

超声振动珩磨表面残余应力数值模拟研究

郑华林, 张伟

(西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

摘要:目的 磨削产生的残余应力对工件表面特性有重要影响,超声振动珩磨使磨粒具有极大的加速度而改变了材料去除机理,研究超声振动对工件表面残余应力的影响及产生机理。方法 分析残余应力形成有限元理论,建立基于热弹塑性有限元法的超声振动单颗 CBN 磨粒切削 40CrNiMoA 热力耦合有限元模型,并设置两次切削、卸载、约束转换及冷却等分析步。通过数值模拟得到不同振动参数下表面残余应力的分布情况,并对模拟结果进行分析。结果 有限元计算得到的各分析阶段应力分布存在差别,超声振动参数设置达到仿真要求;对磨粒施加超声振动后珩磨力下降约 26%,珩磨热降低约 17%,切向残余压应力有所减小,垂直珩磨速度方向拉应力减小并向压应力转变。结论 超声振动使珩磨力和珩磨热有一定程度降低从而改变了残余应力的分布及数值;振动频率在 20 kHz 波动时对残余应力的影响不大;磨削速度减小,切向残余压应力增大,垂直磨削方向残余拉应力减小;振幅增大时,切向残余压应力减小,垂直方向残余应力增大。

关键词: 超声振动;珩磨;热力耦合;珩磨力;珩磨热;残余应力

中图分类号: TG580.67; TG663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)07-0131-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.024

Simulation Research on the Surface Residual Stress of Ultrasonic Vibration Honing

ZHENG Hua-lin, ZHANG Wei

(Mechatronic Engineering College, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the influence on residual stress as the grinding residual stress has important influence on work-piece surface characteristics and ultrasonic vibration honing makes the grains obtain a great acceleration which changes the material removal mechanism. **Methods** The residual stress finite element theory was analyzed, the coupled thermal-mechanical finite element model was established for the ultrasonic vibration honing of a single CBN grain cutting 40CrNiMoA based on the thermal elastic-plastic theory. Steps of two cutting processes, unloading, constraint transformation and the cooling analysis were set. The surface residual stress distribution was obtained by numerical simulation under different vibration parameters and the simulation results were analyzed. **Results** The stress distribution at each analytical step was different, the ultrasonic vibration met the requirements of the simulation experiment. The honing force decreased by about 26% and the honing heat decreased by about 17% when applying

收稿日期: 2015-04-22; 修订日期: 2015-06-05

Received: 2015-04-22; Revised: 2015-06-05

基金项目: 四川省教育厅自然科学基金重点项目(13ZA0178)

Fund: Supported by the Education Department of Sichuan Province Natural Science Foundation of Key Project(13ZA0178)

作者简介: 郑华林(1965—),男,四川人,教授,主要从事先进制造技术及理论、细长杆超声振动珩磨理论与应用研究。

Biography: ZHENG Hua-lin(1965—), Male, from Sichuan, Professor, Research focus: the advanced manufacturing technology and theory, theory and application research on ultrasonic vibration honing.

ultrasonic vibration, the tangential residual stress was reduced, and the residual stress at vertical grinding direction was also reduced and changed from the tensile stress to the compressive stress. **Conclusion** Ultrasonic vibration decreases the honing force and the honing heat which changes the distribution of residual stress and numerical values. The vibration frequency near 20 kHz has little influence on residual stress. The tangential compressive residual stress increases and the honing tensile residual stress at the vertical direction decreases with the decreased honing speed. The tangential residual stress decreases and the residual stress at the vertical direction increases with the increased amplitude.

KEY WORDS: ultrasonic vibration; honing; thermal-mechanical couple; honing force; honing heat; residual stress

磨削加工的表面残余应力性质和大小会影响工件的耐磨性、抗疲劳特性和抗腐蚀性能等。残余拉应力是造成材料断裂破坏的原因之一,残余压应力则能提高工件表面强度,闭合表面裂纹,有助于提高零件的使用寿命^[1]。因此,加工过程中应避免或降低残余拉应力的产生。影响磨削表面残余应力主要因素是磨削热和磨削力^[2],与传统磨削相比,超声振动珩磨具有加工效率高、珩磨力小、珩磨温度低、表面质量好、工件耐用度高等优点。

磨削加工实质上是无数个磨粒切削加工过程的复合,只是磨粒相比于车刀更小,磨屑相比于切屑更细微。单颗磨粒磨削分析是进行复杂磨削分析的重要方法^[3]。Jianguo C 等^[4]进行了单颗金刚石磨粒超声振动划擦实验。张修铭等^[5]利用 ANSYS 揭示热力耦合算法对磨粒磨削表面残余应力形成影响机制。张雪萍等^[6]使用 Deform 进行了单颗磨粒普通磨削残余应力研究。Zhu D 等^[7]进行了单颗磨粒磨削 SiC 材料的粗糙度及残余应力研究。这些研究表明通过单颗磨粒进行残余应力分析的可行性,证明超声振动减小残余应力,但研究主要应用于陶瓷等脆硬材料^[8-9],研究者对于金属材料及超声振动参数对残余应力的影响规律的研究较少,使用的多是二维有限元模型,不能反映出轴向超声振动对残余应力的影响。

综合上述问题,考虑珩磨中的热力相互影响、振动特性等因素,本文提出采用基于热力耦合的有限元法研究超声振动珩磨单颗磨粒珩磨表面残余应力产生、分布情况及变化规律。

1 有限元数值模拟理论及建模

1.1 残余应力有限元理论

磨削加工是磨粒作用于工件致使材料发生弹塑性变形直至断裂的过程。变形较小的部分发生弹性变形,当所受载荷超过材料的屈服应力后发生塑性变形,当卸载后弹性变形恢复,而塑性变形则不可恢复。

磨削是一个复杂的热力耦合过程,磨粒切削时发生弹塑性变形并产生大量的热。本文采用增量理论来分析磨削中材料的弹塑性行为。根据 Prandtl-Reuss 理论,全应变增量包含弹性应变、塑性应变、温度应变 3 个增量,用“增量载荷法”得出线性热弹塑性力学本构关系^[10]:

$$\text{弹性区: } \Delta\sigma = D(\Delta\{\varepsilon\} - \Delta\{\varepsilon\}_T) \quad (1)$$

$$\text{塑性区: } \Delta\sigma = D_{cp}(\Delta\{\varepsilon\} - \Delta\{\varepsilon\}_T) + \Delta\{\sigma\}_T \quad (2)$$

式中: D , D_{cp} 为材料的弹性和弹塑性矩阵。 $\Delta\{\varepsilon\}$ 和 $\Delta\{\sigma\}_T$ 作为一般的初应变和初应力,从而转化为等效节点载荷:

$$\text{弹性区: } \Delta\{R\}_c^e = \iint_c B^T D \Delta\{\varepsilon\}_T dv \quad (3)$$

塑性区:

$$\Delta\{R\}_{cp}^e = \iint_c B^T D_{cp} \Delta\{\varepsilon\}_T - \Delta\{\sigma\}_T dv \quad (4)$$

式中: B 为几何矩阵。

由于工件还受到外部节点力载荷、体力载荷和分布载荷的作用。因此,总的等效节点力为:

$$\Delta\{R\}_c^e = \Delta\{R\}_d^e + \Delta\{R\}_f^e + \Delta\{R\}_p^e + \Delta\{R\}_c^e \quad (5)$$

总的基本平衡式为:

$$K\Delta\{u\} = \Delta\{R\} \quad (6)$$

式中: K 为总体刚度矩阵。由上式求出节点位移增量 $\Delta\{u\}$, 再通过位移和应变增量求出单元应变增量 $\Delta\{\varepsilon\}$, 最后求出应力增量 $\Delta\{\sigma\}$ 。

1.2 材料特性参数

工件材料采用 Johnson-Cook 本构模型,该模型适用于解决材料的屈服应力在温度、应变率及应变等因素影响下的动态行为^[11]。CBN 磨料具有较好的热稳定性,表面的 B_2O_3 层在 1300 °C 仍能保证其不被氧化。40CrNiMoA 是一种应用广泛的优质合金钢,调质后可获得较好的强度及综合力学性能。本文采用单颗 CBN 磨粒切削 40CrNiMoA 工件,以分析超声振动珩磨对工件表面残余应力的影响。模型中工件材料及磨粒特性参数见表 1。

表 1 工件与磨粒材料物理参数

Tab. 1 Material parameters of workpieces and grains

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	导热率 K/(kg·m·s ⁻³ ·K ⁻¹)
40CrNiMoA	210	0.3	7830	44.5
CBN	720	0.13	3480	1300

1.3 超声振动位移方程

超声振动珩磨是将超声频振动加在油石上使每颗磨粒都进行振动切削,超声振动控制方程采用傅里叶级数表示,其表达式为^[12]:

$$A=A_0+\sum_{n=1}^N\left[A_n\cos n\omega(t-t_0)+B_n\sin n\omega(t-t_0)\right]$$

(7)

式中: t_0 为初始时刻, A_0 为初始振幅, ω 为振动圆频率, N,A_n,B_n,n 为相关常数。

1.4 有限元建模及分析

1.4.1 有限元建模

根据图 1 中 CBN 磨粒 SEM 照片建立了单颗磨粒有限元模型,如图 2 所示。超声振动珩磨油石工作时作用于旋转的工件,同时沿轴向缓慢往复运动。本文将超声振动外圆珩磨简化为磨粒在平面上的珩磨。考虑到磨削时摩擦和塑性变形产生的热对材料性能参数的影响,工件和刀具采用热力耦合算法。

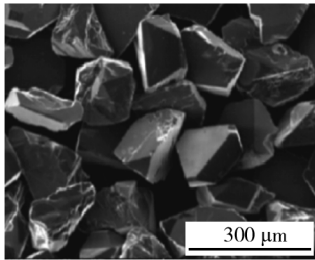


图 1 CBN 磨粒 SEM 照片^[13]

Fig. 1 The SEM picture of CBN grains

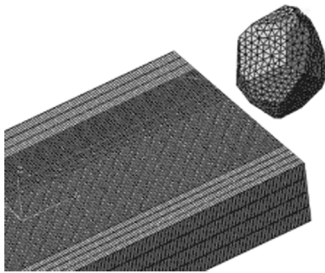


图 2 有限元模型

Fig. 2 FEM model of ultrasonic honing

1.4.2 残余应力分析过程

磨粒一次切削阶段如图 3a 所示。工件底部施加固定约束,在磨粒上施加磨削速度,通过周期型幅值曲线为磨粒施加轴向(Y 向)超声振动。

施加二次磨粒切削过程更真实反映磨削表面应力状态,如图 3b 所示,一次加工后磨粒上移后退回预定位置,向磨粒宽度方向移动半个磨粒宽后继续切削。

磨粒卸载阶段,当切削完成后磨粒向上移动到远离加工表面,去除磨削力对加工表面的影响,边界条件不变,如图 3c 所示。

约束转换及冷却阶段,将施加在工件底面上的约束去除,重新对工件的两个底边施加约束,目的在于使单元尽可能在不受约束的影响而自由分析,如图 3d 所示。更改温度边界条件使工件冷却至室温。

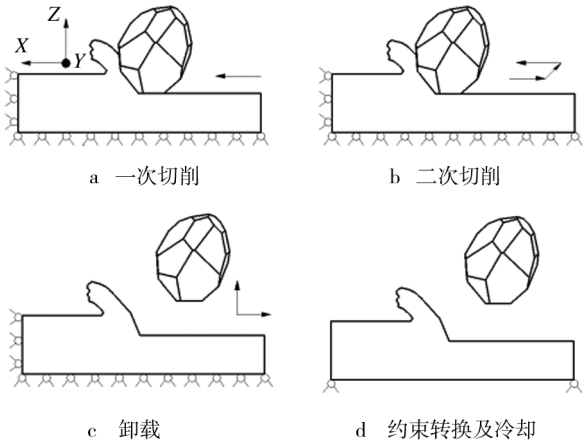


图 3 残余应力分析的 4 个阶段

Fig. 3 The four stages of residual stress analysis

2 有限元仿真结果与分析

2.1 振动位移、温度场及磨削力输出

图 4 为超声振动珩磨时磨粒 20 kHz 时 3 种振幅的位移曲线,振动参数达到仿真要求。

图 5 为普通和超声振动珩磨在 20 kHz, 振幅为 15 μm, $V=1.5$ m/s 的磨削温度场。由图 5 可知,两种磨削状态下,磨削区温度都在 300 ℃ 以下,大部分热量被磨屑带走。超声振动的温度分布呈现一定的间隔,且温度相对较低,这与磨粒振动时的断续接触有关。

图 6 为普通和超声振动珩磨时 $V=1.5$ m/s 时切向珩磨力 F_x 的对比曲线。由图 6 可知,在磨粒初始

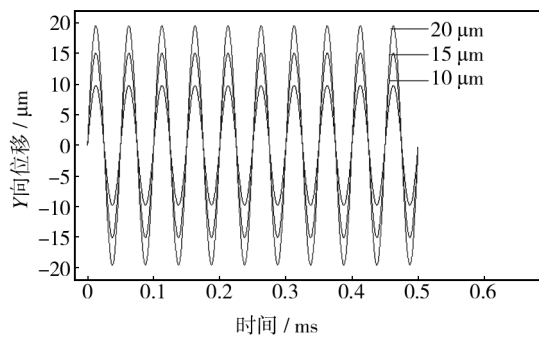


图4 磨粒振动位移曲线

Fig. 4 The curve of abrasive particle vibration and displacement

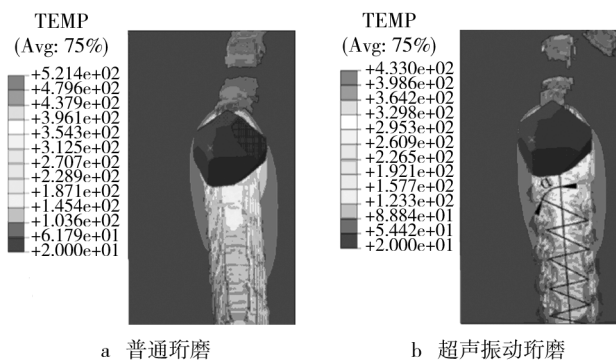
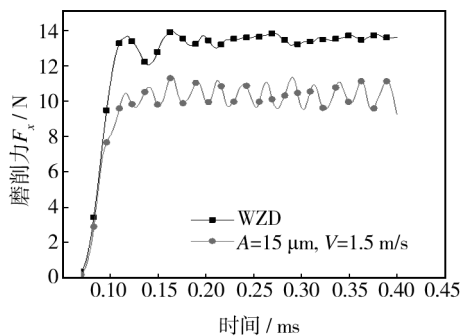


图5 磨粒珩磨温度场云图

Fig. 5 The nephogram of honing temperature distribution of grains

图6 切向磨削力 F_x 曲线Fig. 6 Tangential honing force F_x

切削阶段普通有较大的波动,切削稳定后平均值为13.5 N。超声振动时珩磨力波动趋势与施加的振动位移变化一致,且平均值约为10.2 N,有明显的降低。

由图5和图6知,加工中力和热都以脉冲形式出现,平均值有了大幅度下降。主要因为轴向超声振动使得磨粒的切削由三面的连续接触变为 x 方向接触而两侧面断续接触,降低了磨削的动态摩擦系数^[14],因此磨削力降低。

2.2 珩磨方式对残余应力的影响

为准确获得工件表面沿深度方向产生的残余应力,在已切削表面中段选取一条由表面至工件里层的路径,从而得到残余应力沿表面至深度方向关于切向残余应力及垂直磨削方向残余应力的分布曲线。

图7为振幅 $A=15\ \mu\text{m}$,珩磨速度 $V=1.5\ \text{m/s}$ 时振动频率对残余应力的影响曲线。由图7a可知,普通珩磨表面的残余应力 σ_{11} 为压应力, σ_{22} 为拉应力,超声振动珩磨时 σ_{11} 及 σ_{22} 都表现为压应力。由图6中的结论可知,珩磨力的降低使得残余应力 σ_{11} 在表面产生的压应力有所降低。残余应力 σ_{22} 在普通珩磨时表现为拉应力,而施加了超声振动后形成的表面则为压应力。由于超声振动使得磨削时的摩擦系数降低,从而使由于磨擦产生的热大幅降低,而磨削热是产生残余拉应力的主要因素^[15],且CBN磨料具有较高的热传导率,进一步促进了工件表面的冷却。因此超声振动珩磨表面的拉应力逐渐降低,直至生成压应力。

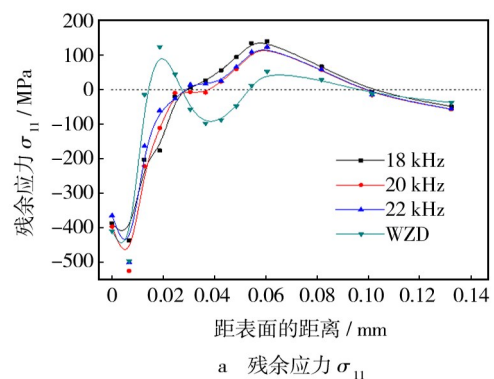
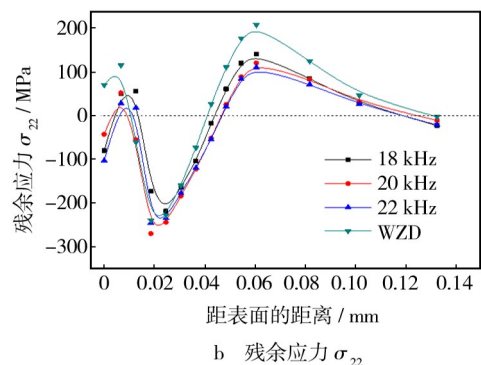
a 残余应力 σ_{11} b 残余应力 σ_{22}

图7 频率对残余应力的影响

Fig. 7 Influence of frequency on residual stress

本文同时研究了3种不同频率的振动对残余应力的影响,由图7可知,振动频率在20 kHz附近时残余应力 σ_{11} 及 σ_{22} 变化并不大。

2.3 珩磨速度对残余应力的影响

图8为振动频率20 kHz,振幅 $A=10\ \mu\text{m}$ 时,珩磨速度对残余应力的影响曲线。由图8a知,当振幅一定时,珩磨速度减小,超声振动珩磨工件表面的残余压应力 σ_{11} 逐渐增大。不同速度造成的残余压应力最大处为距表面的距离为0.01 mm处。远离表面,残余压应力值逐渐减小,直至产生残余拉应力,离工件表面至0.12 mm时的应力值则逐渐趋于零,这是因为研究中假设工件没有初始残余应力。珩磨时产生的切削热使得表层材料膨胀,但受到里层材料的限制,在表面产生拉应力,当切削完成工件表面迅速冷却收缩,此时里层材料温度高于表层,外层受到里层的制约而产生压应力。当速度增大时磨削热也越大,此时工件表层的热应力有向残余拉应力转变的趋势,但此时压应力仍占主导,表面仍是压应力。

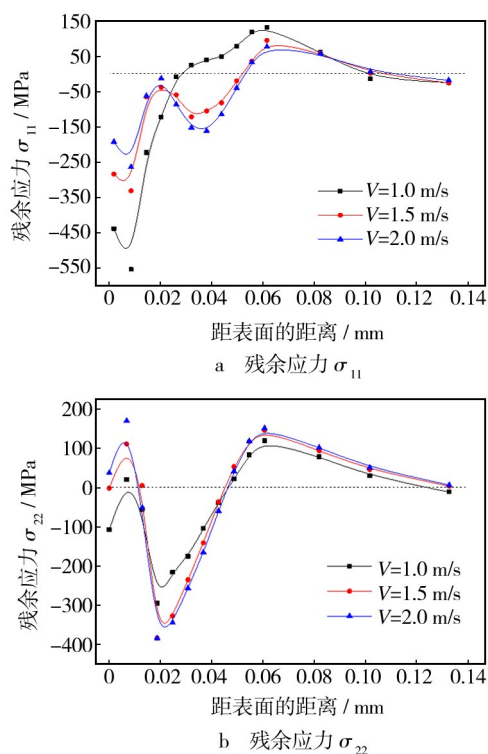


图8 珩磨速度对残余应力的影响

Fig.8 Influence of honing speed on residual stress

在图8b中,残余应力 σ_{22} 随速度减小逐渐由拉应力向压应力转变。残余拉应力的最大值出现在距表面0.01 mm处,在0.02 mm又达到压应力的最大值,随着深度的增加再次转变为拉应力,直至0.12 mm处应力值逐渐变为零。因为当珩磨速度减小时珩磨热也减小,珩磨热造成的拉应力减弱;同时超声振动磨粒不断冲击磨削沟槽的两侧,并对已加工表面形成反

复“熨压”,使得表面沿 σ_{22} 方向形成压应力。

2.4 振幅对残余应力的影响

图9为20 kHz,珩磨速度 $V=1\ \text{m/s}$ 时,振幅对残余应力的影响曲线。由图9a知,当速度一定时,随着振动幅值的增大,超声振动珩磨工件表面的残余压应力 σ_{11} 逐渐变小。不同振幅磨削产生的最大残余压应力在距表面0.01 mm处,原理表面时的残余压应力减小逐渐转为拉应力,且在0.12 mm处逐渐趋于零。主要原因是振幅越大,分离特性越明显,使得机械应力引起的塑性变形减小,同时脉冲式珩磨热和珩磨力的平均值降低,使得其对残余应力值的影响变小。

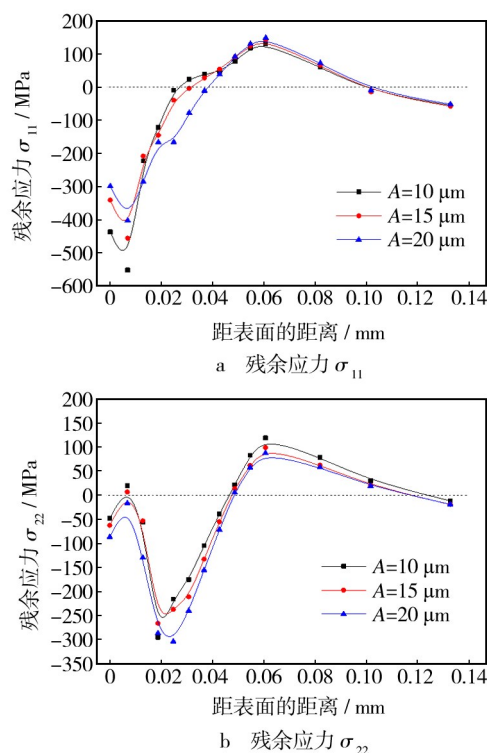


图9 振幅对残余应力的影响

Fig.9 Influence of amplitude on residual stress

由图9b知,表面残余应力 σ_{22} 随着振幅的增加而增大。在0.01 mm增大至产生拉应力,但在0.02 mm处形成的压应力最大,随后逐渐减小并转为拉应力,在0.12 mm处趋于零。主要是因为振幅增大,磨粒的轴向振动对工件表面垂直于珩磨方向反复熨压特性更加剧烈,残余应力 σ_{22} 增大。

3 结论

1) 超声振动珩磨相比普通珩磨由于切削时磨粒与工件的接触状态发生变化,使珩磨力有了明显的降

低,切向残余压应力 σ_{11} 有了一定程度的降低;同时,由于珩磨热也相对降低,使垂直于珩磨速度方向的残余拉应力 σ_{22} 逐渐减小,甚至转变为残余压应力。

2) 目前常用的超声振动发生器频率主要为 20 kHz,通过进行 3 种不同频率的残余应力数值模拟,发现在 20 kHz 附近时振动频率对残余应力的影响不明显。

3) 在超声振动珩磨时,当振幅一定时,残余应力 σ_{11} 随着珩磨速度的增大而减小。残余应力 σ_{22} 随着珩磨速度的减小逐渐由拉应力转为压应力。

4) 当速度一定时,两个方向的残余应力随振幅的减小而增大。

参考文献

- [1] 杨欢,张建辉. 人工心瓣含硅热解炭涂层残余应力分析[J]. 表面技术,2014,43(1):7—10.
YANG Huan,ZHANG Jian-hui. Analysis of Residual Stress of Silicon-alloyed Pyrocarbon Coatings for Artificial Heart Valves[J]. Surface Technology,2014,43(1):7—10.
- [2] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
KOMETANI M. Residual Stress Generation and Countermeasures[M]. Beijing:China Machine Press,1983.
- [3] HECKER R L,LIANG S Y,WU X J,et al. Grinding Force and Power Modeling based on Chip Thickness Analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,33(5/6):449—459.
- [4] JIANGUO C,YONGBO W,DONG L,et al. Material Removal Behavior in Ultrasonic Assisted Scratching of SiC[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2014(79):49—61.
- [5] 张修铭,刘莉娟,修世超,等. 基于热力耦合磨削表层残余应力的仿真分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2014,35(12):1758—1762.
ZHANG Xiu-ming,LIU Li-juan,XIU Shi-chao,et al. Simulation Analysis of Ground Surface Residual Stress with Thermal Mechanical Coupling Principle[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2014,35(12):1758—1762.
- [6] 张雪萍,王和平,高二威. 单粒磨削过程仿真与工件表面残余应力的离散度分析[J]. 上海交通大学学报,2009,43(5):717—721.
ZHANG Xue-ping,WANG He-ping,GAO Er-wei. Simulation of Single Abrasive Particle Grinding Process and Analysis on the Residual Stresses Scatter[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University. 2009,43(5):717—721.
- [7] ZHU D,YAN S,LI B. Single-grit Modeling and Simulation of Crack Initiation and Propagation in SiC Grinding using Maximum Undeformed Chip Thickness[J]. Computational Materials Science,2014(92):13—21.
- [8] 薛进学,赵波,吴雁,等. 二维超声磨削纳米复相陶瓷表面残余应力研究[J]. 兵工学报,2010,31(5):636—640.
XUE Jin-xue,ZHAO Bo,WU Yan,et al. Research on Surface Residual Stress of Nano-composite Ceramics after Two dimension Ultrasonic Grinding[J]. Acta Armamentarii,2010,31(5):636—640.
- [9] 姚建国,宁欣,王占奎,等. 超声辅助磨削后纳米 ZrO_2 陶瓷的表面残余应力[J]. 机械工程材料,2014,35(2):90—92.
YAO Jian-guo,NING Xin,WANG Zhan-kui,et al. Surface Residual Stress of Nano ZrO_2 Ceramics After Ultrasonic Assisted Grinding[J]. Materials for Mechanical Engineering,2014,35(2):90—92.
- [10] 赵志业,金属塑型加工力学[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
ZHAO Zhi-ye. Metal Plastic Processing and Mechanics[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2003.
- [11] 张晓东,李秀红,李文辉,等. 离心式滚磨光整加工钛合金的数值模拟分析[J]. 表面技术,2014,43(5):11—15.
ZHANG Xiao-dong,LI Xiu-hong,LI Wen-hui,et al. Numerical Simulation Analysis of the Centrifugal Roll Finishing of Titanium Alloy[J]. Surface Technology,2014,43(5):11—15.
- [12] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
SHI Yi-ping,ZHOU Yu-rong The Finite Element Analysis Example Explanation of ABAQUS[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,2006.
- [13] 宿崇,许立,李明高,等. 磨粒建模方法与切削过程仿真研究[J]. 航空学报,2012(11):2130—2135.
SU Chong,XU Li,LI Ming-gao,et al. Study on Modeling and cutting Simulation of abrasive grains[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2012(11):2130—2135.
- [14] 李伯民,赵波. 实用磨削技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
LI Bo-min,ZHAO Bo. Modern Grinding Technology[M]. Beijing:China Machine Press,2003.
- [15] 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(3):51—60.
HU Zhong-hui,YUAN Zhe-jun. Grinding Residual Stress Mechanism of Production[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,1989(3):51—60.