7050 铝合金二维超声滚压加工残余应力场研究

郑建新，蒋书祥
（河南理工大学 机械与动力工程学院，河南 焦作，454003）

摘 要：目的 研究二维超声滚压后 7050 铝合金残余应力场的形成过程和表层残余应力的分布规律。**方法** 利用有限元软件模拟二维超声滚压加工，分析残余应力场的形成过程及表层残余应力的分布规律；采用正交试验方法进行 7050 铝合金二维超声滚压加工试验，研究工艺参数对表面残余应力的影响规律，并与有限元分析结果相对比，验证有限元模拟的合理性。**结果** 在二维超声滚压加工过程中，7050 铝合金表层材料应力随时间先减小后增大，最后趋于稳定，形成残余应力。残余压应力沿滚压深度方向先增大后减小，再转化为残余拉应力。残余压应力层厚度约为 1.05 mm，最大残余压应力值约为 285 MPa。在相同的工艺参数下，有限元分析结果与试验结果基本吻合。静压力对表面残余应力的形成影响最大，表面残余压应力随静压力的增大而增大。**结论** 二维超声滚压加工使 7050 铝合金表面发生剧烈的塑性变形，并形成一定深度的残余压应力。铝合金表面残余压应力随静压力的增大而增大，而与转速和进给量无关。

关键词：二维超声滚压；残余应力；7050 铝合金；有限元模拟
中图分类号：TG302 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)12-0265-05
DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.12.041

Residual Stress Field in the Process of 2D Ultrasonic Rolling 7050 Aluminum Alloy

ZHENG Jian-xin, JIANG Shu-xiang
(School of Mechanical & Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: The work aims to study formation process of residual stress fields and distribution law of surface residual stress of 7050 aluminum alloy after 2D ultrasonic rolling. Finite element software was used to simulate the process of 2D ultrasonic rolling, so as to analyze the formation process of residual stress fields and distribution law of the surface residual stress. Orthogonal experiment was designed to perform 2D ultrasonic rolling test to the 7050 aluminum alloy, so as to study the effect law of process parameters on surface residual stress. Test results were compared with finite element analysis results to validate reasonability of the finite element simulation. During the process of 2D ultrasonic rolling, surface material stress of the 7050 aluminum alloy first decreased and then increased, and finally tended to be stable, and residual stress formed; the residual compressive stress first increased and then decreased in the direction of rolling depth, and later translated into residual tensile stress; the thickness of residual compressive stress layer was about 1.05 mm, and the maximum residual compressive stress was 285 MPa.

收稿日期：2017-06-25；**修订日期：**2017-09-25
Received：2017-06-25；**Revised：**2017-09-25
基金项目：河南省高等学校重点科研项目（16A460006）；国家自然科学基金项目（51005071，51575163）
Fund：Supported by the Key Scientific Research Projects of Henan Province (16A460006), National Natural Science Foundation of China (51005071, 51575163)
作者简介：郑建新（1979—），男，博士，教授，主要研究方向为精密与特种加工技术和表面工程技术。
Biography：ZHENG Jian-xin(1979—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and non-conventional machining, surface engineering technology.

Provided with identical process parameters, the results obtained from finite element analysis were nearly consistent with the test results. Static pressure had the greatest influence on formation of residual stress, and the surface residual compressive stress increased as the static pressure increased. Severe plastic deformation occurs on the surface of 7050 aluminum alloy as a result of 2D ultrasonic rolling, and certain depth of residual compressive stress forms. The surface residual compressive stress of aluminum alloy increases along with the static pressure, but rotational speed and feed rate have little effect on the residual stress.
KEY WORDS: 2D ultrasonic rolling; residual stress; 7050 aluminum alloy; finite element simulation

超声滚压加工是一种抗疲劳制造工艺。其通过将高频超声冲击和滚压相结合，对金属零部件表面进行高速撞击处理，材料表层因剧烈塑性变形而强化，并形成残余压应力。同时，经滚压后的塑性流动可将工件表面微观波峰压平并填入波谷，从而降低表面粗糙度值[1-2]。

超声滚压加工产生的塑性变形使工件表层产生残余压应力和加工硬化，可有效抑制裂纹的形成和扩展，是实现零件抗疲劳制造的关键[3-4]。因此，研究二维超声滚压加工的塑性变形过程和残余应力场的分布具有重要意义。Ismail 等[5]建立了多次滚压过程的三维有限元模型，分析了多次滚压后表面的等效残余应力和塑性应变分布。刘宇等[6]对 40Cr 进行超声滚压加工，采用纳米压痕实验测定了工件表层的残余应力，并指出表层残余应力随加工次数的增大而增大。朱有利等[7]采用超声深滚加工技术对 Ti6Al4V 合金进行表面强化处理研究，发现超声深滚加工能产生较高的残余压应力和表面硬度以及较低的表面粗糙度。王生武等人[8]对多圈滚压工艺进行有限元模拟，结果表明进给量太大、转速太快都容易造成工件表层残余应力分布不均匀，甚至形成残余拉应力。对于同属于表面强化的超声喷丸加工，国内外学者也有残余应力数值模拟的报道[9-11]。

本文首先对 7050 铝合金轴件进行二维超声滚压加工有限元分析，研究二维超声滚压加工后的应力分布。然后对 7050 铝合金进行二维超声滚压加工试验，并与有限元分析结果相结合，研究工艺参数对残余应力的影响。

1　二维超声滚压加工原理

二维超声滚压加工原理如图 1 所示。球形工具头在静压力 F 作用下压在工件上，工件以转速 n 做旋转运动，工具头以进给速度 f_r 沿工件轴线做直线运动。在滚压过程中，工具头在纵向和圆周方向同时被施以同频超声振动。工具头以振幅 A 对工件表面进行纵向高频冲击，实现表面冲击强化；以振幅 B 对工件表面进行扭转高频碾压，实现表面光整加工。

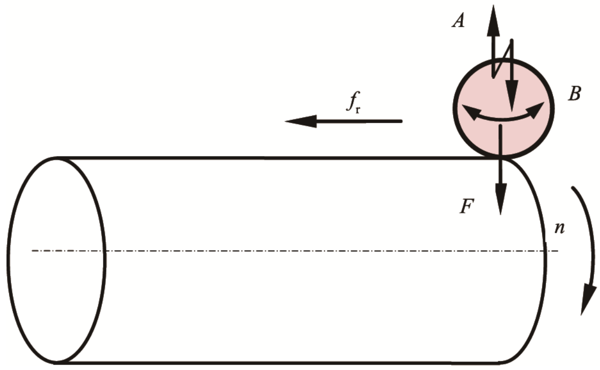


图 1　二维超声滚压加工原理
Fig.1 Principle of 2D ultrasonic rolling

2　二维超声滚压有限元分析

2.1　建立有限元模型

利用 ANSYS LS-DYNA 建立二维超声滚压加工有限元模型，如图 2 所示。将滚轮设为 ϕ12 mm 的球体，工件为 ϕ45 mm、长 12 mm 的半圆柱体。滚轮和工件的网格单元类型均采用 solid164 单元。

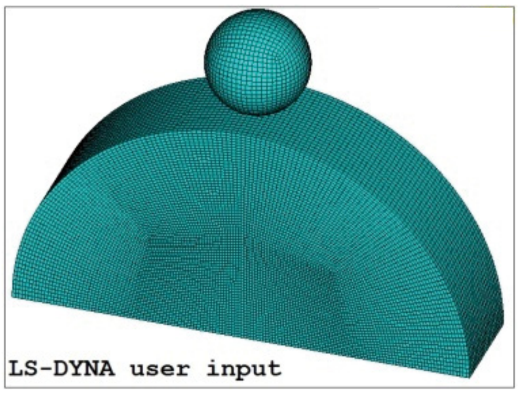


图 2　有限元模型
Fig.2 Finite element model for simulations

2.2　确定材料模型

7050 铝合金经二维超声滚压后，工件表层材料发生剧烈的弹塑性变形，并产生残余应力和加工硬化，因此本文采用 Cowper-Symonds 本构模型，其屈服应力表达式为：

$$\sigma = \left[1+(\dot{\varepsilon}/C)^{1/p}\right]\left(\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\mathrm{eff}}\right) \tag{1}$$

式中：$E_p = \dfrac{E_{\tan}\cdot E}{E - E_{\tan}}$；$\dot{\varepsilon}$ 为应变率；C、P 为 Cowper-Symonds 应变率参数；σ_0 为初始屈服应力；β 为硬化参数；$\varepsilon_p^{\mathrm{eff}}$ 为有效塑性应变；E_p 为塑性硬化模量；$E_{\tan}$ 为切线模量；E 为弹性模量。对于 7050 铝合金材料，C=8000，P=30，β=180[12]。

滚轮材料为 YG8 硬质合金，其强度和硬度远高于 7050 铝合金，可将滚轮设为刚体。滚轮与工件的接触选用面面自动接触类型，接触面和目标面分别是滚轮表面和工件表面。工件和滚轮材料的力学性能如表 1 所示。

表 1　材料力学性能参数

Tab.1 Mechanical performance parameters of material

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	切线模量/MPa	屈服应力/MPa
7050	2600	70	0.3	300	450
YG8	14500	600	0.21		

2.3　二维超声滚压工艺条件设定

对滚轮施加纵向振动位移 $y(t)=A\sin(2\pi ft)$和扭转位移 $\theta(t)=B\sin(2\pi ft+\varphi)$。其中，$A$、$B$ 分别为纵向和扭转振幅，f 为振动频率，φ 为相位差。根据前期工艺试验成果[13-15]，设定二维超声滚压时的静压力 F_s=260 N，转速 n=160 r/min，进给量 f_r=0.11 mm/r。加工过程中超声振动频率和振幅保持不变，频率 f=19.8 kHz，振幅 A=9 μm，B=4 μm。模拟超声滚压时间 t=0.1 ms。

2.4　有限元分析结果

图 3 为滚压后工件表层等效应力分布云图。由图可见，工件表层等效应力在滚压区域内由表及里先增大后减小，最后呈现为拉应力状态。

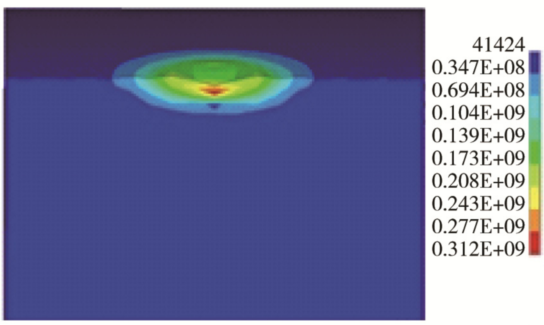


图 3　滚压后工件表层等效应力分布云图

Fig.3 Distribution of equivalent residual stress along surface layer induced by 2D ultrasonic rolling

残余应力沿深度方向的分布如图 4 所示。由图可知，经二维超声滚压后，残余压应力层深度可达 1.05 mm，且残余压应力沿滚压深度方向先增大后减小。其中，表面残余压应力约为 196.21 MPa，最大残余压应力约为 285 MPa，发生在距离表面约 0.31 mm 处。在深度大于 1.05 mm 的次表层，残余拉应力先增大后减小，最后趋近于零，且最大残余拉应力不超过 50 MPa。

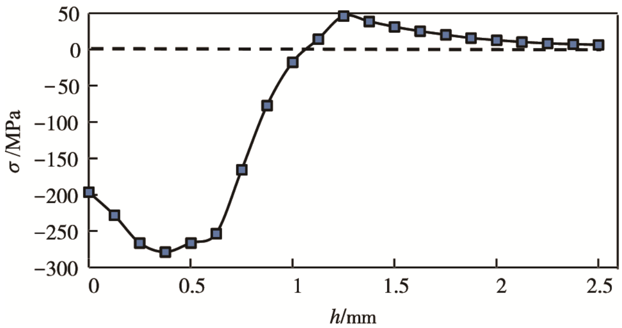


图 4　沿深度方向的残余应力分布

Fig.4 Distribution of residual stress in depth direction

为分析滚压过程中工件表层应力随时间变化的规律，在后处理中沿滚压深度方向取 5 个点（距表面距离分别为 0、0.3、0.6、0.9、1.2 mm），以获取应力时间历程曲线，结果如图 5 所示。

由图可知，在距工件表层 0.9 mm 以内，各点处的应力随时间先减小后增大，最后趋于稳定，稳定后的应力为残余压应力。在距工件表面 1.2 mm 处，应力随时间变化不明显，且残余应力呈现为拉应力。当 t=0.037 ms 时，工件表面应力达到最大值，约为 711 MPa，远超过材料屈服应力 450 MPa；当 t=0.054 ms 后，内应力无明显变化，瞬时应力转变为残余应力。

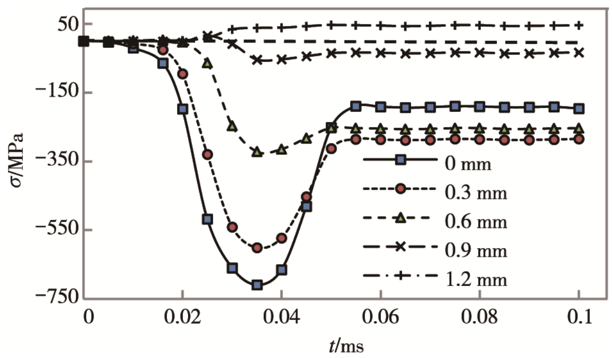


图 5　节点应力随时间变化情况

Fig.5 Variation of nodes stress as a function of time

3　二维超声滚压加工试验

3.1　试验设备

二维超声滚压加工试验在 CA6140B/A 普通车床上进行。将自主研制的声学系统安装在刀架上，并保证滚轮中心与主轴轴线等高。试验所需静压力由安装在换能器底部的压缩弹簧提供。超声振动系统的谐振频率为 19.8 kHz,纵振振幅为 9 μm,扭振振幅为 4 μm。

工件为 7050 铝合金轴件，经一次走刀车削后，直径为 45 mm，表面粗糙度 *Ra* 值约为 1.9 μm。

工件经二维超声滚压加工后，采用加拿大 PROTO-LXRD X 射线衍射仪测量工件表面的残余应力。

3.2　试验方案与结果

安排 $L_9(3^3)$正交表进行工艺试验，并在相同工艺参数下进行有限元分析模拟。试验方案和结果如表 2 所示，试验与模拟结果如表 3 所示。

表 3 中极差 *R* 表明,静压力对残余应力的影响最大，主轴转速次之，进给量的影响最小。均值 *k* 表明，当 F_s 取第三水平 340 N、*n* 取第三水平 400 r/min、f_r 取第二水平 0.14 mm/r 时，可获得最大残余压应力。

表 2　方案及结果
Tab.2 Experimental scheme and results

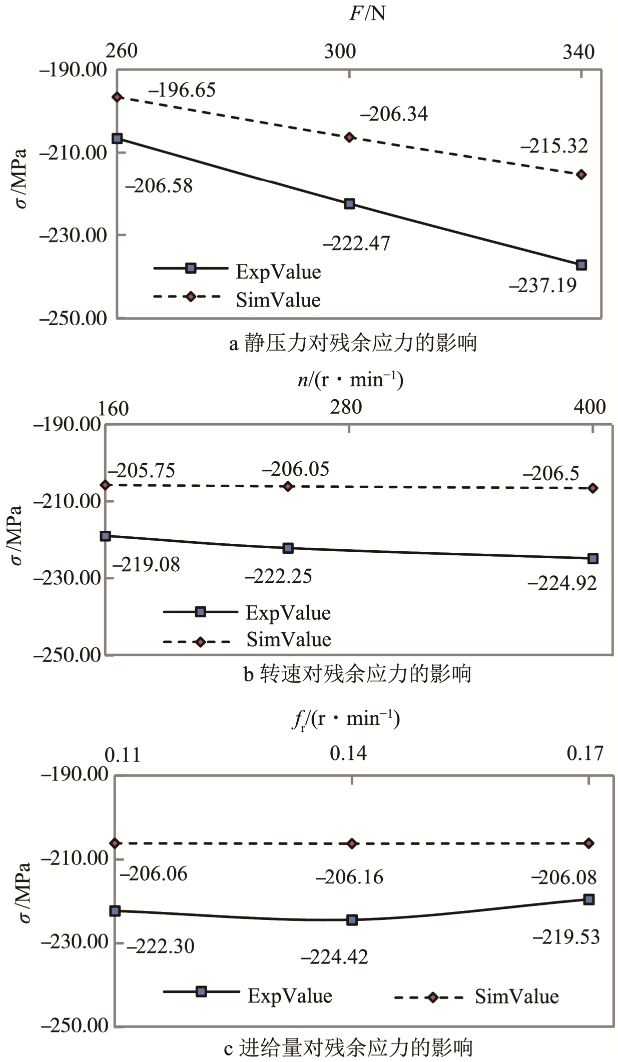
编号	F_s/N	n/(r·min^{-1})	f_r/(mm·r^{-1})	σ/MPa		
				试验值	模拟值	误差/%
1	260	160	0.11	−203.79	−196.21	−3.7
2	260	250	0.14	−210.11	−196.76	−6.4
3	260	400	0.17	−205.84	−196.97	−4.3
4	300	160	0.14	−220.78	−206.00	−6.7
5	300	250	0.17	−220.09	−206.22	−6.3
6	300	400	0.11	−226.55	−206.81	−8.7
7	340	160	0.17	−232.66	−215.05	−7.6
8	340	250	0.11	−236.55	−215.17	−9.0
9	340	400	0.14	−242.36	−215.73	−11

表 3　试验与模拟结果分析
Tab.3 Analysis of test and simulation results

MPa

指标		F_s	n	f_r
试验值	k_1	−206.58	−219.08	−222.30
	k_2	−222.47	−222.25	−224.42
	k_3	−237.19	−224.92	−219.53
	R	30.61	5.84	4.89
模拟值	k_1	−196.65	−205.75	−206.06
	k_2	−206.34	−206.05	−206.16
	k_3	−215.32	−206.50	−206.08
	R	18.67	0.75	0.1

进一步分析各工艺参数对残余应力值的影响规律，结果如图 6 所示。图中，Exp Value 表示试验值，Sim Value 表示有限元分析模拟值。



a 静压力对残余应力的影响

b 转速对残余应力的影响

c 进给量对残余应力的影响

图 6　工艺参数对残余应力的影响

Fig.6 Effects of process parameters on residual stress: a) effects of static pressure on residual stress, b) effects of revolving speed on residual stress, c) effects of feed rate on residual stress

图 6 表明，在相同的工艺参数下，工件表面残余应力的试验值和有限元分析模拟值的分布规律基本相同，有限元分析结果略低于试验值。经过二维超声滚压加工后，工件表面残余压应力随静压力的增大而增大，而转速和进给量的变化对残余应力影响不明显。

这是因为在二维超声滚压过程中，静压力的增大使工件的塑性变形更加剧烈。剧烈的塑性变形使工件被滚压层的组织变得更加紧密，从而在工件表层形成更大的残余压应力。而主轴转速越快，工件表面同一部位被撞击次数越多，其残余应力值越大，但其增加的撞击次数远低于超声振动次数，因而残余应力受转速影响不明显。同样的，进给量不同时，二维超声滚

压加工过程中滚轮前道压痕和后道压痕部分重叠面积也不同，对工件表层材料塑性流动也会有影响。但相对于超声振动，这种影响几乎可以忽略不计。

以上研究表明，在二维超声滚压加工过程中，工件表面残余应力的形成主要取决于超声振动与静压力，而与转速和进给量无关。

4 结论

1）二维超声滚压加工使 7050 铝合金表面产生剧烈的塑性变形，并形成一定深度的残余压应力。

2）残余压应力沿滚压深度方向先增大后减小，后转化为残余拉应力。残余拉应力先增大后减小，最后趋近于零，残余压应力的深度约为 1.05 mm。

3）在相同的工艺参数下，二维超声滚压加工有限元分析获得的工件表面残余应力分布规律与工艺试验相同，有限元分析结果略低于试验值。

4）经二维超声滚压加工后，7050 铝合金表面残余压应力随静压力的增大而增大，而转速和进给量的变化对残余应力的影响可以忽略不计。

参考文献：

[1] 郑建新, 罗傲梅, 刘传绍. 超声表面强化技术的研究进展[J].制造技术与机床, 2012(10): 32-36.
ZHENG Jian-xin, LUO Ao-mei, LIU Chuan-shao. Development of Ultrasonic Surface Enhancement Technique[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(10): 32-36.

[2] WANG T, WANG D P, LIU G, et al. Investigations on the Nanocrystallization of 40Cr Using Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824-1829.

[3] 刘战强, 贺蒙, 赵建. 机械加工强化机理与工艺技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2015, 26(3): 403-411.
LIU Zhan-qiang, HE Meng, ZHAO Jian. Mechanism and Material Processing Technology——A Review[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(3): 403-411.

[4] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 120-126.
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research Progress on Evaluation of Surface Residual Stress and Fatigue Life of Machined Products[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 120-126.

[5] ISMAIL R, TAUVIQIRRAHMAN M, SAPUTRA E, et al. Modeling of Repeated Rolling Contact of Rigid Ball on Rough Surface: Residual Stress and Plastic Strain Analysis[J]. Procedia Engineering, 2013, 68: 593-599.

[6] LIU Y, WANG L J, WANG D P. Finite Element Modeling of Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 2106- 2113.

[7] 李礼, 朱有利. Ti6Al4V 合金超声深滚层的组织结构特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(10): 1754-1757.
LI Li, ZHU You-li. Microstructure Characteristics of Ultrasound-aided Deep Rolling Treated Ti6Al4V Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(10): 1754-1757.

[8] 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.
WANG Sheng-wu, WEN Ai-ling, BING Shi-jun, et al. FE Simulation of Residual Rtresses by Rurface Rolling and Analysis of Rolling Process[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(s1): 113-118.

[9] THIBAUT C, LI J, DANIEL N, et al. Modelling of Multiple Impacts for the Prediction of Distortions and Residual Stresses Induced by Ultrasonic Shot Peening (USP) [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 2080-2090.

[10] 郭超亚, 鲁世红. 铝合金超声喷丸残余应力场[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 75-80.
GUO Chao-Ya, LU Shi-hong. Residual Stress of Ultrasonic Shot Peened Aluminum Alloy[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 75-80.

[11] KLEMENZ M, SCHULZE V, ROHR I, et al. Application of the FEM for the Prediction of the Surface Layer Characteristics after Shot Peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4093-4102.

[12] 王雷, 李玉龙, 索涛, 等. 航空常用铝合金动态拉伸力学性能研究[J]. 航空材料学报, 2013, 33(4): 71-76.
WANG Lei, LI Yu-long, SUO Tao, et al. Mechanical Behavior of Commonly Used Aeronautical Aluminum Alloys under Dynamic Tension[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(4): 71-76.

[13] 侯雅丽, 吴豪琼, 刘传绍. 纵-扭复合振动超声深滚加工试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(4): 19-22.
HOU Y L, WU H Q, LIU C S. Ultrasonic Deep Rolling Technology with Longitudinal-Torsional Vibration[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(4): 19-22.

[14] ZHENG J X, LIU C S, ZHANG Y M. Basic Research on Ultrasonic Extrusion for 45 Steel Shaft[J]. Key Engineering Materials, 2011, 455: 288-292.

[15] HOU Y L, LIU C S, LIU S Q. Effect of Processing Parameters on Surface Roughness in Ultrasonic Deep Rolling 6061-T6 Aluminum Alloy with Longitudinal-Torsional Vibration[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 722: 60-63.