

磨削液参数对磨削强化表面微结构损伤的影响

张修铭, 修世超, 王雨时

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对磨削强化过程中磨削液对磨削力和磨削温度场的影响, 建立非调质 45 钢的磨削强化过程的仿真模型, 分析不同磨削液参数对工件表面温度场及加工后残余应力的影响。最后, 选择不同磨削液参数对 45 钢工件进行平面磨削强化试验, 研究加工后工件表面硬度值及其表面完整性参数。试验结果表明, 工件表面微结构损伤与磨削深度有密切的联系, 在磨削过程中加入一定量的磨削液能有效降低表面微结构损伤, 但削弱了在工件表面上由磨削热产生的强化能力。

关 键 词: 磨削强化; 磨削液; 表面残余应力; 硬度; 微结构损伤

中图分类号: TG 580.64

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)10-1491-05

Effect of Grinding Fluid Parameters on Microstructure Damage of Grinding Hardening Surface

ZHANG Xiu-ming, XIU Shi-chao, WANG Yu-shi

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: ZHANG Xiu-ming, E-mail: zyzyzhangyong@126.com)

Abstract: Aiming at the grinding fluids influence on grinding forces and grinding temperature field in the grinding hardening process, a simulation model of non-quenched and tempered 45 steel was established to analyze the influence of different grinding fluid parameters on the grinding workpiece surface hardness and residual stress. At last, the workpiece surface hardness and its surface integrity after plane grinding hardening experiment by changing the grinding fluid parameters were studied. The results showed that the surface microstructure damage has a closest connection to the grinding depth. Adding a certain amount of grinding fluid can effectively reduce the surface microstructure damage, but it seriously weakens the effect of using grinding heat to strengthen the workpiece surface.

Key words: grinding hardening; grinding fluid; surface residual stress; hardness; microstructure damage

磨削加工过程中能产生大量的磨削热和较大的磨削力, 充分利用磨削热和磨削力对工件表面的影响可以实现表面强化作用^[1]。但瞬时的高温能在工件表面形成热应力, 使工件表面产生残余拉应力, 甚至产生裂纹; 同时磨削热量能使砂轮的磨粒硬度下降、快速钝化, 降低了磨削效率^[2], 因此, 需要研究是否能够在磨削强化过程中采用适当的冷却条件, 使工件表面获得强化效果并具有

较小的表面微结构损伤。

通过不同冷却条件下的磨削强化过程的仿真与试验, 研究仿真过程中工件表面温度场的时间历程和表面残余应力值; 同时, 测量试验工件表面硬度、粗糙度和残余应力, 对比 SEM 图中工件表面微结构损伤, 研究不同冷却条件对磨削强化工件表面微结构损伤的影响。这对进一步研究磨削强化加工过程及机理具有重要的指导意义。

收稿日期: 2014-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375083); 沈阳市科学技术计划项目(F13-316-1-59)。

作者简介: 张修铭(1988-), 男, 浙江舟山人, 东北大学博士研究生; 修世超(1958-), 男, 辽宁凌源人, 东北大学教授, 博士生导师。

1 磨削液对磨削强化过程的影响

磨削液具有冷却和润滑的作用,能够减小砂轮、工件和磨屑在接触区域产生的摩擦和粘附,并降低磨削过程所产生的磨削热^[3].

1.1 磨削液对磨削力的影响

磨削液主要影响磨削力的滑擦力部分. 根据 Malkin 等^[4-5]的研究,磨削力中滑擦力部分的计算公式为

$$F_t = F_{n, ch} + F_{n, sl} = \left(K_1 + K_2 \ln \frac{V_s^{1.5}}{a_p^{0.25} V_w^{0.5}} \right) \frac{V_w a_p}{V_s} + bA \left(\alpha + \frac{4\beta p_0 V_w}{d_s V_s} \right) (d_s a_p)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

式中: K_1, K_2, p_0 为试验确定的常数; α, β 为由摩擦表面物理和机械性质决定的系数; A 为砂轮磨损表面积比; d_s 为当量砂轮直径.

由式(1)可知,使用适当的磨削液能有效降低摩擦表面的 α 和 β 系数. 这是由于在磨削过程中磨削液能够在砂轮与工件之间形成流体层,使磨屑沿着磨粒前进方向流出,同时,由于该流体层具有润滑作用,降低了工件与磨粒、工件与磨屑及磨粒与磨屑之间的摩擦系数,使摩擦力和摩擦热减少. 根据 Brinksmeier 的试验结果^[2]可知,随着磨削液的润滑作用不断增强,工件表面的磨削力不断降低,砂轮磨损量和工件表面粗糙度值也不断减少.

1.2 磨削液对磨削区温度场的影响

1) 磨削液对磨削热源的影响. 磨削热来源于磨削功率的消耗,砂轮磨粒与工件的摩擦和金属的塑性变形能量几乎全部转化为热能^[6],因此,磨削过程中的总热流密度 q_t 如式(2)所示. 由于切向磨削力 F_t 随磨削液的施加使工件表面摩擦系数 α 和 β 下降而下降,因此,磨削表面将产生的磨削热减少.

$$q_t = \frac{F_t \times V_s}{l_s \times b}. \quad (2)$$

2) 磨削液对磨削区对流换热的影响. 在磨削区加入磨削液能增加工件表面的传热作用,并在加工过程中带走一定量的磨削热,使磨削区温度场的温度下降. 由牛顿冷却公式^[7]及移动热源公式可知,对流换热量 q_x 的计算式为

$$q_x = 2xq_w/l_s. \quad (3)$$

对于整个磨削接触区,总对流换热量为

$$Q = \int_A q_x dA = \int_x \frac{2bxq_w}{l_s} dx = F_t \cdot V_s. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,磨削接触区内的总对流换热热量与磨削滑擦力紧密相关. 当加入磨削液之后,磨削滑擦力 F_t 减小,进入工件的热量减少,磨削区产生的温度变化梯度减小,产生的最高温度降低,这在一定程度上影响了由磨削热产生表面强化的作用.

1.3 磨削液对表面硬化层的影响

影响工件表面淬硬层硬度主要因素为加热温度和保温时间^[8]. 加热温度的高低,直接影响 45 钢的奥氏体化程度,也影响淬火后马氏体的形成量. 一般来说,只要加热温度达到材料的奥氏体化温度即可. 保温时间的长短,关系到 C 原子进入 Fe 晶格中的数量,也就是说影响到在淬火过程中能够产生的位错的程度. 当磨削液进入磨削区后,对加热温度和保温时间都将产生影响. 对加热温度的影响主要体现在磨削液对磨削区温度场最高温度的影响,而对保温时间的影响主要体现在磨削液对对流换热时间的影响.

2 磨削液对磨削强化过程影响的仿真

2.1 有限元模型及网格划分

根据磨削强化试验条件,在仿真中采用顺序耦合法先分析温度场,再进行应力分析. 同时,由于实验试件为规则的长方体,因此可以选取工件的 1/2 部分进行仿真. 在划分网格时,为了提高分析的准确性,在沿工件厚度方向上采用了比例划分. 工件实体模型网格划分如图 1 所示.

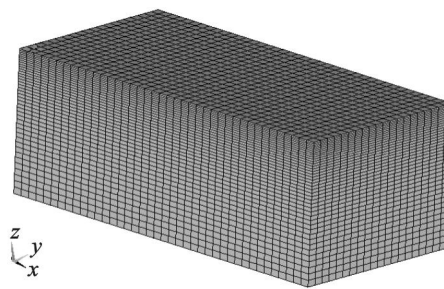


图 1 工件仿真模型的网格划分

Fig. 1 Workpiece simulation meshing model

2.2 温度场仿真条件参数

根据平面磨削强化加工试验过程,设定仿真模型尺寸为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$,材料为非调质 45 钢. 同时设定砂轮当量直径 $d_s = 250 \text{ mm}$,线速度 $V_s = 37 \text{ m/s}$,工件进给速度 $v_w = 0.03 \text{ m/s}$,磨削深度 $a_p = 0.1 \text{ mm}$,磨削宽度 $b = 40 \text{ mm}$,分别采用干磨削和湿磨削.

2.3 热源的加载及对流换热系数的确定

在仿真时加载的热源需要离散化,在平面磨削过程中,磨削力引起砂轮和工件变形,不同接触部位的磨削力不同,导致接触区工件不同部位的变形量不成线性关系,而近似成抛物线形^[6]. 抛物线热源模型离散过程如图 2 所示.

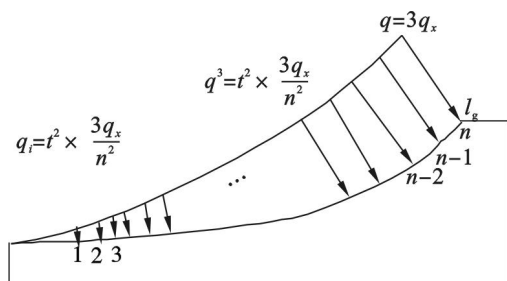


图 2 抛物线热源模型离散过程

Fig. 2 Dispersive process of parabolic heat source model

在计算过程中,由于对流换热系数的取值与磨削液组成成分及磨削加工工件的材料存在一定的关系^[9-10],同时考虑试验采用喷射水基磨削液冷却的对流换热系数为 7 000 ~ 16 500 W/(m²·℃),且喷射速度较小,因此分别取干磨削时(空气 20℃)的对流换热系数为 90 W/(m²·℃),磨削液喷射速度为 3 L/min 时的对流换热系数为 8 500 W/(m²·℃),以及磨削液喷射速度为 12 L/min 时的对流换热系数为 15 000 W/(m²·℃).

2.4 磨削表面层温度变化历程仿真结果

磨削试件表面层温度随时间的变化结果如图 3 所示. 各试件的具体参数见表 1. 由图 3 可知,在相同的磨削深度条件下,工件表面能够达到的最高温度是基本相同的,即磨削液的流量对试件表面的最高温度的影响较小. 随着磨削液流量的增加,对流换热系数的增大,当温度下降到 600℃左右时,试件表面的温度下降速率明显增大,试件表面的保温时间明显下降,这对表面强化层的形成是不利的.

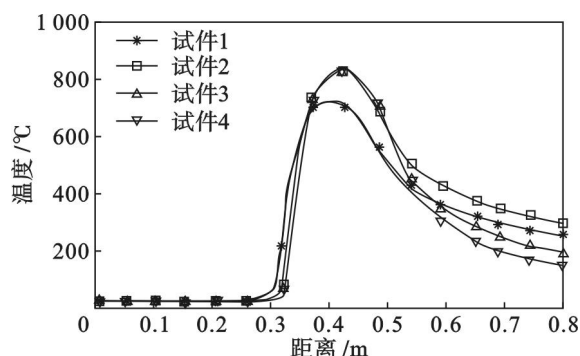


图 3 试件表面温度曲线

Fig. 3 Curves of specimen surface temperature

2.5 磨削残余应力的仿真结果

取残余应力仿真的最后一步(即砂轮刚脱离试件表面时)的试件表面 Von-Mises 残余应力值作为磨削残余应力仿真结果,如图 4 所示.

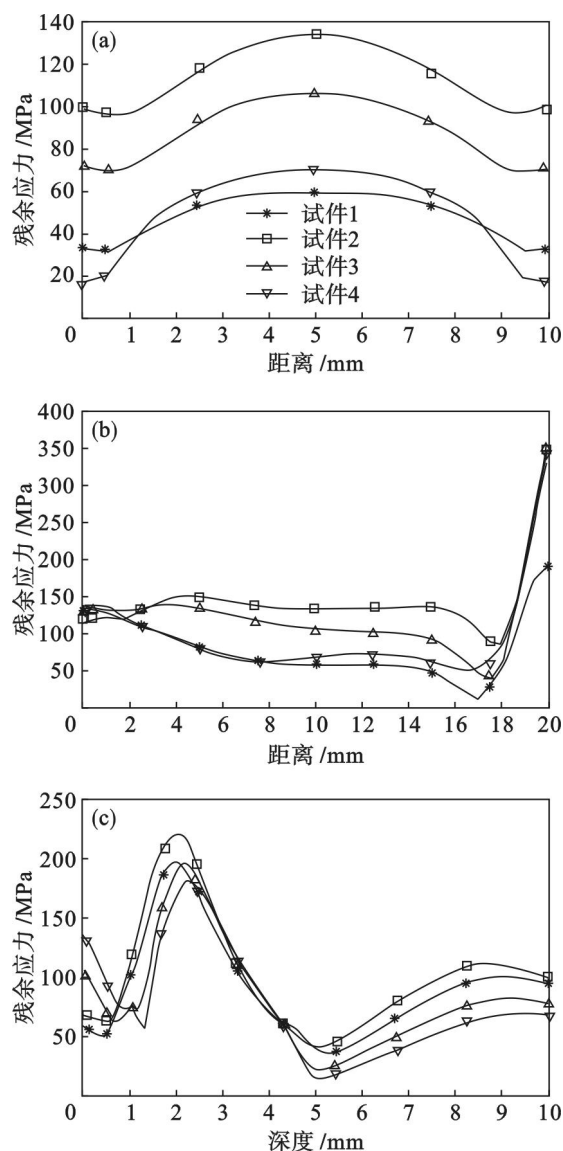


图 4 试件表面 Von-Mises 残余应力曲线
Fig. 4 Curves of specimen surface Von-Mises residual stress

(a) — 垂直于磨削方向; (b) — 平行于磨削方向;
(c) — 中点处沿试件深度方向.

对比图 4 中试件 2、试件 3 和试件 4 的曲线图可知,磨削液对试件表面残余应力的影响是较为明显的. 随着磨削液流量的增大,对流换热系数的增加,工件表面磨削热散热速率的提高,工件表面残余应力值不断下降. 沿深度方向残余应力的变化具有相同的趋势,即增加磨削液的流量,提高对流换热系数,能够有效降低工件表面的残余应力. 同时对比试件 1 与试件 2、试件 3 和试件 4 的残余应力曲线可知,在磨削工件的表面层,由于试件 1

具有较小的磨削深度和磨削力,因此试件 1 表面层的残余应力值略低于试件 2、试件 3 和试件 4;但沿着试件深度的方向,由于较高的对流换热系数能有效降低热应力产生的残余应力效果,因此,试件 3 和试件 4 比试件 1 具有更小的残余应力值.

3 强化表面完整性试验

3.1 试验条件

试验选用 M7120A 平面磨床,砂轮型号为 WA60,宽度 40 mm,直径 250 mm,工件材料为非调质 45 钢.磨削强化加工选用砂轮速度 $v_s = 37\text{ m/s}$,磨削宽度 $b = 15\text{ mm}$,逆磨削.喷嘴距离磨削区的水平距离 $a = 115\text{ mm}$,垂直高度 $h = 14\text{ mm}$.工件尺寸为 $40\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 14\text{ mm}$,其他条件与参数如表 1 所示.

表 1 表面完整性试验研究条件

Table 1 Surface integrity experimental conditions						
试件号	冷却方式	磨削深度/ μm	进给速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	喷射角/ $(^\circ)$	喷射流量/ $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$	磨削方式
1	干磨	80	0.03	—	—	逆磨削
2	干磨	100	0.03	—	—	
3	冷却	100	0.03	7.5	3	
4	冷却	100	0.03	7.5	12	

3.2 试验结果与分析

3.2.1 显微硬度

试件表面显微硬度值如表 2 所示.由表 2 可知,随着磨削深度的增加,磨削力增大,工件表面产生的磨削热增加,工件表面强化效果明显增强.当在磨削过程中加入了磨削液,部分磨削热被带走,磨削强化效果明显降低;而当增加了磨削液流量,磨削强化效果则不再出现明显变化.这是因为磨削强化的机理可以看作是磨削力和磨削热耦合作用的结果,当磨削液带走了大量的磨削热,由磨削热产生的强化效果明显削弱,而由磨削力引起的机械应变开始主导强化过程.当增大磨削液喷射流量时,由对流换热微分方程^[7]可知,磨削液

表 2 硬度测量结果(HV0.1)

Table 2 Measurement results of hardness (HV0.1)			
试件号	磨削深度/ μm	喷射流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	维氏硬度
1	80	—	613.9
2	100	—	670.1
3	100	3	472.8
4	100	12	460.4

带走的磨削热提升不明显,磨削力的大小改变不明显,因此,磨削强化效果变化不明显.

3.2.2 表面粗糙度

试件表面粗糙度值如表 3 所示.由表 3 可知,随着磨削深度的增加,工件表面粗糙度明显增大.当在磨削加工过程中加入了磨削液,工件表面粗糙度值略有下降,继续增大磨削液喷射量到一定值才能使工件表面粗糙度明显下降.这是因为砂轮的高速旋转使其表面产生一个回转气流^[10],当磨削液流量较小,大部分磨削液被回转气流阻挡而未能进入磨削区.只有适当增大磨削液的流量才能使磨削液有效进入磨削区,带走磨屑和砂轮脱落的磨粒,减少在工件表面产生的划伤,降低工件表面粗糙度.因此,只有在磨削过程中加入足量磨削液才能在一定程度上减小工件表面粗糙度.

表 3 表面粗糙度的测量结果

Table 3 Measurement results of surface roughness			
试件号	磨削深度/ μm	喷射流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	Ra
1	80	—	2.179
2	100	—	2.791
3	100	3	2.781
4	100	12	2.434

3.2.3 表面残余应力

试件表面残余应力值如表 4 所示.对比仿真结果与试验结果可知,仿真结果与试验结果有着相同的趋势.磨削液对试件表面残余应力的影响是较为明显的.随着磨削液流量的增大,对流换热系数的增加,工件表面磨削热散热速率的提高,工件表面残余应力值不断下降.

表 4 表面残余应力

Table 4 Surface residual stress				
试件号	磨削深度/ μm	喷射流量/ $(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	仿真结果/MPa	试验结果/MPa
	μm	$(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	MPa	MPa
1	80	—	59.1	70
2	100	—	133	108
3	100	3	106	104
4	100	12	69.1	82

3.2.4 表面微结构损伤 SEM 图对比

1) 划痕.由图 5a 和 5b 可知,随着磨削深度的增加,工件表面的划痕明显增加.由于在磨削过程中破落和脱落下磨粒伴随着磨屑停留在工件表面上,它们将夹在砂轮与工件之间一起运动,而且砂轮粒度太粗、修整过细,因而产生了划痕.对比图 5b 和 5c 可知,磨削液可以有效减小工件表

面产生的划痕,提高表面质量.对比图 5b,5c 和 5d 可知,只有当磨削液流量增大到一定程度时,工件表面的划痕才出现一定程度的减少.这是由于砂轮产生的回转气流的阻碍,使大部分磨削液被冲回而不能有效进入磨削区;只有当磨削液流量增大到一定程度时,进入磨削区的磨削液才能够有效带走磨屑和脱落的磨粒,降低工件表面划痕.

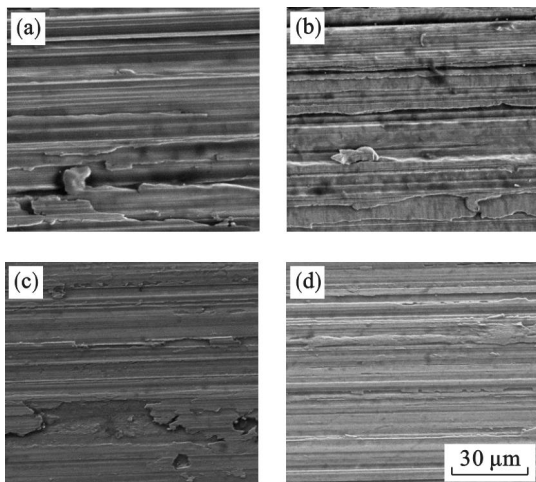


图 5 工件表面划痕的 SEM
Fig. 5 SEM of grinding scratches

(a)—试件 1; (b)—试件 2; (c)—试件 3; (d)—试件 4.

2) 熔融涂覆. 由图 6a 和 6b 可知,随着磨削深度的增加,磨削工件表面熔融涂覆增加.这是因为增加磨削深度使工件表面产生的磨削热增加,温度急剧上升,工件表层金属不断熔化,熔融涂覆现象加剧.对比图 6b 和 6c 可知,当工件表面存在磨削液的冷却,熔融涂覆现象明显减小.但对比图 6b,6c 和 6d 可知,随着磨削液流量的不断增大,熔融涂覆现象不再出现明显减小的现象.由

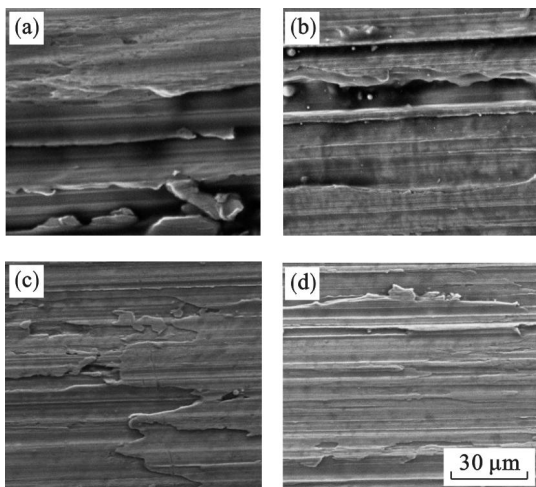


图 6 工件表面熔融涂覆 SEM 图
Fig. 6 SEM of surface melting coating

(a)—试件 1; (b)—试件 2; (c)—试件 3; (d)—试件 4.

对流换热微分方程可知,虽然磨削液流量增大,但被带走的磨削热量改变不明显,因此,熔融涂覆现象不随磨削液流量的增大而明显改善.

4 结 论

1) 增加磨削深度能够有效提升工件表面强化程度,工件表面存在一定的微结构损伤.加入磨削液能够有效地降低工件表面微结构损伤,但削弱了磨削热对工件表面强化的效果.

2) 在给定的加工条件下,只有当磨削液流量增加到一定程度时,工件表面粗糙度与表面微结构损伤能够得到改善.

3) 在给定的加工条件下,当磨削液流量增加到一定量之后,提高磨削液的流量对强化效果的影响不明显.

参考文献:

- [1] Brinksmeier E, Brockhoff T. Advanced grinding processes for surface strengthening of structural parts [J]. *Machining Science and Technology*, 1997, 1(2): 299–309.
- [2] Brinksmeier E, Heinzel M. Friction, cooling and lubrication in grinding [J]. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(2): 581–598.
- [3] 冯宝富,蔡光起. 磨削中摩擦的一些研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2002, 127(1): 46–53.
(Feng Bao-fu, Cai Guang-qi. Some studies in grinding friction [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2002, 127(1): 46–53.)
- [4] Malkin S, Cook N H. The wear of grinding wheels. Part 1: attritious wear [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1971, 93: 1120–1128.
- [5] Malkin S, Cook N H. The wear of grinding wheels. Part 2: fracture wear [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1971, 93: 1129–1133.
- [6] 夏启龙,周志雄,黄向明,等. 平面磨削热源模型的仿真与比较研究[J]. 计算机仿真, 2010(1): 297–300.
(Xia Qi-long, Zhou Zhi-xiong, Huang Xiang-ming, et al. Simulation and comparison of thermal resource models in surface grinding [J]. *Computer Simulation*, 2010(1): 297–300.)
- [7] Malkin S, Guo C. Thermal analysis of grinding [J]. *General Assembly of CIRP*, 2007, 56(2): 760–782.
- [8] 张久龙. 淬硬性和淬透性的概念介绍[J]. 金属加工, 2008(19): 67–69.
(Zhang Jiu-long. The concept introduce of the hardening capacity and hardenability [J]. *Metal Working*, 2008(19): 67–69.)
- [9] Jin T, Rowe W B, McCormack D. Temperatures in deep grinding of finite workpieces [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42(1): 53–59.
- [10] Hossain S, Dahmond M R, Truman C. Prediction and measurement of residual stresses in quenched stainless-steel spheres [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 373(2): 339–349.