高、耐磨性好、耐腐蚀、热膨胀系数小等优点,广泛应用于制造光学玻璃成型、金属拉伸等精密模具和耐磨、耐腐蚀零件。硬质合金模具不仅寿命长,是钢质模具的十几倍甚至上百倍;而且制品表面质量非常高,注塑成型的玻璃透镜等

零件可以达到光学表面质量要求^[1-3]。

硬质合金加工性能较差,是典型的难加工材料。磨削与电火花加工是两种最常用的硬质合金模具加工手段^[4,5]。随着CBN、金刚石等超硬刀具的出现,使得直接切削加工硬质合金成为可能,受到越来越多的关注,国外学者已开展了较多研究。B. Bulla等^[6]分析了金刚石车削中加工参数对硬质合金加工表面轮廓的影响,获得最优加工参数后,进一步研究了刀具几何形状对表面粗糙度和刀具磨损的影响。N. Suzuki等^[7]进行了金刚石超声椭圆振动车

基金项目: 国家自然科学基金(51575268);南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ15-05)
收稿日期: 2017年8月

- [4] 贾进,杨尚磊,倪维源,等. 亚温淬火对20Cr钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺,2014,43(2):165-168.
- [5] 王运炎,朱莉. 机械工程材料[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [6] 韩文强,何辉波,李华英,等. 影响40Cr钢切削力的主要因素研究[J]. 西南大学学报,2013,35(6):109-116.
- [7] 熊良山,严晓光,张福润. 机械制造技术基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2007.
- [8] 龙震海,王西彬,王好臣. 难加工材料高速切削过程中切削力的非线性特征规律析因研究[J]. 机械工程学报,2006,42(1):30-33.
- [9] 杨俊. 304,20Cr钢的摩擦特性及涂层刀具干切削性能研究[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [10] 冉学农. 改进型高镍铬轧辊的切削性能分析[J]. 制造业自动化,2012,34(6):60-62.

- [11] 韩文强,何辉波,李华英,等. TiN涂层对20CrMo钢的干切削性能的影响及磨损机理[J]. 中南大学学报,2014,45(1):64-70.

第一作者:岳启斌,硕士研究生,西南大学工程技术学院,400715重庆市

First Author: Yue Qibin, Postgraduate, College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

通信作者:何辉波,工学博士,副教授,西南大学工程技术学院,400715重庆市

Corresponding Author: He Huibo, Ph. D, Associate Professor, College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China