

# 新型点磨削砂轮磨削表面/亚表面质量研究

尹国强, 巩亚东, 李雨晴, 宋俊利  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 区别于传统外圆磨削,点磨削加工砂轮轴线与工件轴线不平行,而是存在倾斜角 $\alpha$ .设计了一种带有粗磨区倾角 $\theta$ 的新型点磨削砂轮,这种砂轮具有磨除率大、磨削表面粗糙度小等优点.由于 $\alpha$ 和 $\theta$ 的存在,改变了砂轮-工件接触区的几何关系,磨削表面/亚表面质量也随之发生变化.采用制备的新型砂轮,磨削材料为QT700的工件,检测工件表面/亚表面的金相组织、加工硬化和残余应力.分析 $\alpha$ 、 $\theta$ 以及磨削参数对表面/亚表面质量的影响规律,给出获得最优表面/亚表面质量的工艺参数,可知新型点磨削砂轮能够提高工件表面/亚表面质量.

**关 键 词:** 新型点磨削砂轮;金相组织;加工硬化;残余应力  
**中图分类号:** TH 161      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0835-06

## Study on the Grinding Surface and Subsurface Quality of Novel Point Grinding Wheels

YIN Guo-qiang, GONG Ya-dong, LI Yu-qing, SONG Jun-li  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: YIN Guo-qiang, E-mail: yinguoqiang@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** Different from the traditional cylindrical grinding, the axis of a grinding wheel is not parallel to the workpiece axis in the point grinding process, but rotates at an inclining angle  $\alpha$ . A novel grinding wheel with angle  $\theta$  is proposed, which is featured by high grinding rate and small surface roughness. Because of  $\alpha$  and  $\theta$ , the contact between the grinding wheel and workpiece has been changed, and the surface/subsurface quality is also changed. The novel wheels with different angles  $\theta$  are used to grind QT700 workpieces. Then, the metallographic structure, work hardening and residual stress of the workpiece surface/subsurface are tested. The influence of  $\alpha$ ,  $\theta$  and grinding parameters on the surface/subsurface quality is analyzed, and the process parameters for optimal surface/subsurface quality are obtained. In conclusion, the novel point grinding wheel can improve the surface/subsurface quality of workpieces.

**Key words:** novel point grinding wheel (NPGW); metallographic structure; work hardening; residual stress

与传统外圆磨削相比,点磨削加工工艺砂轮轴线与工件轴线不平行,而是倾斜一定角度 $\alpha$ ,把 $\alpha$ 称作倾斜角,使砂轮与工件由线接触变成理论上的点接触,降低了砂轮与工件的接触面积<sup>[1-2]</sup>,减小了磨削力<sup>[3]</sup>.表面质量是磨削性能的一个重要评估指标,亚表面质量对零件的机械性能也有着重要的影响.国内外学者对磨削加工的表面/亚表面质量做了一些研究工作.Chakrabarti等<sup>[4]</sup>通过研究磨粒运动轨迹,建立了不同加工参数下表面形貌和表面粗糙度的预测模型.Fricker等<sup>[5]</sup>研究了CBN砂轮磨削42CrMo4合金钢的表面加工硬化,并且预测了硬化层的厚度.Umbrello等<sup>[6]</sup>在磨削实验中发现较低的砂轮速度和冷却液的使用增加了硬化率.杜随更等<sup>[7]</sup>研究了磨削高温合金GH4169表面变质层的微观组织结构,指出在加工表面/亚表面发生了剧烈的塑性变形.黄新春

等<sup>[8]</sup>通过正交试验研究了难加工材料磨削表面的残余应力,指出残余应力随着磨削深度的增加而增大,随着砂轮速度的增加而减小,磨削深度影响起主要作用.但是,现有文献主要集中于传统磨削,对于点磨削加工工艺尤其是新型砂轮的研究鲜有报道.

本文在新型砂轮磨削表面粗糙度研究<sup>[2]</sup>的基础上,对新型砂轮磨削工件表面/亚表面质量(金相组织、加工硬化、残余应力)进行了研究,比较新型砂轮与传统砂轮的区别,为新型砂轮的磨削性能提供相关的实验数据基础.

1 新型砂轮接触区几何模型

1.1 新型砂轮传统磨削加工

新型砂轮磨料层轴向前端带有粗磨区倾角 $\theta$ ,前面的粗磨区负责去除材料,后面的精磨区负责光整和精磨,从而减小表面粗糙度,提高了加工效率<sup>[9]</sup>,如图 1a 所示.

传统外圆磨削加工,砂轮轴线平行于工件轴线,如图 1a 所示,但是由于新型砂轮具有 $\theta$ 角,在垂直于砂轮粗磨区与工件接触面的方向,即 A - A 方向,砂轮和工件都等效为椭圆如图 1b 所示.等效直径和等效速度可以通过曲率半径计算:

$$\left. \begin{aligned} d_{w,e1} &= 2\rho_1 = \frac{d_w^2}{d_w \cos \theta} = \frac{d_w}{\cos \theta}, \\ d_{s,e1} &= \frac{d_s^2}{d_s \cos \theta} = \frac{d_s}{\cos \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$
$$\left. \begin{aligned} v_{w,e1} &= v_w, \\ v_{s,e1} &= v_s. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\rho_1$  为工件在接触点处的曲率半径; $d_w$  和  $d_s$  分别为工件和砂轮的直径; $d_{w,e1}$  和  $d_{s,e1}$  分别为工件和砂轮的等效直径; $v_w$  和  $v_s$  分别为工件和砂轮速度; $v_{w,e1}$  和  $v_{s,e1}$  分别为工件和砂轮的等效速度.

1.2 新型砂轮点磨削加工

点磨削加工,砂轮轴线与工件轴线之间存在倾斜角 $\alpha$ ,如图 2a 所示,为了简化推导过程,同时考虑粗磨区倾角 $\theta$ ,将工件等效成直径为 $d_w/\cos\theta$ 的虚拟工件,平面 C - C 垂直于砂轮轴线,接触点 E 在 C - C 平面上,如图 2b 所示,工件和砂轮在 C - C 平面的等效直径和等效速度分别为

$$\left. \begin{aligned} d_{w,e} &= 2\rho = \frac{d_w}{\cos^2 \alpha \cos \theta}, \\ d_{s,e} &= d_{s,e1} = \frac{d_s}{\cos \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$
$$\left. \begin{aligned} v_{w,e} &= v_w \cos \alpha, \\ v_{s,e} &= v_s. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\rho$  为工件在点 E 处的曲率半径; $d_{w,e}$  和  $d_{s,e}$  分别为工件和砂轮在 C - C 平面的等效直径; $v_{w,e}$  和  $v_{s,e}$  分别为工件和砂轮在 C - C 平面的等效速度.

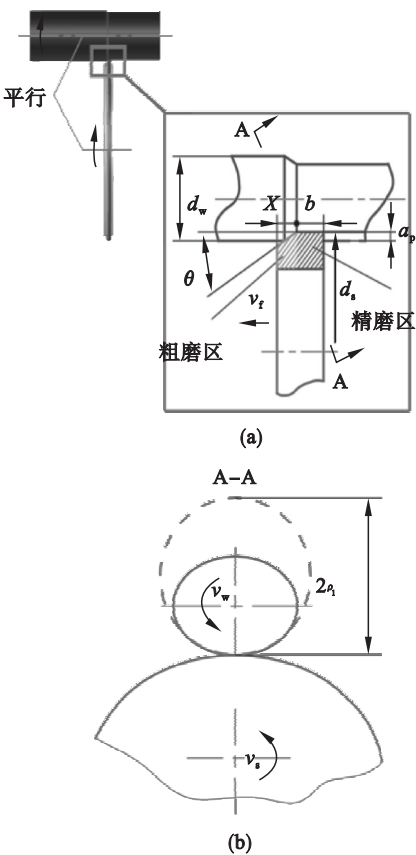


图 1 新型砂轮传统磨削示意图  
Fig. 1 Schematic of traditional grinding with NPGW  
(a)—传统磨削示意图; (b)—A - A 视图.

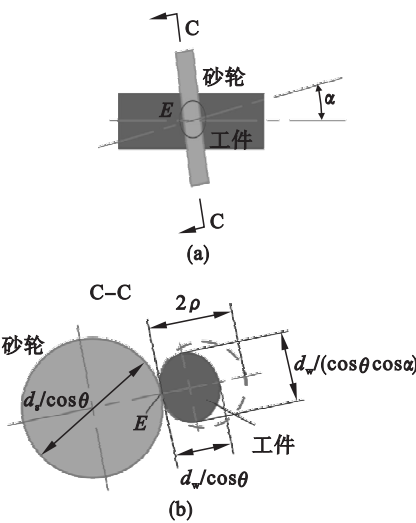


图 2 新型砂轮点磨削示意图  
Fig. 2 Schematic of point grinding with NPGW  
(a)—点磨削示意图; (b)—C - C 视图.

## 2 磨削实验

新型砂轮的粗磨区宽度  $X = 1.8\text{ mm}$ , 精磨区宽度  $b = 3.2\text{ mm}$  (图 1),  $X, b$  不变, 只改变  $\theta$  角, 3 片砂轮其他参数相同, 砂轮参数见表 1。

表 1 砂轮参数表 Table 1 Parameters of grinding wheels				
外径/内径 mm	磨料层宽度/厚度 mm	$\theta/(^{\circ})$	粒度	体积 分数/%
180/32	5/5	0/10/20	120#	100

磨削实验在 MK9025A 光学曲线磨床上完成, 实验参数见表 2。工件直径  $55\text{ mm}$ , 工件转速  $60\text{ r/min}$ , 轴向进给速度  $1.2\text{ mm/min}$  保持不变, 采用逆磨、干磨加工方式。测量加工表面/亚表面硬度, 试验力  $50\text{ N}$ , 持续时间  $10\text{ s}$ , 放大倍率 400 倍, 测量方法如图 3a 所示。将试件表面抛光后, 滴涂 4% 硝酸酒精溶液进行腐蚀, 腐蚀时间  $10\text{ s}$ , 用 ULTRA PLUS 场发射扫描电镜观测金相组织。采用 MGR40P 型 X 射线衍射残余应力测量仪测量表面/亚表面残余应力, 无应力布拉格角  $156.41^{\circ}$ , 拟合曲线采用椭圆法, 测量结果负值代表压应力, 正值代表拉应力。

表 2 实验参数表 Table 2 Experimental parameters				
序号	$\alpha/(^{\circ})$	$\theta/(^{\circ})$	$a_p/\text{mm}$	$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	-1, 0	10	0.03	45
2	-1	0, 10, 20	0.03	45
3	-1	10	0.03, 0.05, 0.08	45
4	-1	10	0.03	35, 45, 60

## 3 实验结果及分析

### 3.1 金相组织

图 4 左、右图片分别为超景深三维显示系统放大 1 000 倍和三维轮廓仪测量的工件相同位置表面形貌。沿着磨粒的切削路径, 存在许多划痕和塑性隆起。 $\theta$  角从 0 增加到  $20^{\circ}$  的过程中, 划痕和塑性隆起都变小。说明  $\theta$  角的存在可以减小磨削表面的塑性变形, 而且形成较好的表面形貌。

从图 3b 金相组织检测照片可知, 加工表面没有发生金相组织的变化, 这是因为新型砂轮和点磨削加工工艺共同降低了磨削温度, 未达到 QT700 的再结晶温度, 但是表层金属发生了明显的塑性变形, 表层的球墨也被拉长, 可知在加工表

层发生了加工硬化以及残余应力的变化, 因此有必要对工件表面/亚表面的加工硬化和残余应力进行深入研究。

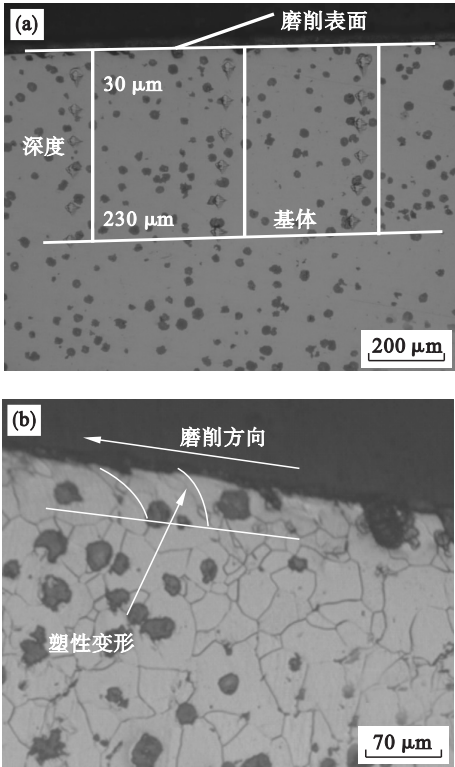


图 3 亚表面质量检测  
Fig. 3 Subsurface quality test  
(a)—硬度测量; (b)—金相组织。

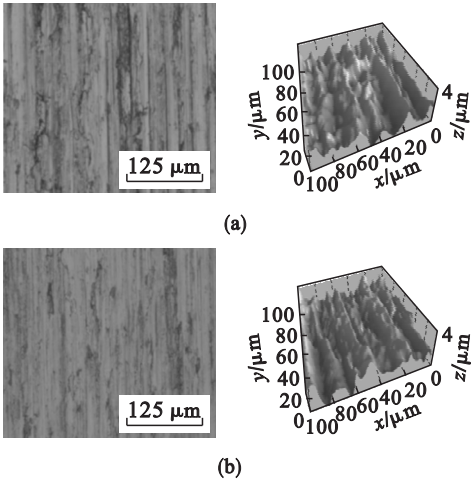


图 4 工件表面形貌  
Fig. 4 Workpiece surface morphology  
(a)— $\theta = 0$ ; (b)— $\theta = 20^{\circ}$ 。

### 3.2 加工硬化

#### 3.2.1 倾斜角 $\alpha$ 对硬度影响

由图 5 ~ 8 可知, 加工表面/亚表面硬度都大于材料基体的硬度, 而且沿着深度方向硬度逐渐减小到基体的程度, 与图 3b 相符合, 塑性变形导致硬化层产生, 而硬度值和硬化层厚度与磨削参

数有关。

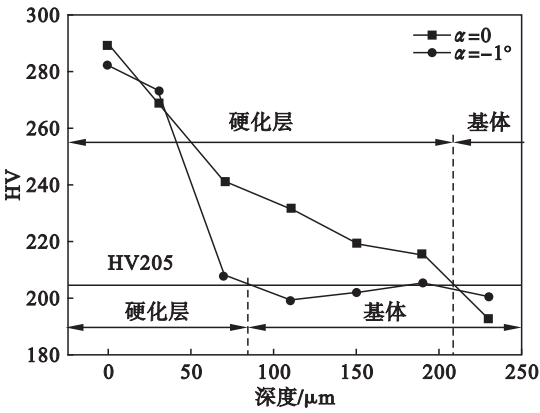


图 5  $\alpha$  对表面/亚表面硬度影响  
Fig. 5 Influence of  $\alpha$  on surface/subsurface hardness

由图 5 可知,从加工表面到基体内部的方向,硬度逐渐减小,倾斜角  $\alpha = -1^\circ$  时,硬度从最大值迅速减小到基体的程度,而  $\alpha = 0$  时减小速度较慢,说明  $\alpha = -1^\circ$  时,硬化层厚度小于  $\alpha = 0$  时的厚度. 因为从文献[3]可知,随着  $\alpha$  绝对值的增加,磨削力减小,不利于硬化层的形成,这也证明了在限制加工硬化方面,点磨削加工工艺要优于传统外圆磨削.

3. 2. 2 粗磨区倾角  $\theta$  对硬度影响

从图 6 可知,磨削表面硬度最大,随着深度的增加硬度逐渐减小到基体的程度. 粗磨区倾角  $\theta = 0$  砂轮磨削表面硬度最大,  $\theta = 10^\circ$  和  $\theta = 20^\circ$  砂轮磨削表面硬度依次减小.  $\theta = 20^\circ$  砂轮磨削表面硬度从表面最大值降低到基体的程度,经历的材料厚度最小,即硬化层厚度最小为  $95\ \mu\text{m}$ ,  $\theta = 0$  和  $\theta = 10^\circ$  砂轮磨削表面硬化层厚度比较接近,约为  $190\ \mu\text{m}$ ,  $\theta = 10^\circ$  砂轮略小. 另外,在同一深度上,随着  $\theta$  角的增加,硬度逐渐减小. 可以得出,新型砂轮减小了磨削表面/亚表面的加工硬化,而且  $\theta$  角越大,减小的程度越大.

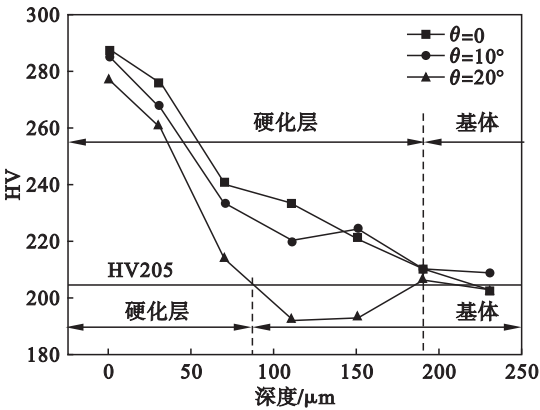


图 6  $\theta$  对表面/亚表面硬度影响  
Fig. 6 Influence of  $\theta$  on surface/subsurface hardness

3. 2. 3 磨削深度  $a_p$  对硬度影响

从图 7 可知,随着磨削深度  $a_p$  从  $0.03\ \text{mm}$  增加到  $0.08\ \text{mm}$ ,表面硬度逐渐增大,硬化层厚度也逐渐增大,分别为  $110, 190$  和  $220\ \mu\text{m}$ . 另外,在同一深度上,磨削深度  $a_p$  越大,硬度也越大. 因为,  $a_p$  增加,单颗磨粒的平均未变形切屑厚度和磨削力都增大,金属塑性变形增大,加工硬化程度也随之增大.

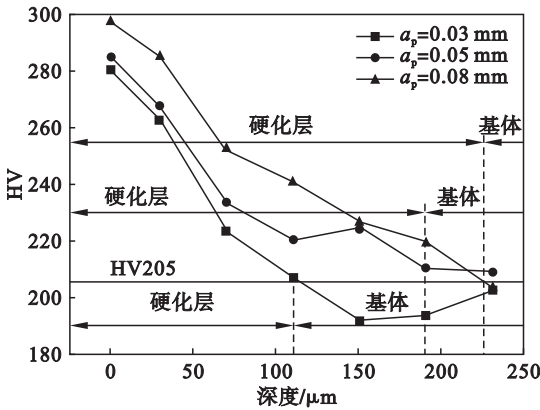


图 7  $a_p$  对表面/亚表面硬度影响  
Fig. 7 Influence of  $a_p$  on surface/subsurface hardness

3. 2. 4 砂轮速度  $v_s$  对硬度影响

由图 8 可知,从加工表面到基体内部的方向,硬度逐渐减小到基体的程度. 随着砂轮速度  $v_s$  的增大,磨削表面硬度逐渐减小,但是变化程度不大. 因为,  $v_s$  对加工硬化的影响是力和热因素共同作用的结果. 一方面,随着  $v_s$  增加,单颗磨粒和工件材料的作用时间减少,金属塑性变形程度减小,加工硬化减小;另一方面,随着  $v_s$  增加,磨削热对工件表面的作用时间缩短,加工硬化的程度增加. 从实验结果可知,力因素对加工硬化的影响比热因素要显著,但是两个因素共同作用的结果对加工硬化的影响程度较小.

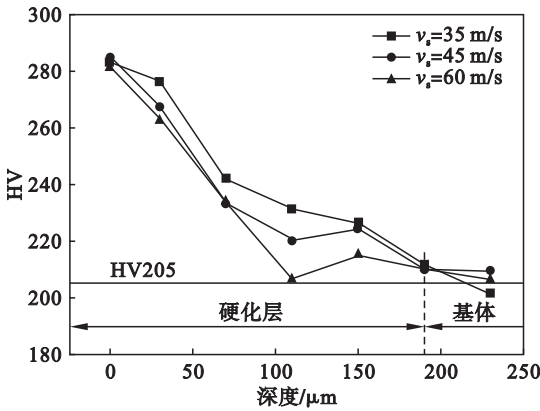


图 8  $v_s$  对表面/亚表面硬度影响  
Fig. 8 Influence of  $v_s$  on surface/subsurface hardness

3.3 残余应力

磨削过程中,被加工金属表面/亚表面会产生剧烈的塑性变形,晶粒被拉长,而内层材料限制这种变形,从而产生残余压应力.另外,磨削热从工件表面传到内部基体,导致热塑性变形,磨削结束后,工件冷却至环境温度,材料体积回缩,产生了拉应力<sup>[10]</sup>.残余应力的产生是各种因素共同作用的结果,当塑性变形占主要作用时表现为压应力,当磨削热占主要作用时表现为拉应力.

3.3.1 倾斜角  $\alpha$  对残余应力影响

从图 9 可知,加工后表面产生了压应力,意味着塑性变形起主要作用,这与图 3b 的结果一致.当  $\alpha = -1^\circ$  时,加工表面的压应力小于  $\alpha = 0$  时的压应力.因为,  $\alpha$  绝对值增加,砂轮与工件之间由线接触变成点接触,接触面积减小,塑性变形作用减弱,残余压应力减小.在亚表面压应力逐渐减小,拉应力逐渐增大,压应力逐渐转变为拉应力,说明在亚表面磨削热起主要作用.拉应力在表面以下 0.1 mm 处达到最大值,随着深度的增加,拉应力逐渐减小.  $\alpha = -1^\circ$  时的最大拉应力值小于  $\alpha = 0$  时最大拉应力值,因为  $\alpha = -1^\circ$  时磨削温度较低,磨削热作用减小,拉应力也随之减小.因此,点磨削加工工艺能够减小表面/亚表面残余应力.

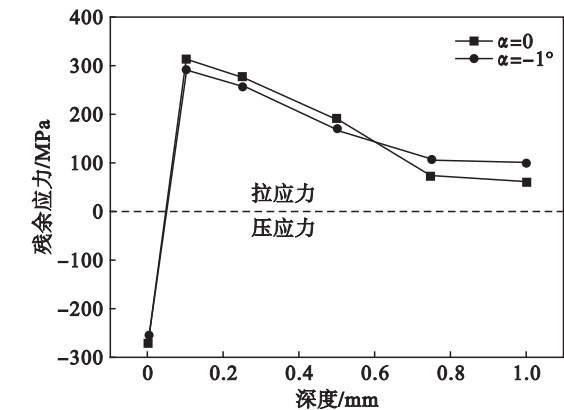


图 9  $\alpha$  对残余应力影响

Fig. 9 Influence of  $\alpha$  on residual stress

3.3.2 粗磨区倾角  $\theta$  对残余应力影响

从图 10 可知,加工表面产生了压应力,  $\theta = 10^\circ$  砂轮磨削工件表面残余应力小于  $\theta = 0^\circ$  砂轮,因为,随着  $\theta$  角增大,磨削力减小,挤压力减小,塑性变形减小,残余应力减小.但是,随着  $\theta$  角增大,磨削热迅速减小,而且减小的程度较大,二者的共同作用使得压应力有所增加.所以,  $\theta = 20^\circ$  砂轮磨削工件表面残余应力大于  $\theta = 10^\circ$  砂轮.在亚表面,压应力逐渐转变为拉应力,拉应力在表面以下 0.1 mm 处达到最大值,随着深度的进一步增加,

拉应力逐渐减小.  $\theta = 0^\circ$  时,最大拉应力值最大,因为  $\theta = 0^\circ$  时磨削温度最高,磨削热作用最大,拉应力最大.根据以上分析,新型砂轮减小了磨削工件表面/亚表面的残余应力,包括压应力和拉应力,  $\theta = 10^\circ$  砂轮减小的程度最大,与普通砂轮相比,约为 12%.

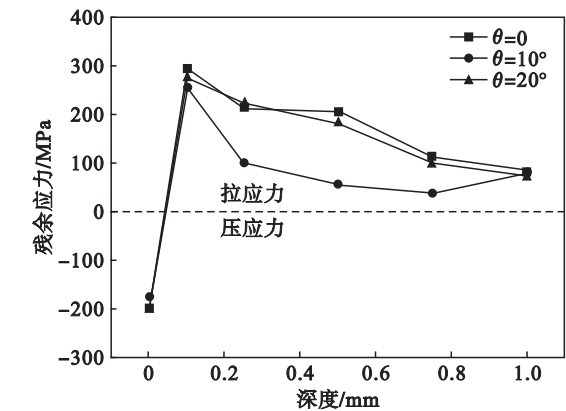


图 10  $\theta$  对残余应力影响

Fig. 10 Influence of  $\theta$  on residual stress

3.3.3 磨削深度  $a_p$  对残余应力影响

从图 11 可知,磨削深度  $a_p = 0.03$  和 0.05 mm 时磨削表面都表现为压应力,压应力随着  $a_p$  的增加而减小,而  $a_p = 0.08$  mm 时,磨削表面表现为拉应力.因为,  $a_p$  较小时,磨削温度不高,金属表层塑性变形起主要作用,表现为压应力.但是,当  $a_p$  较大时,磨削温度升高,单颗磨粒的平均未变形切屑厚度增大,磨削热增加,起主要作用,表现为拉应力.在亚表面,压应力逐渐转变为拉应力,拉应力在表面以下 0.1 mm 处达到最大值.  $a_p$  为 0.03, 0.05 和 0.08 mm 时,最大拉应力值分别为 224.5, 253.3 和 289.7 MPa. 随着深度的进一步增加,拉应力逐渐减小.

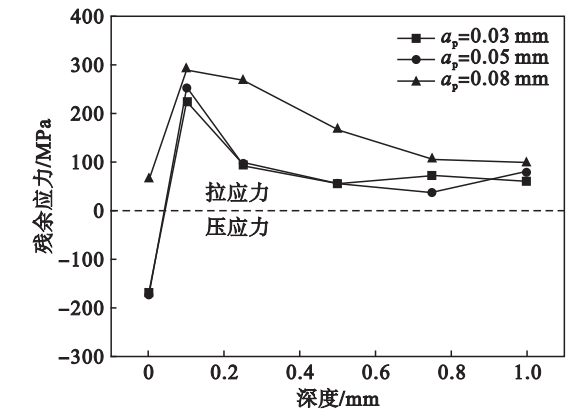


图 11  $a_p$  对残余应力影响

Fig. 11 Influence of  $a_p$  on residual stress

3.3.4 砂轮速度  $v_s$  对残余应力影响

从图 12 可知,加工表面产生了压应力,随着

砂轮速度  $v_s$  的增加,残余压应力逐渐减小. 在亚表面,压应力逐渐转变为拉应力,拉应力在表面以下 0.1 mm 处达到最大值. 因此,若以磨削工件表面残余应力为主要质量指标,建议选择较小的  $v_s$ ,但是  $v_s$  减小,表面粗糙度<sup>[2]</sup>和加工硬化的程度会增大,实际加工中需要综合考虑  $v_s$  对表面/亚表面质量影响,选择适当的砂轮速度  $v_s$ .

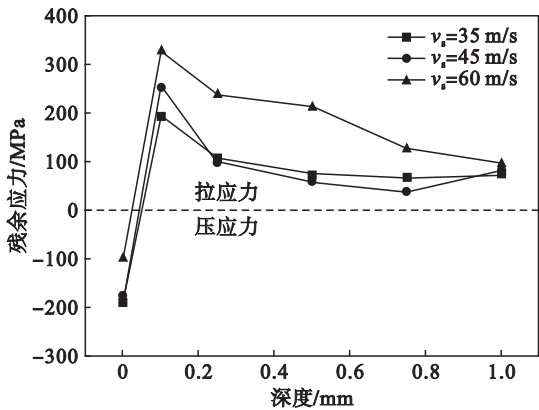


图 12  $v_s$  对残余应力影响  
Fig. 12 Influence of  $v_s$  on residual stress

4 结 论

1) 采用新型点磨削砂轮磨削工件表面/亚表面没有发生金相组织的变化. 但是发生了加工硬化,表面硬度和硬化层厚度都随着  $\alpha$  和  $\theta$  绝对值的增加而减小. 此外,随着磨削深度  $a_p$  的增大和砂轮速度  $v_s$  的减小,表面硬度和硬化层厚度都增大.

2) 磨削工件表面主要表现为压应力,亚表面压应力逐渐转变为拉应力,拉应力在表面以下 0.1 mm 处取得最大值. 新型砂轮和点磨削加工工艺减小了磨削表面/亚表面的残余应力,包括拉应力和压应力.

3) 随着磨削深度  $a_p$  和砂轮速度  $v_s$  的增大,表面压应力减小,亚表面最大拉应力值增大. 获得最优表面/亚表面质量的工艺参数: $\alpha = -1^\circ, \theta = 20^\circ, a_p = 0.03 \text{ mm}$  以及适当的砂轮速度  $v_s$ .

参考文献:

[ 1 ] Wang X W,Guo P Q,Zhao H D, et al. Review of quick-point grinding technology [ J ]. *Key Engineering Materials*, 2012,499:295 – 300.

[ 2 ] Gong Y D,Yin G Q,Wen X L, et al. Research on simulation and experiment for surface topography machined by a novel point grinding wheel [ J ]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29 ( 10 ): 4367 – 4378.

[ 3 ] 尹国强,巩亚东,温雪龙,等. 新型点磨削砂轮磨削力模型及试验研究 [ J ]. *机械工程学报*, 2016, 52 ( 9 ): 193 – 200. ( Yin Guo-qiang, Gong Ya-dong, Wen Xue-long, et al. Modeling and experimental investigations on point grinding force for novel point grinding wheel [ J ]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 ( 9 ): 193 – 200. )

[ 4 ] Chakrabarti S, Paul S. Numerical modelling of surface topography in super abrasive grinding [ J ]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39 ( 1 / 2 ): 29 – 38.

[ 5 ] Fricker D C, Pearce T R A, Harrison A J L. Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel [ J ]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218 ( 10 ): 1339 – 1356.

[ 6 ] Umbrello D, Pu Z, Caruso S, et al. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining [ J ]. *Procedia Engineering*, 2011, 19 ( 3 ): 371 – 376.

[ 7 ] 杜随更,姜哲,张定华,等. GH4169 合金磨削表面塑性变形层的微观结构 [ J ]. *机械工程学报*, 2015, 51 ( 12 ): 63 – 68. ( Du Sui-geng, Jiang Zhe, Zhang Ding-hua, et al. Microstructure of plastic deformation layer on grinding surface of GH4169 alloy [ J ]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51 ( 12 ): 63 – 68. )

[ 8 ] 黄新春,张定华,姚倡锋,等. 镍基高温合金 GH4169 磨削参数对表面完整性影响 [ J ]. *航空动力学报*, 2013, 28 ( 3 ): 621 – 628. ( Huang Xin-chun, Zhang Ding-hua, Yao Chang-feng, et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy [ J ]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28 ( 3 ): 621 – 628. )

[ 9 ] Gong Y D, Yin G Q, Wang C, et al. Study on the effect of coarse grinding area slope angle on surface quality in point grinding [ J ]. *Advanced Materials Research*, 2013, 797: 118 – 122.

[ 10 ] Tonissen S, Klocke F, Feldhaus B, et al. Residual stress prediction in quick point grinding [ J ]. *Production Engineering*, 2012, 6 ( 3 ): 243 – 249.