

预应力淬硬磨削复合加工表层硬化试验研究

修世超¹, 白 斌^{1,2}, 张修铭¹, 刘明贺¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳工程学院 机械工程系, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 融合了预应力磨削与磨削淬硬技术原理, 提出一种预应力淬硬磨削技术方法. 以工件淬硬层组织形貌、分布特征、厚度、硬度等为研究对象, 开展预应力淬硬磨削复合加工试验研究, 并与单纯磨削淬硬试验结果对比分析. 结果表明, 相同加工条件下, 预应力淬硬磨削加工表面在宏观上具有与磨削淬硬加工表面相同的金相组织形貌与分布, 组织为亚温淬火组织. 与磨削淬硬工艺相比, 预应力淬硬磨削工艺对磨削热具有更强的抑制作用; 预应力淬硬磨削试件的淬硬层硬度、厚度略小于磨削淬硬试件, 但表面硬度可以达到常规完全淬火硬度; 该研究工作可为开发预应力淬硬磨削工艺及工件表面质量控制技术提供理论与实验基础.

关 键 词: 预应力; 磨削; 复合加工; 淬硬层; 金相组织

中图分类号: TG 580.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)01-0086-05

Study of the Surface Hardening in Pre-stressed Hardening Grinding Combined Machining

XIU Shi-chao¹, BAI Bin^{1,2}, ZHANG Xiu-ming¹, LIU Ming-he¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China.

Corresponding author: BAI Bin, E-mail: kpbw@163.com)

Abstract: Blending the principle of pre-stressed grinding and grinding hardening, an pre-stressed hardening grinding approach was presented. The microstructure, distribution characteristics, thickness and hardness of the grinding hardening layer were studied. The results showed that under the same condition, the microstructure and distribution characteristics of grinding hardening layer in pre-stressed hardening grinding was the same as in grinding hardening and the microstructure was the subcritical quenching. Pre-stressed hardening grinding process showed more restraint effect on grinding heat. The hardening layer thickness and hardness of pre-stressed hardening grinding specimens were slightly below the grinding hardening specimens, but the surface hardness was able to reach the general complete quenching state. The research provides the experiments and principle basis for pre-stressed hardening grinding process development and work-piece surface quality control.

Key words: pre-stress; grinding; combined machining; hardening layer; microstructure

磨削加工是利用磨料去除材料的一种加工方法, 在机械制造行业中得到广泛应用. 预应力磨削 (pre-stressed grinding, PSG) 是对传统磨削工艺的一种改良工艺, PSG 集磨削加工与残余应力控制于一体, 它不需要对零件进行残余应力调节与控制工序, 就可以使零件在磨削加工后, 表面层直接产生理想的应力状态, 从而提高零件的抗疲劳强

度, 延长其使用寿命^[1]. 磨削淬硬 (grinding hardening, GH) 是利用磨削加工中产生的大量磨削热, 将工件表层快速加热到材料的相变温度, 并以大于马氏体相变临界冷却速度急速冷却, 从而使工件表层发生马氏体相变, 达到磨削淬硬目的^[2]. GH 工艺集磨削加工与表面淬火工艺于一体, 直接利用磨削时产生的磨削热对工件表面进

行热处理,符合绿色制造和清洁化生产模式^[3-9].虽然这两种技术都有各自突出的特点,但也存在不足. GH 技术虽然在磨削加工的同时能够实现工件表面淬硬,但在磨削过程中没有考虑零件的抗疲劳性能,不能实现对工件表层残余应力的控制,而 PSG 技术虽然在磨削加工的同时可以实现对工件表面残余应力的控制,但不能获得淬硬的表面,因此没有将磨削热加以利用,工艺的绿色水平不高.

本文从抗疲劳制造与绿色制造的观念出发,以 GH 技术为基础,融合 PSG 技术原理,提出预应力淬硬磨削 (pre-stressed hardening grinding, PSHG) 复合加工方法.

1 PSHG 工艺过程分析

PSHG 工艺过程如下:首先在机床上通过预应力夹具对工件施加预拉应力,使工件在保持此预拉应力条件下进行磨削淬硬加工,利用磨削时产生的磨削热对工件表层淬火,磨削后的工件冷却至室温后卸除预拉应力完成加工. PSHG 技术直接利用磨削热对工件表面进行淬火,同时又通过在磨削过程中对工件施加预拉应力,对磨削后工件表面残余应力状态进行主动控制与干预,有效改变已加工表面的残余应力状态,增大残余压应力,减少残余拉应力,是将磨削、表面淬火及残余应力控制三种工序集成的工艺方法. PSHG 技术同时满足了绿色制造和抗疲劳制造的观念.

表 1 为 PSHG 工艺与 GH 工艺 45[#] 钢工件加工表面的残余应力试验结果. 与 GH 工艺相比较, PSHG 工艺可以降低工件表面残余拉应力,增大残余压应力,使工件获得更好的抗疲劳性能及抗应力腐蚀性能. 以上结果表明: PSHG 工艺在对工件表面淬硬的同时,实现了对表面残余应力的控制.

表 1 残余应力测量结果

Table 1 Measuring result of the residual stress

工艺	预紧力矩 $M/(N\cdot m)$	磨削深度 a_p/mm	残余应力 σ/MPa
GH	0	0.35	56.8
PSHG	15	0.35	-70.0
GH	0	0.40	256.8
PSHG	15	0.40	161.6
GH	0	0.45	283.1
PSHG	15	0.45	161.5

注:残余应力测量位置为淬硬层表面沿磨削方向距试件切入端 25 mm 位置线中点处,残余应力记录数值为最大主应力.

2 PSHG 试验研究

PSHG 工艺的磨削效果是通过淬硬层性能来体现的,不同显微组织及其分布具有不同的表层物理性能. 以 PSHG 试件的硬化层为研究对象,并与相同条件下的 GH 工艺试验结果相对比,分析经 PSHG 加工的工件淬硬层显微组织形貌和分布、厚度、硬度特点及其影响因素,为开发 PSHG 工艺及对 PSHG 工件淬硬层进行质量控制提供理论与实验基础. 在加工条件相同的情况下,进行 PSHG 工艺与 GH 工艺(预应力为 0)对比试验研究. 试件材料为 45[#] 钢,图 1a 和图 1b 分别为 GH 与 PSHG 工艺试验系统. 试件磨削段尺寸均为 90 mm×9 mm×14 mm,磨削试验条件如表 2 所示.

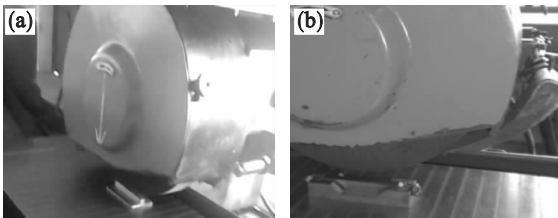


图 1 试验系统
Fig. 1 Testing system
(a)—GH 工艺; (b)—PSHG 工艺.

表 2 试验条件与磨削参数

Table 2 Testing condition and grinding parameters

试验参数	参量选择
机床	M7133 平面磨床
磨削方式	单程,切入式逆磨
砂轮	白刚玉,直径 350 mm,宽 40 mm,粒度 F60
冷却方式	干磨削,空冷
磨削深度/mm	0.35, 0.40, 0.45
工件进给速度/($m\cdot min^{-1}$)	10
砂轮转速/($r\cdot min^{-1}$)	1 440
预紧力矩/($N\cdot m$)	15, 17, 23

3 淬硬层金相组织分析

PSHG 和 GH 工艺加工后的试件沿淬硬层深度方向切取试样,试样尺寸为 20 mm×9 mm×9 mm. 经打磨、抛光、腐蚀等工艺处理后,制成金相组织观察试样,观测金相组织图片并量取试样淬硬层厚度.

3.1 金相组织形貌及其分布特征

试验与观测表明, PSHG 工艺和 GH 工艺一样,磨削热对材料的作用是一种快速加热、快速冷

却的自淬火过程.

表 3 为试件金相试样的加工条件. 1 号和 2 号为 GH(预应力为 0)试样,3~5 号为 PSHG 试样. 45# 钢试件基体组织形貌与分布如图 2a 所示,可以看出,基体组织由珠光体与铁素体组成. 在磨削加工过程中,磨削弧区产生的大量磨削热传入试件表面后,以热传导的方式向底层扩散,并在工件内部形成一个非均匀温度场,试件表层在一定区域内产生金相组织的变化. 在表 3 所示的预应力及磨削深度情况下,试样的金相组织形貌与分布规律如图 2b~2f 所示,通过观察发现上述试件淬硬层的金相组织形貌及其分布非常相似,表层组织按照磨削温度场分布规律,并结合颜色与形貌特征可由表及里分为 3 个区域:硬化区、过渡区及基体区. 在淬硬层的硬化区,组织主要为混合型马氏体,在马氏体周围分布着少量屈氏体及微量铁素体,马氏体呈现细—粗—细的变化规律;过渡区为铁素体与马氏体的混合结构;基体区是铁素体+珠光体. 由淬硬层金相组织形貌与分布特点可以确定所有试样的金相组织均为亚温淬火组织^[10].

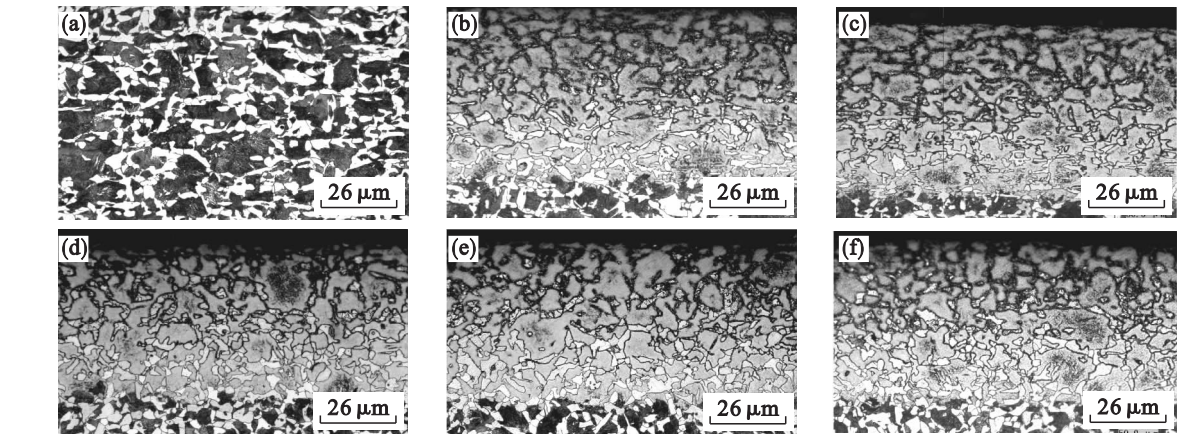


图 2 试样金相组织图
Fig. 2 Metallographic microstructure of the specimens

(a)—基体试件; (b)—1 号试件; (c)—2 号试件; (d)—3 号试件; (e)—4 号试件; (f)—5 号试件.

3. 2. 2 预应力对金相组织形貌及分布的影响

图 2c,2e,2f 是磨削深度为 0. 45 mm 时,在不同预应力条件下的试件淬硬层金相组织照片,观察并对比后发现,随预应力的增大,淬硬区马氏体组织逐渐细化,铁素体量增加,屈氏体量减少.

通过对比可知,预应力可以细化晶粒,抑制磨削热作用,是防止淬火烧伤的有效手段.

4 淬硬层厚度测量与分析

利用 LYMPUS-STM6 金相显微镜,对试样淬硬层的淬硬区及过渡区的总厚度进行测量. 测量时将进行金相组织观察的试件截面与淬硬层表

表 3 金相试样的加工条件		
Table 3	Machining conditions of metallographic specimen	
试样号	预紧力矩 $M/(N \cdot m)$	磨削深度 a_p/mm
基体	0	0
1	0	0. 40
2	0	0. 45
3	23	0. 40
4	17	0. 45
5	23	0. 45

3. 2 磨削条件对试件金相组织的影响分析

虽从宏观上讲,不同磨削条件下的试件淬硬层金相组织形貌及分布相似,但由于磨削条件的不同,亦存在细微差别,正是由于这些细微差别的存在,才使试件表现出相异的力学性能.

3. 2. 1 磨削深度对金相组织形貌与分布的影响

图 2b,2c 是 GH 试件在不同磨削深度下的金相组织对比照片,图 2d,2f 为 PSHG 试件在不同磨削深度下的金相组织对比照片. 通过对比金相组织后发现随深度的增加,淬硬区马氏体组织增加,铁素体数量变少;总体上随磨削深度的增加,金相组织逐渐接近完全淬火组织形貌.

面交线中点取为第一点,向两侧每隔 1. 5 mm 取点,共取 5 点,以此 5 点作为测量位置,取 5 个测量位置处淬硬层厚度的平均值作为淬硬层厚度.

4. 1 磨削深度对淬硬层厚度的影响

磨削深度对淬硬层厚度的影响如图 3 所示. 由图 3 可知,GH 试件及 PSHG 试件变化规律大体相同. 磨削深度小于 0. 4 mm 时,随磨削深度的增加淬硬层厚度增加,但当磨削深度超过 0. 4 mm 后,随磨削深度增加,淬硬层厚度增加的趋势放缓,PSHG 试件甚至出现了淬硬层厚度减少的现象. 出现这种现象的原因是随着磨削深度的增加,单颗磨粒的未变形切屑厚度相应增大,加上砂轮与工件接触弧长变长,热作用时间延长,且同时参

加切削的磨粒数增多,因此磨削力增大、磨削热量增加,磨削温度升高,从而导致磨削淬硬层深度增加;当磨削深度较小时,磨削深度的变化对磨削力的影响更加明显,而当磨削深度增加到一定值后,这种影响趋势将会减弱,此时预应力等其他因素的影响将会显现.

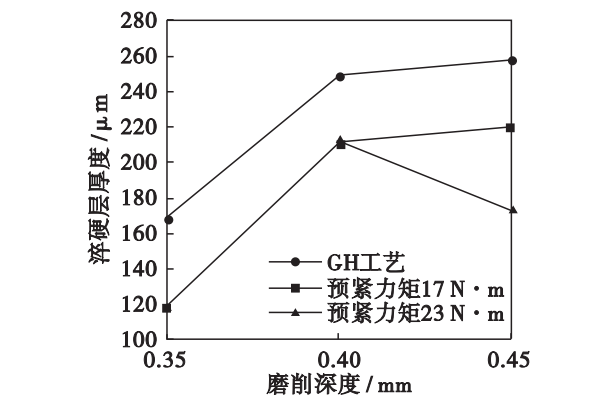


图 3 磨削深度对淬硬层厚度的影响曲线
Fig. 3 Effect of depth of cut on the grinding hardening layer thickness

4.2 预应力对淬硬层厚度的影响

预应力对淬硬层厚度的影响如图 4 所示. 由图 4 可知,在加工条件相同的情况下,GH 试件淬硬层厚度大于 PSHG 试件. 如当磨削厚度为 0.40 mm 时,采用无预应力的 GH 工艺加工后,试件淬硬层厚度为 249.3 μm ,而有预应力的 PSHG 试件中,淬硬层厚度最大的是预紧力矩为 23 N·m 的试件,其淬硬层厚度为 216.9 μm ,略小于 GH 工艺试件淬硬层厚度. 当预紧力矩从 15 N·m 增大到 23 N·m 过程中,淬硬层厚度并未出现显著的增大或减小趋势,实验范围内预应力的大小对磨削淬硬层厚度无显著影响. 施加预应力使工件加工表面在整个磨削过程中始终处于绷紧、展平的状态,减少了磨削过程中的摩擦阻力,进而降低了磨削热的产生,使淬硬层厚度减少,但淬硬层

的最终厚度还会受到试件内部实际含碳、合金元素量等其他因素的影响.

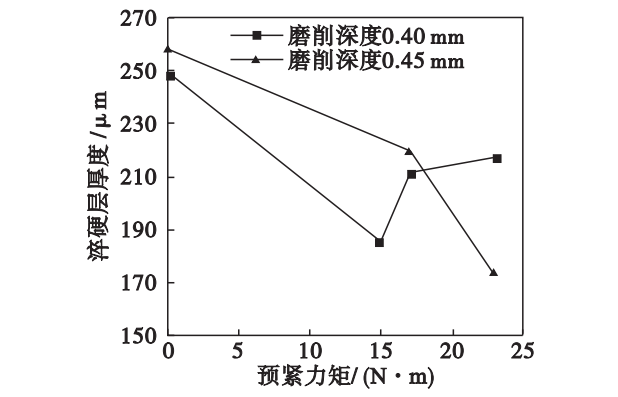


图 4 预应力对淬硬层厚度的影响曲线
Fig. 4 Effect of pre-stress on the grinding hardening layer thickness

5 淬硬层硬度测量与分析

将进行金相组织观察的试件截面与淬硬层表面交线中点处取为第一点,从淬硬层表面沿淬硬层深度方向每隔 0.05 mm 依次取点,共取 4 点. 试验中硬度测量采用型号为 THV-5 的维氏硬度计,施加的测试力为 5 N,45[#] 钢的非淬火硬度为 230 HV.

5.1 磨削深度对淬硬层硬度值及其分布的影响

不同预应力条件下,试件沿淬硬层深度方向硬度变化规律见图 5a~5c. 总的来说,由图可知,当预紧力矩一定,磨削深度不同时,试件淬硬层硬度从表层沿着淬硬层深度方向逐渐下降. 这是由于工件受热量由表及里逐渐减少造成的. 其中 GH 试件硬度在表层至表层下 0.05 mm 距离范围内缓慢下降,之后快速下降. 而 PSHG 试件硬度未出现明显的缓慢下降的过程,所有试件表面硬度都在 650~800 HV 之间,达到了完全淬火的硬度.

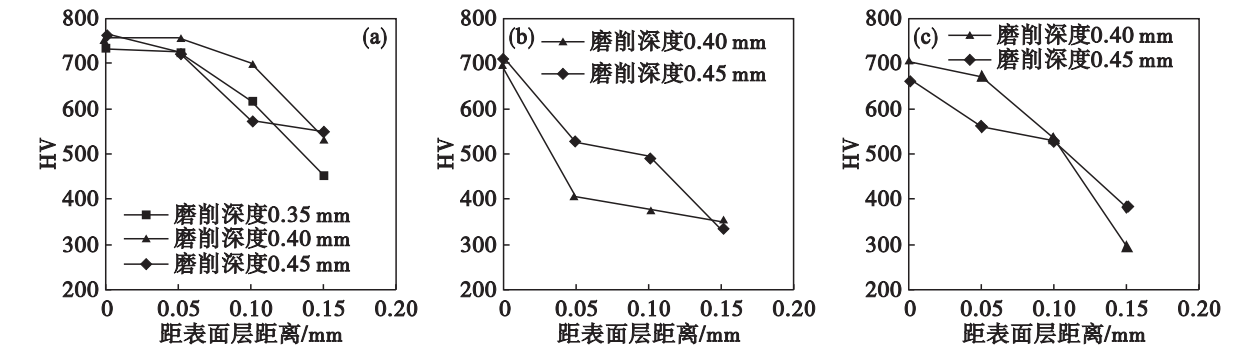


图 5 不同预紧力矩条件下,工件沿淬硬层深度方向硬度变化曲线
Fig. 5 Hardness variation along the hardening layer depth direction with different tightening torque
(a)— $M=0\text{ N}\cdot\text{m}$, GH 工件; (b)— $M=17\text{ N}\cdot\text{m}$ 的 PSHG 工件; (c)— $M=23\text{ N}\cdot\text{m}$ 的 PSHG 工件.

5.2 预应力对淬硬层硬度值及其分布的影响

不同磨削深度条件下,试件沿淬硬层深度方向硬度变化规律见图 6a,6b. 由图可知,当磨削深度一定,预应力条件不同时,试件沿淬硬层深度方向硬度也是逐渐减小的. 从表层开始,沿淬硬层深度方向的 4 个硬度测量位置处,GH 试件硬度均

大于 PSHG 试件,而 PSHG 试件之间硬度变化无明显规律,说明 PSHG 试件从表层开始,沿着淬硬层深度方向的整体硬度低于 GH 试件,这是由于预应力对磨削热起到了抑制作用的结果. 试验结果同时也说明在试验范围内预应力的大小对硬度的影响不显著.

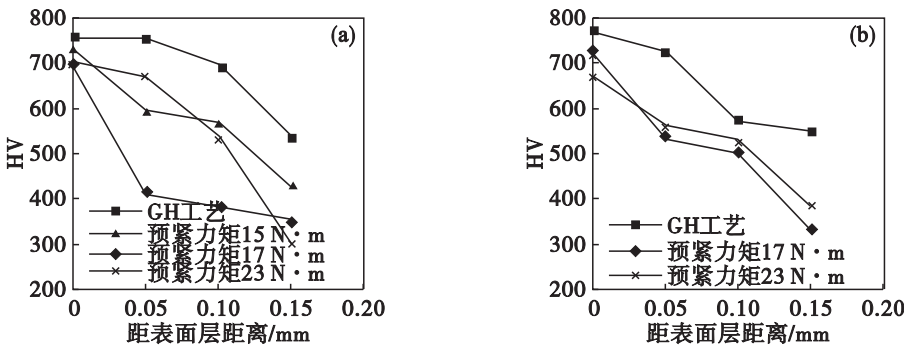


图 6 不同磨削深度时,工件沿淬硬层深度方向硬度变化曲线
Fig. 6 Hardness variation along the hardening layer depth direction with different grinding depth
(a)— $a_p = 0.40\text{ mm}$; (b)— $a_p = 0.45\text{ mm}$.

6 结 论

1) PSHG 工件淬硬层由淬硬区、过渡区及基体区 3 个区域组成,金相组织为亚温淬火组织. 与 GH 工艺相比,PSHG 工艺对磨削热具有更强的抑制作用,可作为防止磨削热过高,预防磨削烧伤的有效手段.

2) PSHG 与 GH 试件的淬硬层厚度随磨削深度的变化规律相同. 磨削深度小于 0.4 mm 时,试件的淬硬层厚度随磨削深度的增加而增加,但当磨削深度超过 0.4 mm 后,随磨削深度增加,试件淬硬层厚度增加的趋势放缓,甚至会出现淬硬层厚度下降的现象. PSHG 试件淬硬层厚度小于 GH 试件淬硬层厚度,但实验范围内预应力的对磨削淬硬层厚度无显著影响.

3) PSHG 与 GH 试件淬硬层硬度都具有从表层沿着淬硬层深度方向逐渐下降的变化趋势. PSHG 试件表层硬度在 $650 \sim 800\text{ HV}$ 之间,达到了完全淬火的硬度. PSHG 试件从表层开始,沿着淬硬层深度方向的整体硬度低于 GH 试件,且在试验范围内预应力的对淬硬层硬度的影响不显著.

参考文献:

[1] 王珉, Lau W S. 金属表面改性的预应力磨削机理研究[J]. 机械工程学报, 1992, 28(3): 104 – 109, 112.

(Wang Min, Lau W S. Improvement of surface integrity with pre-stressed grinding [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1992, 28(3): 104 – 109, 112.)
[2] Brinksmeier E, Brockhoff T. Surface heat treatment by using advanced grinding processes [J]. La Metallurgia Italiana, 1999, 91(4): 19 – 23.
[3] Xiu S C, Li C H, Cai G Q. Study on surface finish mechanism in quick-point grinding [J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2007, 29(2): 163 – 167.
[4] Li C H. Experimental investigations of mechanical characteristics and tribological mechanisms of nanometric zirconia dental ceramics [J]. The Open Materials Science Journal, 2011, 5: 178 – 183.
[5] Menenzes P, Kallas S, Lovell M. Role of surface texture, roughness, and hardness on friction during unidirectional sliding [J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 1 – 15.
[6] Brockhoff T. Grinding-hardening: a comprehensive view [J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 255 – 260.
[7] Liu J D, Wang G C, Wang Z, et al. Experimental research on grind-hardening of 65Mn steel [J]. Materials Science Forum, 2006, 505(7): 787 – 791.
[8] Zhang L, Ge P Q, Zhang J H, et al. Experiment and simulation on temperature field of 40Cr steel surface layer in grind-hardening [J]. International Journal of Abrasive Technology, 2007, 1(2): 187 – 197.
[9] Zhang Y, Ge P Q, Zhang L. Numerical analysis of surface temperature in grind-hardening based on time variation heat flux [J]. Materials Science Forum, 2011, 697/698: 34 – 38.
[10] 贺睿, 李雷, 郭世敬, 等. 亚温淬火温度对 45 钢组织性能的影响 [J]. 材料热处理技术, 2010, 39(2): 142 – 143.
(He Rui, Li Lei, Guo Shi-jing, et al. Effects of subcritical quenching temperature on microstructure and properties of 45 steel [J]. Material & Heat Treatment, 2010, 39(2): 142 – 143.)