

文章编号: 1000-582X(2011)09-033-06

7075 铝合金拉伸残余应力数值模拟及实验测试

罗家元^{1,2}, 朱才朝¹, 李大峰¹, 钟渝^{1,3}, 李云^{1,3}

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 400039;
3. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326)

摘要:对 7075 铝合金板材淬火过程进行温度场和应力场的直接热力耦合数值模拟, 获得淬火残余应力分布规律, 在此基础上开展基于等向强化 Mises 屈服准则和 Prandtl-Reuss 塑性流动增量理论的铝合金拉伸过程数值模拟, 仿真不同拉伸率对内部残余应力的消除效果, 采用盲孔法对铝合金淬火及不同拉伸量拉伸后残余应力进行实验测量, 结果表明对于厚 12 mm 的 7075 铝合金试件最优拉伸率为 1.0%。同时根据不同拉伸率拉伸后铝合金板材残余应力分布规律的变化趋势可以看出, 以不同拉伸率拉伸后铝合金板材表面和内部残余应力的消除效果具有相同的变化趋势。

关键词: 淬火; 预拉伸; 拉伸率; 优化; 实验

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Numerical simulation and experimental investigation of residual stress in the stretching process of the 7075 aluminum alloy

LUO Jia-yuan^{1,2}, ZHU Cai-chao¹, LI Da-feng¹, ZHONG Yu^{1,3}, LI Yun^{1,3}

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. China Automotive Engineering Research Institute Co., LTD, Chongqing 400039, P. R. China; 3. Southwest Aluminum (Group) Co., LTD, Chongqing 401326, P. R. China)

Abstract: Numerical simulation of the direct thermo-mechanical coupling of temperature field and stress field during the 7075 aluminium alloy plate's quenching process is investigated and the distribution tendency of residual stress is acquired. Numerical simulation of the elimination effect of varying stretching rates on the residual stress in the stretching process is carried out based on isotropic hardening Mises yield criterion and Prandtl-Reuss plastic flow rule with incremental theory. Then blind hole method is adopted to measure the residual stress. Both results show the optimum stretching rate for 12 mm thick 7075 aluminum alloy plate is 1%. From the residual stress distribution rules, it is showed that with varying stretching rates, the elimination effects of surface and internal residual stresses have similar variation tendency.

Key words: quenching; pre-stretching; stretching rate; optimize; experiment

航空整体结构件通常采用高强度铝合金厚板直接铣削加工而成^[1], 但铝合金预拉伸板内存在残余

应力引起的加工变形问题是航空自动化制造领域的瓶颈问题。为了消除残余应力, 铝合金板生产过程

收稿日期: 2011-04-09

基金项目: 科技特派计划项目(2009GJF10028)

作者简介: 罗家元(1978-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事铝合金板材残余应力消减研究。

朱才朝(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)zcc92@163.com。

中通常采用预拉伸工艺,即在淬火后进行一定变形量的拉伸,可以很好地消除板材淬火过程中形成的残余应力。目前诸多军工企业在对预拉伸板拉伸消除残余应力时,只是照搬国外数据(拉伸率控制在 1.5%~3.0%之间),对于拉伸后板材内残余应力状态也没有清晰的了解^[2]。残余应力的实验测定分析方法已有多种,但多局限于部分实验测试点,且在优化拉伸率的过程中由于反复实验而导致成本高昂。目前,有限元数值模拟技术已经成为研究铝合金淬火过程以及预拉伸过程中残余应力分布的一种先进而有效的方法,并取得相当多的研究成果^[3-5]。英美等发达国家从 20 世纪 50 年代就开始残余应力消除工艺的研究并已形成一整套专门的工艺^[6-8],中国对于高性能铝合金板淬火残余应力的研究尚处于起步阶段,大量的基础理论与实验研究有待深入开展^[9]。

笔者对 7075 铝合金板材的淬火过程及预拉伸过程开展数值仿真分析,结合实验测试优化拉伸率,寻求预拉伸法消除淬火残余应力的最好效果。通过这种深入细致的基础研究,获得对铝合金预拉伸法更清晰的理解,由此为制订生产工艺以及优化残余应力控制技术提供实用的参考数据。

1 预拉伸消除残余应力的机理

在铝合金板材的生产过程中,淬火是必不可少的一道工艺,经过淬火处理后的铝合金板材内部会形成大量的残余应力,对于板材结构的铝合金材料通常采用预拉伸工艺消除残余应力。预拉伸工艺消除残余应力的机理是^[10]:对淬火后的铝合金板材在拉伸机上给予 1.0%~3.0%的塑性变形,实质就是使板材内部的残余应力重新分布,趋向均匀。无论是受压应力的表层金属,还是受拉应力的内层金属,在受到外力的作用后都将发生变形,当外加的拉伸力超过该金属的屈服极限后,就发生塑性变形。由于板材的内层金属原来就具有残余拉应力,所以它首先达到屈服点进入塑性变形,这就造成了内层金属的变形速度快于表层金属,但是由于板材仍是一个整体,表层金属将牵制内层金属的变形,故在塑性变形发生后,表层金属施加给内层金属的是阻止其拉伸变形的阻力(方向与拉伸力相反),即内层金属受到压应力作用,同时表层金属受到内层金属的反作用力,即表层金属受到拉应力作用,这正好和淬火后的板材的残余应力符号相反。当外力去除后,板材弹性应变松弛,此时板材中残余应力就是淬火后残余应力与拉伸变形时所产生的内应力相互抵消后的结果。

在机械拉伸铝合金板材的过程中,在弹性范围的应力应变关系符合广义 Hooke 定律,基于 Mises 屈服准则,当应力满足式(1)时就会发生塑性变形。

$$\bar{\sigma} - H(\int d\bar{\epsilon}_p) = 0. \quad (1)$$

当应力超过屈服极限后,塑性区域要按增量理论来计算,此时总的应变量为两部分:

$$d\{\epsilon\} = d\{\epsilon_e\} + d\{\epsilon_p\}. \quad (2)$$

根据 Prandtl-Reuss 塑性流动增量理论,其表达式为

$$d\{\epsilon_p\} = d\bar{\epsilon}_p \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}}. \quad (3)$$

在铝合金板材的拉伸过程中,沿厚度方向分布的应力增量 $d\sigma$ 还应满足如下平衡方程式

$$\int_{-L/2}^{+L/2} d\sigma dz = 0. \quad (4)$$

上述式中 $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $d\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变增量; H 为等效塑性模量; $d\{\epsilon\}$ 、 $d\{\epsilon_e\}$ 、 $d\{\epsilon_p\}$ 依次为总应变增量、弹性应变增量和塑性应变增量; $d\sigma$ 为每个时间间隔内厚度方向上每点处的应力增量; z 为厚度方向(Z 向)坐标; L 为板材厚度。

由预拉伸消除残余应力的机理可以看出不同的拉伸量产生的内应力不同,从而应力的抵消效果不同,所以拉伸量有优化的必要。

2 淬火-拉伸过程的数值模拟

数值模拟采用的材料为 7075 铝合金,板材尺寸规格(长×宽×高)为:280×26×12,单位为 mm。

2.1 有限元模型的假设条件

铝合金淬火的目的是为了抑制相变而保留固溶处理后的过饱和状态,铝合金淬火过程中一般不发生相变^[9,11],数值模拟时假设条件如下:

- 1) 材料视为各向同性的弹塑性材料;
- 2) 不考虑淬火过程中的相变问题;
- 3) 淬火前初始状态为零应力状态;
- 4) 拉伸塑性变形沿板材中间面对称分布。

2.2 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 软件的显式动态分析模块(Dynamic, Explicit)进行淬火过程温度场和应力场的直接热力耦合数值模拟。由于铝合金板材结构及边界条件对称,取铝合金板材 1/8 结构进行三维建模,建模对象与实验试件尺寸规格一致,如图 1 所示。图 1 中 O 点为整个板材的中心点, C 点为垂直于 Z 轴方向(厚度方向)上外表面的中心点。

淬火数值模拟时采用减缩积分八节点六面体温度-位移耦合单元划分网格。模拟过程依照淬火工

况:模型初始温度为 473 °C,于 26 °C 的水中进行淬火(忽略铝合金板材的入水过程),因淬火过程是在充满淬火介质(水)的大池中进行的,故可认为淬火介质温度是恒定的。淬火过程中随着铝合金板材温度的变化,铝材的弹性模量、导热系数、比热容等材料属性以及淬火介质换热系数均为温度的函数,其数据取自文献[3],并且考虑铝合金高温下的流变应力特性^[11-12]。在淬火模拟过程中考虑这些变化,从而一定程度上弥补了因忽略潜热、相变塑性产生的误差^[13-14]。

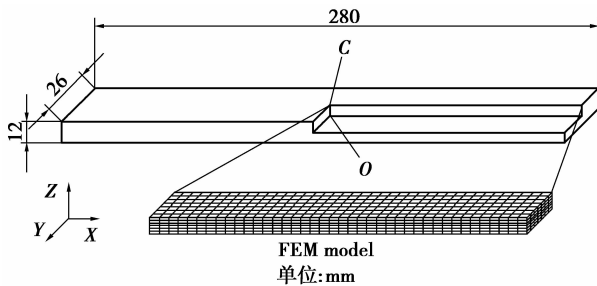


图1 铝合金板材结构图及有限元模型

铝合金板材淬火和拉伸过程的计算模型相同,但边界条件有所不同,淬火数值模拟时位移边界条件是在 3 个对称面上采用对称约束,只限制了铝合金板材的刚体运动,不影响淬火过程中铝合金板材的变形;拉伸过程主要考虑淬火后铝板在外力作用下内应力的重新平衡过程,其边界条件主要是在 3 个对称面上采用对称约束,同时直接在板材端部施加模拟拉伸载荷的强制位移(分别施加了拉伸率为 0.5%、0.8%、1.0%、1.2% 和 1.5% 的拉伸载荷),淬火数值模拟结果作为拉伸模拟的初始条件。

2.3 数值模拟结果

图 2 为拉伸前的淬火残余应力(X 向 S_{11} 和 Y 向 S_{22}) 的分布云图。从图中可以看出数值模拟的淬火残余应力均表现为“外压内拉”分布,其中 S_{11} 的范围在 $-139.5 \sim 146.3$ MPa 之间, S_{22} 的范围在 $-142.9 \sim 118.4$ MPa 之间。

图 3 为以拉伸率 1.0% 拉伸后残余应力(X 向 S_{11} 和 Y 向 S_{22}) 的分布云图。从图中可以看出拉伸 1.0% 后的残余应力分布趋于均匀,其中 S_{11} 的范围在 $-14.22 \sim 19.14$ MPa 之间, S_{22} 的范围在 $-14.71 \sim 17.05$ MPa 之间,对比图 2 可以看出拉伸后残余应力消除效果明显。

实际生产过程中,铝合金板材的端部需要切除一部分,中部区域是残余应力消除效果的重点,故选取 OC 路径上的残余应力分布作为优化拉伸率的参考。

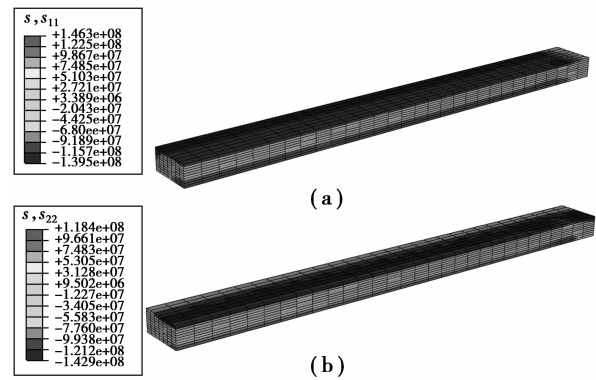


图2 拉伸前淬火残余应力分布图

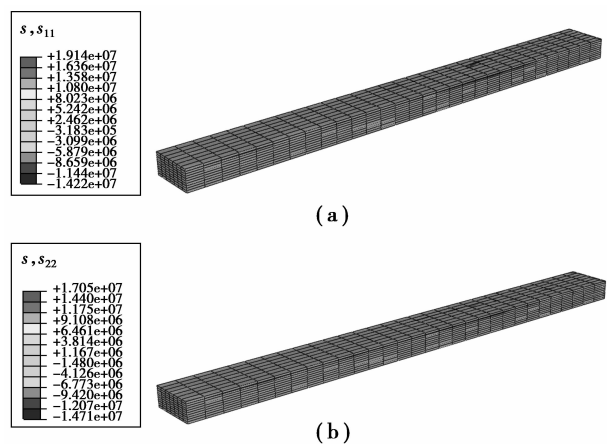


图3 拉伸 1% 后残余应力分布图

图 4 为 OC 路径上拉伸前淬火残余应力数值模拟结果,图 5 和图 6 分别为 OC 路径上拉伸后的残余应力 X 向 S_{11} 和 Y 向 S_{22} 数值模拟结果。

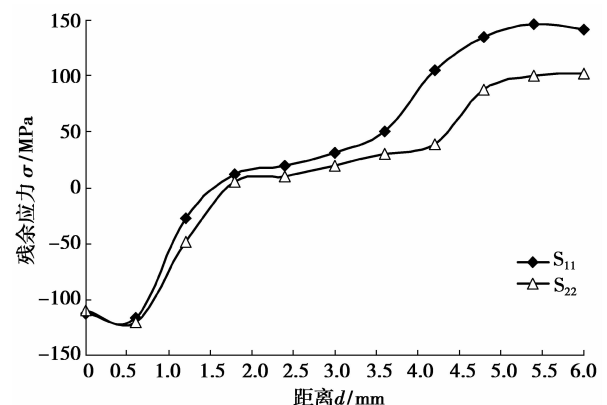


图4 OC 路径上淬火残余应力仿真结果

将图 4 与图 5 及图 6 对比可以看出:淬火后的铝合金板材经过一定量的塑性拉伸,长度方向和宽度方向的残余应力(X 向 S_{11} 和 Y 向 S_{22}) 绝对值均大幅度减小,对于最小的拉伸率 0.5%,残余应力消除效果最差,说明拉伸载荷施加的塑性变形还不够,

而最大的拉伸率 1.5% 的残余应力消除效果也不是最佳,说明拉伸载荷施加的塑性变形过大。可见拉伸载荷施加的塑性变形不是越大越好,过量的塑性变形会产生额外的应力叠加使得最终的残余应力消除效果减弱^[15]。

以 1.0% 的拉伸率残余应力消除效果最佳,此时 OC 路径上 X 向残余应力 S_{11} 为 $-8.22 \sim 3.11$ MPa, y 向残余应力 S_{22} 为 $-11.5 \sim 3.05$ MPa; 而拉伸前 OC 路径上 X 向残余应力 S_{11} 为 $-117 \sim 146$ MPa, y 向残余应力 S_{22} 为 $-121 \sim 102$ MPa, X 向残余应力消除达到 92.97%~97.87%, Y 向残余应力消除达到 90.49%~97.01%。

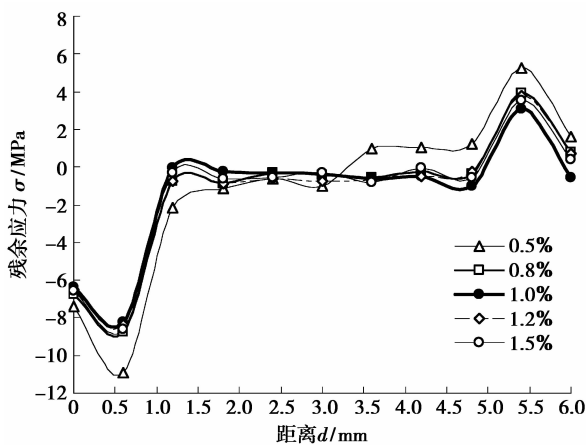


图 5 OC 路径上拉伸后残余应力 S_{11} 仿真结果

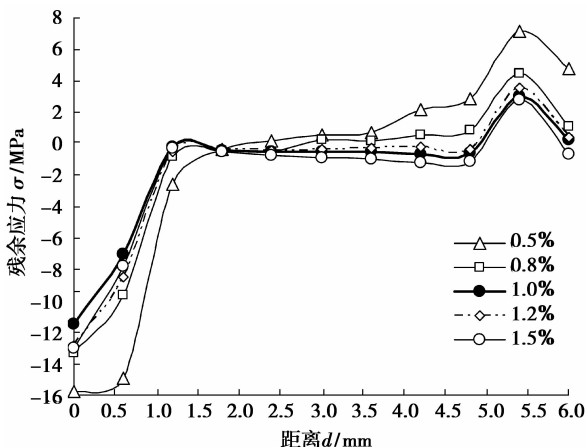


图 6 OC 路径上拉伸后残余应力 S_{22} 仿真结果

3 实验测试

3.1 实验试件及淬火-拉伸工况

实验材料为 7075 铝合金板材,尺寸规格为(长度×宽度×厚度):280 mm×26 mm×12 mm。

实验过程主要分为铝合金试件的保温、淬火、拉

伸、以及残余应力测试几个流程。图 7 为实验相关设备及试件测试照片。



图 7 实验设备及试件现场照片

淬火过程:将试件放入加热至 473 °C 的高温炉(盐浴加热炉)中,保温时间为 80 min。出炉后立即将试样放入水池(室温)中进行淬火(转移时间控制在 15 s 以内),水中停留时间不少于 30 s。

拉伸工况:淬火完毕后,在 AGIS-250 拉伸仪上进行拉伸,拉伸率依次为 0.5%、1.0% 和 1.5%,每种拉伸率均由淬火后的试件一步到位进行拉伸,无反复拉伸操作。

3.2 实验测试

测定残余应力的方法采用目前已广泛应用、测量精度较高、测量技术较为成熟的半破坏性方法——钻孔法,本实验采用为 ZDL-II 型钻孔装置进行钻孔测试,钻孔深度为 2 mm。由于实验试件过薄,不宜采用逐层钻孔法进行厚度方向残余应力分布的测试,故测试点选在试件表面的中部区域,这是实际生产过程中消除残余应力的重点关注区域。且由于盲孔法测试残余应力每次仅能测试一个点,钻孔点之间的距离以及钻孔点离边缘的距离过小会影响测量精度,每片试件选取 4 个点进行测量,测点位置及拉伸夹持位置见图 8。试件淬火完毕后间隔 30 min 后进行钻孔测试淬火残余应力,拉伸完毕测试点位置与淬火后测试点位置一致,每个测试实验重复 5 次。

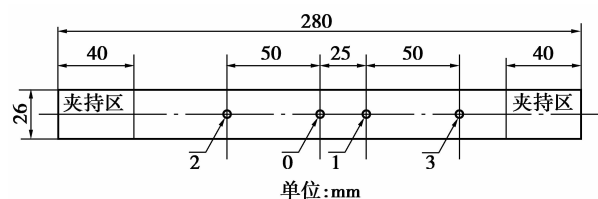


图 8 试件夹持区及测试点位置

3.3 实验结果

重复5次实验测试后取每个测试点数据的平均值,测试结果如表1。

从表1的实验数据对比可以看出,采用3种拉伸率进行拉伸后的铝合金试件残余应力均大幅度消

减,不论是X向还是Y向残余应力均已被消减至±20 MPa以内,图9为各测试点对应的残余应力消除百分比,其中拉伸率为1.0%时消除效果最好,这与数值模拟的拉伸率优化结果一致,可见数值模拟和实验测量均是优化拉伸率的有效手段。

表1 测试点残余应力测试值

拉伸量 /%	残余应力(X向 σ_{11} ,Y向 σ_{22})							
	0号点		1号点		2号点		3号点	
	σ_{11}	σ_{22}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{11}	σ_{22}	σ_{11}	σ_{22}
0	-125.01	-106.23	-119.52	-115.42	-104.87	-117.03	-118.73	-96.41
0.5	-9.06	-16.04	-9.57	-15.66	-10.81	-15.75	-12.16	-17.13
1.0	-7.58	-12.16	-7.86	-12.38	-9.75	-14.61	-8.63	-15.22
1.5	-8.14	-14.37	-10.11	-17.27	-11.36	-19.82	-15.30	-18.62

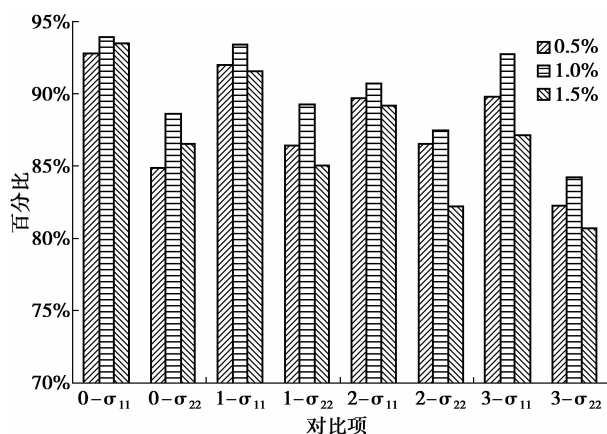


图9 残余应力消除百分比

通过实验测试优化拉伸率时,一般通过内部残余应力的对比来优选拉伸率数据,但对于较薄的板材或者由于实验设备的限制,内部残余应力的分布很难测量,通过外表面的残余应力测试同样可以达到优化拉伸率的目的。从图5和图6可以看出:随着拉伸率的变化,表面残余应力和内部残余应力的变化有着相同的趋势(绝对值同时增大或者同时减小),相关文献的实验测试数据和数值模拟数据均展现了这一趋势^[10,15-16],当表面残余应力消除效果达到最优,内部残余应力的消除同步趋于最优效果。

4 结论

针对目前对预拉伸板拉伸消除残余应力时照搬国外拉伸数据且对于拉伸后板材内残余应力状态无清晰了解现状,对7075铝合金板材淬火过程和拉

伸过程进行数值模拟,得到铝合金淬火及拉伸后残余应力的分布规律,并结合实验测试对机械拉伸法消除残余应力的拉伸率进行了优化,数值模拟与实验测试结果吻合,得到如下结论:

1)预拉伸法是消除淬火残余应力的有效手段,选择合理的拉伸率,残余应力消除效果可达90%以上,可采用数值模拟或者实验测试的手段对铝合金板材消除淬火残余应力的最优拉伸率进行优化。

2)以实验测量进行拉伸率的优化时,着眼于铝合金板材的表面残余应力或者内部残余应力均可达到优化拉伸率的目的,而且数值模拟方法也是优化拉伸率的有效手段。

3)实验测试和数值模拟显示对于本实验中厚12 mm的铝合金板材,最优拉伸率为1.0%。

参考文献:

- [1] 唐志涛,刘战强,艾兴,等.基于裂纹柔度法的铝合金预拉伸板内部残余应力测试[J].中国有色金属学报,2007,17(9):1404-1409.
TANG ZHI-TAO, LIU ZHAN-QIANG, AI XING, et al. Measuring residual stresses depth profile in pre-stretched aluminum alloy plate using crack compliance method[J]. The Chinese Journal of nonferrous Metals, 2007, 17(9): 1404-1409.
- [2] 赵丽丽,张以都.基于轧制应力分布的铝合金厚板淬火应力仿真[J].北京航空航天大学学报,2006,32(1):88-91.
ZHAO LI-LI, ZHANG YI-DU. FEM simulation for residual stress in quenched aeronautics aluminum alloy thick-plate based on rolled residual stresses distribution[J]. Journal of Beijing University of

- Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1):88-91.
- [3] MUAMMER K, JOHN C, TAYLAN A. Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes[J]. Journal of materials Processing Technology, 2006, 174:342-354.
- [4] ROBINSON J S, HOSSAIN S, TRUMAN C E, et al. Residual stress in 7449 aluminium alloy forgings[J]. Materials Science and Engineering, 2010, 527(10/11): 2603-2612.
- [5] TANNER D A, ROBINSON J S. Residual stress magnitudes and related properties in quenched aluminium alloys [J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(1):77-85.
- [6] JUIJERM P, ALTENBERGER I, SCHOLTES B. Fatigue and residual stress relaxation of deep rolled differently aged aluminium alloy AA6110[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 426(1/2):4-10.
- [7] JUIJERM P, ALTENBERGER I, SCHOLTES B. Influence of 382ageing on cyclic deformation behavior and residual stress relaxation of deep rolled as-quenched aluminium alloy AA6110 [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(7): 1374-1382..
- [8] TANNER D A, ROBINSON J S. Reducing residual stress in 2014 aluminium alloy die forgings [J]. Materials and Design, 2008, 29(7):1489-1496.
- [9] 林高用, 郑小燕, 冯迪, 等. 铝合金厚板淬火残余应力的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(6):70-74.
LIN GAO-YONG, ZHENG XIAO-YAN, FENG DI, et al. Research development of quenching-induced residual stress of aluminum thick plates[J]. Materials Review, 2008, 22(6):70-74.
- [10] 龚海, 吴运新, 廖凯. 预拉伸对 7075 铝合金厚板残余应力分布的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(6): 201-205.
GONG HAI, WU YUN-XIN, LIAO KAI. Influence of re-stretching on residual stress distribution in 7075 aluminum alloy thick-plate [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(6):201-205.
- [11] 朱才朝, 罗家元, 李大峰, 等. 基于流变应力特性的铝合金淬火残余应力数值模拟及试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22):41-46.
ZHU CAI-CHAO, LUO JIA-YUAN, LI DA-FENG, et al. Numerical simulation and experimental investigation of the aluminium alloy quenching-induced residual stress by considering the flow Stress characteristic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22):41-46.
- [12] 黄光杰, 程虎. 3104 铝合金流变应力行为[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2007, 30(1):70-72.
HUANG GUANG-JIE, CHENG HU. Flow stress behavior of 3034 aluminum alloy [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(1):70-72.
- [13] KESSLER O, REICH M. Similarities and differences in heat treatment simulation of aluminium alloys and steels [J]. Materials Science and Engineering Technology, 2009, 40(5/6):473-478.
- [14] PRESTON R V, SHERCLIFF H R, WITHERS P J, et al. Physically-based constitutive modelling of residual stress development in welding of aluminium alloy 2024 [J]. Acta Materialia, 2004, 52(17): 4973-4983.
- [15] 吴运新, 廖凯. 铝合金厚板拉伸过程横向残余应力消减分析[J]. 材料工程, 2009(10):45-48.
WU YUN-XIN, LIAO KAI. Research of transverse stress reduction in prestretching of aluminum alloy thick plate[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(10):45-48.
- [16] 廖凯, 吴运新, 龚海. 淬火铝合金厚板预拉伸变形区域仿真与分析[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(2): 198-202.
LIAO KAI, WU YUN-XIN, GONG HAI. Simulation of deformed area for pre-stretching aluminum alloy thick plates [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(2):198-202.

(编辑 张 苹)