

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.08.019

预加载荷对表面机械滚压强化残余应力影响的数值研究*

胡兴远¹, 王 成^{1*}, 李开发¹, 王宇星²

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 上海城建职业学院 机电工程与信息学院, 上海 201415)

摘要: 为了研究预加载荷对表面机械滚压强化残余应力的影响, 建立了表面机械滚压强化 AISI 4340 钢的三维有限元模型, 并提出了一种耦合显式动力学-隐式静力学的计算框架, 多步骤模拟了预加载荷作用下的表面机械滚压强化过程。首先, 通过施加位移载荷在待滚压模型上, 使之产生弹性变形; 然后, 固定了边界条件, 冻结了弹性变形, 在此基础上模拟了表面机械滚压强化过程; 最后, 释放了弹性变形, 比较了表面机械滚压强化残余应力的变化。研究表明: 预加载荷会导致表面机械滚压强化后的板材表层产生不利的残余拉应力, 另外与滚压力方向相反的预加载荷会减小滚压强化的最大残余压应力, 滚压后释放预加载荷会进一步削弱板材表层的残余压应力; 因此, 在表面机械滚压强化过程中应当避免工件承受预加载荷。

关键词: 表面机械滚压处理; 预加载荷; 残余应力; 数值模拟

中图分类号: TH16; TG668

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2021)08-1064-06

Numerical study of effects of preload on the residual stresses induced by surface mechanical rolling treatment

HU Xing-yuan¹, WANG Cheng¹, LI Kai-fa¹, WANG Yu-xing²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Mechanical Engineering and Information, Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 201415, China)

Abstract: In order to study the effects of preload on the residual stresses induced by surface mechanical rolling treatment (SMRT), the three-dimensional finite element models in conjunction with a novel computation framework coupling the explicit dynamics and implicit statics were developed to simulate the process of surface mechanical rolling of AISI 4340 steel under preload. At first, the elastic deformation was produced in the finite element model to be surface mechanical rolled by applying the displacement load. Secondly, the displacement-preloaded side was completely constrained for freezing the displacement-induced elastic deformation. On this basis, the surface mechanical rolling of the finite element model with the freezing elastic deformation was then carried out. Lastly, the residual stresses induced by surface mechanical rolling treatment were comparatively studied after the freezing elastic deformation was released. The obtained results show that the surface mechanical rolled materials can produce the unfavorable tensile residual stresses in the treated surface, and the maximum compressive residual stresses can be reduced if the preloading direction is opposite to the direction of rolling pressure. The compressive residual stresses in the subsurface of surface mechanical rolled materials can be further reduced when the preload is released. It is therefore necessary to avoid the preload in the surface mechanical rolling process.

Key words: surface mechanical rolling treatment; preload; residual stresses; numerical simulation

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2008085QE228); 安徽理工大学研究生创新创业基金资助项目(2021CX2061, 2020CX2048)

作者简介: 胡兴远(1997-), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事金属材料表面改性方面的研究。E-mail: aust_huxingyuan@163.com

通信联系人: 王成, 男, 博士, 讲师, 硕士生导师。E-mail: chwang@ aust.edu.cn

0 引言

表面机械滚压处理是一种高效率、低成本的绿色表面强化技术。该技术通过采用滚针或滚珠形状的刀具,在滚压力作用下加载于工件表面之上,并进行往复滚压,以降低工件的表面粗糙度,诱导材料表层晶粒细化和纳米化,并引入残余压应力场,有效改善工件的耐腐蚀、耐磨性和抗疲劳性能。因此,该技术被广泛应用于航空航天、工程机械和车辆船舶等工业领域^[1-3]。汽车发动机曲轴 80% 以上需经圆角滚压处理,轿车发动机曲轴几乎全部采用圆角滚压工艺进行强化^[4]。

影响表面机械滚压强化效果的工艺参数颇多,主要有滚压力、滚压速度、滚压道次和滚压刀具的几何形状以及其尺寸。胡宁静^[5]和杨运勤^[6]等人通过“正交试验法”建立了滚压工艺参数与表面粗糙度之间的关系,对滚压工艺参数进行了优化。夏伟等人^[7]通过对 6061 铝合金进行滚压强化,得到了润滑条件下最优滚压工艺参数。

近年来,国内外大量的研究人员对表面机械滚压强化过程进行了数值模拟,探究了滚压处理工艺参数对残余应力的影响。相比于试验研究,数值模拟不仅周期短、成本小,而且有助于更加深刻地理解表面机械滚压强化机理。因此,通过数值模拟研究各种工艺参数对滚压强化残余应力的影响以及滚压强化的机制,越来越受到研究学者的青睐^[8-11]。

MAJZOABI G H 等人^[12]235-236 开发了圆盘式滚子滚压板材的模型,研究了滚压力对材料疲劳性能的影响。ZHANG P 等人^[13]建立了滚压柱状工件的模型,研究了滚压强化残余应力对工件疲劳性能的影响。刘福超等人^[14]17-18 采用有限元软件 ABAQUS 建立了滚压强化的参数化模型,研究了滚压力、滚针直径、表面摩擦系数对滚压强化残余应力的影响。韩少军^[15]、毛华杰^[16]和王生武^[17]等人通过有限元软件 ANSYS 和 Marc 对滚压强化过程进行了数值模拟,研究了各种工艺参数对滚压强化残余应力的影响规律。刘荣昌等人^[18,19]数值模拟了曲轴圆角滚压强化过程,研究了滚压工艺、曲轴材料和滚压工具等参数对滚压强化残余应力以及曲轴疲劳性能的影响。

综上所述,关于表面机械滚压工艺参数对其所致残余应力的影响已有大量的试验和研究。然而,据查阅文献所知,目前研究预加载荷对表面机械滚压强化残余应力的影响,还少有报道。

因此,基于 ABAQUS 有限元分析平台,笔者建立

三维表面机械滚压有限元模型,提出一种新型的耦合显式动力学-隐式静力学的计算框架,探究预加载荷对表面机械滚压强化残余应力的影响,为表面机械滚压强化技术的工业应用提供经验和理论支撑。

1 有限元模型

基于 ABAQUS 有限元分析平台,笔者建立三维表面机械滚压强化有限元模型,如图 1 所示。

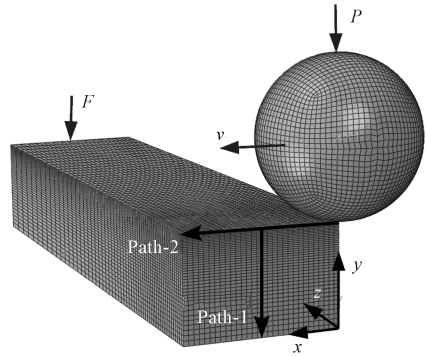


图 1 预加载荷作用下表面机械滚压强化有限元模型

图 1 中,板材的长、宽、高分别为 12 mm、3 mm 和 2 mm,滚珠的直径为 3 mm。笔者采用三维八节点减缩积分单元(ABAQUS/C3D8R)对板材和滚珠模型进行划分网格,单元网格的最小尺寸为 0.02 mm^[14]18。由于滚珠具有超高的强度和刚度,在表面机械滚压强化过程中,其变形可以忽略不计,可将滚珠处理成一个刚性体,刚性体的参考点位于其球心。

板材为 AISI 4340 钢,笔者采用 Johnson-Cook 模型^[20]表征其在表面机械滚压强化过程中的动态应力-应变响应,即:

$$\sigma_f = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0^p} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ_f —流动应力,MPa; $\bar{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}^p, \dot{\epsilon}_0^p$ —等效塑性应变、等效塑性应变率和参考应变率($\dot{\epsilon}_0^p = 1$); T —温度,K; T_m, T_r —材料的熔点以及室温,K; A, B, C, m, n —材料参数。

除此之外,板材的其他基本材料参数有:弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$ 和密度 $\rho = 7\,800 \text{ kg/m}^3$ 。

具体取值如表 1 所示。

表 1 AISI 4340 钢 Johnson-Cook 模型参数

A/MPa	B/MPa	C	m	n	T_m/K	T_r/K
792	510	0.014	1.03	0.26	1 793	300

2 数值模拟流程

预加载荷作用下,表面机械滚压强化过程的数值模拟主要分为 4 个步骤完成,如图 2 所示。

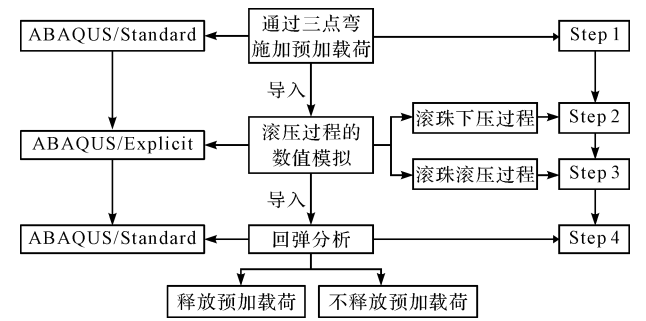


图 2 预加载荷作用下表面机械滚压强化过程的模拟流程图

首先,笔者在隐式静力学模块(ABAQUS/Standard),通过三点弯对板材施加预载荷(注意:在三点弯加载过程中要确保板材只处于弹性变形阶段)。

具体的做法是:在板材承受滚珠滚压的那一端(记为滚压端面)施加对称约束,并固定其底端一边;在板材另一端施加预载荷(F)。这里采用位移载荷,通过弹性变形试算确定位移大小为 $0.05\text{ mm}^{[12]237}$ 和 0.07 mm ;

然后将隐式静力学计算的预载荷导入到显式动力学模块(ABAQUS/Explicit),此时固定板材预载荷施加端以冻结预加载荷;同时在滚珠的参考点上施加下压位移载荷,大小为 0.1 mm ;当滚珠下压后再进行滚动处理,滚动速度为 30 mm/s ,方向沿图 1 中的 Path-2,滚珠从板材一侧滚到相对面所需时间为 0.1 s 。滚珠与板材之间的接触采用罚函数法进行计算,摩擦系数为 0.3 。

为了获得稳定的表面机械滚压强化残余应力场,笔者将滚压强化完成后的动态应力场再次导入到隐式静力学模块(ABAQUS/Standard)进行回弹计算(把回弹计算分为两个工况进行分析:释放预加载荷和未释放预加载荷)。对于释放预加载荷,在回弹计算之前,将板材预载荷施加端的固定约束撤去;反之,未释放预加载荷就是在回弹计算过程中一直保持对板材预载荷施加端的固定约束。

为了消除板材两端滚压起点和终点的影响,笔者在图 1 中板材滚压端面的中间位置建立一条厚度方向的路径 Path-1,用以分析数值模拟结果。

3 结果与讨论

为了研究预加载荷对表面机械滚压强化残余应力的影响,笔者设置 4 个模拟工况,分别记为:方案 1、方案 2、方案 3 和方案 4。方案 1 是没有预加载荷作用下

的表面机械滚压强化模拟,作为参考;方案 2 和方案 3 对应的预加载荷分别为 $F=0.05\text{ mm}$ 和 0.07 mm ,预加位移载荷的方向与滚珠下压的方向一致;方案 4 预加载荷的大小与方案 2 相同,但方向相反。

在不同表面机械滚压强化模拟工况下,滚珠下压位移及其支反力的演化如图 3 所示。

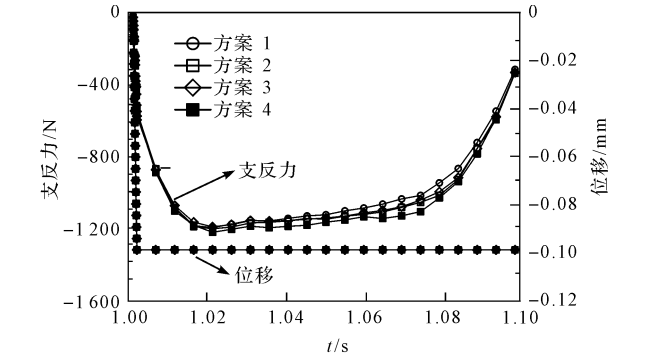


图 3 滚珠下压位移及其支反力的演化

由图 3 可见,滚珠在其滚动过程中下压位移稳定在 0.1 mm ,但其支反力在滚动过程中呈现先增大、然后相对稳定、最后减小 3 个阶段的变化趋势;

从图 3 中还可以看到,当滚珠下压 0.1 mm 后,其参考点的支反力增大至 550 N ,随着滚珠滚动 0.02 s ,其参考点的支反力逐渐增大,最大支反力达到 1200 N ;在滚珠滚动 0.02 s 到 0.08 s 的阶段,其参考点的支反力略微有所减小,基本处于相对稳定阶段;在滚珠滚动 0.08 s 到 0.1 s 的阶段,随着滚珠到滚压终点距离的减小,滚珠支反力逐渐减小。

在滚珠支反力的增加阶段,不同表面机械滚压强化工况响应的支反力相差不大;但在支反力相对稳定以及减小阶段,对应于相同的滚压时间,方案 1 响应的支反力最小,方案 4 响应的支反力最大,方案 2 和方案 3 两者相差不大。

考虑到预加载荷产生的主要应力为图 1 中 z 轴方向的应力分量 σ_z (记为 S33),本文主要以 σ_z (S33)为研究对象分析表面机械滚压强化的残余应力。

在表面机械滚压强化过程中,板材响应的动态应力如图 4 所示。

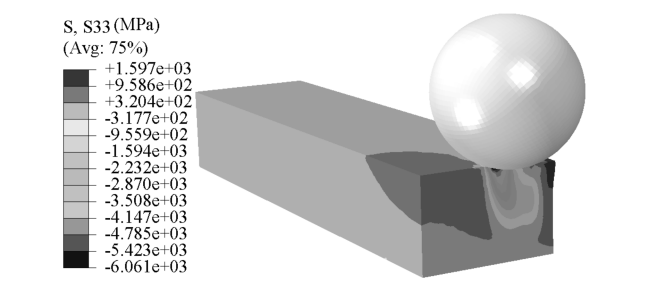
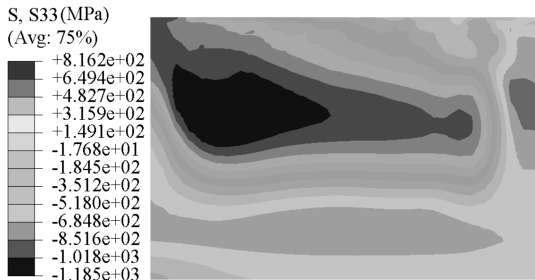


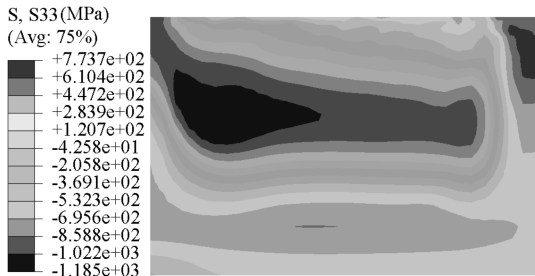
图 4 动态应力云图

板材与滚珠接触区域的最大动态压应力达到 6.06 GPa,压应力沿着板材厚度方向逐渐减小,在滚珠与板材接触区域的前、后方均产生一定的动态拉应力。

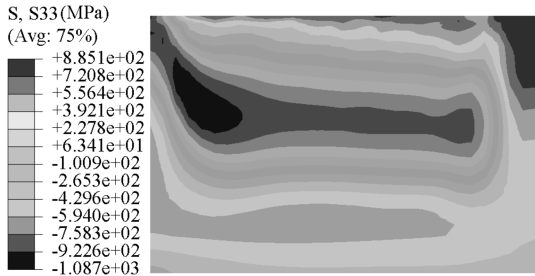
笔者将板材的动态应力进行回弹计算,得到不同模拟工况下板材稳定后的残余应力如图 5 所示。



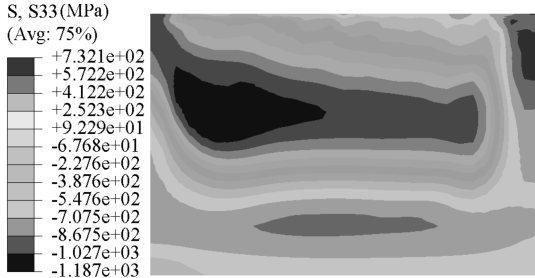
(a) 方案1无预加载荷



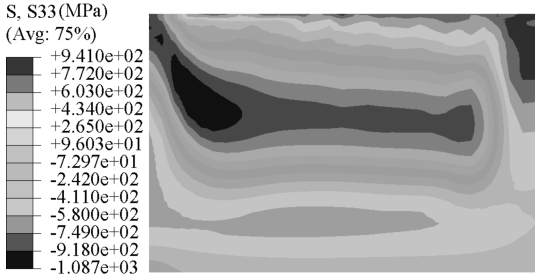
(b) 方案2未释放预加载荷



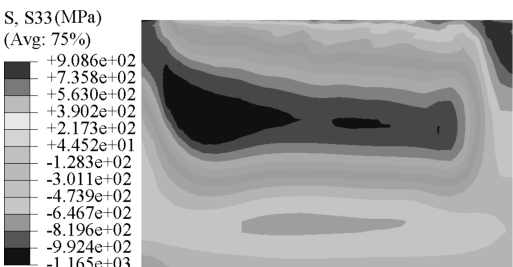
(c) 方案2释放预加载荷



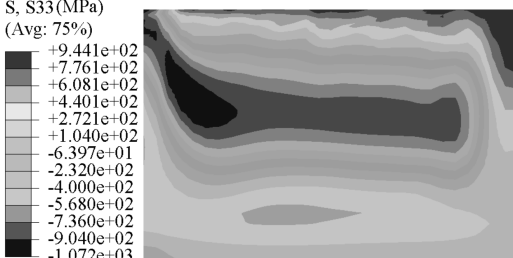
(d) 方案3未释放预加载荷



(e) 方案3释放预加载荷



(f) 方案4未释放预加载荷



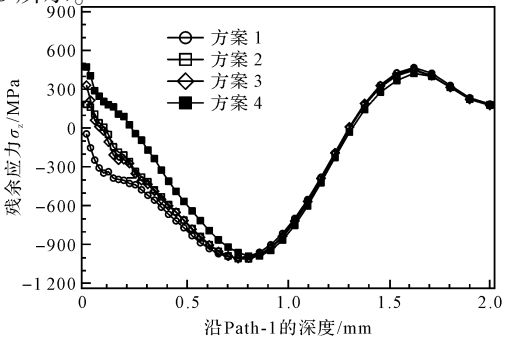
(g) 方案4释放预加载荷

图5 残余应力云图

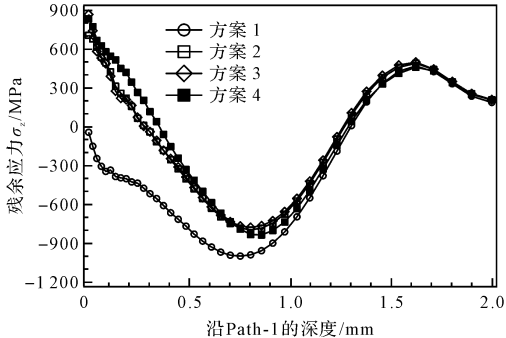
由图 5 可见:板材在滚压的起点形成残余拉应力,在滚压的终点形成残余压应力;板材内部产生残余压应力层,并且靠近滚压终点端的残余压应力明显偏大。

相对于方案 1 (没有施加预载荷的滚压强化工况),由图 5(c,e,g)可知,预加载荷会增大板材滚压起点端的残余拉应力,并且在释放预加载荷的工况下表现得更加明显。

为了消除板材上滚珠滚压起点和终点的影响,板材对称面上沿中间路径 Path-1 (图 1) 分布的残余应力如图 6 所示。



(a) 未释放预加载荷工况



(b) 释放预加载荷工况

图6 不同工况下残余应力沿板材厚度方向的分布

由图 6 可见:相对于方案 1,预加载荷在板材的表层及亚表层产生残余拉应力,其中方案 4 产生的残余拉应力更为显著;对于未释放预加载荷的工况,预加载荷对最大残余压应力和残余压应力的深度影响很小;对于释放预加载荷的工况,预加载荷致使板材的最大残余压应力小于方案 1 工况,但对残余压应力的深度以及最大残余压应力的深度影响不大。

为了进一步研究预加载荷对表面机械滚压强化残余应力的影响,笔者单独比较方案 1 与方案 2 和方案 4 的残余应力分布如图 7 所示。

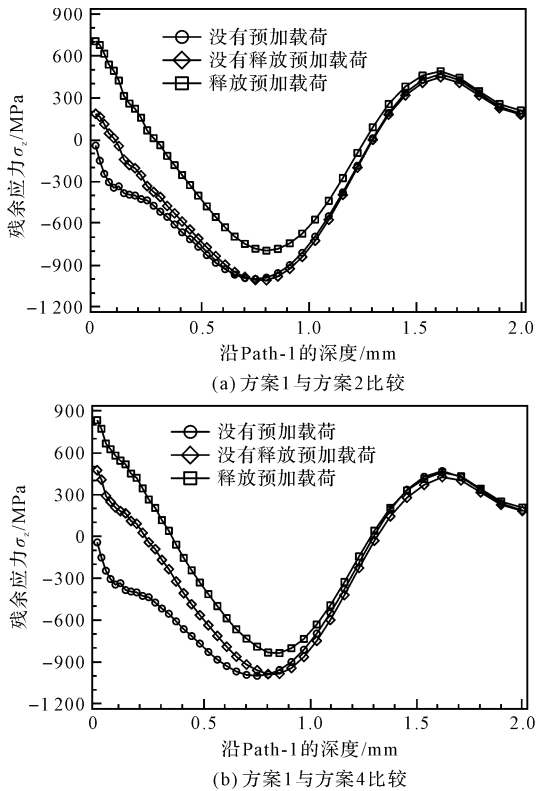


图 7 预加载荷对表面机械滚压强化残余应力的影响

图 7 中,方案 2 和方案 4 的预加载荷大小相同,但方向相反。从图 7 中可以看到:释放预加载荷会进一步增大板材表层及亚表层的残余拉应力,减小其最大残余压应力,其中以方案 4 工况表现得更为显著。

由此可见,在预加载荷作用下进行表面机械滚压处理,对其所致的残余应力是不利的,板材表层及亚表层会产生残余拉应力,板材内部的最大残余压应力也会有所减小,并且释放预加载荷会进一步加剧这种对表面机械滚压强化残余应力不利的影响。因此,在表面机械滚压强化工过程中应当避免工件承受预加载荷。

4 结束语

为了探究预加载荷对表面机械滚压强化残余应力

的影响,本文基于 ABAQUS 有限元分析平台,建立了表面机械滚压强化三维有限元模型,通过耦合显式动力学 (ABAQUS/Explicit) 与隐式静力学 (ABAQUS/Standard),模拟了预加载荷作用下的表面机械滚压强化过程。研究结果表明:

(1)在相同的滚珠下压位移载荷下,表面机械滚压强化过程中滚珠支反力经历先增大、然后相对稳定和最后减小的 3 个阶段,预加载荷会增大后两个阶段的滚珠支反力;

(2)表面机械滚压强化会在板材表层及亚表层产生有益的残余压应力,但预加载荷会导致滚压强化后的板材表面产生残余拉应力;

(3)相对于未释放预加载荷工况,表面机械滚压强化后释放预加载荷会减小板材滚压强化的最大残余压应力;

(4)相对于预加载荷方向与滚压力方向一致的工况,与滚压力方向相反的预加载荷会进一步削弱板材亚表层的残余压应力。

该数值模拟结果对表面机械滚压处理技术的发展以及滚压强化残余应力的定量研究有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] DRECHSLER A, DÖRR T, WAGNER L. Mechanical surface treatments on Ti-10V-2Fe-3Al for improved fatigue resistance[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 243(1/2): 217-220.
- [2] ALTENBERGER I, SCHOLTES B, MARTIN U, et al. Cyclic deformation and near surface microstructures of shot peened or deep rolled austenitic stainless steel AISI 304[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 264(1/2): 1-16.
- [3] NALLA R K, ALTENBERGER I, NOSTER U, et al. On the influences of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 355(1/2): 216-230.
- [4] 李海国,李满良. 曲轴圆角滚压强化工艺综述[J]. *山东农机*, 2002(2): 16-20.
- [5] 胡宁静,胡蓉蓉,胡道秋. 滚压工艺国内外的发展动向[J]. *湘潭大学学报:自然科学学报*, 1994, 16(2): 98-103.
- [6] 杨运勤. 单缸柴油机曲轴圆角滚压工艺浅析[J]. *厦门城市职业学院学报*, 2012, 14(1): 70-74.
- [7] 夏伟,李风雷,唐正强,等. 滚压对 6016 铝合金微动磨损性能的影响[J]. *华南理工大学学报*, 2011, 39(1): 84-89.

- [8] PRABHU P R, KULKARNI S M, SHARMA S. Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts[J]. **Journal of Materials Research and Technology**, 2020, 9 (5): 11402-11423.
- [9] HUANG X, WANG B, ZHOU J, et al. Comparative study of warm and hot cross-wedge rolling: numerical simulation and experimental trial [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017, 92 (9): 3541-3551.
- [10] AKOPYAN T K, GAMIN Y V, GALKIN S P, et al. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties[J]. **Materials Science and Engineering: A**, 2020, 786:139424.
- [11] CAO L, LI X, WANG Q, et al. Vibration analysis and numerical simulation of rolling interface during cold rolling with unsteady lubrication [J]. **Tribology International**, 2021, 153:106604.
- [12] MAJZOBI G H, AZADIKHAH K, NEMATI J. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of aluminum-7075-T6 [J]. **Materials Science and Engineering A**, 2009, 516(1/2): 235-247.
- [13] ZHANG P, LINDERMAN J. Effect of roller burnishing on fatigue properties of the hot-rolled Mg-12Gd-3Y magnesium alloy [J]. **Materials Chemistry and Physics**, 2010, 124(1): 835-840.
- [14] 刘福超,雷丽萍,曾攀. 滚压有限元模型数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 17-21.
- [15] 韩少军,李召富. 曲轴滚压强化残余变形的有限元分析[J]. 中国水运, 2009, 9(4): 107-108.
- [16] 毛华杰,沈小燕. 粉末冶金件表面滚压塑性变形强化过程的数值模拟 [J]. **热加工工艺**, 2010, 39 (11): 110-114.
- [17] 王生武,温爱玲,邴世君,等. 滚压强化的残余应力的数值仿真及工艺分析 [J]. **计算力学学报**, 2008, 25 (S1): 113-118.
- [18] 刘荣昌,薛隆泉,马淑英,等. 曲轴圆角滚压强化载荷-应力关系的研究 [J]. **内燃机工程**, 2007, 28(4): 61-64.
- [19] 刘荣昌,薛隆泉,冯利臻,等. 曲轴滚压加工的数值模拟 [J]. **内燃机学报**, 2008, 26(3): 283-287.
- [20] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. **Engineering Fracture mechanics**, 1985, 21(1): 31-48.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

胡兴远,王成,李开发,等. 预加载荷对表面机械滚压强化残余应力影响的数值研究[J]. 机电工程, 2021, 38(8): 1064 - 1069.

HU Xing-yuan, WANG Cheng, LI Kai-fa, et al. Numerical study of effects of preload on the residual stresses induced by surface mechanical rolling treatment [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(8): 1064 - 1069.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>