

## 预加热磨削强化均匀性实验研究\*

黄向明<sup>†</sup>, 吴为, 任莹晖, 李通

(湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对磨削强化过程中磨削强化层沿工件磨削方向分布不均匀以及磨削后工件表面产生变形的情况,提出了一种基于温度补偿的磨削强化层均匀性改善方法.通过铜电极对工件导电加热,并在工件切入端安装304不锈钢垫片,通电后形成串联的闭合回路.利用304不锈钢的电阻率大,导热系数小的特性,在预加热条件下工件切入端形成局部高温,达到对工件切入端进行温度补偿的目的,从而提高切入端的磨削强化层深度,进而提高工件磨削强化层深度分布的均匀性.实验中研究了预加热温度和304不锈钢厚度对磨削强化层分布和工件变形情况的影响规律.实验研究结果表明:磨削力和工件磨削强化层深度随着预加热温度升高而增加;随着工件磨削切入端所加不锈钢垫片厚度的增加,磨削后工件变形减少,同时沿工件磨削方向磨削强化层深度分布的均匀性相应提高.

**关键词:**磨削强化;温度补偿;均匀性;工件变形

**中图分类号:**TG580.6

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Uniformity of Preheated Grind-hardening

HUANG Xiangming<sup>†</sup>, WU Wei, REN Yinghui, LI Tong

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In this paper, referring to the uneven distribution of the grinding harden layer along the grinding direction and the deformation of the workpiece surface after grinding, a kind of grinding method was put forward based on the temperature compensation to improve the uniformity of the grinding harden layer. The workpiece was electrically heated by a copper electrode with a 304 stainless steel gasket mounted at the cut-in zone of the workpiece, and a closed loop was formed after electrifying. Because the 304 stainless steel is of the high resistivity and low thermal conductivity, the high temperature on the cut-in zone appeared. Thus, the increased harden layer was formed on the cut-in zone, and the uniformity for the grinding harden layer distribution can be also improved. The distribution of grind-hardening layer and the workpiece deformation were studied under the different preheating temperature and different thickness of the 304 stainless steel. The results show that the grinding force and the grinding harden layer depth can be increased under the preheating condition. With the increasing thickness of the stainless steel gasket at the cut-in zone of the workpiece, the deformation of the ground workpiece is reduced. At the same time, the

\* 收稿日期:2017-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475158), National Natural Science Foundation of China(51475158)

作者简介:黄向明(1971-),男,湖南宁乡人,湖南大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: h\_xiangming@aliyun.com

uniformity for the harden layer depth distribution is also improved.

**Key words:** grind-hardening; temperature compensation; uniformity; workpiece deformation

磨削表面强化技术是集成磨削与热处理于一体的复合加工技术,它是利用磨削过程中产生的热量对工件表面进行强化处理,在力-热-相变的耦合作用下实现表面强化,从而提高工件表面的强度、硬度和耐磨性<sup>[1]</sup>.磨削强化过程省去了热处理工艺,且在磨削强化过程中产生的磨削强化层有助于提高工件的疲劳强度和抗摩擦磨损性能.因而有必要对磨削强化工艺进行研究.

磨削强化工艺由德国 Brinksmeier 和 Brokchoff 首次提出<sup>[2]</sup>,随后国内外学者对磨削强化工艺及强化层均匀性方面进行了研究.郭瑜等<sup>[3]</sup>将磨削过程分为切入段、中间段和切出段,并结合有限元温度仿真分析了磨削强化层沿工件磨削方向上的分布情况.相关研究得出,磨削后磨削强化层沿工件磨削方向深度分布不均匀,主要表现在磨削强化后工件切入端磨削强化层深度较浅,而中间和切出端磨削强化层分布较深<sup>[4-8]</sup>.磨削过程中会产生大量的热量,从而引起工件热变形,相关研究表明,由于磨削过程中的热变形导致磨削后工件呈现凹形<sup>[9-12]</sup>.工件热变形的变化会导致磨削力的变化,从而改变流入工件的热流密度,影响磨削温度场,最终导致磨削强化层分布不均匀.上述研究虽取得了一系列的成果,但有关改善工件磨削强化层均匀性和减小工件变形的研究相对较少.本文以平面磨削强化实验为基础,并结合预加热磨削强化方法<sup>[12]</sup>,利用 304 不锈钢电阻率大、导热系数小的特点,将其放置在工件切入端,实现切入端温度补偿,研究磨削后沿工件磨削方向强化层深度分布均匀性及工件变形,进而探索出提高工件磨削强化层均匀性和减少工件变形的有效方法,为该工艺的工程实际应用提供实验依据.

## 1 实验条件与方法

### 1.1 实验装置及材料

预加热磨削实验装置图见图 1 和图 2.通过低压直流电源(8V)对工件进行加热,工件的两端是铜电极加热装置,铜电极和工件与夹具之间紧贴着云母片,目的在于隔热和绝缘,防止铜电极和工件与夹具直接接触千分表,从而将大量热量传入夹具,影响

实验结果.工件的切出端直接与铜电极接触,工件切入端通过不同厚度的 304 不锈钢与铜电极接触,保证电源从铜电极的正极流向负极,形成闭合回路.通过调节电源电流的大小来控制加热温度,并用热电偶测量工件切入端、中间处和切出端三个位置的温度,通过热电偶、信号放大采集器以及温度数显仪表来测量工件加热温度并控制直流电源.夹具下端安装三向压电晶体测力仪(Kistler-9257B),采样频率为 5 000 Hz,实时测量磨削过程的磨削力.

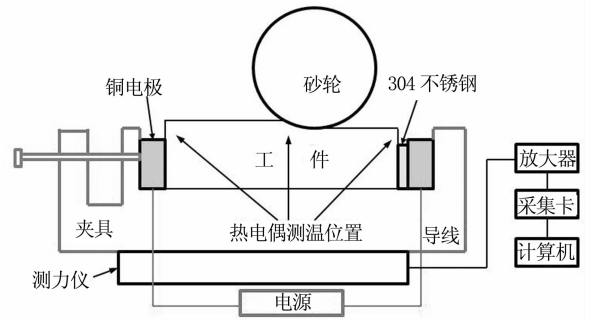


图 1 预加热磨削实验装置简图  
Fig. 1 Schematic diagram of preheating grinding experiment device

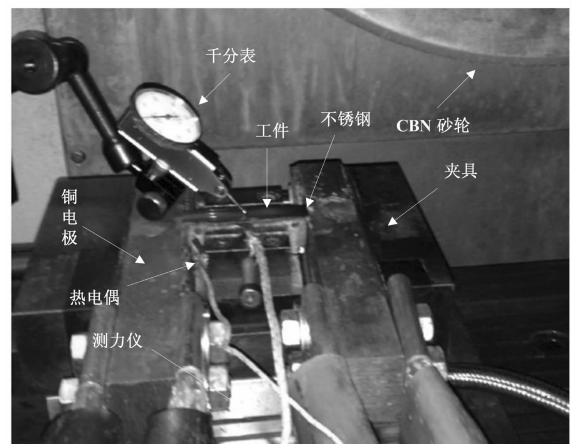


图 2 预加热磨削实验装置图  
Fig. 2 Experimental setup of preheating grinding

实验材料为 40Cr,其化学成分见表 1,工件的长宽高分别为 60 mm×12 mm×20 mm.工件在实验之前进行去应力退火处理,材料的平均硬度为 HV250.实验用的砂轮为 CBN 砂轮,其直径 400 mm,粒度 100,结合剂为陶瓷结合剂,采用单颗粒金

刚石笔修整砂轮.

表1 40Cr化学成分(质量分数)  
Tab.1 Chemical composition of 40Cr %

C	Mn	Mo	Si	Cr
0.37~0.45	0.50~0.80	0.37~0.45	0.17~0.37	0.80~1.10

## 1.2 实验方法及加工参数

实验是在 MKL7132 成型磨床上进行的,磨削工艺参数如表 2 所示.实验分为 4 组,A 组为常温磨削、B 组为预加热温度为 200 °C 条件下磨削、C 组为预加热温度为 200 °C 且工件切入端放置厚度为 2 mm 的 304 不锈钢垫片条件下磨削、D 组为预加热温度为 200 °C 且工件切入端放置厚度为 6 mm 的 304 不锈钢垫片条件下磨削.磨削前接通电源对工件进行加热,当工件中间位置的温度达到 200 °C 时,即表 2 中提到的预加热温度为 200 °C,断开电源进行磨削.

表2 磨削工艺参数  
Tab.2 Grinding process parameters

磨削参数	参数值
砂轮	CBN
磨削速度 $V_s/(m \cdot s^{-1})$	50
理论磨削深度 $a_p/mm$	0.2
工作台速度 $V_w/(m \cdot min^{-1})$	0.6
磨削方式	逆磨
冷却方式	干磨
加热温度/°C	常温,200
304 不锈钢厚度/mm	0.2,6

表 3 为工件切入端、中间位置及切出端的温度值.由于在对工件加热过程中会产生热膨胀,从而影响实际的磨削深度,因此为了使所有的工件实际磨削深度一致,先对工件加热至实验所需温度,然后用千分表测出工件中间位置的热变形量,用实际磨削深度减去热变形量就是砂轮需要进给的深度,从而保证了实验中所有工件磨削深度的一致性.

表3 预加热工件磨削前不同位置温度对比表  
Tab.3 Preheating temperature of the different grinding zone

实验组号	不锈钢厚度/mm	切入端温度/°C	中间处温度/°C	切出端温度/°C
D	6	322	200	134
C	2	263	200	172
B	0	218	200	223

工件磨削完后,先用螺旋测微器测出沿工件磨削方向上工件磨削表面八个位置的变形值,然后用电火花线切割机沿工件长度方向上切取 4 个 15

mm×5 mm×4 mm 的试样,最后用 XQ-2B 镶嵌机进行镶嵌.将镶嵌好的工件用砂纸进行打磨并用金相抛光机抛光后,用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀其表面,待工件表面干燥后,通过金相显微镜观察磨削强化层组织,采用 HV-1000 维氏显微硬度计测量磨削强化层的显微硬度,并测量工件沿长度方向上的磨削强化层深度.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 磨削力

图 3 是四组实验的切向磨削力  $F_t$  随时间变化的对比图.从图中可以看出,在切入段磨削力从零逐渐增加,这是因为在切入段内( $t=0$  到  $t=0.9$  s),砂轮从刚接触工件开始,实际的磨削深度是逐渐增加的,导致在第一个接触弧长内磨削力增大<sup>[13]</sup>.

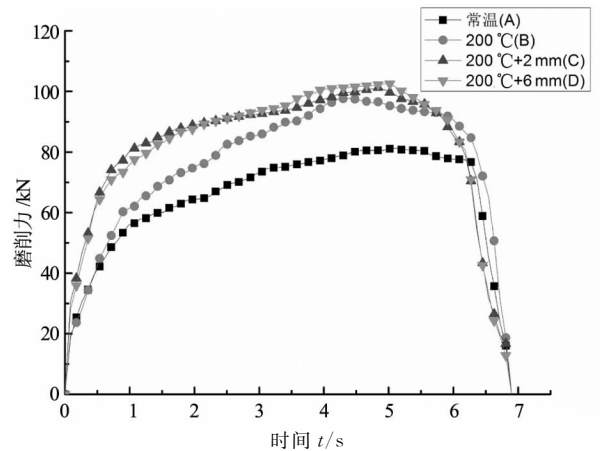


图3 切向磨削力对比图

Fig.3 Tangential grinding force contrast diagram

在中间阶段( $t=0.9$  s 到  $t=4$  s)磨削力也是逐渐增加,这主要是由于磨削热的增加导致磨削温度升高后,工件的热变形增加,从而导致工件的实际磨削深度增加.在中间阶段后期( $t=4$  s 到  $t=6$  s)由于磨削温度和磨削变形基本趋于稳定状态,因此,磨削力亦基本趋向于稳定状态.切出阶段( $t=6$  s 到  $t=6.9$  s),由于实际磨削深度降低导致磨削力在该时间段内迅速减小.预加热条件下的中间阶段磨削力要比常温磨削条件下的磨削力大,这主要是因为预热温度的升高,引起未磨区温度升高,工件整体的热变形相比常温磨削增加,同时磨削高温也会影响到砂轮磨损,从而导致磨削力增加.

同时从图 3 可知,C 和 D 两组实验切入端切向磨削力均大于 A 和 B 两组实验.由于预加热导致不同区域的温度变化,从表 3 可知 C 和 D 组预加热温度

在切入端最高,因此其热变形增加,导致在切入端实际磨削深度相应增加,从而使得其切向磨削力增加.

### 2.2 磨削强化层深度分布

磨削强化层深度分布的不均匀性主要表现在磨削切入区磨削强化层很浅,而在中间磨削稳定区域和切出阶段磨削强化层深度明显增大. 本文主要通过四组对比实验来比较沿工件磨削方向磨削强化层深度分布的均匀性.

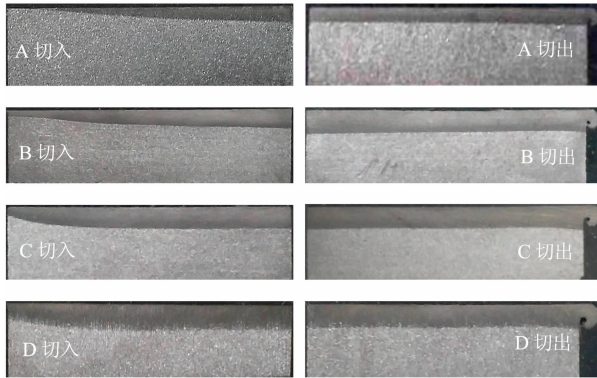
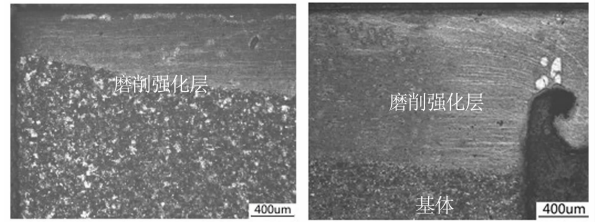


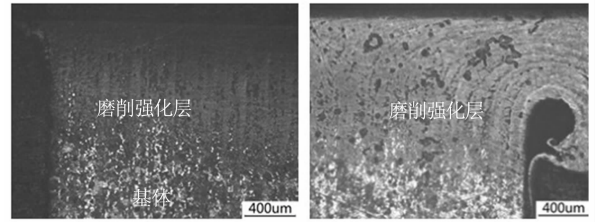
图 4 磨削强化层深度分布情况实物图  
Fig. 4 Map of depth distribution of grinding hardened layer

图 4 是四组实验工件磨削强化层深度分布情况实物图,即将沿工件长度方向上切取的 4 个试样(长度 15 mm)镶嵌后用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀其表面所得到的磨削强化层深度分布情况实物图. 从图可以看出 A 组即常温条件下切入端的磨削强化层相对比较浅,而通过预加热以及增加不锈钢垫片能提高磨削强化层深度和均匀性.

图 5 为四组实验工件切入端和切出端的金相组织图,其中上面较细密的组织结构部分为磨削强化层,下面较粗大的组织结构为基体.



(c)C 组工件



(d)D 组工件

图 5 四组实验工件切入端(左)和切出端(右)金相图  
Fig. 5 Metallographic structure of the cut-in(left) and cut-out(right) zone

通过金相显微镜的测量工具并结合维氏硬度计测量组织的微观硬度,当微观硬度值超过 HV500 即为磨削强化层<sup>[14]</sup>,其沿工件磨削方向磨削强化层深度分布的情况如图 6 所示.

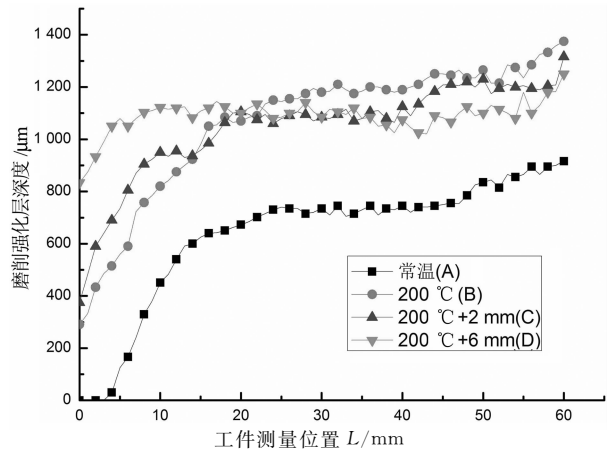
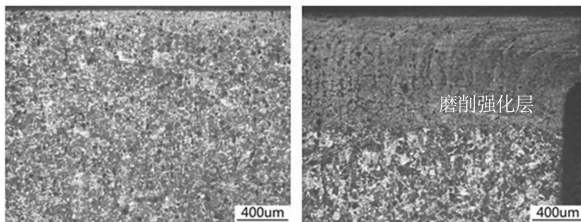


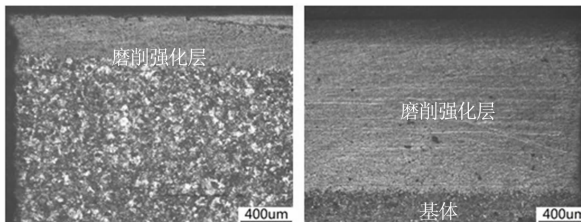
图 6 沿工件磨削方向强化层深度分布图  
Fig. 6 Depth distribution of the hardened layer along workpiece grinding direction

由图 6 可知,B、C、D 三组实验的磨削强化层深度都要高于常温磨削的强化层深度,说明预加热磨削能提高磨削后工件强化层深度. 预加热磨削条件下由于其切向磨削力增加导致其磨削热比常温磨削要大,因而在预加热温度和磨削热的综合作用下增加了工件表面的总能量,导致表面及次表面的温度升高<sup>[12]</sup>,使得工件表层金属达到淬火相变温度  $A_{c3}$  以上的区域变深,磨削强化层深度增加.

A 和 B 两组实验磨削强化层沿工件磨削方向深度分布规律趋于一致,都是在切入端磨削强化层



(a)A 组工件



(b)B 组工件

深度较浅,随着磨削加工过程进行,磨削强化层深度逐渐增加并在中间处趋于稳定,在切出端强化层又稍微增加.其中常温磨削条件下磨削强化层的均匀性最差.原因在于在砂轮切入阶段(一个接触弧长),实际的磨削深度是从零到理论磨削深度逐渐增加,磨削开始阶段传入工件的热量较少,使得切入端的工件表层金属达到淬火相变温度  $A_{c3}$  以上的区域较浅,因此,工件切入端磨削强化层深度较小.随着磨削加工的进行,磨削理论深度趋于稳定,但由于工件的热膨胀现象,使得实际磨削深度增大,磨削温度升高,导致磨削强化层深度增大.在中间阶段后期,磨削温度基本稳定,因此,磨削力和磨削强化层深度也基本趋于稳定.在砂轮切出阶段,由于实际磨削深度的减少,磨削热量会相应减少,但磨削热受工件端面边界绝热的影响,热量传递受阻并聚集于其末端,当热量聚集的影响超过磨削深度减小对热量的影响时,磨削温度会升高,从而导致磨削强化层深度也会相应增加. C、D 两组实验相对 A、B 来说,工件切入端磨削强化层深度提高,原因在于 304 不锈钢的电阻率相对铜电极和工件要高,从而温度上升快,如表 3 所示,并且不锈钢的导热系数相对偏低,其导热性能低于工件,因而工件自身的热量不易向不锈钢传递,从而在切入端局部形成高温.工件切入端温度高、热膨胀大,切入端实际磨削深度会增加,在预加热和磨削热的共同作用下,工件切入端达到淬火相变温度  $A_{c3}$  以上的区域变深,磨削强化层深度增大.实验中 D 组切入端磨削强化层深度为最大,基本跟中间、切出阶段值相当,原因在于在不锈钢垫片侧面不变的情况下,厚度越大,电阻越大,在保证中间段相同温度情况下( $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),6 mm 的不锈钢垫片比 2 mm 的不锈钢垫片产热更多,从而对工件切入端温度补偿效果更好,因此,在工件的切入端加入不锈钢垫片能增加工件切入端的磨削强化层深度,从而改善磨削后沿工件磨削方向强化层深度分布的均匀性.

### 2.3 工件变形

磨削强化过程中会产生大量的热量,这就使得在平面磨削强化工件时,磨削热-力作用会引发工件的变形<sup>[9]</sup>,从而影响实际磨削深度,已有研究表明由于热变形导致磨削后工件呈现凹形<sup>[11]</sup>,这是由于磨削过程中磨削热沿工件磨削方向分布不均匀,引起工件未磨削区向上膨胀变形,使得磨削时实际磨削深度增大,造成磨削后工件出现尺寸偏差.磨削深度的变化会引起切向磨削力的变化,从而流入工件的

热流量也发生变化,最终导致磨削强化层的不均匀.实验中采用螺旋测微器沿着工件磨削方向依次测量磨削表面各点到工件底面的距离,用各测量得到的距离值分别减去第一点的距离  $L_1$ ,即可得到沿工件磨削方向不同位置的变形量.图 9 是磨削后各工件沿工件长度方向的工件变形情况.

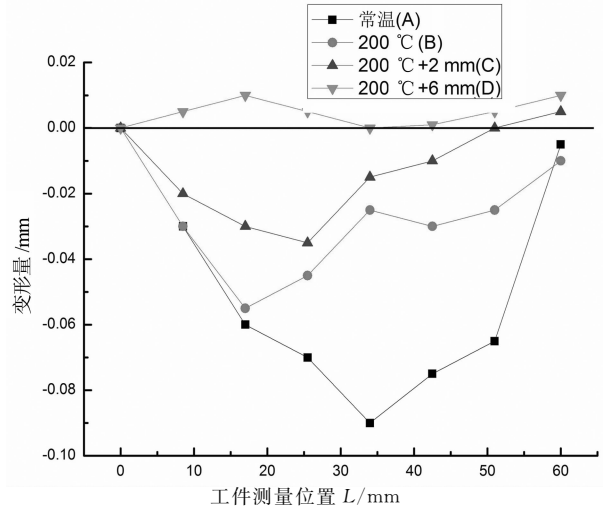


图 7 沿工件长度方向上的工件变形  
Fig. 7 Workpiece deformation at the workpiece length direction

从图 7 可以看出,常温磨削条件下的工件其磨削后变形呈凹形,且变形比较大,这与已有研究结果相符合. B、C 组工件变形也为凹形,但其变形量比 A 组工件要小,原因在于 B、C 组实验均为预加热条件下磨削,对于 B、C 组工件来说,铜电极直接与工件的两端接触对其加热,这就使得工件的切入端温度相对中间处偏高,从而热膨胀增大,磨削时在磨削热与预加热的共同作用下,砂轮实际磨削深度相对常温磨削增大,减小了与工件中间区域磨削深度的差距,从而磨削后工件变形相对减小. D 组的工件变形比其他三组明显减小且磨削后工件有略微向上凸起趋势.这说明工件切入端热变形明显增大了,导致切入端去除量过多,磨削后工件有向上凸起的趋势.从图 7 中的结果可以看出,较厚的不锈钢因其电阻较大,产热多,温度补偿效果好,其磨削后工件变形也相对较小.

## 3 结论

通过预加热磨削强化实验,利用 304 不锈钢的特性,对工件的切入端进行温度补偿,实验研究结果表明:

1) 对工件进行预加热磨削,能提高磨削后工件

磨削强化层深度.

2)在工件的切入端加 304 不锈钢能提高沿工件磨削方向强化层深度分布的均匀性,随着不锈钢厚度适当的增加,其产热越多,沿工件磨削方向上磨削强化层的均匀性越好.

3)常温磨削后工件呈现凹形,预加热磨削相对于常温磨削工件变形要小,在切入端加 304 不锈钢垫片且适当增加不锈钢垫片厚度能减少工件变形.

## 参考文献

- [1] 候亚丽,李长河,丁玉成.绿色切削磨削加工技术[J].工具技术,2011,43(4):3-5.  
HOU Y L, LI C H, DING Y C. New technology investigation of green cutting and grinding process[J]. Tool Technology, 2011,43(4):3-5. (In Chinese)
- [2] BRINKSMERIER E, BROCKHOFF T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1996, 45(1):283-286.
- [3] GUO Y, XIU S, LIU M, *et al.* Uniformity mechanism investigation of hardness penetration depth during grind-hardening process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,89 (5/8) : 1-10.
- [4] ZHANG Y, GE P, BE W. Plane grind-hardening distortion analysis and the effect to grind-hardening layer[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1/4):431-438.
- [5] GUO Y, XIU S, LIU M, *et al.* Uniformity mechanism investigation of hardness penetration depth during grind-hardening process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016,89 (5/8) :1-10.
- [6] ZHANG Y, GE P Q, BE W. The study for variable grinding depth to control plane grind-hardening layer depth distribution [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5/8):1269-1276.
- [7] 黄松伟.磨削方式对 65Mn 钢磨削淬硬层及其均匀性的影响[J].武汉理工大学学报,2011,35(6):1269-1272.  
HUANG S W. Influence of the grinding method on harden layer and its uniformity of 65Mn steel[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011,35(6):1269-1272. (In Chinese)
- [8] ZHANG Y, GE P Q, BE W B. Plane grind-hardening distortion analysis and the effect to grind-hardening layer[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015,78 (1/4) : 1-10.
- [9] WANG X Z, WANG W S, YU T B, *et al.* Study on radial deformation of CBN grinding wheel considering centrifugal force and grinding heat [J]. Advanced Materials Research, 2013, 797:500-504.
- [10] ZHANG Y, GE P Q, ZHANG L, *et al.* The numerical simulation for thermal deformation in grinding hardening thin work-piece[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501(55):500-504.
- [11] 张莹,葛培琪,张磊.磨削淬硬工件热变形数值分析[J].工具技术,2012, 46(1):9-11.  
ZHANG Y, GE P Q, ZHANG L. Numerical analysis for thermal deformation in grind-hardening [J]. Tool Technology, 2012, 46(1):9-11. (In Chinese)
- [12] HUANG X M, REN Y H, ZHENG B, *et al.* Experiment research on grind-hardening of AISI5140 steel based on thermal compensation[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2016, 30(8):3819-3827.
- [13] 周志雄,周德旺,毛聪,等.平面磨削接触长度的实验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(2):27-31.  
ZHOU Z X, ZHOU D W, MAO C, *et al.* Experimental study of the contact length in surface grinding[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2009,36(2):27-31. (In Chinese)
- [14] 杨迪,李福欣.显微硬度试验[M].北京:中国计量出版社,1988:22-26.  
YANG D, LI F X. Microhardness test [M]. Beijing: China Metrology Publishing House,1988:22-26(In Chinese)