

基于微切削模型的不锈钢研磨表面残余应力规律

袁巨龙¹, 韩文杰^{1,2}, 杜东兴², 黄文², 吕迅¹

(1. 浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310023;
2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 基于单颗粒微切削模型, 研究分析研磨工艺对 HR-2 抗氢不锈钢工件表面残余应力的演化规律与产生机制的影响。**方法** 建立研磨磨粒单颗粒微切削残余应力数学模型, 采用正交试验获得研磨工艺参数与表面残余应力大小、磨粒微切削切深和切向力回归方程, 利用单因素试验对研磨工艺进行验证, 获得研磨工艺参数对表面残余应力大小、表面磨粒切深和切向力的影响规律, 并开展单因素试验结果与数学模型计算结果对比研究。**结果** 试验中, 磨粒粒径从 10 μm 变化为 50 μm 时, 残余应力从 -130 MPa 变化至 -345 MPa; 研磨压力从 10 N 变化至 50 N 时, 残余应力从 -135 MPa 变化至 -253 MPa; 而转速的变化对残余应力结果的影响规律不显著。不同工艺参数试验中, 模型所得计算值和试验值误差基本在 10% 以内。**结论** 根据正交试验结果和单因素试验得出, 研磨工艺对残余应力影响的显著度从高到低为磨粒粒径 > 研磨压力 > 研磨转速, 磨粒切深和切向力与残余应力关系显著, 建立的单颗粒研磨模型可以预测不同研磨工艺参数条件下的残余应力产生规律。

关键词: 残余应力; 表面完整性; 抗氢不锈钢; 研磨工艺; 微切削模型; 残余应力预测模型; 单磨粒

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)01-0422-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.01.039

Law of Residual Stress on Stainless Steel Lapping Surface Based on Micro Cutting Mode

YUAN Ju-long¹, HAN Wen-jie^{1,2}, DU Dong-xing², HUANG Wen², LYU Xun¹

(1. Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the evolution rule and mechanism of lapping process on the surface residual stress of HR-2 hydrogen steel based on the micro cutting model. A mathematical model of single-grain micro-cutting residual stress of abrasive particles was established. Orthogonal experiments were conducted to obtain the regression equations of lapping process parameters and surface residual stress, micro-cutting depth of abrasive particles and tangential force. Single-factor experiments were conducted to verify the lapping process. The influence of the lapping process parameters on the surface residual stress, the

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-09-07

Received: 2020-07-27; Revised: 2020-09-07

基金项目: 国防基础科研“科学挑战计划”项目 (TZ2016006-0107-01); 中国科学物理研究院超精密加工重点实验室基金 (ZM18003)

Fund: Supported by the “Science Challenge Project” of Basic Research on National Defense (TZ2016006-0107-01) and Foundation of CAEP Key Laboratory of Ultra-Precision Machining (ZM18003)

作者简介: 袁巨龙 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为超精密加工技术及装备。邮箱: jlyuan@zjut.edu.cn

Biography: YUAN Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: ultra precision machining technology and equipment. E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn

引文格式: 袁巨龙, 韩文杰, 杜东兴, 等. 基于微切削模型的不锈钢研磨表面残余应力规律[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 422-431.

YUAN Ju-long, HAN Wen-jie, DU Dong-xing, et al. Law of residual stress on stainless steel lapping surface based on micro cutting mode[J]. Surface technology, 2021, 50(1): 422-431.

cut depth of the abrasive particles and the tangential force was obtained. And a comparative study between the experimental results and the mathematical model calculation results was carried out. The residual stress changed from -130 MPa to -345 MPa when the abrasive particle size was changed from $10\ \mu\text{m}$ to $50\ \mu\text{m}$, and the residual stress changed from -135 MPa to -253 MPa when the lapping pressure was changed from $10\ \text{N}$ to $50\ \text{N}$. The change of the rotation speed had no significant effect on the residual stress result. In the test of different process parameters, the error between the calculated value and the experimental value of the model was basically within 10%. Based on test results, it is concluded that the significant degree of influence of the lapping process on the residual stress from high to low is: abrasive particle size, lapping pressure, lapping speed; abrasive particle depth and tangential force have significant relationships with residual stress. The single particle lapping model can predict the law of residual stress under different lapping process parameters.

KEY WORDS: residual stress; surface integrity; hydrogen resistant stainless steel; lapping process; micro cutting model; prediction model of residual stress; single abrasive

HR-2 抗氢不锈钢（下称工件）具有耐氢、氮、氨腐蚀性质和良好的抗氢脆性能，在能源工业及相关领域中得到广泛应用^[1]。在大科学装置实验室的试验中，HR-2 抗氢不锈钢等材料制成的样品表面完整性要求接近理想状态，不仅需要极高的平面精度，还需要良好的形状精度稳定性。然而机械加工后表面存在过大残余应力，将导致样品形状精度随时间发生微变形，影响物理实验的一致性和准确性^[2]。为确保工件的面形精度，需要对加工残余应力的产生规律和机制进行探究，目前国内外对机械加工残余应力研究多集中在磨削和车削等工序，如 P. N. MOULIK 等^[3-4]研究了磨削中热应力、机械应力以及材料相变应力三者耦合作用的影响，阐述了磨削力等因素对材料表面磨削残余应力形成规律的影响。胡忠辉等学者^[5-7]对磨削残余应力的机理进行了研究，解释了磨削过程中残余应力主要产生的原因。胡自化等学者^[8-9]研究了刀具对工件表面残余应力的影响。

尽管上述对机械加工残余应力的研究已经相当深入，但以上加工手段多用于粗/半精加工，随着精密器械表面精度的要求越来越高，对精密加工方式（如研磨）的残余应力研究也将深入^[10]。研磨与磨削等机械加工方式相比都是机械方式去除表面的过程，但一般来说研磨去除量小得多，且几乎不产生热效应，因而表面残余应力的产生和表现会有相当大的差异性。然而目前针对研磨工艺的残余应力研究少且集中在参数变量对残余应力的影响规律，如杨建东等学者^[11-12]研究了不同研磨工艺下残余应力的变化规律，研究方向并未深入到残余应力大小的演化规律与产生机制。

对磨粒去除表面过程进行探究，是进一步深入研究研磨与残余应力产生机制的方向，但研磨加工是一种相当复杂的多颗粒参与去除的加工方式，故利用单颗粒微切削的方法简化类似的加工方式是一个重要的手段。如对磨削多颗粒简化研究，Guoqiang Yin 等学者^[13]研究了单颗粒微切削复合材料的磨削力理论，建立了数学模型和有限元模型实验，证明了数学理论模型和有限元模型的一致性。Chuanmin Zhu 等学者^[14]

根据单颗粒微切削去除理论建立了粗糙度数学模型，预测了磨削过程中工艺参数对粗糙度的影响。Chuanjin Huang 等学者^[15]研究半导体抛光的微切削模型，建立了不同形状磨粒的接触模型。这些研究表明了建立单颗磨粒微切削模型进行研磨残余应力分析的可行性，且目前尚未有关于研磨加工磨粒微切削与残余应力关系的报道。

综上所述，基于单颗粒微切削理论，开展针对研磨工艺参数与样品表面残余应力关系的研究是非常有必要和意义的。本文将利用微切削模型数值模拟与试验结合的方法，分析磨粒微切削理论并建立研磨工序下磨粒微切削表面产生残余应力的数学模型，并开展研磨工艺参数与残余应力关系的试验研究。

1 研磨磨粒微切削残余应力模型

固结磨料研磨加工可以看作是大量微小高硬度磨粒耕犁表面的过程，在已加工表面上会残留加工应力变质层，使得加工路径上的材料表面晶粒冷作硬化，从而产生已加工残余机械应力^[11]，如图 1a 所示。研磨加工因为极小的切入去除量以及供液的冷却作用，热效应几乎可以忽略，所以在不考虑热效应的情况下，研磨过程中颗粒微切削时的机械效应将是产生残余应力的主导因素。

建立磨粒微切削表面受力如图 1b 所示，其中磨粒受到工件对其施加从 A 至 B 的弹性区的摩擦作用力 $F_{\tau 1}$ ：

$$F_{\tau 1} = \mu E \pi R^3 (1 - \cos \alpha)^2 \quad (1)$$

式中： E 是工件加工面的弹性模量； R 为磨粒粒径； α 为磨粒沿表面切削时磨粒与接触面的夹角； μ 为摩擦系数。

磨料所受的总切向力除了磨粒划擦表面的摩擦力外，还有去除切屑时的反作用力 $F_{\tau 2}$ ，公式如下：

$$F_{\tau 2} = \int_{\cos^{-1}\left(\frac{R-h}{R}\right)}^{\cos^{-1}\left(\frac{R-t}{R}\right)} 2R^2 \frac{\tau \sin(\alpha_0 - \beta)}{\cos^2[(\alpha_0 + \beta)/2]} \sin^2 \alpha_0 d\alpha_0 \quad (2)$$

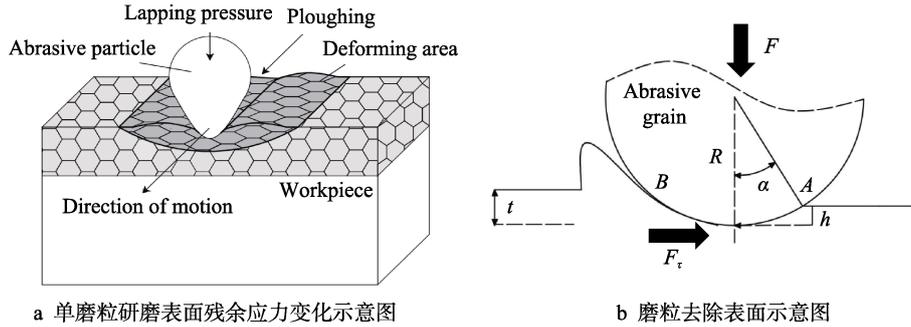


图1 表面材料机械加工示意图

Fig.1 Schematic diagram of machining of surface material: (a) schematic diagram of residual stress in single abrasive lapping, (b) abrasive particle removal surface

式中： α_0 、 β_0 为瞬时摩擦角； τ 为剪切强度； t 为切入深度； h 为回弹高度。将分力整合即为磨粒所受切向切削力 F_τ [16-17]：

$$F_\tau = \mu E \pi R^3 (1 - \cos \alpha)^2 + \int_{\cos^{-1}(\frac{R-h}{R})}^{\cos^{-1}(\frac{R-t}{R})} 2R^2 \frac{\tau \sin(\alpha_0 - \beta_0)}{\cos^2[(\alpha_0 + \beta_0)/2]} \sin^2 \alpha_0 d\alpha_0 \quad (3)$$

在建立研磨磨粒微切削表面受力模型的基础上，对残余应力产生条件进行研究，建立如图2所示的研磨应力模型。

根据应力模型可得到机械效应应力公式为：

$$\sigma = \frac{2z}{\pi} \int_{-a}^a \left(\frac{p(s)(x-s)^2 + q(s)(x-s)^2}{((x-s)^2 + z^2)^2} \right) ds \quad (4)$$

式中： x 和 z 为接触到应力发生点之间的距离； p 是研磨压力分布； q 是切向力分布； a 为切屑接触长度。

$$p(s) = F \left(1 - \frac{s}{a} \right), \quad q(s) = F_\tau \left(1 - \frac{s}{a} \right) \quad (5)$$

式中： F 为法向压应力； F_τ 为磨粒所受的切向切削力，见式(3)。根据文献[18]的研究结果， a 的值由

$$\sigma = -\frac{2z}{\pi} \int_{-kRHE/\sin\alpha}^{kRHE/\sin\alpha} \left\{ F \left(1 - \frac{s \cdot \sin \alpha}{kRHE} \right) (x-s)^2 + F_\tau \left(1 - \frac{s \cdot \sin \alpha}{kRHE} \right) (x-s)^2 \right\} / [(x-s)^2 + z^2]^2 ds \quad (7)$$

其中：

$$\sin \alpha = \sqrt{R^2 - [R - (t - h)]^2} / R \quad (8)$$

不考虑加工材料磨粒形状等因素，根据公式(7)可知：在机械作用应力效应中，磨粒粒径 R 、磨粒切深 t 、研磨压力 F 、切向力 F_τ 与残余应力 σ 有着直接关系。

2 试验

2.1 材料

试验工件为 $\phi 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ HR-2 抗氢钢件，材料的力学性能参数如表1所示 [19-20]。

表1 抗氢钢的主要力学性能

Tab.1 Mechanical property of hydrogen resistant stainless steel			
τ/MPa	Reduction of area/%	Impact ductility/%	E/GPa
715	51	54	193

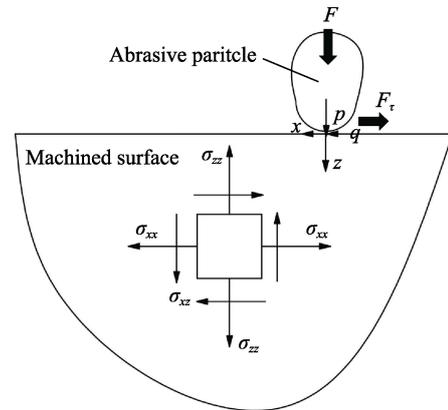


图2 微切削应力产生模型

Fig.2 Model on generation of micro-cutting stress

式(6)计算：

$$a = \frac{kRHE}{\sin \alpha} \quad (6)$$

式中： k 为系数； H 为材料硬度。将 $p(s)$ 和 $q(s)$ 代入式(4)，可以得到研磨工序中机械效应产生的残余应力 σ ：

2.2 条件

2.2.1 研磨设备

试验中使用 UNIPOL-1200S 自动压力研磨抛光试验机，装置示意图如图3所示。在试验机下盘粘接

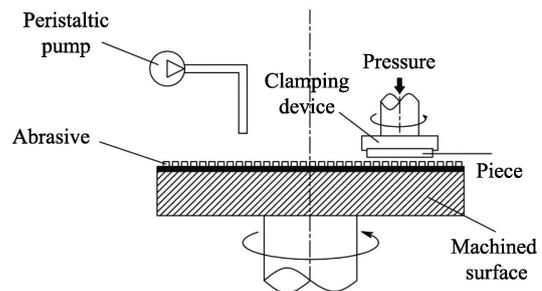


图3 研磨试验原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the lapping experiment

固结磨料垫，磨粒成分为碳化硅，使用去离子水作为研磨液，为了使得研磨过程中排屑顺畅，实验中上载物盘和下研磨盘的转向相同。

2.2.2 残余应力测量

使用 μ -360X 残余应力仪进行工件表面残余应力测量。试验中具体测量参数如表 2 所示。

工件前道工序为磨削，磨削所留纹路如图 4a 所示。磨削中加工面产生塑性变形，在沿平行磨削方向

收缩，而在垂直磨削方向伸长，导致沿平行磨削方向产生残余拉应力而垂直方向产生残余压应力^[21-23]。分别标识垂直磨削纹路方向为 X 和平行磨削纹路方向为 Y 。经测试，试验前 X 方向的平均残余应力为 $-300 \sim -250$ MPa， Y 方向的平均残余应力为 $50 \sim 100$ MPa。为确保试验结果的完整性，同时对垂直、平行磨削纹路方向的残余应力进行测量研究。

表 2 XRD 残余应力仪参数
Tab.2 Parameter of XRD residual stress gauge

X-ray tube	Tube voltage/kV	Tube current/mA	Measuring diameter/mm	Diffraction plane	Diffraction $\theta/(\circ)$	Incidence angle/ (\circ)
Cr	30	1.5	2	211	156	35

研磨试验过程中，表面测量 72 个点的残余应力，检测点包络试样件，并计算平均值大小，测量具体点位如图 4b 中的红色点所示。将残余应力数据带入公式(9)处理。

$$\bar{x} = \sum_{n=1}^{72} x_n / 72 \quad (9)$$

式中： x_n 代表所测量的第 n 点的残余应力数值，测量数总量为 72，则 \bar{x} 即为所求得残余应力平均值，后续试验中残余应力皆为表面均值。

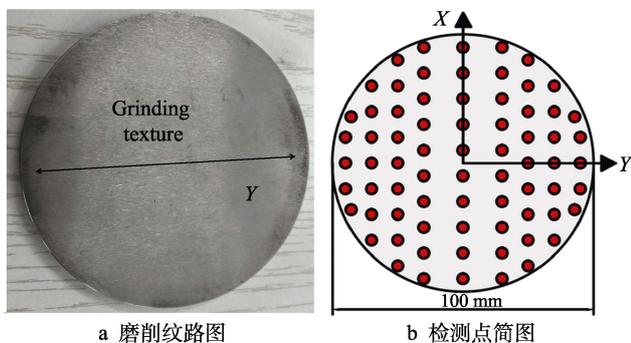


图 4 残余应力测量简图

Fig.4 Residual stress distribution point diagram: (a) the picture of grain, (b) residual stress distribution point

2.2.3 研磨受力测量

图 5 为 DFH-40 传感器测量位置示意图，分别能够检测加工件所受法向力 F 和切向力 F_t 。

传感器测量间隔为 0.01 s，精度为 0.1 mN。测量结果滤波后示意如图 6a—d 所示。图 6 中红色曲线为工件所受切向力 F_t ，黑色曲线为法向力 F 。对比图 6a—d 各变量试验，试验机系统施加载荷法向力 F 在精密控制系统中枢下围绕设定压力波动极小，而随着压力和转速的增大， F_t 波动较大。在试验开始一定时间后，随着去离子水的注入，表面摩擦减小且磨粒钝化，随着研磨时间的增加，切向力 F_t 减小并趋向平稳。

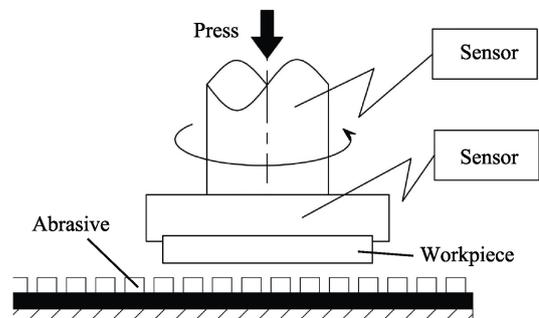


图 5 传感器测力示意图

Fig.5 Schematic diagram of sensor force measurement

2.2.4 磨粒切深测量

磨粒微切削切深由研磨结束后表面划擦深度来表征，使用 Sensofar 光学轮廓仪对加工表面形貌进行观测，并用轮廓仪自带分析软件对加工后表面磨粒划痕做贯穿拟合线，并对拟合线进行二次分析，根据软件分析提取拟合线上各点处划擦深度大小如图 7 所示。下文中各试验磨粒切深数值即为拟合线上划擦深度均值。

2.3 试验设计

为了能够系统地研究各研磨工艺参数对残余应力等结果的影响规律与程度，首先采用正交方法进行试验，设计三水平三因素正交试验 (3^3)^[24-25]，正交试验的研磨过程参数及水平见表 3。

表 3 研磨正交试验参数和水平
Tab.3 Parameters and levels of lapping orthogonal test

Variable factor	Levels		
	1	2	3
Lapping pressure/N	15	30	45
Abrasive particle size/ μm	10	20	40
Speed/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	30	50	70

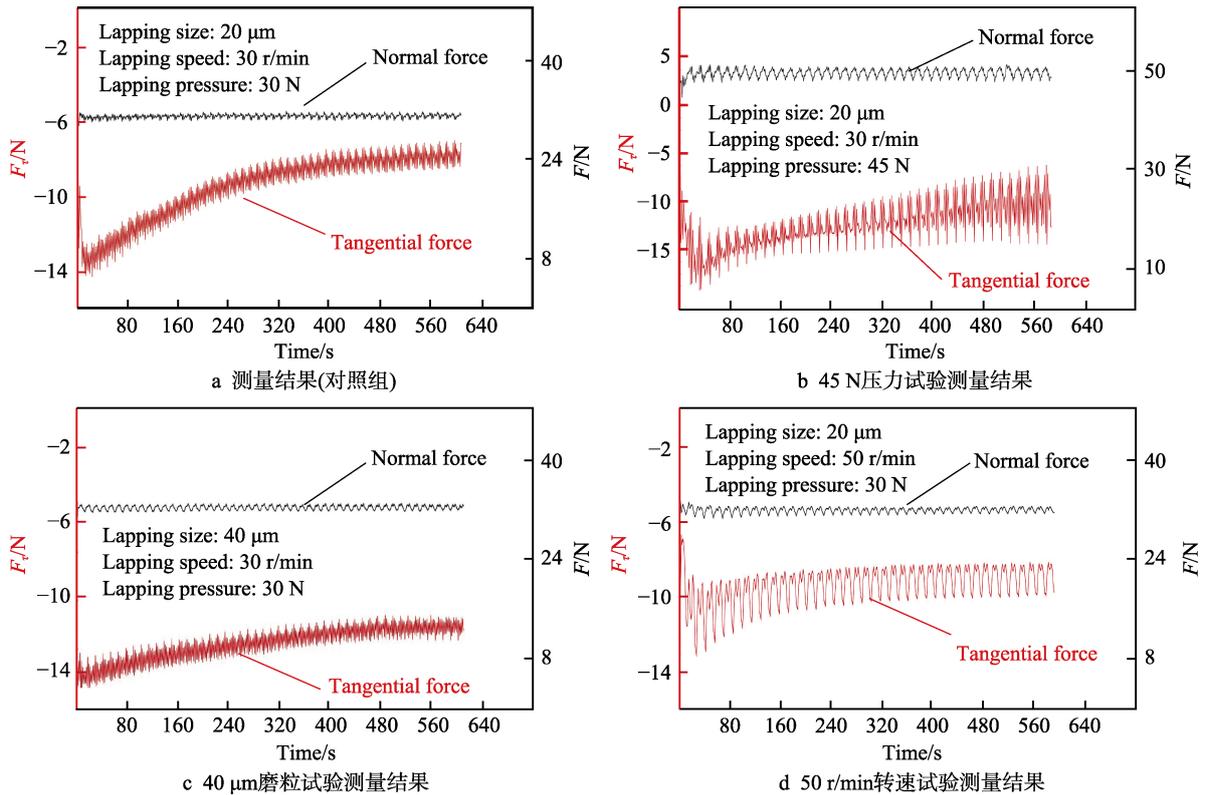


图6 研磨试验件受力测试结果

Fig.6 Force test of the lapping experimental piece: (a) control group, (b) measurement result of 45 N, (c) measurement result of 40 μm, (d) measurement result of 50 r/min

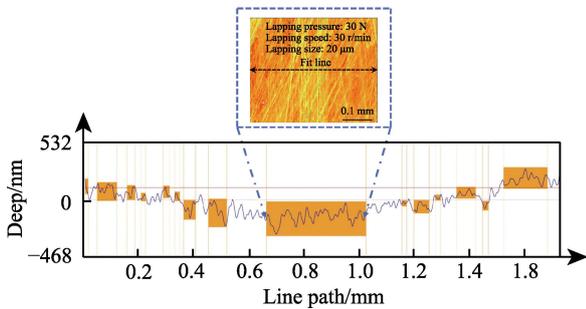


图7 磨粒切深结果

Fig.7 Graph of cutting depth of abrasive particles

为了更加详细地研究各个研磨工艺参数（研磨压力 F 、磨粒粒径 R 、研磨转速 v ）对研磨加工残余应力的影响规律，并与计算模型进行对比，采用单因素法进一步开展研磨试验，试验工艺参数如表4所示。

表4 研磨实验单因素工艺参数

Tab.4 Single factor process parameters of lapping test

Group	Abrasive size/ μm	Pressure/N	Speed/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	10~50	30	30
2	20	10~50	30
3	20	30	30~90

3 结果分析与讨论

3.1 研磨工件整面残余应力演化规律

3.1.1 研磨工件残余应力随时间演化

为研究工件整面残余应力随研磨时间的演化规律，进行数组单因素试验如图8所示。从图8中残余应力随时间曲线的波动可以看出，工件表面研磨加工残余应力数值在试验30 min后趋向平稳状态。图8a和图8b上部分为应力云图，分别代表了10 μm粒径与15 N试验下工件整面残余应力随时间的演化过程，颜色越偏向蓝色，表示残余压应力越大，可以看到即使是在两种不同变量下试验，云图随时间的演化规律也具有相似性，工件在研磨中由拉应力状态转变为压应力状态，研磨初始阶段的应力变化更快，且由于研磨的边缘效应，工件边缘部分的应力变化更快，根据云图对比可知，不同变量下研磨，工件整面残余应力演化也具有 consistency。

3.1.2 研磨工件残余应力随不同变量演化

将粒径变量下残余应力研磨前后结果对比见图9。从图9中可以看到，研磨前的三片试样（图9a—c）初始残余应力分布规律相近，研磨加工试验后，结果如图9d—i所示，由于研磨均匀去除的特性，使得工件表面各点的残余应力分布相一致。对比不同粒径云

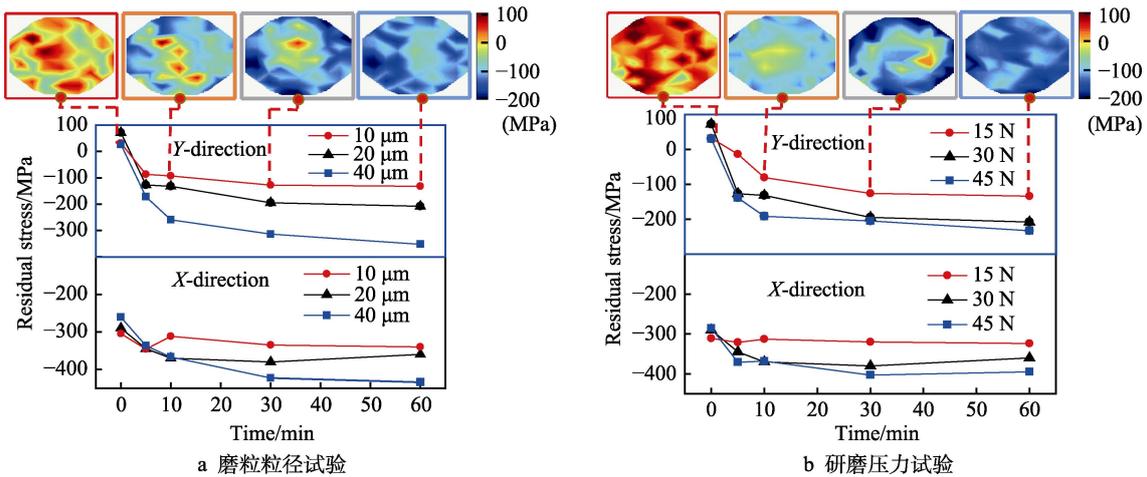


图 8 残余应力大小随时间的演化

Fig.8 Change of residual stress with time: (a) abrasive particle size test, (b) abrasive particle pressure test

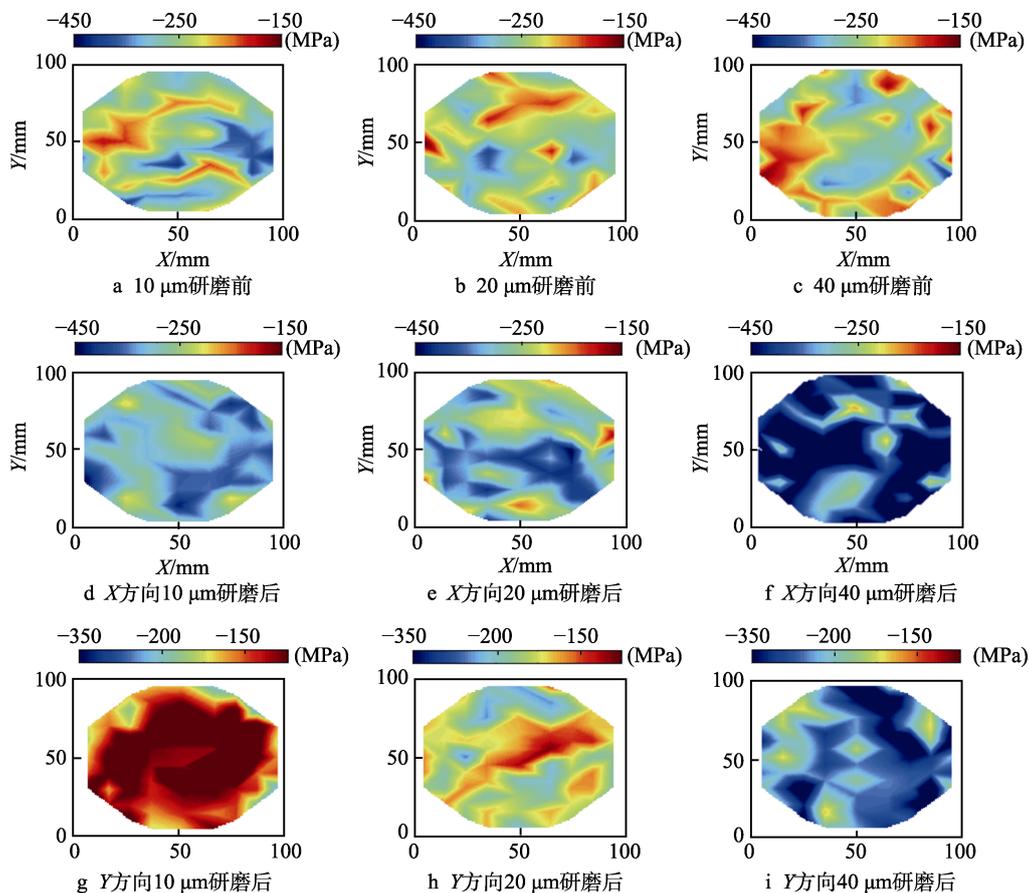


图 9 初始状态和结束状态残余应力对比

Fig.9 Comparison of initial and end residual stress states: (a) 10 μm before lapping, (b) 20 μm before lapping, (c) 40 μm before lapping, (d) 10 μm in the X-direction, (e) 20 μm in the X-direction, (f) 40 μm in the X-direction, (g) 10 μm in the Y-direction, (h) 20 μm in the Y-direction, (i) 40 μm in the Y-direction

图，随着磨粒粒径的增大，表面上各点残余压应力的数值相对越大，这表明研磨工艺变量对工件整体残余应力的变化效果明显。

3.2 正交试验结果分析

为了使得试验数据更加稳定可靠，根据图 8 中残

余应力时间演化规律，确定试验时间为 1 h，并根据相应序列号，对研磨完成后的工件进行测量，获得表 5 的正交试验结果，并完成初步线性回归分析，正交试验设计和试验结果见表 5。

表 5 正交试验结果
Tab.5 Orthogonal test results

No.	Variable factor			Test results		
	Lapping pressure /N	Abrasive particle size/ μm	Speed /($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	Residual stress /MPa	Lapping depth/nm	Tangential force /N
1	15	10	30	-112	101	2.1
2	15	20	50	-134	134	3
3	15	40	70	-183	393	4.5
4	30	10	30	-145	165	6.2
5	30	20	50	-208	232	8.6
6	30	40	70	-289	473	12.3
7	45	10	30	-195	197	10.3
8	45	20	50	-233	257	15.4
9	45	40	70	-321	537	20.7

使用 SPSS 统计分析软件对残余应力 σ 、磨粒切深 t 、切向力 F_τ 分别进行线性回归分析,从而得到一阶回归方程,如公式(10)—(12)所示。

$$\sigma = -3.4F - 3.65R - 14.167 \quad (10)$$

$$t = 4.01F + 10.8R - 95.33 \quad (11)$$

$$F_\tau = 0.401F + 0.205R - 7.817 \quad (12)$$

式中: F 为研磨压力; R 为磨粒粒径。

多元线性回归分析相关结果见表 6。由表 6 结果可知,变量残余应力 σ 、磨粒切深 t 、总切向力 F_τ 所建立的一阶回归方程,其拟合优度 R^2 和校正测定系数 R_{adj}^2 均大于 90%,表明回归方程的拟合效果相当好。

对显著性 p 值进行分析,其中残余应力 σ 的自变量研磨压力 F 、磨粒粒径 R 的 p 值都小于 0.01,这表明这些参数对残余应力的影响相当显著。然而研磨转速 v 的 p 值远大于 0.05,这表明其对结果的相关性差,影响程度由高到低为磨粒粒径 R >研磨压力 F >研磨转速 v ;对于磨粒切深 t ,研磨转速 v 的 p 值依旧远大于 0.05,其余变量的影响程度仍然显著,从结果来看,影响程度从高到低为磨粒粒径 R >研磨压力 F >研磨转速 v ;对于切向力 F_τ ,变量影响程度从高到低为研磨压力 F >磨粒粒径 R >研磨转速 v 。

表 6 线性回归分析结果
Tab.6 Linear regression analysis results

Dependent variable	Goodness of fit $R^2/\%$	Correction factor $R_{\text{adj}}^2/\%$	Saliency p		
			Lapping pressure F	Abrasive particle size R	Rotating speed v
Residual stress σ	97.3	94.6	0.55×10^{-3}	0.34×10^{-3}	0.838
Abrasive cut t	94.6	91.4	0.047	0.2×10^{-5}	0.614
Tangential force F_τ	94.2	92.3	0.11×10^{-5}	0.4×10^{-2}	0.364

3.3 单因素试验结果分析

3.3.1 磨粒粒径变量试验

进行单因素试验研究,各变量试验时间为 1 h,对试验结果进行数据测量。图 10 为残余应力大小随磨粒粒径大小变化的单因素试验结果。 X 、 Y 两方向残余压应力数值均随磨粒粒径的增大呈现线性增加,其中磨粒粒径为 10 μm 条件下的研磨残余压应力数

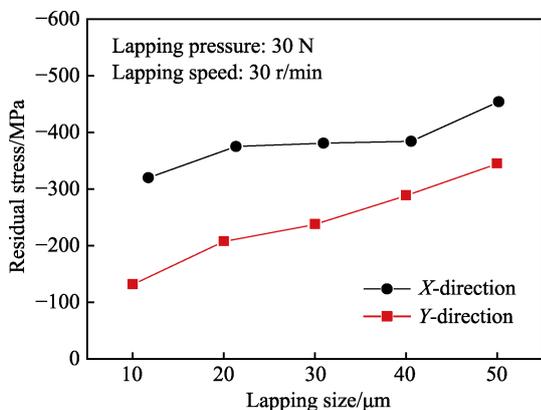


图 10 X 、 Y 方向上不同磨粒粒径对残余应力均值变化的影响

Fig.10 Effect of different abrasive size on residual stress in X -direction and Y -direction

值比磨粒粒径为 50 μm 情况下所得数值结果相差近 200 MPa。

图 11 为力传感器和光学轮廓仪所测磨粒切向力、磨粒切深与残余应力试验结果对比。当残余应力从 -130 MPa 增加到 -345 MPa 时,磨粒切深从 0.15 μm 增加到 0.65 μm ,磨粒总切向力从 6.2 N 增加到 16.7 N,所以随着磨粒粒径的变大,残余应力增大的同时切向力和磨粒切深也随着显著增大。此外,折线代表的残余应力大小的变化趋势分别与柱状图代表

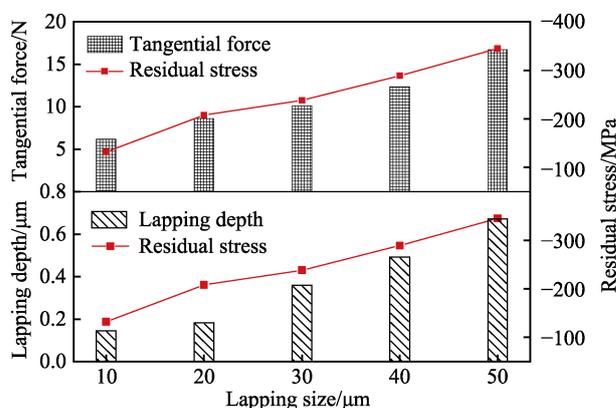


图 11 磨粒粒径变量下磨粒微切削与残余应力的关系
Fig.11 Relationship between abrasive micro-cutting and residual stress under variable abrasive size

的切向力和磨粒切深的变化趋势有着较好的一致性，说明了残余应力变化和磨粒切深与磨粒受力有着内在关联，这与残余应力公式(7)所推得的结论相仿。

综上所述，可以得出：随着磨粒粒径的增大，导致磨粒与工件加工表面间的作用力与所产生的磨粒切深增大，加深了冷塑性变形导致磨粒微切削机械效应带来的压应力增大，从而使得研磨表面残余压应力增大。

3.3.2 研磨压力变量试验

图 12 中，工件表面残余压应力随研磨压力线性增大的趋势显著。研磨压力从 10 N 变至 50 N 时，两方向残余压应力增加 100 MPa 左右。其中，Y 方向 50 N 研磨压力下的残余压应力相对 10 N 研磨压力增大 80% 以上，且比 X 方向的应力变化更呈现线性规律。

根据图 13 结果显示，随着研磨压力的变化，当残余应力从 -140 MPa 变化至 -253 MPa 时，磨粒切深从 0.14 μm 增加到 0.33 μm ，磨粒总切向力从 2.5 N 增加到 18.8 N。研磨压力变量试验和磨粒粒径变量试验结果规律相仿，在相同研磨加工条件下随着研磨压力的变大，切向力、磨粒切深也增加明显并保持相似的变化规律。这说明随研磨压力的增大，作用力与磨粒切深增大，从而增强了机械效应产生的应力，引起工

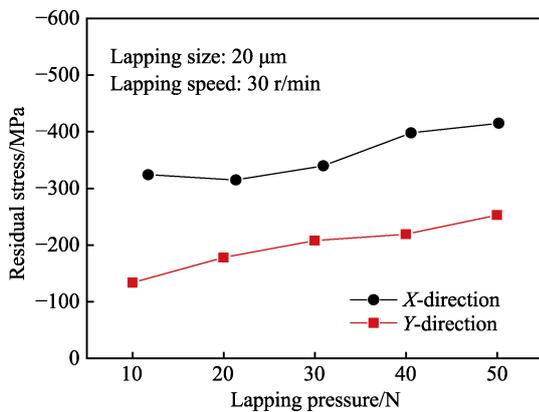


图 12 X、Y 方向上不同压力对残余应力均值变化的影响
Fig.12 Effect of different pressure on residual stress in X-direction and Y-direction

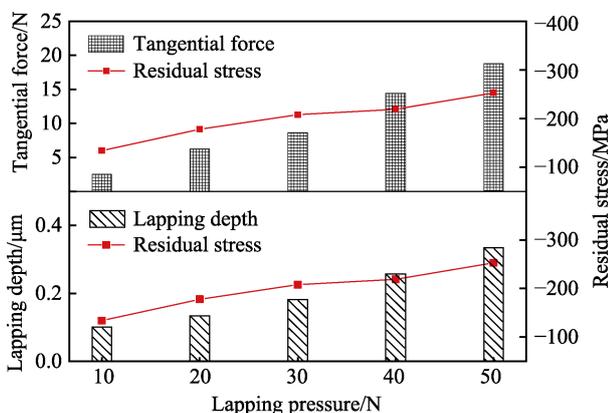


图 13 研磨压力变量下磨粒微切削与残余应力的关系
Fig.13 Relationship between abrasive micro-cutting and residual stress under variable lapping pressure

件表面的残余压应力增大。

3.3.3 研磨转速变量试验

图 14 显示，随研磨速度的提高，X 方向上随着转速产生的残余压应力的变化波动很小，且转速大于 50 r/min 时，Y 方向的残余压应力随转速的增大有减小趋势。从总体变化上来看，研磨转速在本次试验条件下对残余应力大小的影响不显著。

图 15 显示本次试验条件中，磨粒切深和切向力大小随转速增大有一定波动的变化但并不明显，也可以看到残余应力和磨粒切深、受力有着相当一致的波动，这表明机械效应产生的应力与磨粒切深等微切削因素存在内在联系，也说明了本次试验条件下研磨转速并不是主要影响残余应力等结果的因素。

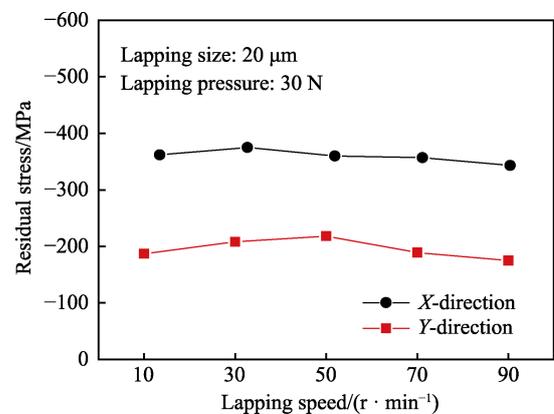


图 14 X、Y 方向上不同转速对残余应力均值变化的影响
Fig.14 Effect of different speed on residual stress in X and Y directions

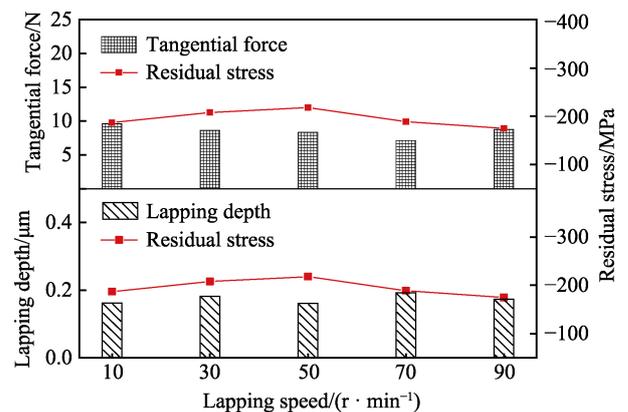


图 15 研磨转速变量下磨粒微切削与残余应力的关系
Fig.15 Relationship between abrasive micro-cutting and residual stress under variable lapping speed

3.4 单因素残余应力试验结果与计算残余应力结果误差分析

根据单因素试验结果，将各研磨工艺所得磨粒切深 t 、切向力大小 F_τ 、研磨压力 F 等数值代入计算残余应力公式(7)，各变量工艺试验结果与计算结果对比如图 16a—c 所示。

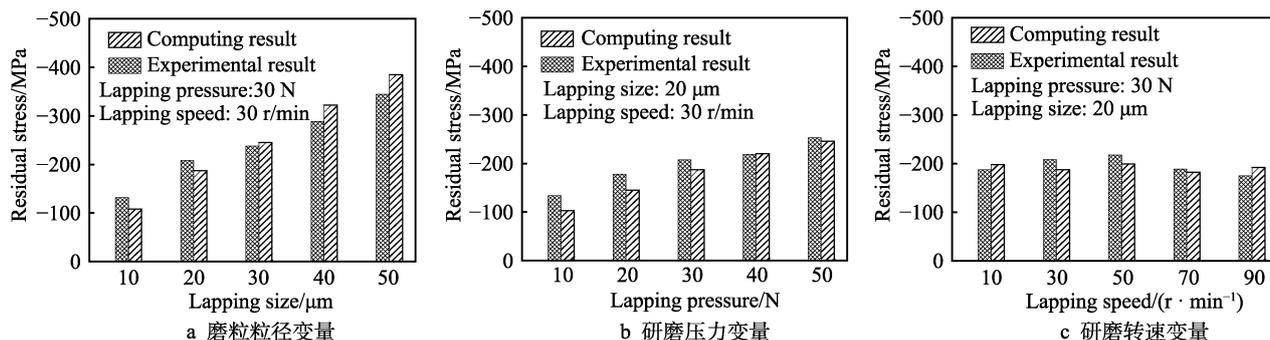


图16 试验结果与计算结果对比图

Fig.16 Comparison of test results and calculation results: (a) variable size, (b) variable pressure, (c) variable speed

图16a和图16b中,残余应力计算值和试验值随变量的增大而显著增大,两者变化波动规律一致;图16c中,由于转速对切向力等机械效应因素的影响较小,计算值和试验值的波动都很小。根据图6a—c可以得出,随着不同工艺参数的变化,计算值与试验值的误差基本在10%以内。

4 结论

1) 建立磨粒微切削数学模型,得出研磨加工方式下单颗粒微切削参数与机械效应产生残余压应力的关系式,公式表明在机械应力效应中,磨粒粒径、磨粒切深、研磨压力、切向力参数与残余应力有着直接关系。

2) 根据工件残余应力演化结果分析,研磨工艺变化对工件整面残余应力的变化效果明显,但即使是不同工艺下,工件整面残余应力随时间演化也具有的一致性规律。

3) 正交试验线性回归分析,建立了研磨过程中残余应力、磨粒切深、磨粒所受切向力的回归模型,结果显示各工艺参数对残余应力影响的显著度从高到低为磨粒粒径>研磨压力>研磨转速。

4) 基于单因素试验工艺变量结果:磨粒粒径、研磨压力对残余应力、磨粒切深和切向力大小的影响显著,而研磨转速对残余应力等的影响不明显,随变量波动较小;将残余应力与磨粒切深、切向力大小进行对比,三者随着研磨工艺试验条件变化表现出相当好的一致性,表明了机械效应产生的应力与磨粒切深等微切削因素存在内在联系,是直接影响残余应力大小的原因,与数学模型公式推导结论相符。

5) 本文各工艺变量下微切削残余应力计算模型数值与单因素试验测试结果值的误差基本在10%以内,证明了建立的单颗粒研磨模型预测不同研磨工艺参数条件下残余应力的产生规律是可行的。

参考文献:

[1] 雷华东,黄文荣,郭鹏,等. 抗氢不锈钢的激光焊接性

及气孔成因初探[J]. 焊接技术, 2002, 31(3): 8-10.

LEI Hua-dong, HUANG Wen-rong, GUO Peng, et al. Laser weldability and stomatal formation of hydrogen resistant stainless steel[J]. Welding technology, 2002, 31(3): 8-10.

[2] 张世文,刘仓理,李庆忠,等. 初始应力状态对材料层裂破坏特影响研究[J]. 力学学报, 2008, 40(4): 535-542. ZHANG Shi-wen, LIU Cang-li, LI Qing-zhong, et al. Study on the special influence of initial stress state on material fracture failure[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2008, 40(4): 535-542.

[3] MOULIK P N, YANG H T Y. Simulation of thermal stresses due to grinding[J]. International journal of mechanical sciences, 2001, 43(3): 831-851.

[4] KERMOUCHE G, RECH J, HAMD I. On the residual stress field induced by a scratching round abrasive grain[J]. Wear, 2010, 269(5): 86-92.

[5] 胡忠辉,袁哲俊. 磨削残余应力产生机理的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1989, 6(3): 51-60.

HU Zhong-hui, YUAN Zhe-jun. Study on the mechanism of residual stress in grinding[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1989, 6(3): 51-60.

[6] RECH J, KERMOUCHE G, GRZESIK W, et al. Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel[J]. Mater process tech, 2008, 208(1-3): 187-195.

[7] STEFAN T, FRITZ K. Residual stress prediction in quick point grinding[J]. Production engineering, 2012, 6(3): 243-249.

[8] 胡自化,王金龙,秦长江,等. 刀片表面粗糙度对工件表面残余应力分布影响的分析[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 255-261.

HU Zi-hua, WANG Jin-long, QIN Chang-jiang, et al. Effect of insert surface roughness on residual stress distribution of workpiece surface[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 255-261.

[9] PATRIK D, FREDRIK G, MICHAEL J. The influence of rake angle cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning[J]. Journal of materials processing tech, 2004, 147(2): 181-184.

[10] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等. 超精密加工领域科学技

- 术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
- YUAN Ju-long, ZHANG Fei-hu, DAI Yi-fan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [11] 杨建东, 田春林, 金海峰. 固着磨料研磨对工件表面残余应力的影响[J]. 中国表面工程, 2002, 54(4): 37-38.
- YANG Jian-dong, TIAN Chun-lin, JING Hai-feng. Effect of solid abrasive lapping on residual surface stress[J]. China surface engineering, 2002, 54(4): 37-38.
- [12] 薛进学, 赵波, 焦锋. 超声高速研磨陶瓷表面残余应力特性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 172(4): 57-61.
- XUE Jin-xue, ZHAO Bo, JIAO Feng. Experimental research on the surface residual stress in ultrasonic lapped surface of engineering ceramics[J]. Diamond & abrasives engineering, 2009, 172(4): 57-61.
- [13] YIN Guo-qiang, GONG Ya-dong, LI You-wei, et al. Modeling and evaluation in grinding of SiCp/Al composites with single diamond grain[J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 163(3): 105-137.
- [14] ZHU Chuan-min, GU Peng, YIN Yue, et al. Surface roughness prediction model of SiC_p/Al composite in grinding[J]. International journal of mechanical sciences, 2019, 155(5): 384-396.
- [15] HUANG Chuan-jin, ZHOU Hai, XIA Chang-tai, et al. Effect of abrasive grit shape on polishing of β -Ga₂O₃(100) substrate[J]. Precision engineering, 2020, 61(1): 65-71.
- [16] 杨军, 李志鹏, 李伟, 等. 基于不同单颗磨粒模型的微细磨削力研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(8): 54-62.
- YANG Jun, LI Zhi-peng, LI Wei, et al. Study on micro-grinding force based on different single abrasive particle models[J]. Journal of Hunan University (natural science), 2018, 45(8): 54-62.
- [17] PARK H W, LIANG S Y. Force modeling of micro-grinding incorporating crystallographic effects[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2008, 48(15): 1658-1667.
- [18] ARCONA C, DOW T. An empirical tool force model for precision machining[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 1998, 120: 700-708.
- [19] JAESIK H, JEONG K, SEUL K. Effect of PTFE coating on enhancing hydrogen embrittlement resistance of stainless steel 304 for liquefied hydrogen storage system application[J]. International journal of hydrogen energy, 2020, 45(15): 9149-9161.
- [20] MOTOMICHI K, EIJI A, YOUNG K, et al. Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels[J]. International journal of hydrogen energy, 2017, 42(5): 12706-12723.
- [21] 任敬心, 华定安. 磨削原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- REN Jing-xin, HUA Ding-an. Grinding principle[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- [22] 唐进元, 郑金超, 廖东日, 等. 12CrNi4A 材料轴向超声干磨削残余应力计算及试验研究[J]. 机械工程学报, 2018(17): 246-254.
- TANG Jin-yuan, ZHENG Jin-chao, XIU Dong-ri, et al. Calculation and experimental study on residual stress in axial ultrasonic dry grinding of 12CrNi4A material[J]. Journal of mechanical engineering, 2018(17): 246-254.
- [23] SYED M, DANIEL N, MUHA M, et al. Numerical simulation of grinding induced phase transformation and residual stresses in AISI-52100 steel[J]. Finite elements in analysis & design, 2012, 61(11): 1-11.
- [24] JIANG M, KOMANDURI R. Application of taguchi method for optimization of finishing conditions in magnetic float polishing (MFP)[J]. Wear, 1997, 213(1-2): 59-71.
- [25] YANG W H, TARNG Y S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the taguchi method[J]. Journal of materials processing technology, 1998, 84(1): 122-129.
- (上接第 421 页)
- [16] CHOMIENNE V, VALIORGUE F, RECH J, et al. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel[J]. Cirp journal of manufacturing science and technology, 2016, 13: 90-96.
- [17] LOPEZ DE LACALLE L N, RODRIGUEZ A, LAMIKIZ A, et al. Five-Axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness[J]. Materials and manufacturing processes, 2011, 26(8): 997-1003.
- [18] ABRAO A M, DENKENA B, KOHLER J, et al. The inducement of residual stress through deep rolling of AISI 1060 steel and its subsequent relaxation under cyclic loading[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2015, 79(9-12): 1939-1947.
- [19] 王海军, 高广东. 发动机气缸套深滚压强化处理技术研究[J]. 内燃机与配件, 2014(3): 17-20.
- WANG Hai-jun, GAO Guang-dong. Research on enhanced treatment technique of engine cylinder liner deep rolling[J]. Internal combustion engine & parts, 2014(3): 17-20.
- [20] 何志坚, 周志雄, 黄向明. 45CrNiMoVA 高速切削条件下本构关系建模技术研究[J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(4): 33-39.
- HE Zhi-jian, ZHOU Zhi-xiong, HUANG Xiang-ming. Study on the constitutive relation modeling technology of 45CrNiMoVA for high speed machining[J]. Materials science & technology, 2016, 24(4): 33-39.
- [21] GUO Y B. An integral method to determine the mechanical behavior of materials in metal cutting[J]. Journal of materials processing tech, 2003, 142(1): 72-81.