

奥氏体不锈钢塑性变形过程中的应力分布

付殿禹¹, 蒋 鹏¹, 孙 勇¹, 凌云汉¹, 孙伟领¹, 邓晓婷²

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 为了研究奥氏体不锈钢变形后的应力分布规律, 以及与马氏体相变行为的关系, 对变形后的奥氏体不锈钢板材进行残余应力测试分析, 并在相应变形区域进行组织观测。测试中, 对奥氏体不锈钢板材进行了单向拉伸试验, 并采用无损检测方法——X 射线衍射 (XRD) 对不同变形条件下的应力值进行分析; 最后, 通过有限元模拟进行验证分析, 得到了不同变形条件下的应力分布规律。结果表明, 变形程度、变形温度、组织相变等因素均对变形后的应力分布规律有一定的影响; 随着拉伸载荷的增加, 变形复杂度增加, 残余应力分布不均匀性增加, 测得的应力值增大; 随着温度升高, 材料本身组织变化, 应力值随之减小。

关键词: 不锈钢; 应力分布; 组织相变; 变形程度; 变形温度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.035

中图分类号: TG113 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0255-06

Stress distribution on austenitic stainless steel during plastic deformation

Fu Dianyu¹, Jiang Peng¹, Sun Yong¹, Ling Yunhan¹, Sun Weiling¹, Deng Xiaoting²

(1. Beijing Mechanical and Electrical Research Institute Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China;

2. Material Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In order to study the stress distribution laws of austenitic stainless steel after deformation and the relationship with martensitic transformation behavior, the residual stress of deformed austenitic stainless steel plate was measured and analyzed, and the microstructure was observed in the corresponding deformation area. During the test, the uniaxial tensile test of austenitic stainless steel plate was carried out, and the stress values under different deformation conditions were analyzed by non-destructive testing method of X-ray diffraction (XRD). Finally, the verification analysis was carried out by finite element simulation, and the stress distribution laws under different deformation conditions were obtained. The results show that the deformation degree, deformation temperature, microstructure phase transition and other factors have certain influence on the stress distribution laws after deformation. Furthermore, with the increasing of tensile load, the deformation complexity increases, the unevenness of residual stress distribution increases, and the measured stress value increases. In addition, with the increasing of temperature, the microstructure of the material itself changes, and the stress value decreases.

Key words: stainless steel; stress distribution; organization phase transition; deformation degree; deformation temperature

在材料加工行业, 构件成形精准度的要求与标准越来越高。在加工过程中, 构件变形后内部对应存在的残余应力会在装配以及日后的使用过程中, 起着至关重要的作用。在实际应用中, 该应力的出现使构件在成形后的一段时间内出现起皱、开裂和滞后变形等工艺缺陷^[1-5]。然而在成形后的自然释放过程中, 应力的释放也会影响工件精度并降低构件的使用性能^[6]。所以, 变形后应力的出现是引起

材料疲劳断裂、失稳破坏和变形的主要原因。而对于实际应用中的构件来说, 如果存在这些缺陷, 则会造成很大的损失^[7-9]。为了避免应力所带来的弊端, 有效利用其积极作用, 研究成形后残余应力的分布和控制有着非常重要的意义。

本文主要研究奥氏体不锈钢在成形后的残余应力分布, 揭示变形后应力分布的影响因素, 从而找到有效的控制方法。通过试验测试和模拟验证的研究方法, 得到更加准确的分布规律。

1 试验方法

本文以 AISI304 奥氏体不锈钢为研究对象, 该材料的化学成分如表 1 所示。

收稿日期: 2022-05-17; 修订日期: 2022-08-24

作者简介: 付殿禹 (1978-), 男, 博士, 工程师

E-mail: romhand_fdy@163.com

通信作者: 蒋 鹏 (1964-), 男, 博士, 研究员级高级工程师

E-mail: jp1964@163.com

表 1 304 不锈钢的化学成分 (%，质量分数)
Table 1 Chemical compositions of 304 stainless steel
(%, mass fraction)

C	Mn	P	Cu	S	Si	Ni	Cr	Fe
0.05	1.12	0.034	0.112	0.001	0.47	8.08	18.3	余量

1.1 拉伸试验

在室温以及 150 °C 下进行单向拉伸试验，初始应变速率为 0.001 s⁻¹。拉伸试样的形状和尺寸如图 1 所示。拉伸载荷分别选取为 450、350 和 250 MPa。

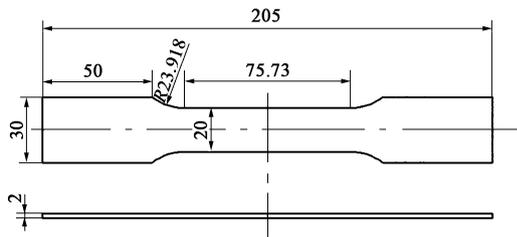


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of tensile specimen

图 2 为通过试验测试得到的 304 不锈钢的应力-应变曲线，测得屈服强度为 350 MPa，抗拉强度为 680 MPa，选定测试载荷值为 250、350 和 450 MPa 来分别进行试验。

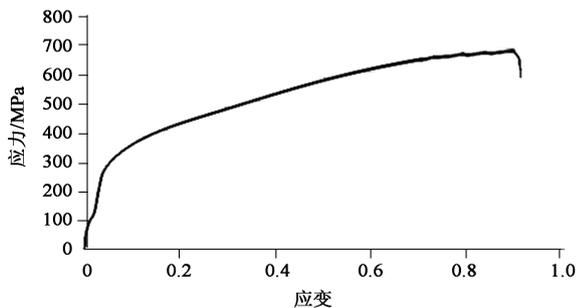


图 2 304 不锈钢的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of 304 stainless steel

1.2 残余应力测试

1.2.1 测试原理

X 射线衍射方法技术成熟，应用广泛，其主要优点是能够实现无损检测，且测量速度快、测量精度高。所以，选择 X 射线衍射方法作为应力测试的一种无损方法，其原理为：对于理想的晶体，不同方位的同族间距是相同的。当存在残余应力时，不同晶粒的同族晶面间距随晶面方位即应力大小发生有规律的变化，从而使 X 射线衍射谱线发生位偏移，根据位偏移的大小可计算出残余应力。X 射线衍射的依据是布拉格方程，X 射线衍射不同于晶面

反射，X 射线仅在特定的晶面进行反射，所以，在这个晶面间距有变化时能够检测出来。如图 3 所示，入射线入射时，会在广衍射晶面上进行衍射，产生衍射线 C。

$$\sigma = \frac{E}{2(1+v)} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \cot\theta_0 \cdot \frac{\partial 2\theta_\varphi}{\partial \sin^2\varphi} \quad (1)$$

式中： σ 为残余应力； E 为弹性模量； v 为泊松比； θ_0 为所选晶面在无应力情况下的衍射角； η 为入射线夹角，并与衍射线夹角相等； φ 为样品表面法线与所选晶面法线的夹角； $2\theta_\varphi$ 为样品表面入射线与衍射线的夹角^[10-12]。

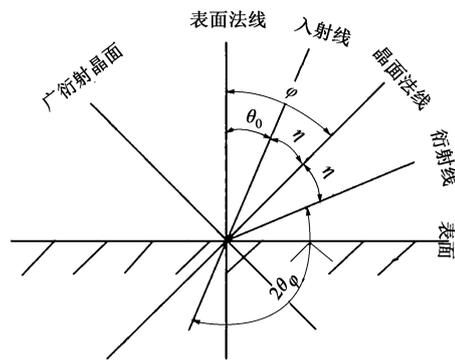


图 3 X 射线衍射原理图

Fig. 3 Principle diagram of X-ray diffraction

1.2.2 测试方法

采用 X 射线衍射技术测量试件变形后的残余应力分布。不同变形方式下的测试点选取如图 4 所示。试件 1-1、1-2、1-3 的拉伸载荷为分别 250、350 和 450 MPa。位置 1 为中心点，位置 2 距离中心点 10 mm，位置 3 距离中心点 20 mm。没有选择以中心对称的方式选定测试点，避免了选点两侧的测试点重复，在一侧选点能够说明不同变形位置的残余应力分布。图 4 为一组对照组的标点位置。

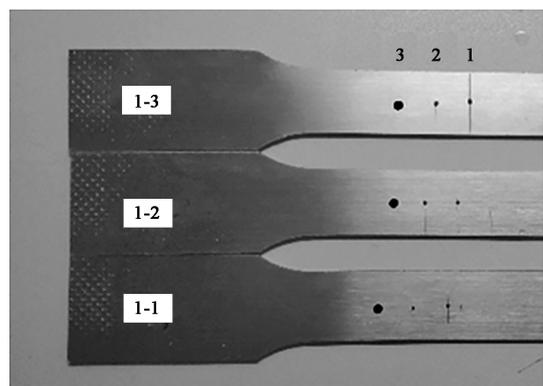


图 4 试件残余应力测试的位置与方向

Fig. 4 Positions and directions for residual stress test of specimen

2 试验结果与分析

2.1 应力测试结果

由测试结果可知，试件中心位置的残余应力值均为最大的，随着应力值的增大，应力分布显现出规律性的变化，如表2所示，1-1试件的1、2、3点标记为1-1-1、1-1-2、1-1-3；1-2试件的1、2、3点标记为1-2-1、1-2-2、1-2-3；1-3试件的1、2、3点标记为1-3-1、1-3-2、1-3-3。

表2 室温下测得的试件应力值

Table 2 Stress values of specimens measured at room temperature

试件取点编号	应力值/MPa
1-1-1	160
1-1-2	97
1-1-3	80
1-2-1	140
1-2-2	94
1-2-3	71
1-3-1	220
1-3-2	210
1-3-3	176

从表2中的应力测试值的变化规律可发现：试件中心位置的变形程度较大，与之对应的形变量就较大，试件变形的不均匀性增加，形变不均匀性导致试件形成的应力值就会越大；当试件中心的变形程度增加时，组织也会产生变化，不再是单一奥氏体相，此时测得的应力值也随之增大。

2.2 金相组织

2.2.1 试样1-1在位置1处的金相组织

304不锈钢在250 MPa的载荷下拉伸后的金相组织如图5所示，可以隐约看到极少量的针状马氏体组织出现，整体的组织形貌由针状马氏体和奥氏体组成。图5中还有部分孪晶存在。

2.2.2 试样1-2在位置1处的金相组织

304不锈钢在350 MPa载荷下拉伸后的金相如图6所示，从上往下组织分别为马氏体、孪晶、奥氏体，也可以清晰地看到晶界。

2.2.3 试样1-3在位置1处的金相组织

304不锈钢在450 MPa载荷下拉伸后的金相如图7所示，组织为马氏体、奥氏体（看到明显的晶界）、孪晶。图7中可以较明显地观察到各部分组

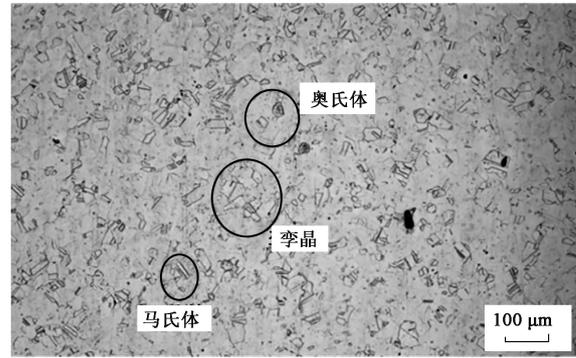


图5 250 MPa 载荷下拉伸后的金相组织

Fig. 5 Metallographic structure after tension under load of 250 MPa

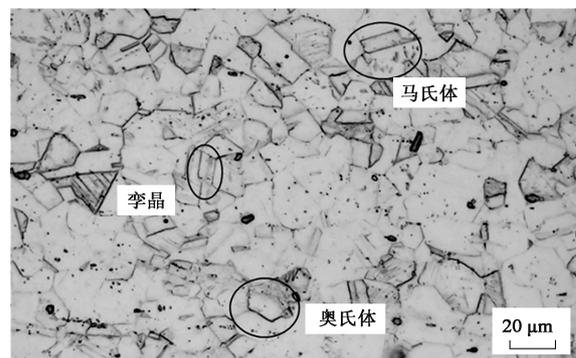


图6 350 MPa 载荷下拉伸后的金相组织

Fig. 6 Metallographic structure after tension under load of 350 MPa

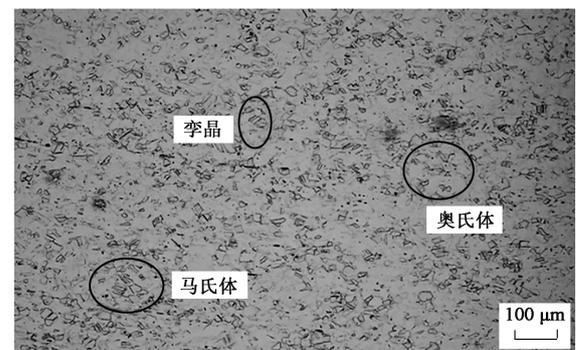


图7 450 MPa 载荷下拉伸后的金相组织

Fig. 7 Metallographic structure after tension under load of 450 MPa

织。其他试样中未观察到明显的马氏体组织，由此可知，拉伸载荷变化会很大程度上影响马氏体相变的产生。

由于奥氏体不锈钢在室温下变形会有马氏体相变产生，所以提高变形温度至150℃，以去除相变行为对应力分布的影响^[13-14]。将试件1-3在不同变形温度下试件中心位置测试点的应变与残余应力测试结果表示在一个坐标系中，如图8所示。保持应变速率为0.001 s⁻¹，随着真应变的增加，残余应力

值整体上有先增大后减小的趋势。而当变形温度升高至 150 ℃ 时, 残余应力值降至最低。与室温变形相比较, 当变形温度为 150 ℃ 时, 残余应力值平均下降了 41.7%。

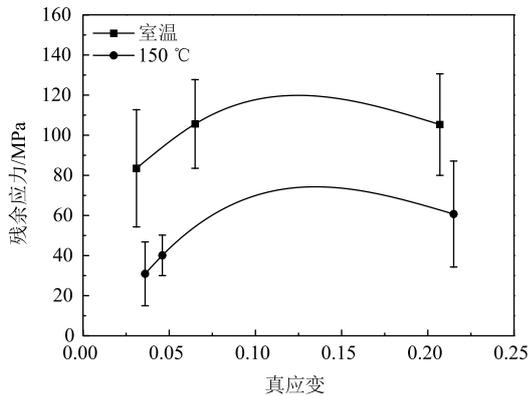


图 8 应变速率为 0.001 s^{-1} 时不同变形温度下残余应力与真应变的关系

Fig. 8 Relationship between residual stress and true strain under different deformation temperatures at strain rate of 0.001 s^{-1}

3 模拟结果与分析

模拟采用与试件 1-3 拉伸试验相对应的参数, 初始应变速率为 0.001 s^{-1} , 载荷选取为 450 MPa。

3.1 拉伸状态

拉伸变形中, 去除外力, 试件内部残余应力随变形程度的分布变化如图 9 所示。当试件变形程度为 50% 时, 试件的中心部分开始有应力产生, 随着变形程度增加至 60%, 试件中心位置已经出现了明显的应力集中现象。图 9 说明试件中心位置的变形较大, 对应的残余应力值也较大, 可见存在于构件内部的残余应力分布与变形程度紧密相关。当拉伸结束, 完全卸除载荷时, 得到的残余应力分布如图 10 所示。应力值的最大点发生在试件中心位置, 再次说明变形程度越大, 变形不均匀性增加, 导致产生的残余应力值越大。

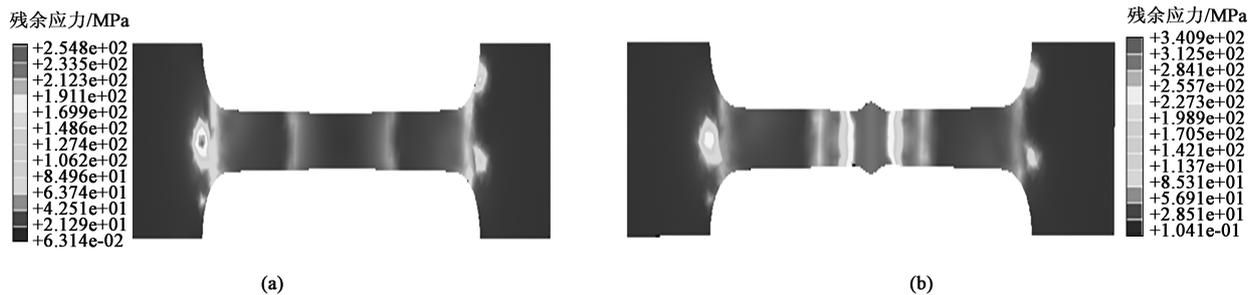


图 9 不同变形程度下的残余应力分布变化

(a) 变形程度为 55% (b) 变形程度为 60%

Fig. 9 Variation of residual stress distribution under different deformation degrees

(a) Deformation degree of 55% (b) Deformation degree of 60%

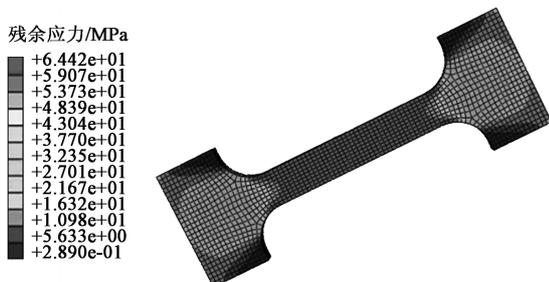


图 10 卸载后的残余应力分布

Fig. 10 Residual stress distribution after unloading

模拟输出的残余应力分布与试验测量值的对比分析如图 11 所示。测试起始点为试件的中心点, 横坐标为测试点距离试件中心点的位移。由图 11 可

知, 模拟值始终略高于试验值。这是由于整个仿真模拟过程中建立的模型较简单, 且采用简单的加载进行运算, 并未考虑相变过程中变形不均匀性所带来的残余应力增量, 所以, 模拟输出的残余应力值整体上略低于试验测量值。而与加载时相比较, 应力瞬时降低, 较之前总体降低近 90%。可见, 拉伸外力卸载, 试件释放应力后的应力值约为原来加载时应力值的 90% 左右。

3.2 结果分析

考虑奥氏体不锈钢的马氏体相变行为, 将相变影响代入模型, 对模型进行修正。为验证修正模型的准确性, 将其与初始模型以及试验值进行对比分析, 如图 12 所示。无论是初始模型、修正模型以及

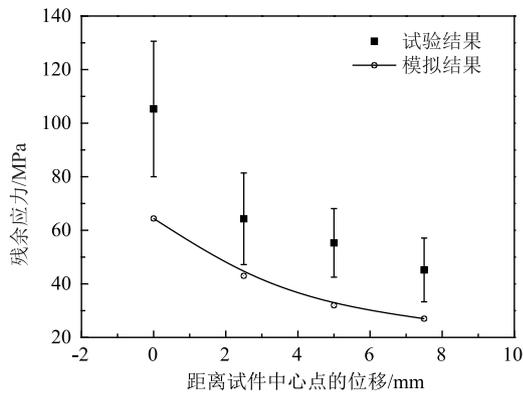


图 11 模拟残余应力分布与试验测量值的对比

Fig. 11 Comparison between simulated residual stress distribution and test measurement values

试验测量值, 3 种方式所得数据的变化规律相似, 在拉伸变形中均是逐渐减小的趋势。从图 12 中可看出: 首先, 在拉伸变形中初始模型所得的应力输出明显低于试验测量值, 而建立修正模型后输出的应力分布与试验值贴合得较好; 其次, 在变形过程中两种模型建立的计算结果均高于试验测量值, 尤其是初始模型, 明显高于试验值, 经过修正的模拟结果较贴进于试验测试值。

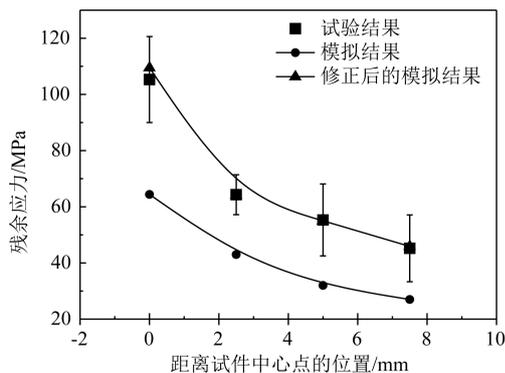


图 12 不同变形条件下的残余应力试验值与模拟值对比

Fig. 12 Comparison between residual stress test values and simulated values under different deformation conditions

将引入的修正模型接入模拟软件中, 整个计算过程考虑了形变诱发马氏体相变这一行为对应力释放后的残余应力分布的影响。马氏体相变行为的产生增加了构件内部变形的不均匀性, 将直接影响残余应力组成部分中的组织应力。复杂的变形过程致使马氏体相变以及残余应力值均有所增加, 所以, 简单的初始模型得出的结果必会存在较大误差。

通过以上分析, 针对奥氏体不锈钢在室温下形变产生马氏体相变的特殊行为, 该种材料在室温下进行成形时, 为避免残余应力的不均匀性增加, 应

适当控制形变时的组织变化, 即马氏体相变量的产生, 并且控制变形时的均匀性。

4 结论

(1) 304 不锈钢材料在室温下拉伸后, 加载载荷越大, 变形越复杂, 相应的应力分布越不均匀。此外, 变形试件的内部组织的不均匀性增加, 材料变形产生的残余应力值也越大。

(2) 变形过程中温度升高, 也会影响残余应力的分布。当变形温度升高至 150 °C 时, 相变行为消失, 材料的力学性能变化, 残余应力也随之降低。

(3) 将修正的模型在有限元模拟软件中实现。通过输出结果与初始模型以及试验测量值进行一一对比, 发现修正后的计算结果比初始模型能够更加准确地预测变形后的残余应力分布, 模拟过程也说明了相变行为对残余应力的分布有着非常重要的影响。

参考文献:

- [1] 王庆明, 孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向 [J]. 机电工程, 2011, 28 (1): 11-15, 41.
Wang Q M, Sun Y. Research development on the test methods of residual stress [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28 (1): 11-15, 41.
- [2] 蒋刚, 谭明华, 王伟明, 等. 残余应力测量方法的研究现状 [J]. 机床与液压, 2007, (6): 213-216, 220.
Jiang G, Tan M H, Wang W M, et al. Present research status of measuring residual stress [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, (6): 213-216, 220.
- [3] 王亚民, 王彦龙. 残余应力的超声波检测研究 [J]. 仪表技术, 2004, (4): 33-34.
Wang Y M, Wang Y L. Measuring system for residual stress by ultrasonic [J]. Instrument Technology, 2004, (4): 33-34.
- [4] Withers P J, Turski M, Edwards L, et al. Recent advances in residual stress measurement [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 85 (3): 118-127.
- [5] 宋俊凯, 黄小波, 高玉魁. 残余应力测试分析技术 [J]. 表面技术, 2016, 45 (4): 75-82.
Song J K, Huang X B, Gao Y K. Test and analysis technology of residual stress [J]. Surface Technology, 2016, 45 (4): 75-82.
- [6] 詹春晓, 李昊, 刘一华, 等. 轿车横梁的冲压残余应力分析 [J]. 合肥工业大学学报, 2004, (2): 183-186.
Zhan C X, Li H, Liu Y H, et al. Analysis of stamping residual stresses in the cross members of a car [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2004, (2): 183-186.

- [7] 彭超楠. ZrTiAlV 合金锻造过程中变形与组织演化规律 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
Peng C N. The Organization and Evolution of Deformation during the Forging Process of ZrTiAlV Alloy [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [8] Kamalakar K, Prakash T S. Design optimization of oil pan using finite element analysis [J]. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 2014, 3 (12): 335-341.
- [9] 肖良红, 龙涛, 徐俊瑞, 等. 拉深比对 304 不锈钢圆筒件残余应力的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2015, 23 (3): 18-23.
Xiao L H, Long T, Xu J R, et al. Influence of drawing ratio on the residual stress in 304 stainless steel cylindrical drawing parts [J]. Material Science and Technology, 2015, 23 (3): 18-23.
- [10] 程乾坤, 杜春平. 残余应力对零件加工精度的影响分析与工艺改进——以钳工加工燕尾槽为例 [J]. 桂林航天工业学院学报, 2019, 24 (4): 497-501.
Cheng Q K, Du C P. Analysis of the influence of residual stress on the machining accuracy of parts and process improvement-Taking fitter processing dovetail groove as an example [J]. Journal of Guilin University of Aerospace Technology, 2019, 24 (4): 497-501.
- [11] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
Zhang D Q, He J W. X-ray Diffraction Analysis and Effect of Residual Stress in Materials [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999.
- [12] Chen D Y, Xu Y, Zhang S H, et al. Numerical and experimental study on manufacture of a novel high-capacity engine oil pan subjected to hydro-mechanical deep drawing [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 896 (1): 012012-012012.
- [13] 李申昱. 应变诱发马氏体相变对 304 奥氏体不锈钢非线性超声响应的影响 [D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
Li S Y. Deformation Induced Martensitic Transformation Effects on Nonlinear Ultrasonic Responses of 304 Austenitic Stainless Steel [D]. Shanghai: East China University Of Science And Technology, 2015.
- [14] 杨钊, 黄建龙. 304 奥氏体不锈钢应变诱发马氏体的研究 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33 (3): 104-109.
Yang F, Huang J L. Study on strain induced martensite in 304 austenitic stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33 (3): 104-109.

