

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.007

淬硬 H13 钢在高速铣削时的刀具 磨损性能实验研究

秦佳宇, 徐新成, 刘 鹏, 张亚龙, 沈守国

(上海工程技术大学 工程实训中心, 上海 201620)

摘 要:针对淬硬 H13 热作模具钢在高速切削时的刀具耐磨性问题, 选用了陶瓷铣刀和带涂层的 3 种硬质合金钢铣刀对其进行高速铣削实验。首先, 分析了在相同切削参数条件下不同刀具后刀面磨损量 V_B 的变化情况; 其次, 分析了失效刀具的磨损机理; 最后, 探讨了刀具磨损量对零件加工表面粗糙度的影响。研究表明: AlTiN 涂层立铣刀刀具的耐磨性能最佳; 刀具的磨损机理主要为磨粒磨损和粘结磨损, 刀具的崩刃是硬质合金刀具的主要失效形式; TiAlN 涂层立铣刀对工件的表面形成的粗糙度变化趋势较为平稳, 工件表面质量较好。

关 键 词: 高速铣削; H13 钢; 刀具磨损; 粗糙度

中图分类号: TG506.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2019)03-0035-06

Experimental Study on Wear Performance of Cutting Tools in High Speed Milling of Hardened H13 Tool Steel

QIN Jiayu, XU Xincheng, LIU Peng, ZHANG Yalong, SHEN Shouguo

(Engineering Practice and Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To investigate the wear resistance of hardened H13 hot work tool steel in high-speed cutting, ceramic milling cutter and three kinds of coated carbide tools were used for high-speed milling experiments. Firstly, the change of different tool flank wear V_B was analyzed under the same cutting parameters. Secondly, the wear mechanism of the failed tool was analyzed. Finally, the influence of tool wear on the surface roughness of the workpiece was discussed. The results showed that the wear resistance of AlTiN coated carbide tool is the best; the wear mechanism of the tool is mainly abrasive and adhesive wear, the chipping of the tool is the main failure mode of the carbide tool; the TiAlN coated carbide tool has a stable trend in the roughness of the workpiece surface and a better surface quality.

Keywords: high speed milling; H13 steel; tool wear; workpiece surface roughness

近年来, 高速切削作为一种新兴的加工技术已在模具制造、航空航天等领域得到了广泛的使用^[1]。单位时间内材料的去除率较高、切削力随着切削速度的提高而降低、零件表面的热变形减少是高速加工的主要优势。淬硬 H13 (4Cr5MoSiV1) 钢由于其优良的力学性能而被广泛用于模具制造行业。磨削作为淬硬 H13 钢的传统精加工方式, 往往由于磨削温度较高、法向磨削力较大, 容易导致工件表面产生烧伤、摩擦和变形严重等现象。因此, 在磨削加工过程中, 通常选用小的磨削用量来获得较好的工件表面质量, 但同时也降

低了加工效率^[2]。而采用高速切削技术可以直接对淬火状态下的模具钢进行精加工, 不仅可以提高工件的表面质量, 而且还缩短了模具钢的加工周期, 提高了加工效率^[3-4]。

刀具寿命是高速切削加工的突出问题, 在模具型腔小结构特征加工时, 需要使用小直径立铣刀 ($d \leq 5$ mm), 刀具的磨损和破损也更为明显^[5-6]。在高速加工过程中, 刀具的耐磨性能直接影响到工件的表面质量和加工精度, 因此, 展开对小直径刀具在高速切削淬硬 H13 钢时的磨损性能的研究十分有意义。

收稿日期: 2018-11-24; 修回日期: 2019-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51501109); 上海市科委地方院校能力建设项目 (17030501400)。

第一作者简介: 秦佳宇 (1994), 男, 上海人, 硕士研究生, 主要研究方向为塑性成形、切削技术等。通信作者: 徐新成 (1959), 男, 上海人, 教授, 主要从事冷、温精密塑性成形方面研究。E-mail: xincheng@sues.edu.cn

1 实验材料及设备

1.1 实验材料

1) 工件材料:经过 1 000 ℃ 淬火和 225 ℃ 低温回火的 H13 钢,尺寸为 80 mm × 60 mm × 20 mm,洛氏硬度为 50 ± 1。经测试材料的合金元素成分如表 1 所示。

表 1 H13 钢中合金元素的质量分数

Table 1 Mass fraction of alloying elements in H13 steel

Si/%	Mn/%	Cr/%	Mo/%	V/%
1.10	0.45	4.96	1.32	0.98

2) 实验刀具

本实验选用的是不同种类、相同几何参数的刀具,具体的参数如表 2 所示。

表 2 刀具的几何参数

Table 2 Geometric parameters of tools

立铣刀类型	齿数	直径 d/mm	前角 $\gamma/(\text{°})$	螺旋角 $\omega/(\text{°})$	刀刃钝圆 半径 r_0/mm
陶瓷	4	4	2	30	0.01
TiN 涂层	4	4	2	30	0.01
AlTiN 涂层	4	4	2	30	0.01
TiAlN 涂层	4	4	2	30	0.01

1.2 实验设备

北京精雕 JDCT600E 五轴加工中心;HIROX KH-7700 光学显微镜,TESCAN VEGA3 扫描电镜和 NPFLEX 白光干涉仪。

2 实验设计方案

采用单因素实验设计,即固定切削参数如表 3 所示。湿切并经一定的去除量后,观察刀具的磨损形态,测量刀具后刀面磨损宽度 V_B 以及工件表面粗糙度。当后刀面的磨损 V_B 达到 0.1 mm 时,或者出现如崩刃、积屑瘤过大的现象时则判定为失效^[7]。

表 3 切削的参数

Table 3 Setting of cutting parameters

主轴转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	切削速度 $v/$ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	每齿进给量 $f_z/(\text{mm} \cdot \text{z}^{-1})$	轴向切深 a_p/mm	径向切宽 a_e/mm
11 936	150	0.12	0.02	4.00

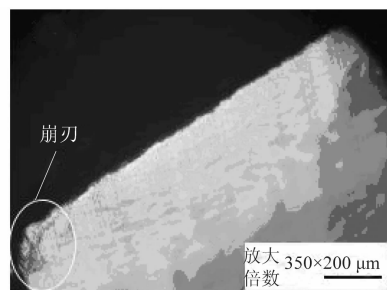
3 实验结果与分析

3.1 刀具磨损形貌

3.1.1 金属去除量 Q 为 320 mm³ 时立铣刀的磨损

图 1 为不同铣刀在金属去除量 $Q = 320 \text{ mm}^3$ 时的刀具磨损情况。从图 1(a)中可以看到,陶瓷铣刀的切削刃出现了崩刃破损现象。虽然陶瓷铣刀具有高耐磨性、高化学稳定性和红硬性,但脆性较大^[8],在高速铣削过程中受振动、冲击及交变应力等交互作用,刀具起初容易产生微裂纹并逐渐扩展,最后发生崩刃。该现

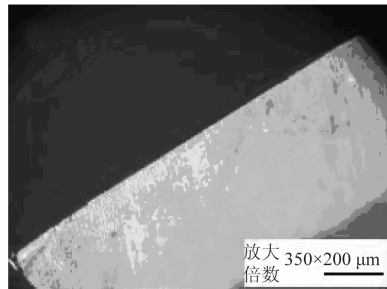
象表明,使用金属陶瓷刀切削淬硬 H13 钢至一定限度后会突然发生脆性破损。图 1(b)、1(c)和 1(d)分别是 TiN($V_B = 54.308 \text{ } \mu\text{m}$)、AlTiN($V_B = 40.206 \text{ } \mu\text{m}$)和 TiAlN($V_B = 46.936 \text{ } \mu\text{m}$)涂层刀具的磨损情况。从图中可以看到 3 种涂层都发生剥落,TiN 涂层剥落更明显,但都未发生崩刃现象。这是由于通过化学气相沉积(chemical vapour deposition,CVD)与物理气相沉积(physical vapour deposition,PVD)技术在刀具基体上涂覆上涂层后,通常会降低切削刀具与切屑之间的摩擦因数,一定程度上提高了刀具抗磨损性能^[9]。



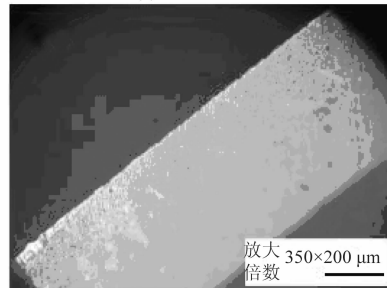
(a) 陶瓷刀



(b) TiN



(c) AlTiN



(d) TiAlN

图 1 刀具在金属去除量为 320 mm³ 下的磨损情况

Figure 1 Wear of tool under metal removal of 320 mm³

3.1.2 金属去除量 Q 为 640 mm^3 时立铣刀的磨损

图 2 为不同涂层的立铣刀在金属去除量 $Q = 640 \text{ mm}^3$ 时的刀具磨损情况。从图 2(a) 可以看到 TiN 涂层刀具的刀刃部分出现微崩刃现象,而图 2(b) AlTiN ($V_B = 53.403 \text{ }\mu\text{m}$) 和图 2(c) TiAlN ($V_B = 57.043 \text{ }\mu\text{m}$) 涂层刀具并未出现微崩刃现象。这是由于 TiN 是单涂层,而 AlTiN 和 TiAlN 是多元涂层。文献[10]中提到,单涂层和多元涂层的刀具基体与涂层之间的弹性模量、硬度和热膨胀系数差别较大,并且两者的晶格类型也不相同,在刀具基体上涂覆单涂层 TiN 等时会导致残余应力的增加,降低了涂层与刀具基体的结合力。同时,在高速铣削阶段,由于刀具涂层与刀具基体温度不同,会产生较强的热应力。由于这两者的共同作用,使 TiN 涂层发生剥落,最后导致了刀具微崩刃现象的产生。而多元涂层 TiAlN 和 AlTiN 涂覆在刀具基体上时,元素的成分呈梯度分布,在一定程度上降低了涂层与刀具基体的内应力,减少了发生崩刃的现象。与 TiN 涂层刀具相比,AlTiN 和 TiAlN 体现出较优的耐磨性能。

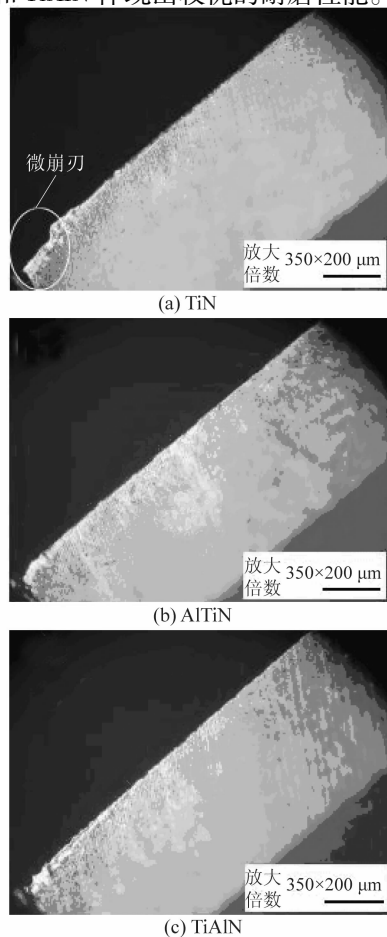


图 2 刀具在金属去除量为 640 mm^3 下的磨损情况
Figure 2 Wear of tool under metal removal of 640 mm^3

3.1.3 金属去除量 Q 为 $1\,600 \text{ mm}^3$ 时立铣刀的磨损

图 3 为 AlTiN 和 TiAlN 涂层刀具在金属去除量 $Q = 1\,600 \text{ mm}^3$ 时的刀具磨损情况。AlTiN 涂层刀具的磨损量 $V_B = 74.246 \text{ }\mu\text{m}$, TiAlN 涂层刀具的磨损量 $V_B = 108.426 \text{ }\mu\text{m}$, 达到了刀具磨钝标准。与 TiAlN 涂层刀具相比,AlTiN 涂层刀具体现出更优的耐磨性能。虽然 AlTiN 涂层与 TiAlN 涂层具有相同的结构,但 2 种涂层中 Al 的质量分数不同。AlTiN 涂层中的 Al 的质量分数高于 50%, 而 TiAlN 涂层中 Al 的质量分数低于 50%。较高的 Al 含量将改变涂层的晶体结构并使晶格发生畸变。在 AlTiN 涂层中,Al 原子取代 TiN 中的部分 Ti 原子,导致了晶格畸变。当晶格畸变程度增加时,会引起晶界和位错密度的增加,因此,晶体的变形将更加困难,导致涂层强度增加^[11],提高了刀具的抗磨损性能。

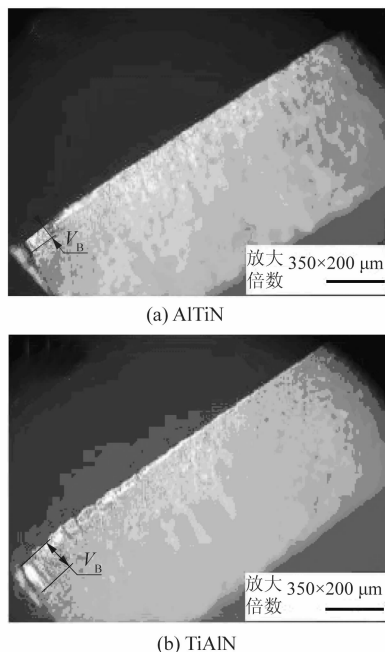


图 3 刀具在金属去除量为
 $1\,600 \text{ mm}^3$ 下的磨损情况

Figure 3 Wear of tool under metal
removal of $1\,600 \text{ mm}^3$

3.2 刀具磨损、破损机制分析

3.2.1 磨粒磨损

由于工件材料内部存在分散的硬质相,同时涂层的硬度相对较大,在切削过程中工件的硬质相以及碎裂的涂层对刀具表面进行了机械摩擦,使得刀具表面留下划痕,形成了磨粒磨损。图 4 分别是 TiN 和 TiAlN 涂层刀具后刀面磨损 SEM 图,从图中可以看到刀具磨损区域在涂层剥落的同时,出现了较浅的机械划痕但

痕迹并不是很明显。划痕出现的原因是刀具基体材料硬度较低,硬质相在刀具基体上刻下划痕,破坏了刀具基体材料的连续性。由于高速铣削的相对运动,硬质相与碎裂的涂层被带走的同时刀具基体也遭到破坏,循环往复形成了磨粒磨损。

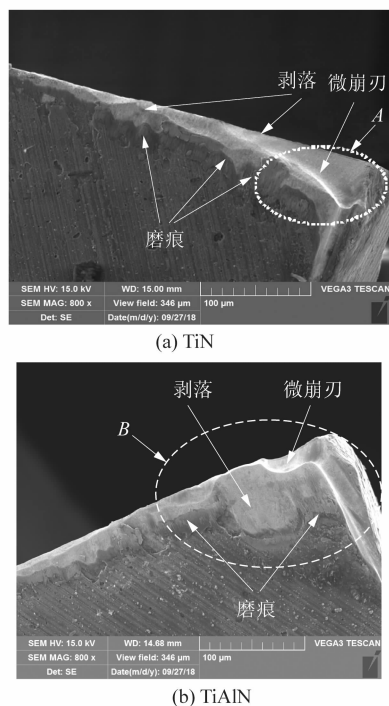


图4 刀具后刀面磨损形貌 SEM 图

Figure 4 SEM images of tool flank wear

3.2.2 粘结磨损

分别对 TiN 和 TiAlN 涂层刀具后刀面磨损区域 A、B 进行 EDS-Mapping 元素扫描,其结果如图 5~6 所示。EDS-Mapping 元素能谱的判定是通过观察元素的颜色在该区域是否呈高亮态显示。从图中可以看到涂层未磨损区域含有刀具涂层元素,而磨损区域除了含有刀具基体元素 Co 和 W 之外,还粘结上了工件材料 Cr、Mo、Si 和 V 元素,这说明刀具发生了粘结磨损。其原因为,在高速切削过程中,刀具与工件表面及切屑之间的接触区域产生高温高压,虽然在整个切削过程中都加冷却液,但由于接触区域的紧密贴合,切削液无法进入该区域^[12]。高温高压下,接触区域间的原子与分子相互粘结,在工件与切屑的相对高速运动下,粘结界面被破坏,然而粘结界面造成的剪切区仍存在,形成了粘结磨损。从图中还可以看到,磨粒磨损并不是很明显,原因是刀具基体中含有 Co 元素的粘结相并没有被完全破坏。

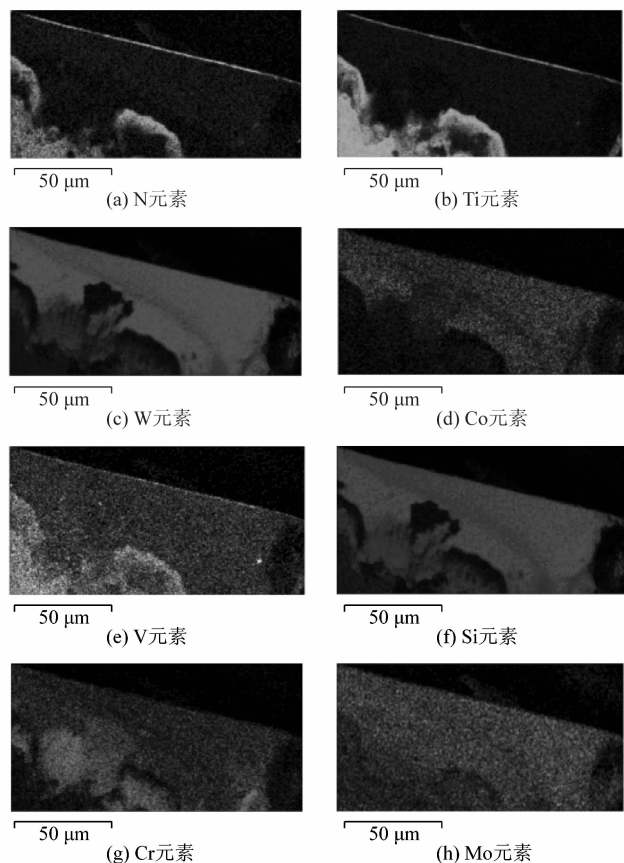


图5 TiN 刀具后刀面磨损 A 区域能谱分析

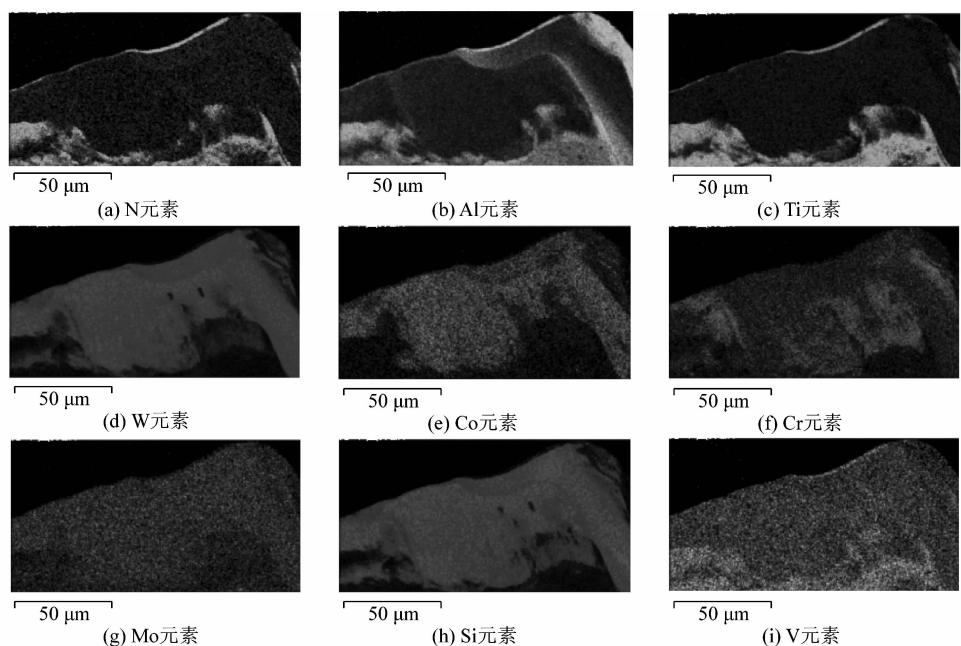
Figure 5 Energy spectrum analysis of A-zone of TiN tool flank wear

3.2.3 剥落和微崩刃

由于涂层与刀具基体存在内应力以及硬质合金刀具本身内部的缺陷,在高速切削淬硬钢初期往往会出现涂层剥落现象,刀具仍可以继续切削,随着加工时间的增加,刀具涂层产生微裂纹并逐渐扩展,在热应力和机械振动的共同作用下,刀具失效形成微崩刃。

3.3 刀具磨损曲线分析

图 7 为刀具后刀面磨损量随金属去除量 Q 的变化曲线。从图中可以看到,整体式涂层硬质合金立铣刀高速铣削淬硬钢时刀具磨损分为 3 个阶段:初期磨损阶段、稳定磨损阶段和急剧磨损阶段。在初期磨损阶段,由于新刀具的刀具表面较为粗糙且刀刃较为锋利,与工件的实际接触面积较小,压应力较大,刀具磨损迅速。随着切削的进行,刀具进入正常磨损阶段,在这个阶段刀具粗糙表面逐渐变得平整,且与工件的实际接触面增大,刀具磨损量增加的较为缓慢。随着切削的继续进行,刀具磨损量急剧增大,这是由于经过正常磨损阶段之后,刀具的刀刃变钝,导致了切削力变大,切削热急剧上升。虽然本次实验在湿切环境下进

图6 TiAlN 刀具后刀面磨损 *B* 区域能谱分析Figure 6 Energy spectrum analysis of *B*-zone of TiAlN tool flank wear

行但由于刀具与工件区域的紧密贴合,切削液无法对接触区域进行冷却,这样在接触区域与非接触区域形成了热应力梯度,加剧了刀具的失效。TiN 在金属去除量为 640 mm^3 时出现了微崩刃现象。3 种涂层刀具中 AlTiN 体现出较优的耐磨性能, TiAlN 涂层刀具次之。

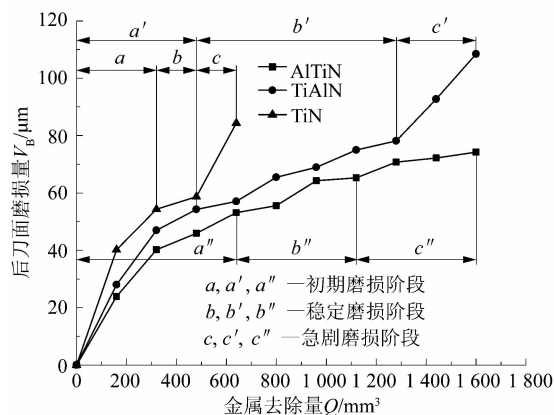


图7 刀具后刀面磨损曲线

Figure 7 Tool flank wear curve

3.4 加工表面粗糙度分析

图8为工件加工表面粗糙度随金属去除量 Q 的变化曲线。从图中可以看到,使用 TiN 涂层刀具加工淬硬钢时,工件表面粗糙度从初始阶段的 $0.628 \mu\text{m}$ 增至 $0.701 \mu\text{m}$ 后急剧下降到 $0.434 \mu\text{m}$ 。初期粗糙度增大的原因为刀具在磨损初期磨损剧烈,且工件中有硬质点的存在使得工件表面较为粗糙;后期加工表面

粗糙度急剧下降是由于过度磨损的切削刃如崩刃对工件材料的挤压效应^[12]。使用 AlTiN 涂层刀具加工淬硬钢初期,工件表面粗糙度在 $0.830 \mu\text{m}$ 左右变化且变化并不大,而使用 TiAlN 涂层刀具加工后工件表面粗糙度从 $0.509 \mu\text{m}$ 缓慢增加至 $0.639 \mu\text{m}$,这可能是由于2种涂层中的 Al 元素的质量分数不同所致。随后在刀具稳定磨损阶段,使用 AlTiN 加工的工件表面粗糙度下降之后趋于平稳,此时工件表面的粗糙度为 $0.577 \mu\text{m}$ 。最后当 TiAlN 和 AlTiN 涂层刀具进入剧烈磨损阶段,工件表面粗糙度增大。比较3种涂层加工表面粗糙度变化得趋势可以看出, TiAlN 涂层刀具加工的工件表面粗糙度变化较稳定,加工工件表面质量较好。

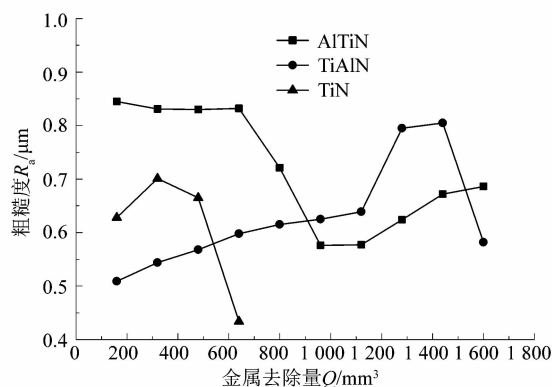


图8 加工表面粗糙度变化曲线

Figure 8 Variation curves of workpiece surface roughness

4 结论

课题组选用了陶瓷铣刀及涂层分别为 TiN、TiAlN 和 AlTiN 的立铣刀进行高速铣削淬硬 H13 钢试验,比较了刀具后刀面的磨损量 V_B ,分析了刀具磨损的机制以及工件表面粗糙度的变化趋势,得出:

1) 陶瓷立铣刀在加工初期容易产生崩刃现象,3 种涂层刀具中的 AlTiN 涂层立铣刀的耐磨性能最佳, TiAlN 涂层刀具次之;

2) 涂层立铣刀的主要磨损机理为磨粒磨损和粘结磨损,刀具破损的形式主要是涂层剥落之后产生的微崩刃;

3) 从工件表面粗糙度随金属去除量 Q 变化趋势可以看出,使用 TiAlN 涂层立铣刀加工工件时,工件的表面粗糙度变化趋势较为平稳。从加工后的工件表面质量考虑, TiAlN 涂层硬质合金立铣刀更适合用于高速切削加工淬硬 H13 钢。

参考文献:

- [1] 熊义. 高速切削技术在模具加工中的应用[J]. 中国设备工程, 2018(17): 88-89.
- [2] 王湘. 30Cr3SiNiMoVA 超高强度钢以铣代磨试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 5-6.
- [3] 岳彩旭, 马晶, 刘飞, 等. 模具钢 Cr12MoV 精密硬态切削过程刀具磨损[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(5): 56-60.
- [4] 孙晶, 任元, 周强, 等. 车削中三维复杂断屑槽刀具断屑仿真研究[J]. 机电工程, 2016, 33(3): 247-252.
- [5] 吴学奇. 小直径铣刀高速铣削淬硬钢机理及工艺研究[D]. 南宁: 广西大学, 2004: 1-2.
- [6] ASLAN E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC)[J]. Materials & Design, 2005, 26(1): 21-27.
- [7] 鲁炎鑫. 硬质合金立铣刀高效铣削钛合金表面完整性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016: 7-8.
- [8] CAMUSCU N, ASLAN E. A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(1/2): 121-126.
- [9] GHANI J A, CHOUDHURY I A, MASJUKI H H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153/154: 1067-1073.
- [10] 何宁. 高速切削技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012: 98-100.
- [11] AN Qinglong, WANG Changying, XU Jinyang, et al. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 43: 94-101.
- [12] PAUL P S, VARADARAJAN A S, GNANADURAI R R. Study on the influence of fluid application parameters on tool vibration and cutting performance during turning of hardened steel[J]. Engineering Science and Technology, 2016, 19(1): 241-253.
- [13] HUANG Weimin, ZHAO Jun, AI Xing, et al. Influence of tool path strategies on friction and wear behavior of high-speed ball-end-milled hardened AISI D2 steel[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(5/6/7/8): 2769-2779.

(上接第 34 页)

颗粒更易筛分。

4) 利用离散元软件 EDEM 可以仿真玉米的筛分试验,与传统实验相比优越明显。

参考文献:

- [1] 陈阳, 胡志超, 吴惠昌, 等. 基于 EDEM 的单粒式谷物水分仪采样机构仿真研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 239-244.
- [2] 陈进, 周韩, 赵湛, 等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83.
- [3] 伍毅, 白晓丽, 张双, 等. 基于离散元 EDEM 的碾米机内物料运动离散元分析研究[J]. 粮食加工, 2018, 43(2): 52-54.
- [4] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36-42.
- [5] 马征, 李耀明, 徐立章, 等. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 22-29.
- [6] SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 62-69.
- [7] 赵啦啦. 振动筛分过程的三维离散元法模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010: 16-22.
- [8] 王晓梅. 基于多球充填的玉米籽粒群体建模方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 52-56.
- [9] COŞKUN M B, YALÇIN I, ÖZARSLAN C. Physical properties of sweet corn seed (zea mays saccharata Sturt.)[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523-528.
- [10] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34-41.