

GCr15 钢内圆表面磨削淬硬层软化带的正交试验

高顺兴¹, 刘菊东^{1,2}, 黄松伟³

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 海洋平台保障系统关键技术
福建省高校工程研究中心, 福建 厦门 361021; 3. 集美大学工程训练中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究 GCr15 钢内圆磨削表面淬硬层的硬度分布特征, 进行径向切入式内圆表面磨削淬硬正交试验, 并优化了磨削用量组合。结果表明: 1) 内圆磨削淬硬件的砂轮周向切入切出区域存在软化带, 该软化带由砂轮径向切入区、周向切入过渡区和周向切出过渡区组成; 2) 磨削深度对软化带弧长的影响最为显著, 工件进给速度对软化带弧长的影响显著, 磨削速度对软化带弧长的影响一般显著; 3) 随着磨削深度的增大, 软化带周向显微硬度分布曲线由“U”形转变为“W”形。当磨削用量组合为: 磨削深度 $a_p = 0.3 \text{ mm}$, 工件进给速度 $v_w = 0.20 \text{ m/min}$, 磨削速度 $v_s = 30 \text{ m/s}$ 时, 可以获得最小软化带弧长。

[关键词] GCr15 钢; 内圆磨削; 正交试验; 软化带; 显微硬度; 磨削用量

[中图分类号] TG 580.64; TG 156.33

An Orthogonal Experiment to the Softening Zone of Grind-Hardening Layer on the Internal Surface of Steel GCr15

GAO Shunxing¹, LIU Judong^{1,2}, HUANG Songwei³

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Key Technology University Engineering Research Center of Marine Platform Support System in Fujian Province, Xiamen 361021, China; 3. Engineering Training Center, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the grind-hardening orthogonal experiment on the internal surface in the radial plunge grinding way, the hardness distribution characteristics of the internal grind-hardening layer of the steel GCr15 was studied for obtaining the information about the optimal combination of grinding parameters. The results show that a softening zone exists in the wheel circumferential in-out incision zone of the workpiece. The softening zone is composed of a radial plunge zone, a circumferential engagement transition zone and a circumferential exit transition zone. The grinding depth has a remarkably significant effect on the arc length of softening zone, and the feed speed has a significant effect on the arc length of softening zone and the grinding wheel speed has a less pronounced effect on the arc length of softening zone. Furthermore, the distribution curve of the softening zone circumferential micro-hardness changes from “U” to “W” in shape as the grinding depth increases. To obtain the minimum arc length of softening zone, the optimum combination of grinding parameters determined in the experiment is as follows: the grinding depth is $a_p = 0.3 \text{ mm}$, the feed speed of workpiece is $v_w = 0.20 \text{ m/min}$, the grinding speed is $v_s = 30 \text{ m/s}$.

[收稿日期] 2019-12-31

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51676085); 福建省自然科学基金项目(2018J01489); 厦门市科技计划项目(3502Z20191022)

[作者简介] 高顺兴(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为磨削淬硬加工技术。通信作者: 刘菊东(1965—), 男, 教授, 博士, 硕导, 研究方向为高效精密加工技术等。

Keywords: steel GCr15; internal grinding; orthogonal experiment; softening zone; micro-hardness; grinding parameters

0 引言

磨削淬硬是利用磨削热对工件表面淬火的磨削工艺, 磨削淬硬后零件淬硬层可达到渗氮、喷丸强化、激光表面淬火工艺的效果^[1]。

自 1994 年 Brinksmeier 等^[2]提出“磨削淬硬”以来, 国内外学者分别采用平面磨削和外圆磨削等方法对 45 钢、40Cr 钢、42CrMo 钢、65Mn 钢和耐磨合金钢等中高碳(合金)钢进行了磨削淬硬试验, 探讨了磨削用量、砂轮特性、材料原始组织、冷却条件、预加应力、砂轮修整参数和预加热等对磨削淬硬层显微组织、显微硬度、淬硬深度、残余应力以及摩擦磨损性能的影响, 并对磨削淬硬过程进行了数值模拟^[3-11]。同时, 针对平面磨削淬硬过程, 对比分析了砂轮切入与砂轮切出阶段的淬硬机理^[12]。HUANG X 等^[13]在切入区施加热电偶, 优化了平面磨削淬硬切入区淬硬不足的问题。Zhang Y 等^[14]提出了在切入区, 中间区和切出区三个区域进行不同深度的磨削, 以提高淬硬层的均匀性。刘菊东等^[15]采用切入式平面磨削方式对 65Mn 钢的表面进行磨削淬硬试验研究, 结果表明, 磨削淬硬层可分为完全淬硬区和过渡区, 完全淬硬区可分为表层, 次表层和里层, 过渡区可分为上过渡区和下过渡区, 调质态材料可获得最佳的淬硬层深度。可见, 目前有关表面淬火常用钢的平面磨削淬硬研究已较为深入, 特别是工件长度方向上淬硬深度均匀性方面, 原因在于平面磨削的砂轮运动轨迹不封闭, 砂轮切入与切出时工件表层产生的磨削热不会相互影响。

对于砂轮运动轨迹封闭的圆周表面磨削淬硬, 尤其是表面宽度小于砂轮宽度的短圆柱面, 由于砂轮切入与切出工件时的周向位置重合, 已淬硬的切入区域势必受到砂轮切出时的热影响, 从而在圆柱表面的切入切出区出现一定范围的回火软化带, 进而影响磨削淬硬层的均匀性。但目前的外圆表面磨削淬硬尚未涉及回火软化带的研究。另一方面, 当磨削深度相同, 进行内圆磨削时, 砂轮与工件的接触面积大于外圆磨削时砂轮与工件的接触面积。此外, 内圆磨削的砂轮主轴组件比外圆磨削的砂轮刚性差, 以往有关外圆磨削淬硬工艺参数已不适用于内圆磨削淬硬加工。

本文以径向切入式内圆磨削正交试验为基础, 重点研究了 GCr15 轴承钢内圆磨削表面淬硬层软化带的变化规律; 同时, 以获得最小软化带弧长为目标, 结合正交试验分析方法优化磨削用量组合, 以期进一步完善磨削淬硬形成机理, 并为内圆表面磨削淬硬的工程应用提供实验依据。

1 试验方法

试验材料选用球化退火态 GCr15 钢, 硬度 210 HV, 原始组织如图 1 所示。试件尺寸: 外径 × 厚度 × 内径 = 110 mm × 10 mm × 70 mm。磨削淬硬试验在改装后的 M2120 内圆磨床上进行, 采用外径 60 mm、宽度 32 mm 的铬刚玉砂轮, 砂轮型号为 PA46L6V。

文献 [3, 15] 在磨削三要素中, 磨削深度 a_p 和工件进给速度 v_w 是影响磨削淬硬效果的显著因素。本文在正式试验前, 进行了预磨削试验, 发现磨削深度 $a_p < 0.1$ mm 时, 由于产生的磨削热无法使工件表层达到淬火相变温度 A_{c3} , 工件表层未出现磨削淬硬; 磨削深度 $a_p > 0.3$ mm 时, 由于磨削热和磨削力较大, 砂轮磨损严重, 甚至出现局部崩碎。当工件进给速度 v_w 较大时, 热作用时间变短, 淬硬效果不理想; 而当工件进给速度 v_w 较小时, 热作用时间长, 且砂轮易粘合工件表面。因此, 基于以上分析, 并结合现有的内圆磨床条件, 本试验采用如下方案: 磨削深度 $a_p = 0.1, 0.2, 0.3$ mm; 工件圆周进给速度 $v_w = 0.10, 0.15, 0.20$ m/min; 磨削速度 $v_s = 24, 27, 30$ m/s; 顺磨; 空冷。

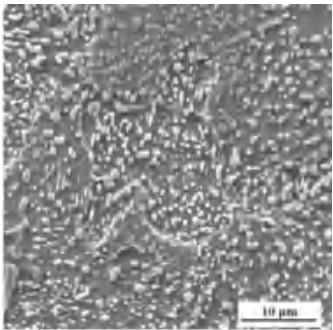


图 1 GCr15 钢原始组织
Fig.1 Matrix of GCr15 steel

试验采用“砂轮径向切入+工件周向进给”的磨削方式，磨削淬硬过程中砂轮相对工件的运动轨迹如图 2 所示。首先，工件静止、砂轮沿工件径向切入到要求的磨削深度后，径向进给运动停止；然后，工件随磨床头架作缓慢地圆周进给运动，旋转 360°后砂轮退出，完成内圆表面的磨削淬硬过程。

采用 $L_9(3^4)$ 的正交表，其中，3 因素 3 水平的因素表如表 1 所示，具体的试验方案如表 2 所示。每种磨削试验条件均重复进行 3 次试验。

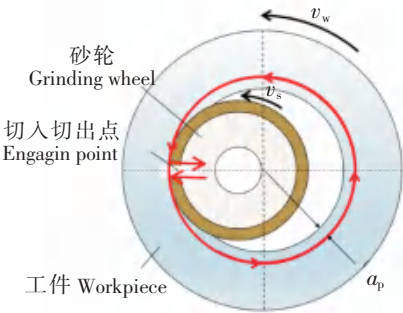


图 2 磨削加工路线示意图

Fig.2 Schematics of the grinding process track

切割后，将试样镶嵌、研磨和抛光，采用 HX-1000TMC 自动转塔显微硬度计和专用夹具，在距离加工表面 0.1 mm 的同心圆上测量 1 区的周向显微硬度。测量时，以径向切入点为中间点，每隔 1°测量 1 个硬度值，测量范围 $\pm 35^\circ$ ，显微硬度测量载荷为 9.81 N，加压时间为 10 s。用硝酸酒精溶液（硝酸 4 mL，酒精 96 mL）腐蚀抛光后的切割件，制成金相试样，采用 VHX-700F 型数码显微系统观察磨削淬硬件宏观形貌，采用 Phenom-XL 型扫描电镜观察微观组织形貌。

2 试验结果与分析

2.1 典型的磨削淬硬件宏观形貌

通过对所有试件磨削表层形貌的观察与分类，得到典型的磨削淬硬件及其淬硬层宏观形貌，如图 3 所示。图 3a 所示的形貌主要出现在 $a_p=0.1$ mm 的场合，图 3b 所示的形貌主要出现在 $a_p>0.1$ mm 的场合，两者的主要差异在于砂轮切入切出区域。

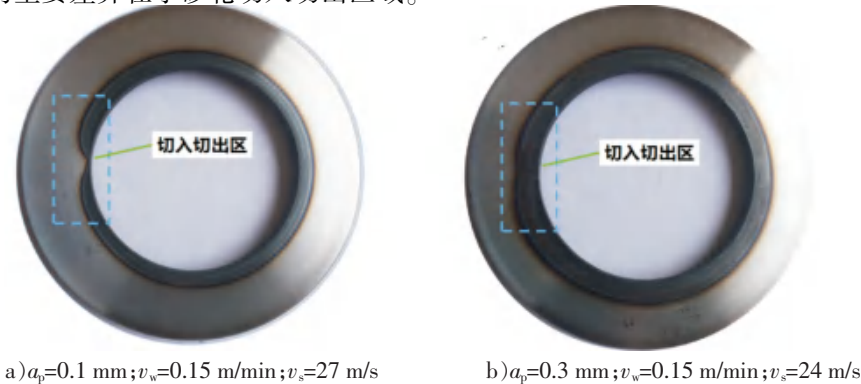


图 3 典型的磨削淬硬件

Fig.3 The typical grind-hardening workpiece

表 1 内圆磨削淬硬工艺的因素水平

Tab.1 Factor levels in the internal grinding hardening process

水平 Level	A $a_p/(mm)$	B $v_w/(m/min)$	C $v_s/(m/s)$
1	0.1	0.10	24
2	0.2	0.15	27
3	0.3	0.20	30

表 2 正交试验参数

Tab.2 Orthogonal experimental parameters

编号 No.	$a_p/(mm)$	$v_w/(m \cdot min^{-1})$	$v_s/(m \cdot s^{-1})$
1	0.1	0.10	24
2	0.1	0.15	27
3	0.1	0.20	30
4	0.2	0.10	27
5	0.2	0.15	30
6	0.2	0.20	24
7	0.3	0.10	30
8	0.3	0.15	24
9	0.3	0.20	27

通过对所有的磨削淬硬件进行观察, 并根据腐蚀后呈现的颜色特征和组成进行归类、整理, 砂轮切入切出区两种典型形貌如图 4 所示的。由图 4 可见, 砂轮切入切出区经腐蚀后, 其周向表层不同区域呈现出不同的颜色特征, 将其由左到右依次分为 A 区、B 区和 C 区等 3 个区域。其中: A 区为砂轮周向切出区; B 区为砂轮径向切入区且位于砂轮周向切入区、切出区之间; C 区为砂轮周向切入区。

在磨削深度 $a_p=0.1\text{ mm}$ 时, 腐蚀后的 B 区呈现与试件基体相同的灰色, 为未淬硬区。磨削深度 $a_p=0.3\text{ mm}$ 时, 腐蚀后的 B 区呈暗灰色的月牙形, 其左、右两侧尖部还分别与 A 区、C 区重叠, 且在紧邻 A 区、C 区的局部区域呈浅灰色, 具有回火迹象。

A 区和 C 区腐蚀后均呈暗灰色, 均为淬硬区。不同的是, A 区左侧为周向连续进给区, 从左到右, 随着磨削深度的逐渐减小, 产生的磨削热相应减小, 淬硬层深度相应缓慢减小, 直至为 0; 而 C 区右侧也为周向连续进给区, 从左到右, 随着磨削深度的逐渐增大, 产生的磨削热相应增大, 超过淬火相变温度的区域增大, 导致淬硬层深度相应增大, 并趋于均匀。

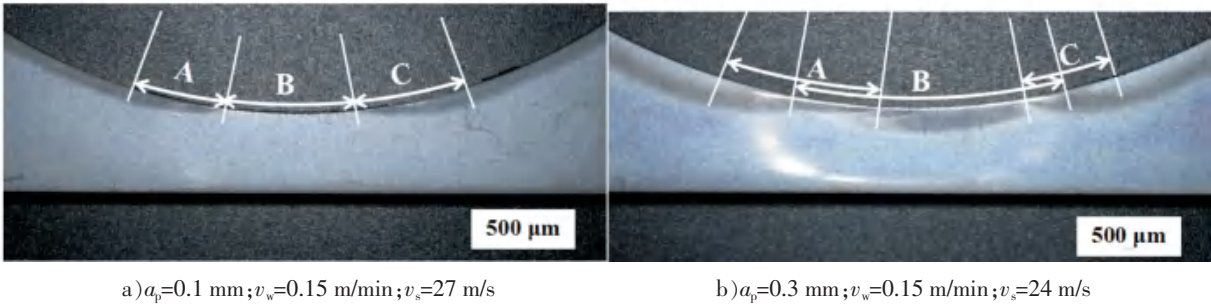


图 4 淬硬件砂轮切入切出区典型的宏观形貌

Fig.4 Typical macrograph of the grinding wheel cutting-in and cutting-out zone for the grind-hardening workpiece

2.2 硬度分布

对所有试件砂轮切入切出区周向显微硬度进行测量, 并进行分类、归纳, 获得了不同磨削深度砂轮切入切出区周向显微硬度典型分布曲线, 如图 5 所示。图 5a 所呈现的“U”型分布出现在磨削深度 $a_p=0.1\text{ mm}$ 的场合; 图 5b 所呈现的“W”型分布出现在磨削深度 $a_p=0.3\text{ mm}$ 的场合。

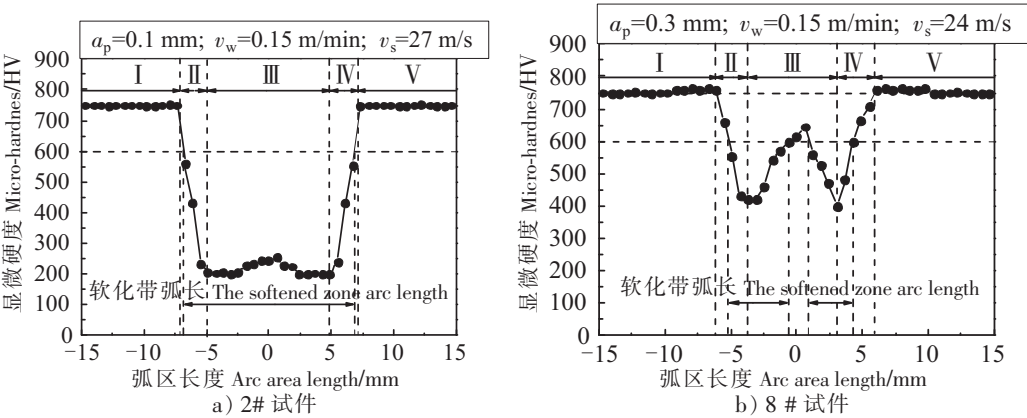


图 5 淬硬件砂轮切入切出区周向显微硬度典型分布曲线

Fig.5 Typical circumferential micro-hardness distribution curve of the grinding wheel circumferential cutting-in or cutting-out zone for the grind-hardening workpiece

由图 5 可见, 硬度曲线中的 I 区和 V 区分别对应淬硬件的砂轮周向切出完全淬硬区和砂轮周向切入完全淬硬区, 其硬度平均值高达 750 HV 左右。硬度曲线中的 II 区和 IV 区分别对应淬硬件的砂轮周向切出过渡区和砂轮周向切入过渡区, 在磨削深度 $a_p=0.1\text{ mm}$ 时, 其硬度值在 750 ~ 210 HV 之间变化; 在磨削深度 $a_p=0.3\text{ mm}$ 时, 其硬度值在 750 ~ 400 HV 之间变化。

硬度曲线中的 III 区对应淬硬件的砂轮径向切入区, 当磨削深度 $a_p=0.1\text{ mm}$ 时, 由于砂轮径向切

入过程中产生的磨削热量未能使工件表层达到淬火相变温度以上，因此，砂轮径向切入区未产生淬硬，Ⅲ区的硬度仍为基体硬度值（210 HV 左右），其软化带主要由砂轮径向切入区和过渡区组成。随着磨削深度 a_p 的增加，磨削热量相应增大，在磨削深度 $a_p = 0.3\text{ mm}$ 时，砂轮径向切入区表层加热温度达到淬火相变温度以上时，原始组织奥氏体化，并在自冷却中转变为马氏体；随后，在砂轮周向磨削过程中，靠近砂轮周向切入和砂轮周向切出区域的部分马氏体组织又受到磨削热的影响而产生局部回火，从而导致其Ⅲ区的硬度值在 650 ~ 400 HV 之间变化，其软化带主要由过渡区和回火区组成。

2.3 正交实验分析

若将淬硬件砂轮切入切出区硬度值为高硬度平均值 750 HV 的 80% 以下的区域^[7]定义为软化带（见图 6），则不同磨削用量条件下，软化带弧长 L 如表 3 所示。

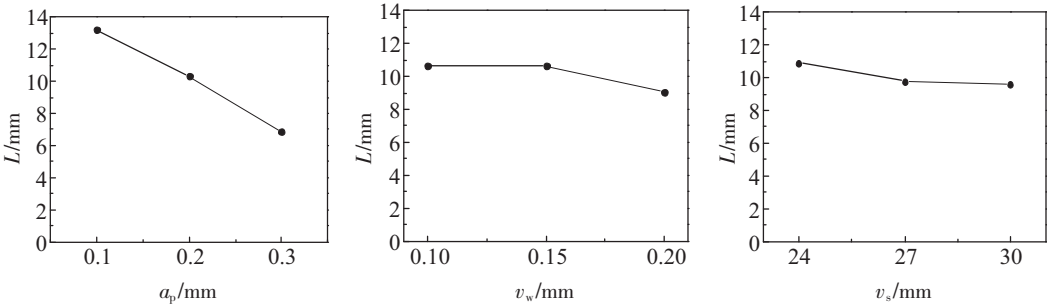


图 6 因素水平变化趋势与软化带弧长的关系

Fig.6 Relationship between the trend of factor level and the softened zone arc length

2.3.1 直观分析

各因素软化带弧长 L 的极差分别为 $R_{ap} = 6.32$; $R_{vw} = 1.60$; $R_{vs} = 1.10$ 。可见,磨削用量中,各因素对软化带弧长 L 的影响大小均为:磨削深度 $a_p >$ 工件进给速度 $v_w >$ 磨削速度 v_s 。

各因素水平对软化带弧长 L 的影响趋势如图 6 所示。由图 6 可见:随着磨削深度、工件进给速度和磨削速度的增大,软化带弧长 L 均呈现减小趋势,但变化的程度略有不同,其中以磨削深度的变化趋势最为显著。为了使软化带弧长 L 最小,磨削深度 a_p 选用水平 3 = 0.3 mm,工件进给速度 v_w 选用水平 3 = 0.2 m/min,磨削速度 v_s 选用水平 3 = 30 m/min,即最优组合为 $A_3B_3C_3$ 。

2.3.2 方差分析

表 4 是软化带弧长 L 方差分析结果。根据不同显著性下的临界值 $F_{0.75}(2,2) = 3.0$ 、 $F_{0.90}(2,2) = 9.0$ 、 $F_{0.95}(2,2) = 19$ 和 $F_{0.99}(2,2) = 99$,并结合表 4 中不同因子的 F 值,可见磨削深度 a_p 是非常显著因素,工件进给速度 v_w 是显著因素,磨削速度 v_s 为一般显著因素。

表 4 软化带弧长方差分析

Tab.4 Variance of the softened zone arc length

方差来源	平方和 Sum of squaresS	自由度 Degree of freedom f	均方和 Mean square sum V	F 值 Value	显著性 Significance
A	60.15	2	30.08	109.09	非常显著 Very marked
B	4.99	2	2.50	9.06	显著 Marked
C	2.85	2	1.42	5.17	一般显著 Generally marked
误差 Errorse	0.55	2	0.28		
总和 Sum	68.54	8			

3 结论

1) 采用径向切入磨削方式进行内圆表面磨削淬硬加工时,工件的砂轮切入切出区存在一定长度的回火软化带。

2) 软化带显微硬度曲线分别呈现“U”形和“W”形特征,并随着磨削深度的增大,“U”形曲线转变为“W”形曲线。

3) 本试验条件下,磨削深度对软化带弧长的影响最为显著,工件进给速度对软化带弧长的影响显著,磨削速度对软化带弧长的影响一般显著。

4) 从降低软化带弧长的角度出发,宜采用磨削深度 $a_p = 0.3 \text{ mm}$ 、工件进给速度 $v_w = 0.2 \text{ m/min}$ 、磨削速度 $v_s = 30 \text{ m/min}$ 的磨削用量组合。

[参考文献]

- [1] BRINKSMEIE E, BROCKHOFF T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process [J]. CIRP annals, 1996, 45(1): 283-286.
- [2] BRINKSMEIE E, BROCKHOFF T. Randschicht-wörmebehandlung dursh schleifen [J]. Häerterei-Technische Mitteilungen, 1994, 49(5): 327-330.
- [3] BROCKHOFF T. Grinding-hardening: A comprehensive view [J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 255-260.
- [4] ZARUDI I, ZHANG L C. Mechanical property improvement of quenchable steel by grinding [J]. Journal of materials science, 2002, 37(18): 3935-3943.
- [5] 刘菊东,王贵成,陈康敏,等. 非淬硬钢磨削表面硬化层的试验研究 [J]. 中国机械工程, 2005(11): 1013-1017.
- [6] NGUYEN T, ZARUDI I, ZHANG L C. Grinding-hardening with liquid nitrogen: mechanisms and technology [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(1): 97-106.
- [7] SALONITIS K, CHONDROS T, CHRYSSOLOURIS G, et al. Grinding wheel effect in the grind-hardening process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 38(1/2): 48-58.
- [8] NGUYEN T, ZHANG L C, SUN D L, et al. Characterizing the mechanical properties of the hardened layer induced by grinding-hardening [J]. Machining Science and Technology, 2014, 18(2): 277-298.
- [9] ZHANG Y, GE P, BE W. Plane grind-hardening distortion analysis and the effect to Grind-hardening layer [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1/2/3/4): 431-438.
- [10] 刘菊东,王贵成,陈康敏. 磨削用量对 40Cr 钢磨削淬硬层的影响 [J]. 中国机械工程, 2006(17): 1842-1845.
- [11] NGUYEN T, LIU M, ZHANG L, et al. An investigation of the grinding-hardening induced by traverse cylindrical grinding [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(5): 051008.
- [12] LIU M, ZHANG K, XIU S. Mechanism investigation of hardening layer hardness uniformity based on grind-hardening process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 88(9/10/11/12): 1-10.
- [13] HUANG X, REN Y, ZHENG B, et al. Experiment research on Grind-hardening of AISI5140 steel based on thermal compensation [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(8): 3819-3827.
- [14] ZHANG Y, GE P, BE W. The study for variable grinding depth to control plane grind-hardening layer depth distribution [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84: 1269-1276.
- [15] 王贵成,刘菊东,裴宏杰. 磨削淬硬加工技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)