

# 高速干式铣削马氏体不锈钢的表面质量与组织特性

邱坤<sup>1</sup>, 原君静<sup>1</sup>, 王海宁<sup>2</sup>, 付宏生<sup>1</sup>

(1. 北京电子科技职业学院 机械工程学院, 北京 100176;  
2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 目的 研究高速干切削工艺对难加工材料加工表面质量的影响规律。方法 在切削速度范围 157 ~ 314 m/min 内, 依据析因试验设计方法, 对马氏体不锈钢工件进行干切削条件下的端面铣削工艺试验, 考查铣削加工表面粗糙度变化规律、表面微结构组织特征与维氏硬度分布曲线。结果 由每齿进给量和铣削深度共同决定的切屑截面构形对马氏体不锈钢加工表面轮廓的形成机制有显著作用, 加工表面的表层及次表层组织主要由塑性变形层与回火多相组织层共同构成。结论 为减小干式切削对加工表面层组织特征的影响, 应优先选择大进给量、小切深的工艺参数组合。

**关键词:** 马氏体不锈钢; 高速切削; 塑性变形; 过度回火马氏体

**中图分类号:** TG506.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)05-0020-05

## Surface Quality and Microstructure Characteristics of Martensite Stainless Steel Machined by High-speed Dry Cutting Process

QIU Kun<sup>1</sup>, YUAN Jun-jing<sup>1</sup>, WANG Hai-ning<sup>2</sup>, FU Hong-sheng<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Beijing Electronic Science and Technology Vocational College, Beijing 100176, China;  
2. School of Mechanical & Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the influences of high-speed dry cutting process on the surface quality of difficult-to-cut materials. **Methods** Face milling experiment of martensite stainless steel was conducted at the cutting regime of 157 ~ 314 m/min in dry cutting condition under the guidance of 2K factorial design method, the characteristics of surface roughness, microstructure properties and micro-hardness distribution curves were studied experimentally. **Results** It was shown that: the chip cross section determined by the depth of cut and feed per tooth had significant influence on the formation of roughness profiles; severe plastic deformation and multi-phases structures were the main components of the surface and subsurface layers. **Conclusion** In order to reduce the negative effects of dry cutting process on machined surfaces, the cutting parameters should be carefully controlled, larger feed per tooth and smaller depth of cut are preferred.

**KEY WORDS:** martensite steel; high-speed cutting; plastic deformation layer; over-tempered martensite

随着节能、环保不断深入人心, 少/无切削液高速 加工技术在工业界日益受到重视<sup>[1-5]</sup>。切削液的主

收稿日期: 2014-04-15; 修订日期: 2014-06-02

Received: 2014-04-15; Revised: 2014-06-02

基金项目: 北京市教育委员会科技计划项目(sqkm201210858005)

Fund: Supported by Beijing Education Commission Science and Technology Plans Project(sqkm201210858005)

作者简介: 邱坤(1964—), 女, 辽宁阜新, 硕士, 教授, 主要从事先进制造技术方面的研究。

Biography: QIU Kun (1964—), Female, from Fuxin, Liaoning, Master, Professor, Research focus: advanced manufacturing technologies.

要作用是减少刀第一剪切变形区的切削温度,改善第二、第三剪切变形区的边界润滑条件,因此在加工过程中减少甚至取消切削液,对加工表面质量和刀具寿命都会产生一定程度的影响<sup>[6-9]</sup>。随着涂层硬质合金、金属陶瓷、CBN 等高性能刀具材料技术的发展,干切削条件下的刀具磨损问题逐渐得到改善,但对于干切削和少润滑切削加工是否会对加工表面质量及其使用性能产生不利影响的顾虑依旧存在。因此,评价工件加工表面质量优劣时,除了考查常规表面粗糙度指标,还有必要研究加工过程对可见表面之下的一系列影响<sup>[10-19]</sup>。对于难加工材料的生产实践而言,合理选择切削用量参数,有利于保证工件加工质量,提高生产效率和降低零件加工成本。

文中通过干切削端面铣削工艺试验,考查高速切削条件下难加工材料马氏体不锈钢工件加工表面质

量评价指标和微结构组织的特征与特性,以期深入了解干切削加工机理,阐明关键工艺参数对工件可见表面之下的表层及次表层组织结构的影响规律,为建立和完善高效干式切削技术的工艺设计理论,指导马氏体不锈钢的高性能切削生产实践,提供必要的试验基础与理论依据。

1 试验方案与设计

锻造马氏体不锈钢 2Cr13 工件材料的表面洛氏硬度为 $(30\pm 1)$  HRC,化学成分与机械物理性能见表 1。该类材料的热处理规范为:980 ~ 1000 ℃ 油淬。此条件下获得的基体组织主要为较细的马氏体及少量残余奥氏体,板条马氏体的位向因马氏体束较细而不明显。基体组织的金相显微镜照片见图 1。

表 1 2Cr13 不锈钢的化学成分与机械性能  
Tab.1 The chemical constitution and mechanical property of 2Cr13 stainless steel

化学成分/%						机械性能			
$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{S})$	$w(\text{P})$	$\delta$	$\psi$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$
0.16 ~ 0.24	≤0.60	≤0.60	12.0 ~ 14.0	≤0.030	≤0.035	16	55	660	450

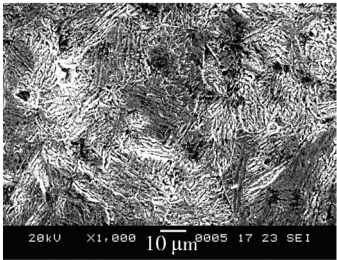


图 1 2Cr13 不锈钢基体组织

Fig.1 The matrix structure of 2Cr13 stainless steel

高速干式端面铣削试验在 DMU 70eVolution 5 轴加工中心中进行,加工方式采用端面中心对称方式,刀盘为山特维克  $\phi 50$  铣刀盘,刀片为 R-245 涂层硬质合金铣刀片。粗糙度测定采用三丰 SV-400 型表面轮廓测量仪,取样长度 0.8 mm,评定长度选择 4 mm。显微硬度测定采用 VTA512 数显维氏硬度仪,载荷为 100 N。

为考查切削用量对加工表面质量的作用规律,并辨识主要影响参数,依据析因设计方法进行试验设计,样件的编号和切削用量组合见表 2。考虑到切削试验和组织特性表征试验的工作量,文中使用三因素两水平析因试验设计  $2^{3-1}$ 。根据表面粗糙度影响因

素析因分析结果,对各相关因素组合所对应的工件试样进行微结构组织分析与显微硬度测量,重点考查切削条件对次表层组织结构和力学指标的影响规律。

表 2 析因试验切削用量水平  
Tab.2 Levels of cutting parameters used in the factorial design experiment

试样 编号	背吃刀量 $a_p/\text{mm}$	每齿进给量 $f_z/(\text{mm}\cdot\text{z}^{-1})$	切削速度 $v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
1	2	0.05	157
2	2	0.20	314
3	1	0.05	314
4	1	0.20	157

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度影响规律

图 2 为根据析因试验结果绘制的因素效应正态概率图。在图 2 中,对表面粗糙度  $Ra$  值有显著影响的因素为:每齿进给量  $f_z$ 、背吃刀量  $a_p$  和二者之间的

交互作用。其中 $f_z$ 对 $Ra$ 的影响表现为正效应,即 $Ra$ 值随着 $f_z$ 增加而增大,该结果与常规切削时每齿进给量的作用规律一致。在高速切削速度范围(157~314 m/min)内, $v_c$ 对 $Ra$ 值的影响并不显著。此结果不同于常规切削中提高切削速度可改善 $Ra$ 值的规律。

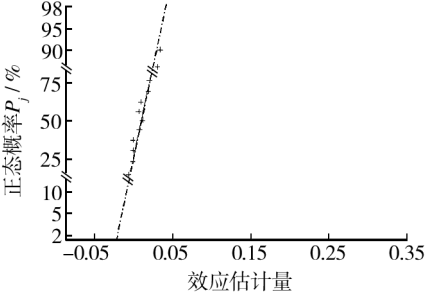


图 2 表面粗糙度影响因素的正态概率

Fig.2 Normal plot of major influencing factors of surface roughness  $Ra$

$P_j$  值得关注的是, $a_p$ 与 $f_z$ 的交互作用对 $Ra$ 值的影响显著。这表明在高速切削时,切屑截面构形(由进给量和铣削深度共同决定)会对加工表面轮廓的形成产生一定影响。对于加工生产实践而言,这意味着在某一特定切削条件下,通过单因素试验获得的 $f_z$ 和 $a_p$ 对 $Ra$ 值的影响规律或指数经验公式不能准确预测马氏体不锈钢类工件加工表面粗糙度指标 $Ra$ 值。

切削用量对表面粗糙度指标 $Ra$ 值的作用见图3,“+”表示该切削用量的高水平值效应,“-”表示该切削用量的低水平值效应。显而易见, $f_z$ 对 $Ra$ 值的

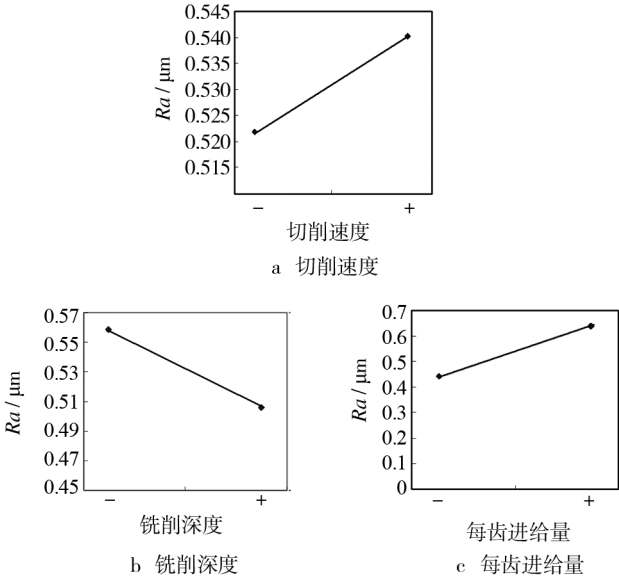


图 3 切削用量的作用效应

Fig.3 Influences of cutting parameters on surface roughness  $Ra$

影响显著,而 $a_p$ 和 $v_c$ 的影响则相对较小。随着 $v_c$ 的加倍, $Ra$ 值的测量值并未如预期有所改善,相反却略有上升;而当 $a_p$ 由1 mm提高到2 mm后, $Ra$ 值反而下降了12%。这意味着在系统刚度预选条件下,增加铣削深度,降低切削速度,可以获得更为理想的加工表面粗糙度。

以上分析表明,若单纯从提高表面粗糙度的角度而言,选择较低的切削速度、较大的切削深度和较低的每齿进给量将是高效率干式加工马氏体不锈钢工件的合理切削用量组合。

2.2 切削用量对表面层组织特性的影响规律

碳质量分数低于0.3%的2Cr13不锈钢中,铁素体组织在加热和冷却时具有 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变特性,其室温组织中除了珠光体外,还存在先共析铁素体。因此,2Cr13不锈钢在奥氏体化过程中,Fe和 $Fe_3C$ 也将向奥氏体A进行转化与溶解。即当加热到Ac1温度后,珠光体开始转化为奥氏体;在温度区间[Ac1, Ac3]内,共析铁素体将逐渐转化为奥氏体;当温度超过Ac3时,2Cr13基体组织的奥氏体化将会结束,获得单一的奥氏体组织。2Cr13不锈钢的Ac1为820℃,Ac3为930℃,Arl为780℃。不仅如此,2Cr13不锈钢的淬透性较好,尺寸较小的工件在空气中即可淬火,得到马氏体组织<sup>[15]</sup>。

图4显示,1号试件表面下0.03 mm附近组织的硬度值最低,为26HRC左右,比心部基体组织(硬度30HRC)显著降低。在表面层下0.005 mm附近出现了最高的硬度值,为32HRC。从表面层组织的微观硬度变化可以初步判断,高速切削过程对工件表面层组织的影响区至少深0.07 mm。由图5可知,表面层下深度0.1~0.25 mm范围内存在两层变质组织,分别为深灰色层和浅灰色层,而紧邻这两层变质层的灰白色组织为基体马氏体组织。根据图5中的组织形貌,结合图4中1号试件的显微硬度曲线,可以判断在加

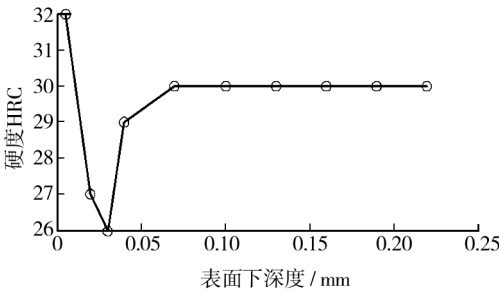


图 4 1号试件表层组织显微硬度变化

Fig.4 Microhardness curve of specimen No. 1's surface layer

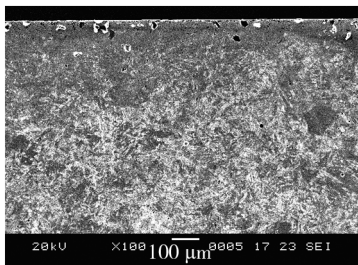


图 5 1 号试件 SEM 形貌

Fig. 5 The SEM photo of specimen No. 1

工表面下深度 8 ~ 10  $\mu\text{m}$  范围内,存在较致密的回火索氏体组织层。该层组织由再结晶后的铁素体和均匀分布的细条状渗碳体组成,这时铁素体已失去了原有基体马氏体组织的片状或板条状的形态。

在回火托氏体层与心部原始灰白马氏体组织层之间的浅灰层组织,虽然其显微硬度并未发生明显改变,但是其电镜形貌与基体原始马氏体组织仍有较明显差别,考虑到该处的温度范围,可以推断该层组织为回火马氏体组织。它由过饱和的  $\alpha$  固溶体(铁素体)和与其晶格相关联的  $\epsilon$  碳化物组成,仍保留基体马氏体组织的片状或板条状形态。仔细观察图 5 可以发现,在加工表面下存在约 10  $\mu\text{m}$  深度的塑性变形层,在显微硬度曲线上体现为硬度的升高。表层组织塑性变形的结果将会在工件表面产生一定的变形强化效应。

图 6 显示,2 号试件切削加工表面层下 20  $\mu\text{m}$  深度附近的硬度值较基体原始硬度降低了 6HRC,硬度变化区深度为 0.07 mm 以上。由图 7 可知,沿垂直于加工表面方向的 0.1 ~ 0.2 mm 深度范围内,有黑色、深灰色金相变质层存在。根据图 6 中显微硬度的变化和图 7 中黑色变质层的组织形貌,可以判断表面黑色层为回火托氏体组织。回火托氏体由尚未发生再结晶的铁素体和细小均匀的渗碳体颗粒组成,在苦味酸的侵蚀作用下易呈黑色。由于这时铁素体尚未再

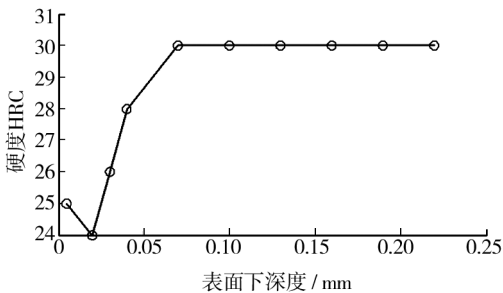


图 6 2 号试件表层组织显微硬度变化

Fig. 6 Microhardness curve of specimen No. 2's surface layer

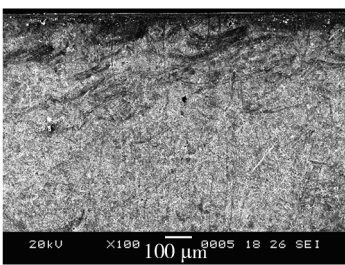


图 7 2 号试件 SEM 形貌

Fig. 7 The SEM photo of specimen No. 2

结晶,因此仍保留着原始马氏体组织的板条状形态。考虑到此时的铣削深度与每齿进给量均处于较高水平( $a_p=2\text{ mm}$  和  $f_z=0.2\text{ mm/z}$ ),在较大的切削力作用下,表层组织有可能会发生  $\gamma\text{—M}$  相变,使硬度升高,体积应力增大。根据图 7 中最上部发生位向偏转的组织厚度,可以判断 2 号工件表面产生了深 15 ~ 20  $\mu\text{m}$  的塑性变形层。

图 8 显示,3 号试件的加工表面层产生了深度 0.15 ~ 0.2 mm 的切削效应影响层,最上层的组织显微硬度为 21HRC,深度约 30  $\mu\text{m}$ ,某些截面上超过 100  $\mu\text{m}$ 。由图 9 可知,最上层的黑色变质区组织十分疏松,由不规则状铁素体和颗粒状的渗碳体组成。根据加工过程中形成的深褐色切屑可以推测,该条件下切削区域温度将在 700  $^{\circ}\text{C}$  以上,黑色变质层有可能为回火珠光体组织。回火珠光体层附近区域的组织条

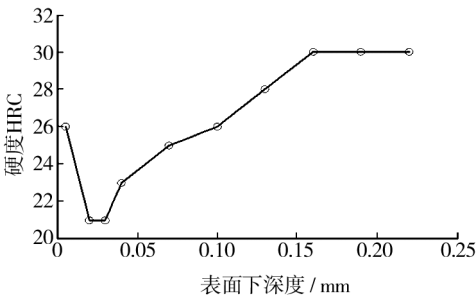


图 8 3 号试件表层组织显微硬度变化

Fig. 8 Microhardness curve of specimen No. 3's surface layer

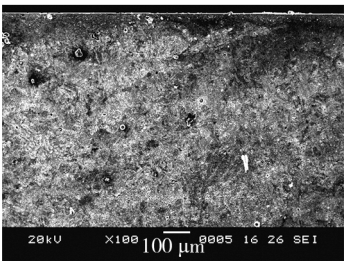


图 9 3 号试件 SEM 形貌

Fig. 9 The SEM photo of specimen No. 3's metallographic structure



形状貌较为明显,故判断为回火索氏体组织。

图10显示,4号试件表面层下0.1 mm深度范围内存在硬度变化,其中最高硬度约为35HRC。结合图11可知,切削表面下存在总厚度为0.1~0.2 mm的热影响层,部分截面热影响层深度超过0.25 mm。最上部的深黑色回火托氏体层深度约为20  $\mu\text{m}$ ,硬度为33HRC。与回火托氏体层相邻的浅灰色变质层为回火马氏体组织,其硬度为31HRC。根据图11中发生位向偏转的马氏体板条束区域厚度,结合图10的微观硬度曲线可知,在4号工件加工表面存在30  $\mu\text{m}$ 深的塑性变形层。因此可以推断,回火托氏体与回火马氏体组织的塑性变形引发了4号工件表层组织微观硬度的显著升高。

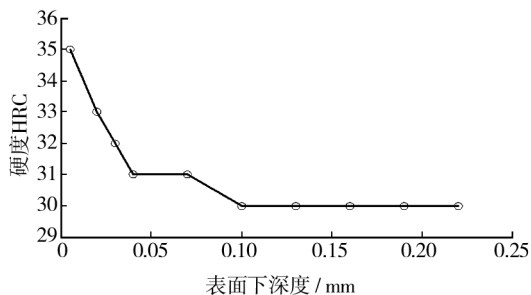


图10 4号试件表层组织显微硬度变化

Fig. 10 Microhardness curve of specimen No. 4's surface layer

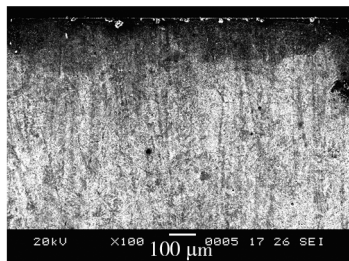


图11 4号试件 SEM 形貌

Fig. 11 The SEM photo of specimen No. 4's metallographic structure

### 3 结论

1) 在干切削条件下,高速切削马氏体不锈钢时,每齿进给量与铣削深度之间的交互作用对加工表面粗糙度指标  $R_a$  值有统计学意义显著性影响。

2) 干切削条件下,加工表面层的微结构组织特征受切削参数影响显著,塑性变形层和马氏体、托氏体、索氏体以及珠光体等微结构的回火组织状态是工件表层及次表层组织的主要形态。

3) 为减小干式切削对加工表面层组织特征的影

响,在高速切削条件下,应优先选择大进给量、小切深的工艺参数组合。

### 参考文献

- [1] DINIZ A E, FERREIRA J R, FILHO F T. Influence of Refrigeration/Lubrication Condition on SAE 52100 Hardened Steel Turning at Several Cutting Speeds [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003 (43): 317—326.
- [2] BRUNI C, D'APOLITO L, FORCELLESE A, et al. Finish Milling Operations of AISI 420 B Stainless Steel under Dry and Wet Conditions [C]// In: Proc of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Reggio Calabria, Italy, 2007: 275—279.
- [3] 王先逵. 制造技术的历史回顾与面临的机遇和挑战 [J]. 机械工程学报, 2002 (8): 3—6.  
WANG Xian-kui. Historical Review and Chance and Challenge for Manufacturing Technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002 (8): 3—6.
- [4] SMITH Tlustý S. Current Trends in High Speed Machining [J]. Journal Manufacturing Science & Engineering, ASME, 1997, 119 (5): 664—666.
- [5] LOPEZ L N, PEREZ J, LLORENTE J I, et al. Advanced Cutting Conditions for the Milling of Aeronautical Alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100 (4): 1—11.
- [6] AXINTE D A, DEWES R C. Surface Integrity of Hot Work Tool Steel after High Speed Milling-experimental Data and Empirical Models [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127 (3): 325—335.
- [7] EI-WARDANY T I, KISHAWY H A, ELBESTAWI M A. Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Machining, Part 1: Micrographical Analysis [J]. Journal Manufacturing Science & Engineering, 2000, 122 (11): 620—631.
- [8] EI-WARDANY T I, KISHAWY H A, ELBESTAWI M A. Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Machining, Part 2: Microhardness [J]. Journal Manufacturing Science & Engineering, 2000, 122 (11): 632—641.
- [9] SADAT A S. Effect of High Cutting Speed on Surface Integrity of AISI4340 Steel During Turning [J]. Journal Materials Science & Technology, 1990, 49 (6): 371—375.
- [10] FARHAD N. Machining of Aerospace Titanium Alloys [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 49 (17): 99—106.

- [14] 李济顺,薛玉君,兰明明,等. 超声波对 Ni-CeO<sub>2</sub> 纳米复合电铸层微观结构和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2009,19(3):517—522.
- LI Ji-shun, XUE Yu-jun, LAN Ming-ming, et al. Effects of Ultrasound on Microstructures and Properties of Ni-CeO<sub>2</sub> Nanocomposite Electroforming Deposits [J]. The Chinese Journals of Nonferrous Metals, 2009, 19(3): 517—522.
- [15] 谢兰清,江彩霞. 辅助超声振荡电沉积 Cu-SiC 复合镀层的结构与性能[J]. 兵器材料科学与工程,2013,36(2):72—76.
- XIE Lan-qing, JIANG Cai-xia. Structure and Property of Cu-SiC Composite Coating Prepared by Electrodeposition Assisting with Ultrasound Oscillation [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(2): 72—76.
- [16] 赵林,樊占国,杨中东,等. 磁场下电沉积制备 CuCo 颗粒膜的巨磁电阻效应[J]. 中国有色金属学报,2009,19(5):924—929.
- ZHAO Lin, FAN Zhan-guo, YANG Zhong-dong, et al. Giant Magnetoresistance of CuCo Granular Films Electrodeposited in Magnetic Field [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(5): 924—929.
- [17] 高鹏,杨中东,薛向欣,等. 磁场影响下的电沉积[J]. 材料保护,2006,39(8):38—42.
- GAO Peng, YANG Zhong-dong, XUE Xiang-xin, et al. Electrodeposited under Magnetic Fields [J]. Materials Protection, 2006, 39(8): 38—42.
- [18] 屠振密,胡会利,于元春,等. 电沉积纳米晶材料制备方法及其机理[J]. 电镀与环保,2006,26(4):4—7.
- TU Zhen-mi, HU Hui-li, YU Yuan-chun, et al. Preparation Methods and Mechanisms of Electrodeposited Nanocrystalline Materials [J]. Electroplating & Pollution Control, 2006, 26(4): 4—7.
- [19] 杨建明,朱获,雷卫宁. 电沉积法制备纳米晶材料的研究进展[J]. 材料保护,2003,36(4):1—4.
- YANG Jian-ming, ZHU Di, LEI Wei-ning. Electrodeposited Nanocrystalline Materials [J]. Materials Protection, 2003, 36(4): 1—4.
- [20] 冯秋元. Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米复合镀层制备及性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2008:101—107.
- FENG Qiu-yuan. Research on Preparation of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Coatings and Its Properties [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 101—107.

(上接第24页)

- [11] LOPEZ L N, LAMIKIZ A, SANCHEZ J A, et al. Improving the Surface Finish in High Speed Milling of Stamping Dies [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123(6):282—302.
- [12] KOSHY P. High Speed End Milling of Hardened AISI D2 Tool Steel (58HRC) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(5):266—273.
- [13] OSULLIVAN D, COTTERELL M. Machinability of Austenitic Stainless Steel SS303 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(3):153—159.
- [14] KARPUSCHEWSKI B. Micromagnetic In-process Surface Integrity Analysis of Ground Workpieces [C]// Proceedings of the First International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing. Germany: [s. n.], 1998:111—123.
- [15] 李炯辉,施友方,高汉文,等. 钢铁材料金相图谱[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981.
- LI Jiong-hui, SHI You-fang, GAO Han-wen, et al. Steel Material Microstructure Map [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1981.
- [16] 陈康,赵玮霖. 304 奥氏体不锈钢氮离子注入层的组织与性能研究[J]. 表面技术,2011,40(2):18—20.
- CHEN Kang, ZHAO Wei-lin. Study on Organization and Performance of Nitrogen Ion Implantation Layer of 304 Austenitic Stainless Steel [J]. Surface Technology, 2011, 40(2):18—20.
- [17] 丛树林,时海芳,姜昕彤,等. 磨削淬火强化层与高频感应淬火强化层的对比研究[J]. 表面技术,2012,41(3):71—75.
- CONG Shu-lin, SHI Hai-fang, JIANG Xin-tong, et al. Study on Comparison of Grinding Hardened Layer with Induction Hardened Layer [J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 71—75.
- [18] 刘克铭,马壮,张连勇,等. 磨削深度及原始组织对 42CrMo 钢磨削强化层的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(10):51—55.
- LIU Ke-ming, MA Zhuang, ZHANG Lian-yong, et al. Effects of Grind Depth and Original Microstructure on Grind Hardening Layer of 42CrMo [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(10): 51—55.
- [19] 王雁涛,杨钊. 铝合金结构件应力腐蚀裂纹机理分析[J]. 装备环境工程,2013,10(1):53—56.
- WANG Yan-tao, YANG Tian. Analysis on Stress Corrosion Crack Mechanisms of Aluminum Alloy Structure [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 53—56.