

整体硬质合金螺旋立铣刀磨槽工艺优化

黎文娟,倪高明,王强,蒋双双,刘鹏程

株洲钻石切削刀具股份有限公司

摘要: 分析立铣刀生产各工序所用工时发现磨槽工序是生产瓶颈,而影响磨槽生产效率和产品质量的主要因素为砂轮粒度、进给量 f 和砂轮线速度 v 。以槽表面粗糙度和加工效率为优化目标,进行三因素三水平正交试验,优选出最佳参数,而后对优选参数进行磨槽质量稳定性测试。结果表明,砂轮粒度对槽表面粗糙度影响最大,最优参数为砂轮粒度 D46, $f=100\text{mm}/\text{min}$ 、 $v=25\text{m}/\text{min}$ 。采用该参数进行批量生产,磨槽质量稳定。从批量生产的立铣刀中随机抽样进行切削试验,从被加工表面纹路、表面粗糙度以及刀具寿命三方面与优化前生产的立铣刀进行对比,结果表明两者无明显差别。采用优选的切削参数,在保证性能稳定的前提下,可使磨槽效率提升 10%,经济效益明显。

关键词: 硬质合金立铣刀;磨削工艺;磨槽;优化

中图分类号: TG706;TH162

文献标志码: A

Optimization of Solid Carbide End Mill in Flute Grinding Process

Li Wenjuan, Ni Gaoming, Wang Qiang, Jiang Shuangshuang, Liu Pengcheng

Abstract: The working hours of each procedure used in the production of the solid carbide end mill are analyzed and found that the grinding groove procedure is the bottle neck. The main affective factors of less efficiency and quality are the grain size, the feed rate f and the circular linear speed v of the grinding wheel. Taking the surface roughness and machining efficiency as the optimization objective, the optimized parameters are selected with the orthogonal experiments of three factors and three levels. The stability of flute grinding is tested with the optimized parameters. The results show that the grain size of the grinding wheel has the greatest influence on the surface roughness of the groove. The optimum parameters of the grinding wheel are grain size D46, feed rate $f=100\text{mm}/\text{min}$ and the circular linear speed $v=25\text{m}/\text{min}$. The optimized parameters are used in mass production and the quality of grinding groove is steady. The cutting experiments are carried out by random sampling from batch end mill. The results have no obvious difference from the machined one before optimization in surface lines, surface roughness and tool life of the end mill. With the optimized parameters, the efficiency of the grinding groove can be raised by 10%, and the economic benefit is obvious with a stable quality.

Keywords: solid carbide end mill; grinding process; flute grinding; optimization

1 引言

硬质合金具有硬度高、耐磨损、耐高温、线膨胀系数小等一系列优点,被广泛用作刀具材料。其中,整体硬质合金立铣刀具有良好的切削加工性能和加工表面质量,在复杂曲面的高速加工中得到广泛应用。整体硬质合金立铣刀结构复杂、基体材料硬度高、刃磨精度要求高,通常采用五轴联动数控工具磨床进行磨制。刃磨工艺包括容屑槽刃磨、周刃刃磨、底刃前刀面刃磨、底刃后刀面刃磨等。对整体硬质合金刀具而言,设计并制作出良好的螺旋槽可以显著提高刀具的切削性能和使用寿命。

周小灵^[1]对 YG8 硬质合金进行了磨削试验研究,建立了磨削用量(砂轮线速度、工作台速度和磨

削深度)与表面粗糙度之间的关系,指出磨削深度是影响硬质合金高速磨削时表面粗糙度的最主要因素,工件表面粗糙度随进给速度、磨削深度的增加而提高,随线速度的增加而略有下降;原一高等^[2]研究了磨削参数对超细硬质合金表面粗糙度的影响,结果显示,在同一切深下,表面粗糙度随砂轮粒度增大而增大,同一砂轮粒度下,表面粗糙度随切深的增加而增大,当切深达到一定值后,表面粗糙度逐渐降低;随卡卡^[3]则指出,随着工作台速度的提高,工件表面粗糙度在一定的范围内波动,提高砂轮线速度,表面粗糙度呈现不规则变化,表面面貌基本不变;文献[4]研究了砂轮粒度和切削深度对超细硬质合金表面残余应力的影响,结果表明,表面应力主要是磨削残余应力,在试验条件下为压应力,其数值随砂轮粒度的减小而降低,切削深度对残余应力影响较小;刘玉帮^[5]在研究硬质合金开槽砂轮修整工艺时指

出,开槽磨削时砂轮线速度不宜经常变动,而应固定一个值使砂轮表面稳定。

学者们在理论方面对硬质合金磨削做了一定的研究和分析,但对实践指导意义有限。因此,如何在保证铣刀性能稳定的前提下进一步提升生产效率,是现实生产中亟待解决的问题。

2 确定优化方案

图1为某型号D6标准铣刀各工序的所耗工时,从图中可知,磨槽工序是制约其进一步提升生产效率的瓶颈。因此,本文将磨槽工序作为优化工序,以标准铣刀中最常使用的6mm铣刀为例,进行相关测试。

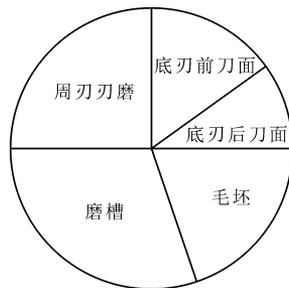


图1 工时组成

由文献[6]可知,螺旋槽由砂轮和工件的组合运动产生,砂轮线速度、磨削深度和进给速度与磨槽表面粗糙度息息相关。由于调整磨削参数十分方便,因此把磨削参数作为本轮优化工作的重点。针对优化产品某型号D6铣刀,采用一次磨槽工艺,磨削深度即为刃径与铣刀芯厚差值的一半。如调整磨削深度,分两次甚至三次磨削,磨槽时间几乎会成倍延长,不具有可操作性,因此,本轮优化暂不考虑磨削深度。耿芬然^[7]指出,不同供应商、结合剂、硬度和粒度的砂轮均会对磨槽表面质量产生影响。从生产实际出发,短时间内较易优化的是粒度因素。因此,选取待优化三因素为砂轮粒度、进给量 f 和砂轮线速度 v 。

3 磨削试验条件

标准铣刀某型号D6毛坯,材质为超细WC-Co合金。试验机床为大连科德KTOOLG3515五轴数控磨削中心,使用ACCRETECH粗糙度测量仪对磨槽表面进行粗糙度测量,试验砂轮为某品牌树脂结合剂金刚石砂轮,外径150mm,宽度3mm,金刚石厚度6mm(见图2)。

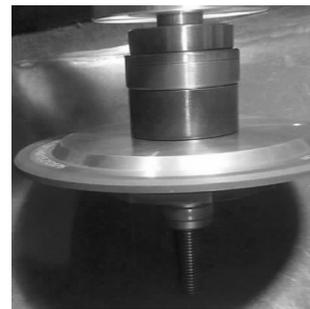


图2 试验用砂轮

采用正交试验方案,以砂轮粒度、进给量和砂轮线速度作为正交表的3个因素,每个因素取3个水平,选用 $L_9(3^3)$ 正交表,进行9组正交试验,参数选择见表1。

表1 因素水平表

水平	砂轮粒度	进给量 f (mm/min)	砂轮线速度 v (m/min)
1	D35	70	20
2	D46	100	25
3	D54	130	30

为了衡量磨削质量,需要选取相应指标。文献[8]认为可以用表面完整性衡量,具体包括表面粗糙度、波纹度、纹理方向、塑性变形、显微硬度变化、微观裂纹、残余应力、晶粒变化等指标。结合现有条件,选取表面粗糙度为衡量磨槽质量的指标。

4 磨削试验结果与分析

4.1 表面粗糙度测量结果及分析

试验产品见图3。为全面衡量表面粗糙度,取四条槽粗糙度的平均值,分别从槽的轴向和径向对产品粗糙度进行测量,最终测量数据见表2和表3。



图3 试验产品

表2 轴向粗糙度正交试验结果

试验序号	砂轮粒度	进给量 f (mm/min)	砂轮线速度 v (m/min)	轴向粗糙度 R_a (μm)
1	D35	70	20	0.188
2	D35	100	25	0.164
3	D35	130	30	0.222
4	D46	70	25	0.155
5	D46	100	30	0.124
6	D46	130	20	0.145
7	D54	70	30	0.174
8	D54	100	20	0.168
9	D54	130	25	0.175

表3 径向粗糙度正交试验结果

试验序号	砂轮粒度	进给量 f (mm/min)	砂轮线速度 v (m/min)	径向粗糙度 R_a (μm)
1	D35	70	20	0.298
2	D35	100	25	0.263
3	D35	130	30	0.273
4	D46	70	25	0.268
5	D46	100	30	0.224
6	D46	130	20	0.214
7	D54	70	30	0.242
8	D54	100	20	0.287
9	D54	130	25	0.271

对测量数据进行极差分析,结果见表4和表5。

表4 轴向粗糙度极差分析

因素	砂轮粒度	进给量 f	砂轮线速度 v
K1	0.191	0.172	0.167
K2	0.141	0.152	0.165
K3	0.172	0.181	0.173
极差值	0.05	0.029	0.009

表5 径向粗糙度极差分析

因素	砂轮粒度	进给量 f	砂轮线速度 v
K1	0.278	0.269	0.266
K2	0.235	0.258	0.267
K3	0.267	0.252	0.246
极差值	0.042	0.017	0.021

从表4和表5可以看出,砂轮粒度对磨槽的轴向粗糙度影响最大,其次为进给量 f ,砂轮线速度 v 几乎无影响;对磨槽的径向粗糙度影响最大的因素为砂轮粒度,其次为进给量 f 和砂轮线速度 v 。

综合来看,砂轮粒度对磨槽表面质量影响最大,优选粒度参数 D46;进给量 f 对磨槽表面质量有一定影响,优选进给量 $f = 100\text{mm}/\text{min}$;砂轮线速度 v 对磨槽表面质量影响不大,为保证一定的工艺过程能力(CPK)和磨削效率,优选砂轮线速度 $v = 25\text{m}/\text{min}$ 。

4.2 批量稳定性测试

为保证优化参数能顺利应用于实际生产,需对优选参数进行质量稳定性测试。连续磨削 500 支产品后,测量磨槽的表面粗糙度结果见图4。

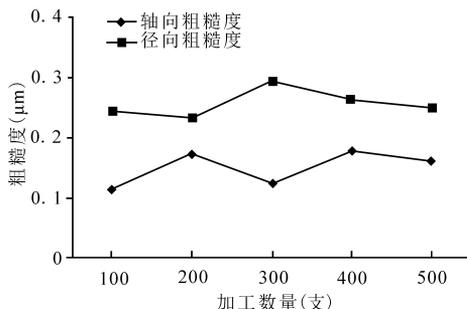


图4 表面粗糙度变化曲线

为了测试优化参数后的砂轮稳定性,对砂轮的磨损量做了跟踪分析,具体方案为连续磨削 500 支产品后,测量砂轮外径的磨损量,结果见图5。

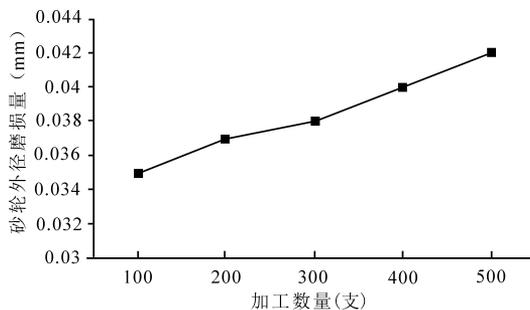


图5 砂轮外径减小量随加工支数的变化

4.3 磨削试验分析及总结

由表2和表3的正交试验结果可知,影响磨槽表面粗糙度的主要因素为砂轮粒度。随着砂轮粒度的增加,单位面积内参与磨削的金刚石颗粒增加,磨削纹路变得更细腻,从而降低了表面粗糙度。

根据批量稳定性的测试结果可得,无论轴向还是径向槽的表面粗糙度并不随加工数量的增加而增加,而是在一定区间内波动,这是砂轮异于常规金属加工刀具(铣刀、钻头、车刀等)的明显特征——自锐性。即磨粒磨钝后,磨削力随之增大,致使磨粒破碎或脱落,重新露出锋利的刃口。因此,随着加工支数的增加,砂轮会因磨粒不断脱落而导致外径不断减小,且磨损量与加工时间呈正比。在保证立铣刀磨削成本降低、性能稳定的前提下,最终优选参数为砂轮粒度 D46,进给量 $100\text{mm}/\text{min}$,磨削线速度 $25\text{m}/\text{min}$ 。采用该参数后,与现行磨槽工艺相比,效率提升 10%。

5 切削性能验证

为验证优化后的产品性能是否发生变化,从 500 支批量测试产品中随机抽取数支,与优化前的产品进行切削试验验证。从零件表面微观形貌、表面粗糙度 R_a 值、立铣刀后刀面磨损值三个方面进行对比。

5.1 表面粗糙度试验

试验机床为 MIKRON HSM800 五轴加工中心,试验刀具为某型号 D6(优化前)和某型号 D6-A(优化后),被加工材料 NAK80(28-32HRC),切削参数 $v_c = 120\text{m}/\text{min}$, $f_z = 0.05\text{mm}/\text{z}$, $a_p = 6\text{mm}$, $a_e = 0.5\text{mm}$,风冷。

为排除刀具磨损的影响,使用新刀测试。待切削稳定后,对零件表面粗糙度进行检测,零件表面纹

理及测试结果见图6。

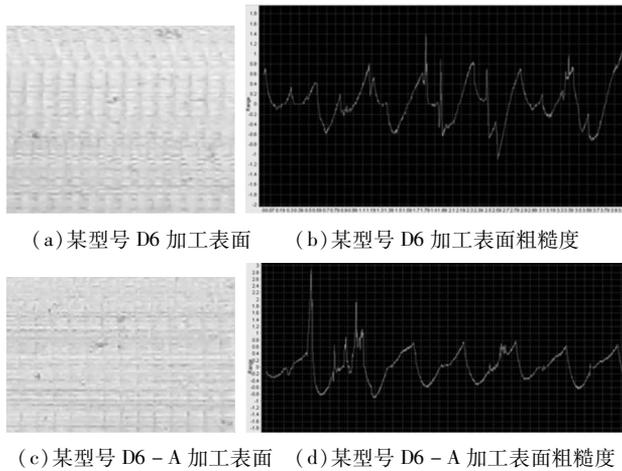


图6 零件表面形貌及表面粗糙度对比

优化参数前后产品的表面形貌无明显区别;优化后的 R_a 数值稍差,但仍在可接受范围。

5.2 加工寿命试验

更换测试刀具后,进行耐磨性试验,分别为低速侧铣试验和高速侧铣试验,试验机床、工件材料和冷却条件与表面粗糙度试验相同,具体切削参数见表6。每隔60min停机测量后刀面磨损值,试验结果见图7和图8。从测试结果看,两者的切削性能无明显差异。

表6 切削参数

	切削速度 v_c (mm/min)	每齿进给量 f_z (mm/z)	切削深度 a_p (mm)	切削宽度 a_e (mm)
低速侧铣	150	0.05	6	0.3
高速侧铣	350	0.05	6	0.3

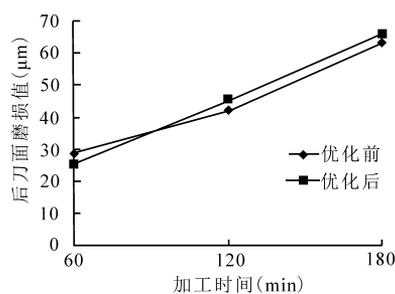


图7 低速侧铣试验磨损曲线

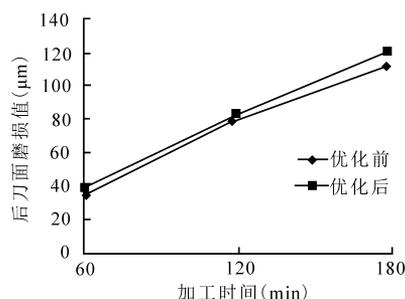


图8 高速侧铣试验磨损曲线

6 结语

通过磨槽正交试验、立铣刀批量稳定性测试以及铣刀切削性能验证,可得出如下结论:

(1)在保证立铣刀磨削成本降低、性能稳定的前提下,优化参数为砂轮粒度 D46、进给量 100mm/min、磨削线速度 25m/min。采用该参数后,磨槽效率可提升 10%。影响磨槽表面粗糙度的主要因素为砂轮粒度,其次为进给量 f ,砂轮线速度 v 几乎无影响。

(2)与常规金属切削工具不同,砂轮具有自锐性,磨槽粗糙度并不随加工数量增加而增大。

(3)采用优化参数加工后的铣刀,从被加工零件表面形貌、表面粗糙度和刀具自身后刀面磨损值看,与优化前无明显差别,不会造成质量波动,优化后参数可以应用于实际生产。

参考文献

- [1]周小灵. YG8 硬质合金高速磨削工艺实验及优化研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [2]原一高,张肖肖,丁健俊,等. 磨削参数对超细硬质合金磨削表面粗糙度的影响[J]. 工具技术,2012,46(5):41-44.
- [3]随卡卡. 整体硬质合金刀具关键工步磨削工艺实验研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [4]原一高,畅晓振,施耀祖,等. 超细硬质合金磨削表面残余应力的实验研究[J]. 机械科学与技术,2011,30(7):1217-1220.
- [5]刘玉帮. 硬质合金刀具开槽砂轮修整工艺及磨削性能的研究[D].泉州:华侨大学,2016.
- [6]宋铁军,周志雄,李伟,等. 硬质合金立铣刀螺旋槽磨削表面粗糙度模型研究[J]. 机械工程学报,2017,53(17):185-192.
- [7]耿芬然. 高速整体硬质合金立铣刀设计及工艺研究[D].天津:河北工业大学,2008.
- [8]任莹晖. 纳米结构硬质合金磨削理论和工艺实验研究[D].长沙:湖南大学,2009.

第一作者:黎文娟,工程师,株洲钻石切削刀具股份有限公司,412007 湖南省株洲市

First Author: Li Wenjuan, Engineer, Zhuzhou Cemented Carbide Cutting Tools Co., Ltd, Zhuzhou, Hunan 412007, China