

模具钢 Cr12MoV 精密硬态切削过程刀具磨损

岳彩旭, 马 晶, 刘 飞, 杨永衡, 张佳奕, 刘献礼

(哈尔滨理工大学 高效切削与刀具国家工程实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 模具钢 Cr12MoV 硬态切削过程中, 工件材料的高硬度导致了刀具在切削过程中受到剧烈的热力耦合作用, 刀具的磨损机制也明显不同于常规的切削过程. 本研究以 PCBN 刀具精密硬态切削模具钢 Cr12MoV 过程为对象, 分析了刀具前刀面和后刀面的磨损规律, 通过元素变化分析得到刀具不同位置的磨损机制; 通过揭示不同切削速度和进给量下的刀具磨损规律为合理选择切削参数提供理论依据; 研究揭示了切削合力和切削三分力受刀具磨损量的影响机制; 通过建立磨损刀具的几何模型, 采用有限元仿真软件 Deform 对不同刀具磨损量下的切削过程进行了仿真分析, 得到了刀具磨损对切削温度场的影响机制.

关键词: 模具钢 Cr12MoV; 硬态切削; 刀具磨损; PCBN 刀具

中图分类号: TG501.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0056-05

Research on Tool Wear in Die Steel Cr12MoV Precision Hard Cutting Process

YUE Cai-xu, MA Jing, LIU Fei, YANG Yong-heng, ZHANG Jia-yi, LIU Xian-li

(Key Laboratory of Machinery Industry Chip Control and

High Efficiency Cutting Tool Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In the process of hard cutting die steel Cr12MoV, the workpiece material hardness is very high, so the tool endure severely thermo mechanical coupling effects. Tool wear mechanism is different from the traditional cutting process. Based on the PCBN tool precision cutting process of die steel Cr12MoV, in this paper the tool rake face wear and the flank face wear form are studied, and tool wear mechanisms in different positions through elements change analysis is researched. Under different cutting speeds and feeds tool wear research regularity results provide theoretical basis for reasonable selection of cutting conditions. The research results reveal that cutting force is affected by mechanism of cutting tool wear. Different tool wear amount of geometric model are founded by using UG software. different cutting FEM models are founded to research effect of tool wear on cutting temperature by using Deform software in this paper.

Key words: die steel Cr12MoV; hard cutting process; tool wear; PCBN tool

收稿日期: 2013-12-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51105119, 51235003) .

作者简介: 岳彩旭 (1982—), 男, 博士, 副教授, E-mail: yuecaixu@163.com;

马 晶 (1989—), 女, 博士研究生;

刘 飞 (1989—), 女, 硕士研究生.

0 前言

高速硬态切削加工过程中,揭示刀具磨损和破坏机制是非常重要的课题,研究结果可以对合理使用刀具提供指导意义,进而减小或者避免刀具的非正常失效^[1-2].若硬态切削过程中刀具磨损控制不好,刀具刃上瞬时动载荷的大小会发生突变^[3-4],使得刀具发生瞬时断裂或者急剧磨损^[5-6],同时也导致了已加工表面质量下降^[7-8].

诸多学者展开了针对高强度钢硬态切削过程刀具磨损的研究^[9-10].上海交通大学王潇屹、等应用多种涂层刀具铣削 SKD11 塑料模具钢,研究发现粘结磨损是刀具的主要失效形式,且涂层的摩擦系数和导热系数是影响刀具磨损的主要因素^[11].在结合 Python 语言二次开发的基础上,解丽静博士利用有限元软件 ABAQUS 对切削过程 PCBN 刀具的磨损进行了预测,并且利用刀具磨损仿真结果对切削条件进行了优化^[12].哈尔滨理工大学刘献礼教授研^[13]究发现,淬硬轴承钢硬态切削过程中 PCBN 刀具前刀面的磨损形式主要是距离刀刃很近的月牙洼磨损,并且月牙洼的宽度很窄.文东辉博士^[14]对 PCBN 刀具干式切削 GCr15 时做了深入细致的研究,结果揭示了不同工件硬度或者切削速度下的刀具磨损形式. Roland Meyer 等^[15]研究了刀尖圆弧半径对刀具磨损的影响,并且指出通过选择合适的刀尖半径可以降低刀具后刀面磨损. COSTES^[16]研究了 CBN 刀具切削 Inconel718 的刀具磨损机理,通过 SME 和化学分析,认为在切削过程中主要由粘结、扩散、和磨料磨损导致刀具的失效.

以往研究成果往往集中在切削条件优化或者刀具磨损机理分析,但是针对 PCBN 刀具硬态切削模具钢 Cr12MoV 硬态车削过程中刀具磨损的研究鲜有报道^[17-19],并且较少学者针对不同刀具磨损量下切削分力的变化规律和温度场变化机制展开分析^[20].基于此,本文在分析刀具磨损机理的基础上,通过实验研究得到了切削条件对刀具磨损的影响规律,利用实验与仿真相结合的手段分析了刀具磨损对切削力和切削温度的影响规律.

1 试验条件

本实验采用沈阳机床厂生产的型号为 CA6140 的车床,现场具体布置如图 1 所示.刀具采用山特维

克公司生产的型号为 CNGA120408S01030A7025 非涂层 PCBN 刀片,刀柄型号为 DCLNR/L2020K12.试件材料为典型模具钢材料 Cr12MoV,工件热处理具体工艺见图 2,热处理后工件硬度为 HRC60~62.

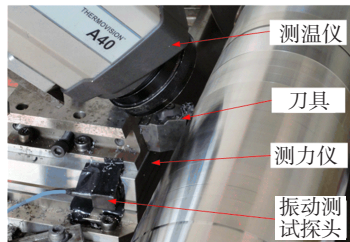


图1 实验现场布置图

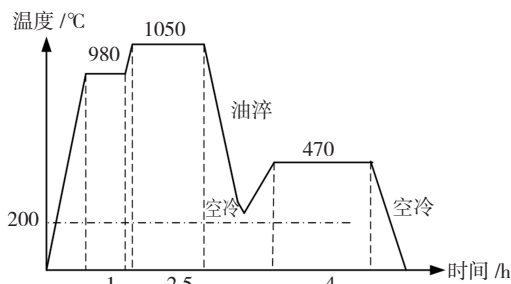


图2 工件热处理的具体工艺过程

2 硬态切削过程中 PCBN 刀具磨损机理研究

本文采用扫描电镜对刀具前后刀面进行元素变化分析,结合形貌变化研究刀具磨损机理.当进给量为 0.1 mm/r,切削深度为 0.2 mm,切削速度为 187 m/min,切削时间为 10 min 时,刀具前刀面磨损形貌如图 3 所示.其中,图 3(a) 中 A 区域为前刀面月牙洼磨损区域,B 为未磨损区域,A 区域和 B 区域元素含量测量结果如图 3(b) 和 3(c) 所示.对比 A 和 B 两区域可以发现 A 处的 Fe 元素含量要明显高于 B 区域,但是 Ti 元素含量相比较小.此结果说明切削过程在剧烈的摩擦作用下,高温切屑的挤压使得刀具前刀面发生了氧化磨损.在前刀面磨损处还可以检测到 Mn、Si 等元素,因此前刀面磨损是多重磨损共同作用的结果,但主要类型为机械磨损和氧化磨损.

图 4 为 PCBN 刀具的后刀面磨损形貌及含量测试图,磨损区域 A 和未磨损区域 B 元素测试为图 4(b) 和图 4(c).从图 4(a) 中可以发现刀具后刀面形成了明显滑擦凹坑痕迹,可见此处承受的机械荷作用要远远大于前刀面.刀具后刀面 A 处可检测到 Fe、Al、Mn 和 Cr 元素,尤其是 O 含量相比于 B 处升高明显,这说明了切削模具钢时刀具后刀面磨损类型主要为机械磨损、氧化磨损和扩散磨损.

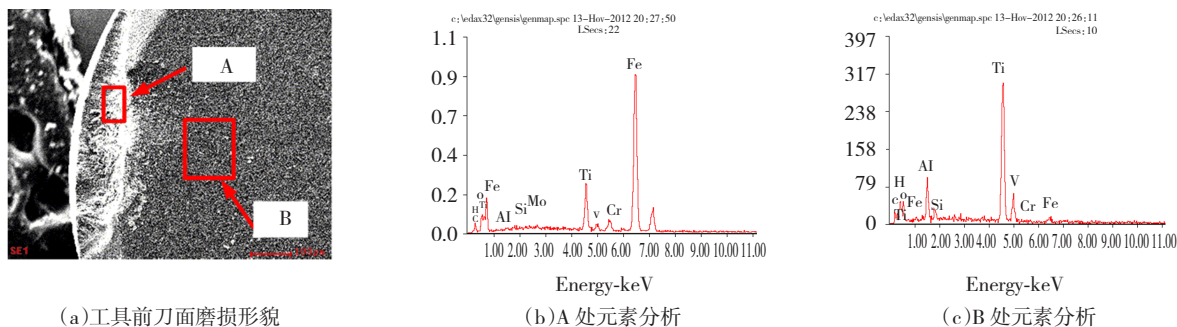


图3 PCBN 刀具前刀面磨损形貌及元素含量对比分析

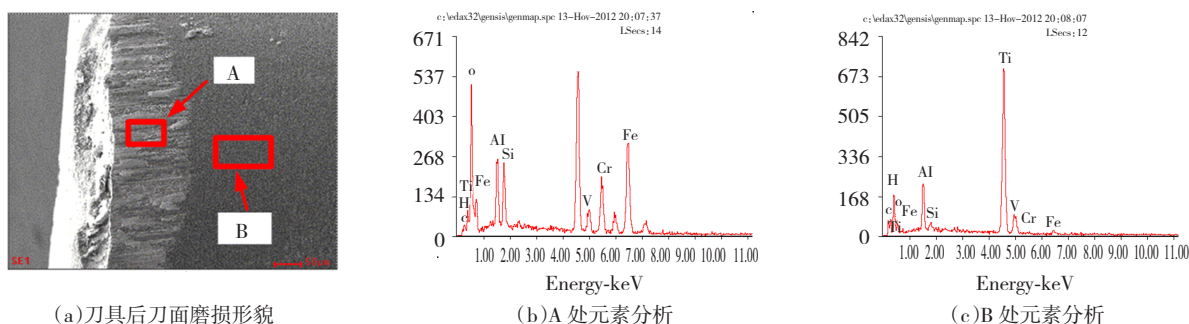


图4 PCBN 刀具后刀面磨损形貌及元素含量对比

3 切削条件对刀具磨损的影响

在硬态切削过程中,相比于切削深度,切削速度和切削进给量对切削区温度场和刀具磨损影响更为明显,因此本实验研究了上述两个切削参数对刀具磨损的影响机制.在进给量为 0.1 mm/r ,切削深度为 0.2 mm 时,切削速度分别为 167 m/min 、 187 m/min 、 234 m/min 、 297 m/min 时刀具后刀面磨损曲线如图5所示,其中刀具磨钝极限为 0.4 mm .从图中可以明显发现刀具磨损随着切削速度的加大而剧烈.在切削速度为 297 m/min 的情况下,刀具寿命与前三者相比明显减小.此现象可解释为当切削速度升高时,刀具后刀面与已加工表面摩擦作用更加剧烈,使得刀具的磨粒磨损和粘接磨损随之加剧.在不同的切削速度下,各种磨损机理相互作用、相互影响.

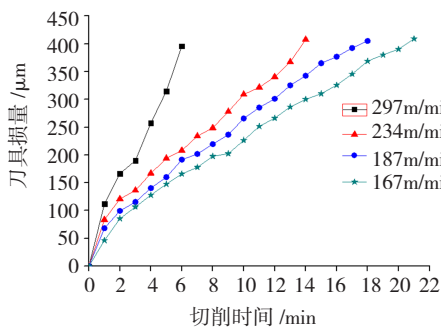
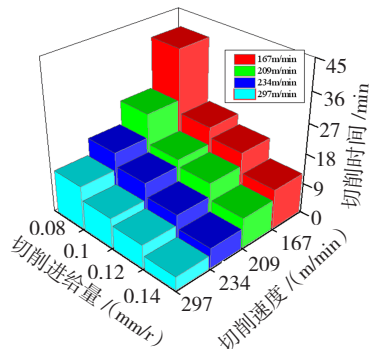


图6为切削深度固定在 0.2 mm 情况下,不同切削进给量和速度下刀具寿命的对比情况.可以明显发现增加进给量和切削速度,则刀具寿命随之降低.刀具寿命最高时对应的切削速度是 167 m/min 和进给量为 0.08 mm/r ,即在最低的进给量和速度组合下得到最高的刀具寿命.进给量从 0.1 mm/r 增加至 0.14 mm/r (增长 40%),切削速度为 167 m/min 、 209 m/min 、 234 m/min 、 297 m/min 对应的刀具寿命分别降低了 43% 、 44% 、 57% 和 67% .因此,若增加进给量,则刀具寿命降低的幅度随着切削速度的增大而增大.当速度从 167 m/min 增加至 297 m/min (增长 77.8%) 时,进给量分别为 0.08 mm/r 、 0.1 mm/r 、 0.12 mm/r 和 0.14 mm/r 时,刀具寿命分别变化为 48.3% 、 60.5% 、 70.9% 和 77.1% ,可见在实验研究参



数范围内,切削速度对刀具寿命比切削进给量有更大的影响,所以合理选择切削条件时应重点监控切削速度。

4 刀具磨损对切削过程的影响

4.1 刀具磨损对切削力的影响

在 PCBN 刀具切削模具钢 Cr12MoV 过程中,切削力的典型特征是径向切削抗力明显大于进给切削力和主切削力,此现象与常规切削不同。图 7 展示了相同的切削进给和深度情况下,切削速度和刀具磨

损对切削力的影响。可以发现切削速度和刀具磨损对切削力影响明显,切削力随着速度的增大而减小,刀具后刀面磨损增加则导致切削力的增大。其原因可以归结为刀具后刀面与工件的摩擦加剧。同时,在切削力的 3 个分力中,径向抗力 F_y 增幅最为明显,进而使得切削力呈增大趋势。当切削速度增大,切削力呈现降低趋势,主要是切削速度的增大使得金属软化效应明显,造成了切削力合力减小。当刀具磨损超过 0.4 mm 时,切削力中径向分力变化明显,平均增幅达 40%,进而使得切削合力的大幅升高。

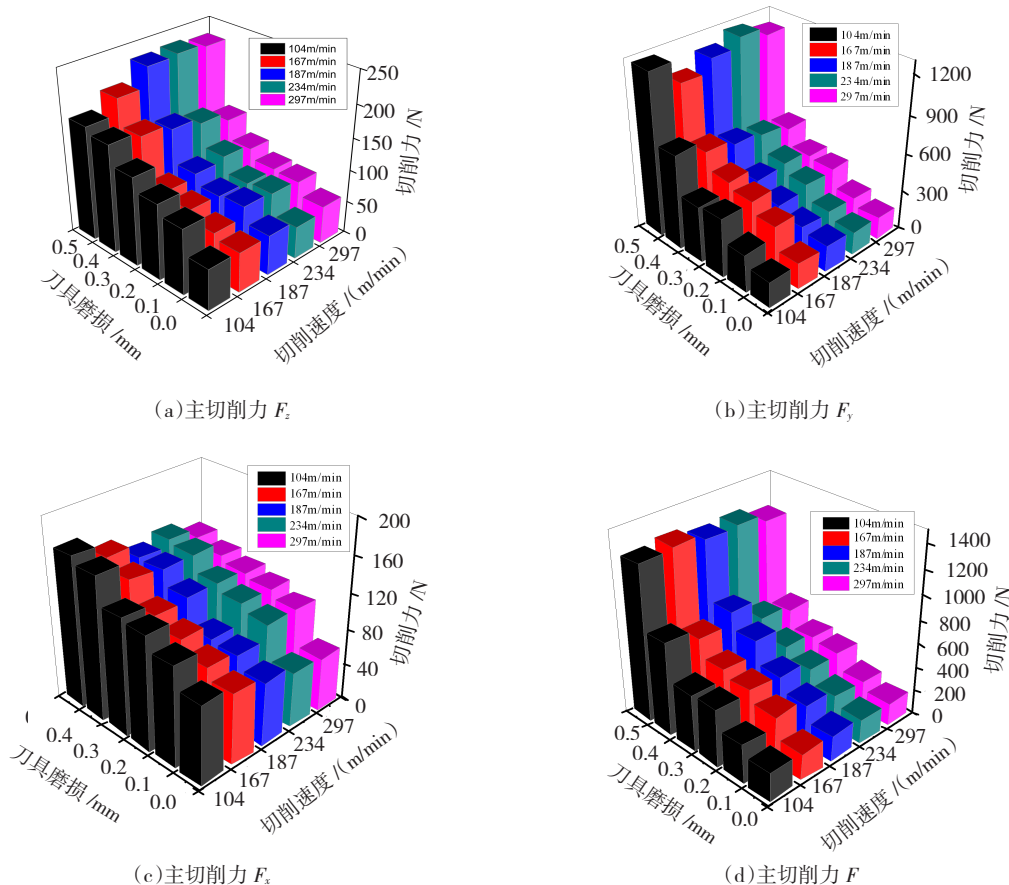


图7 不同切削速度下刀具磨损对切削力的影响

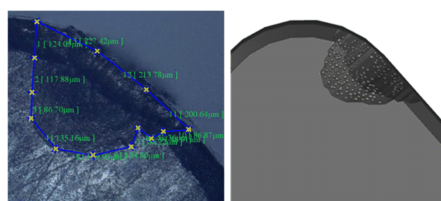
4.2 刀具磨损对切削温度场的影响

切削温度在切削过程中非常关键,对刀具寿命以及已加工表面质量有重要的影响。由于采用实验手段获得切削温度的变化历程和温度场分布较为困难,因此本文采用有限元仿真手段研究了不同刀具磨损量条件下温度场变化情况。为了使仿真模型精确考虑刀具磨损因素对切削过程的影响,本文对刀具前刀面和后刀面区域在超景深显微镜下进行了精确量化,根据测量结果在 UG 软件中进行了不同磨

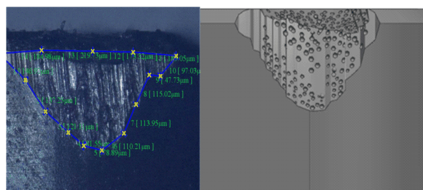
损量刀具的建模,如图 8 所示。其中,刀具前角、后角、刀尖圆弧半径、倒棱参数等尺寸和刃口参数完全按照刀具制造参数建模。

将所建立刀具几何模型导入到仿真软件 Deform-3D 中,模型的初始化设置如图 9(a) 所示。有限元建模时在工件上将上一次的走刀轮廓预先留出,使得仿真条件更加接近实际切削状况。模型切削条件为切削速度 234 m/min,切削深度 0.2 mm,进给量 0.1 mm/r。仿真软件对几何模型自动划分网格,

最大网格单元 0.1 mm, 最小网格单元 0.02 mm. 仿真模型对刀具与工件的接触部分进行局部网格细化, 细化网格随着切削的进行移动, 确保细化的网格始终保持在刀尖与工件接触的部分. 刀具后刀面平均磨损量为 0.4 mm 时, 在刀尖与工件的接触区域得到了切削区域的最高温度, 温度场分布情况如图 9(b) 所示. 当后刀面磨损量分别为 0 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 和 0.4 mm 时, 切削区域温度场最大值变化如图 10 所示. 仿真结果表明随着刀具磨损量的增加, 刀具与工件接触区域摩擦作用的加剧导致了切削温度的升高.

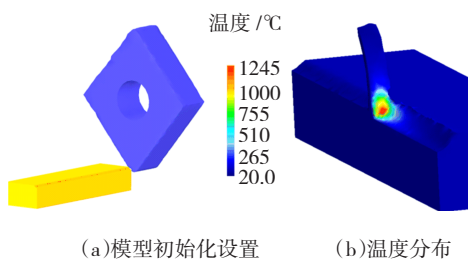


(a) 前刀面磨损量化及建模



(b) 后刀面磨损量化及建模

图8 磨损PCBN刀具的量化与UG建模



(a) 模型初始化设置

(b) 温度分布

图9 有限元初始模型及温度场仿真结果

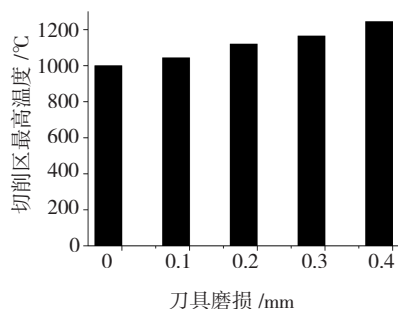


图10 刀具磨损对温度影响

5 结 语

本文以 PCBN 刀具硬态切削模具钢 Cr12MoV 过程为对象, 研究了刀具磨损机理及切削条件对刀具磨损规律的影响. 研究结果表明 PCBN 刀具的前刀面磨损类型主要为机械磨损和氧化磨损, 后刀面磨损类型主要为机械磨损、氧化磨损和扩散磨损; 随着切削速度增大, 刀具磨损速率加剧, 尤其是在较高切削速度和进给量的条件下, 刀具寿命较短. 切削速度对刀具寿命比进给量有更大的影响, 在选择合理切削条件应重点监控切削速度; 刀具磨损加剧时, 径向抗力的明显增大导致了切削合力增大; 仿真结果显示切削区域温度场的最大值随着刀具磨损量的增大而升高, 切削温度场仿真结果的获得为工艺参数的优化提供了指导作用.

参 考 文 献:

- [1] LUO S Y, LIAO Y S, TSAI Y Y. Wear Characteristics in Turning High Hardness Alloy Steel by Ceramic and CBN Tools [J]. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 1999, 88: 114 - 121.
- [2] MSAOUBI R, OUTEIRO J C, CHANDRASEKARAN. A Review of Surface Integrity in Machining and its Impact on Functional Performance and Life of Machined Products [J]. International Journal of Sustainable Manufacturing, 2008, 1(1/2): 203 - 236.
- [3] GRADISEK J, KALVERAM M, INSPIRGER T. On Stability Prediction for Milling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45: 769 - 781.
- [4] COSTES J P, GUILLET Y, G. POULACHON. Tool-life and Wear Mechanisms of CBN Tools in Machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(7-8): 1081 - 1087.
- [5] YEN Y C, HNER J S, WEULE H. Estimation of Tool Wear of Carbide Tool in Orthogonal Cutting Using FEM Simulation [J]. Machining Science and Technology, 2002, 6: 467 - 486.
- [6] MUKHERJEE N P, RAVI B. An Integrated Framework for Die and Mold Cost Estimation Using Design Features and Tooling Parameters [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26: 1138 - 1149.
- [7] 岳彩旭, 刘献礼. 高强度钢已加工表面完整性的研究进展 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(6): 6 - 10.
- [8] POULACHON G, ALBERT A, SCHLURAFF M. An Experimental Investigation of Work Material Microstructure Effects on White Layer Formation in PCBN Hard turning [J]. Machine Tools and Manufacture, 2005, 45: 211 - 218.
- [9] DING Tongchao, ZHANG Song. Optimization of Cutting Parameters for Desirable Surface Roughness in End-Milling Hardened Al-Si H13 Steel under a Certain Metal Removal Rate [J]. Advanced Materials Research, 2011, 188: 307 - 313.

(下转第65页)

- Balls Subjected to Rolling Contact Fatigue [J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2014, 136(2).
- [6] 平静艳. 球轴承振动产生的原因及改进措施 [J]. 哈尔滨轴承, 2008, 29(1): 47-49.
- [7] 张永乾, 吴朝阳. 我国钢球加工工艺设备的现状及发展趋势 [J]. 轴承, 2011, 4: 59-62.
- [8] 潘卫清, 赵晓波. 钢球表面缺陷的双波长干涉数字相位检测 [J]. 中国激光, 2014, 41(5): 1-6.
- [9] LIU H Y, XU Z N, XI J J. The Design of Seamless Steel Tube Ultrasonic Flaw Detection System. Sensors&Transducers, 2013, 157(10): 82-87.
- [10] 梁华, 王姗姗, 仇亚军, 等. 轴承钢球表面缺陷分析方法 [J]. 轴承, 2013, 6: 46-48.
- [11] 赵彦玲, 车春雨, 铉佳平, 等. 钢球全表面螺旋线展开机构运动特性分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(1): 37-40.
- [12] 赵彦玲. 基于图像技术的钢球表面缺陷分析与识别 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008: 2-3.
- [13] 赵彦玲, 刘益智, 郝焕瑞, 等. 钢球球表面展开装置: CN, 201373822Y [J]. 2009-12-30.
- [14] 王义文. 钢球表面缺陷检测关键技术研究及样机研制 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010: 5-6.
- [15] 王义文, 张中然, 青克尔, 等. 摩擦式钢球表面缺陷检测仪的控制系统设计 [J]. 机械工程师, 2010, 3: 26-28.
- [16] 马芸艳. 基于 CCD 的钢球外观检测技术的研究 [J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 25-30.
- [17] 徐淑琼, 蒋沂萍. 轴承球的声发射检测技术 [J]. 无损检测, 2003, 25(7): 358-359.
- [18] 刘国昌, 徐淑琼. 声发射检测技术在轴承球检测中的应用 [J]. 机械制造, 42(479): 63-64.
- [19] 李自根, 李自根, 吴楠松, 等. 陶瓷轴承球渗透检验自动分选系统 [J]. 无损检测, 25(6): 296-301.
- [20] 王鹏, 吴春亚, 刘德利, 等. 基于 LabVIEW 的钢球表面缺陷图像纹理分析与检测 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 208-212.
- [21] YANG J X, ZHANG F Y, SONG X X, et al. New Method of Spherical Surface Defect Detection Based on Machine Vision [J]. Advanced Materials Research, 2011, 6: 1274-1278.
- [22] 栗琳, 王仲, 裴芳莹, 等. 双图像传感器的球表面展开方法 [J]. 仪器仪表学报, 2012: 33(7): 1641-1646.
- [23] 全燕鸣, 陈佳佳, 柯志勇. 成批抛光钢球表面缺陷自动检测的图像预处理方法 [J]. 测试技术学报, 2010, 24(6): 518-521.

(编辑: 关毅)

(上接第 60 页)

- [1] 刘战强, 艾兴. 高速切削刀具磨损表面形态研究 [J]. 摩擦学学报, 2002(22): 468-471.
- [2] 王潇屹, 张晓辉. 新型涂层刀具干式铣削加工 SKD11 切削性能研究 [J]. 工具技术, 2009, 43(2): 8-11.
- [3] XIE L J, SCHMIDT J, SCHMIDT C. 2D FEM Estimate of Tool Wear in Turning Operation [J]. Wear, 2005, 258: 1479-1490.
- [4] 刘献礼, 肖露, 侯世香, 等. PCBN 刀具的磨损机理和干切削 GCr15 时的磨损与寿命 [J]. 工具技术, 2002, 36(5): 3-7.
- [5] 文东辉, 刘献礼, 严复钢, 等. PCBN 刀具的磨损机理 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(1): 56-59.
- [6] ROLAND Meyer, JENS Köhler, BEREND Denkena. Influence of the Tool Corner Radius on the Tool Wear and Process Forces During Hard Turning [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 58: 933-940.
- [7] COSTES J P, GUILLET Y, POULACHON G, et al. Tool-life and Wear Mechanisms of CBN tools in machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7-8): 1081-1087.
- [8] ARAMCHAROEN A, MATIVENGA P T. White Layer Formation and Hardening Effects in Hard Turning of H13 Tool Steel with CrTiAlN and CrTiAlN/MoST-coated Carbide Tools [J]. International Journal of Sustainable Manufacturing, 2008, 36: 650-657.
- [9] POULACHON G, ALBERT A, SCHLURAFF M, et al. An Experimental Investigation of Work Material Microstructure Effects on White Layer Formation in PCBN Hard Turning [J]. Machine and manufactures, 2005, 45: 211-218.
- [10] HIROYUKI Sasahara, TOSHIYUKI Obikawa, TAKAHIRO Shirakashi. Prediction Model of Surface Residual Stress Within a Machined Surface by Combining Two Orthogonal Plane Models [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(7-8): 815-822.
- [11] GUO Y B, SAHNI J. A comparative Study of Hard Turned and Cylindrically Ground White Layers [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 135-145.

(编辑: 温泽宇)