

大型铝合金框梁结构航空模锻件淬火残余应力分析

王少辉 易幼平 黄始全 廖国防

(中南大学机电工程学院,长沙 410083)

文 摘 开展了新型 7085 铝合金材料高温拉伸试验,得到了其基本性能参数与力学模型,运用 ABAQUS 有限元软件对 7085 铝合金框梁结构航空模锻件淬火过程进行了数值仿真,研究了淬火工艺参数与方式对残余应力分布规律的影响。研究表明:框梁结构航空模锻件淬火残余应力主要集中于腹板与筋板交汇处,呈现外压内拉分布特点;淬火温度对残余应力有显著影响,提高淬火温度可有效降低残余应力;固溶温度对淬火残余应力的影响较小,对于大尺寸框梁模锻件,入水方式及转移时间对淬火残余应力的影响甚微。

关键词 7085 铝合金,框梁模锻件,淬火残余应力,有限元

Analysis of Quenching Residual Stress for Large-Size Aluminum Alloy Aircraft Forging With Frame and Beam Structure

Wang Shaohui Yi Youping Huang Shiquan Liao Guofang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract The mechanical properties of 7085 aluminum alloy have been obtained by high temperature tensile test. The quenching process of 7085 aluminum alloy aircraft forging with frame and beam structure has been simulated by FEM code ABAQUS. The influence of different quenching technologies on the magnitude and distribution of quenching residual stress has been investigated. The results show that the residual stresses of the forging are mainly concentrated on the interface of the rib and web with the characteristics of external compressive and inner tensile. The quenching temperature has significant influence on the magnitude of residual stress, and improvement of quenching temperature is beneficial to decreasing the residual stress. The solution treatment temperature, the method of entering water and the transfer time for large-size aircraft forging with frame and beam structure have little effect on residual stress.

Key words 7085 aluminum alloy, Forging with frame and beam structure, Quenching residual stress, FEM

0 引言

可热处理强化的高强变形铝合金被广泛应用于航空航天及军事领域^[1]。这种合金通常需要经过固溶-淬火处理以提高力学性能,但会产生严重的残余应力。残余应力的存在导致锻件在后续机械加工过程中出现尺寸不稳定,同时降低了锻件的抗疲劳与抗腐蚀性能,长期工作在恶劣环境下容易导致材料过早失效甚至造成严重事故。因此,对铝合金锻件淬火残余应力的研究显得十分重要。

框梁类整体结构件因其良好的力学性能成为航空航天领域重要的承力构件,如飞机的大梁、隔框、壁

板、翼肋等^[2]。这类结构件通常是由预拉伸厚板或整体模锻件经机加工而成,加工量很大,淬火残余应力对加工变形及构件力学性能的影响比一般结构件更为显著。目前,国内外学者在这一领域开展了大量研究工作^[3-9],但针对框梁结构航空模锻件淬火残余应力的研究较少,而且没有系统考虑淬火工艺的各种参数对残余应力的影响。本文以 7085 铝合金框梁模锻件为研究对象,借助有限元仿真技术,在材料高温拉伸实验的基础上研究了不同的入水方式、固溶温度、转移时间及淬火温度等工艺参数对这类锻件淬火残余应力大小及分布的影响,为优化框梁类模锻件淬

收稿日期:2010-12-13;修回日期:2011-01-17

基金项目:国家 973 计划资助项目(2010CB731701);国家重大专项资助项目(2009ZX04005-011)

作者简介:王少辉,1985 年出生,硕士研究生,主要从事航空铝合金锻件淬火残余应力控制与消减技术研究。E-mail: yuhan0172004@163.com

火工艺、控制与消减残余应力提供了依据。

1 淬火仿真材料力学参数测试

锻件淬火过程有限元仿真结果的准确性很大程度上依赖于所建立材料的力学模型与真实情况的符合程度。7085 作为新型铝合金材料, 现有文献中尚无与之相关的性能参数, 为了建立更准确的淬火有限元模型, 开展了 7085 铝合金的高温拉伸实验, 为后续分析提供了材料模型。

1.1 试样制备

试样取自某厂提供的 7085 铝合金自由锻坯, 利用线切割方式取样后, 对表面进行打磨, 以减少表面粗糙度对试验造成的误差, 试样尺寸依据 GB/T 4338—2006《金属材料高温拉伸试验方法》制定。

1.2 测试方法

在 CSS 电子万能试验机和 RWS50 高温蠕变机上分别进行材料常温与高温拉伸试验, 试验温度取 20、50、100、150、200、250、300 及 400℃, 拉伸速率为 2 mm/min。

1.3 测试结果

拉伸试验测得的材料力学性能参数如表 1 所示。

表 1 7085 铝合金力学性能参数

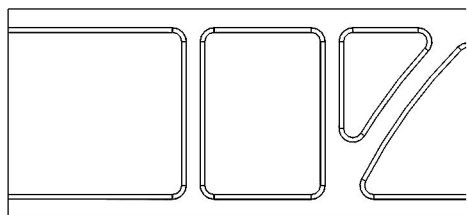
Tab.1 Mechanical properties of 7085 aluminum alloy

$t/^\circ\text{C}$	σ_b/MPa	σ_s/MPa
20	515	502
50	500	495
100	455	455
150	410	400
200	315	310
250	182	181
300	93	93
400	21	21

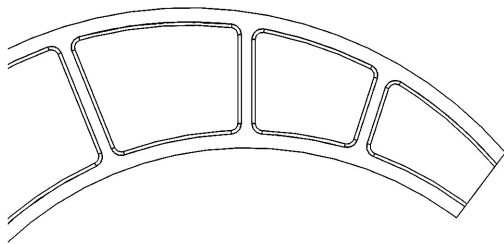
2 框梁结构模锻件淬火过程有限元仿真结果分析

2.1 淬火残余应力分布特点

本文研究对象为 7085 铝合金框梁结构件, 外形尺寸约为 5 400 mm×900 mm×200 mm。在最大投影面上锻件结构特征主要由直线段与圆弧段组成, 局部结构如图 1 所示。



(a) 直线段

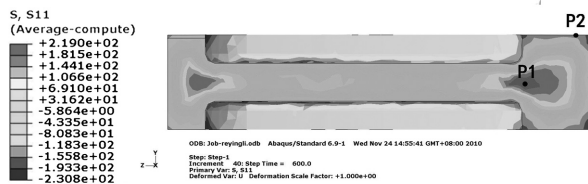


(b) 圆弧段

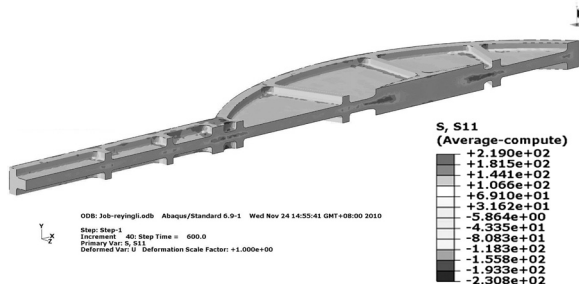
图 1 锻件局部结构示意图

Fig.1 Partial structure of the forging

针对上述锻件, 利用 ABAQUS 有限元平台对采用如下工艺的淬火过程进行了仿真分析: 固溶温度 470℃, 淬火水温 50℃, 转移时间 10 s, 锻件端面预先入水, 淬火时间 600 s。分析结果表明, 淬火结束后, 锻件最大残余应力为 260.4 MPa。图 2 所示为锻件长度方向残余应力沿横截面与纵截面的有限元仿真结果。可知, 淬火结束后锻件残余应力分布呈现外部受压、芯部受拉的特点, 且芯部残余应力主要集中于腹板与筋板交汇处, 腹板处残余应力分布较均匀且数值较小。



(a) 沿锻件横截面分布图



(b) 沿锻件纵截面分布图

图 2 锻件 x 向残余应力分布情况

Fig.2 Distribution of residual stress in x direction of forging

在图 2(a) 所示锻件截面芯部取一点 P_1 , 表面取一点 P_2 , 两点 x 向应力随时间变化情况如图 3 所示。淬火初期, 锻件芯部受压应力作用, 表面受拉应力作用; 淬火后期, 锻件芯部受拉应力作用, 表面受压应力作用。锻件内外残余应力变化趋势的形成主要由锻件内外温度变化引起。图 4 为淬火过程两点的温度变化曲线, 可知, 锻件外表面经历约 200 s 降至淬火温度, 芯部约需 400 s 才能降至淬火温度。淬火刚开始时, 内外温差巨大, 外表面因冷却而急剧收缩, 受到

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2011 年 第 4 期

芯部材料的束缚而承受拉应力,相应得芯部则受到压应力,即淬火前期锻件芯部受压,外部受拉。随着淬火过程的进行,内外温差逐步缩小,芯部材料开始收缩变形,此时外部材料已冷却硬化,因此芯部收缩受到外部的束缚而呈现出拉应力,相应的外部呈现出压应力,即淬火后期锻件芯部受拉,外部受压。

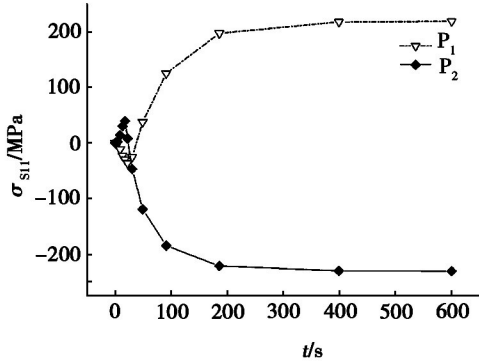


图3 表面与芯部 x 向残余应力变化曲线
Fig.3 Residual stress distribution of outside and inside core along x direction

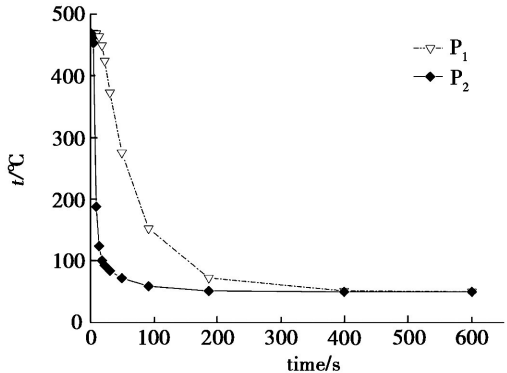
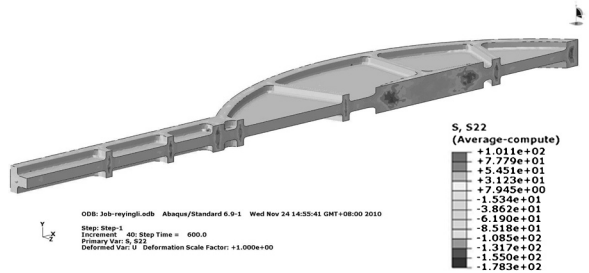
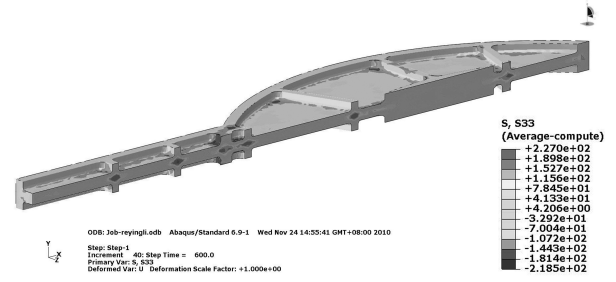


图4 表面与芯部温度变化曲线
Fig.4 Temperature curves of outside and inside

图5所示为锻件宽向与高向残余应力沿纵截面分布的有限元仿真结果。整体来看,这两向残余应力均呈现外压内拉分布特点;局部来看,残余应力均主要集中于筋板与腹板交汇处。通过锻件三向残余应力分布特点可知,淬火结束后锻件表面呈现残余压应力,芯部呈现残余拉应力,筋板与腹板交汇处由于截面发生了突变导致此处出现应力集中,这些部位应当作为设计锻件结构与制定残余应力消除工艺时重点考虑的关键部位。



(a) 高向



(b) 宽向

图5 宽向与高向残余应力沿锻件纵截面分布情况
Fig.5 Distribution of residual stress in height and width direction on longitudinal section

2.2 淬火工艺对淬火残余应力的影响

不同固溶温度以及不同淬火温度条件下锻件最大淬火残余应力变化趋势如图6、图7所示。由图6可知,锻件淬火残余应力对淬火温度的敏感度最高,淬火温度为20°C时,残余应力达到492.5 MPa,淬火温度升至50°C时,残余应力达到260.4 MPa,相差近2倍,残余应力表现出随淬火温度的升高而降低的变化趋势。当淬火温度升高至50°C后,残余应力的变化趋于缓和。

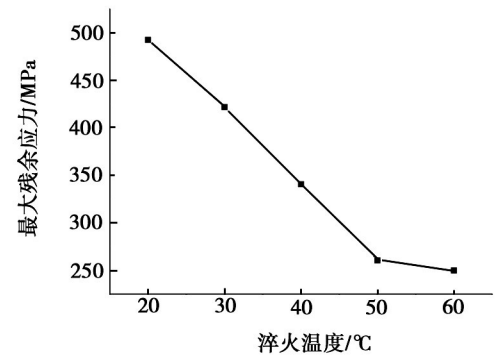


图6 不同淬火温度下锻件最大残余应力
Fig.6 Maximum residual stress of forging under different solution treatment temperatures

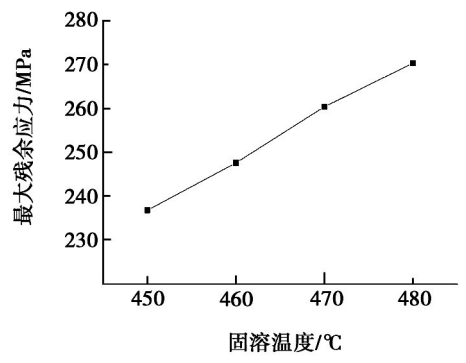


图7 不同固溶温度下锻件最大残余应力
Fig.7 Maximum residual stress of forging under different quenching temperatures

随固溶温度的升高,淬火残余应力也随之增大,当固溶温度由450°C升高至480°C时,残余应力增大

了 33.5 MPa (约 15%), 固溶温度对其影响程度较小。

四种入水方式(锻件以最大投影面沿四个不同方向淬火)以及不同转移时间对残余应力的影响如图 8、图 9 所示。以不同入水方式淬火后锻件的残余应力在 260 ~ 263 MPa, 波动不大, 表明锻件入水方式对残余应力影响很小(图 8)。在 10 ~ 30 s 不同转移时间内, 大型锻件热容大, 温度场变化小, 其最大残余应力波动在 258 ~ 261 MPa(图 9), 转移时间主要影响材料微观组织与性能, 对残余应力影响甚微。

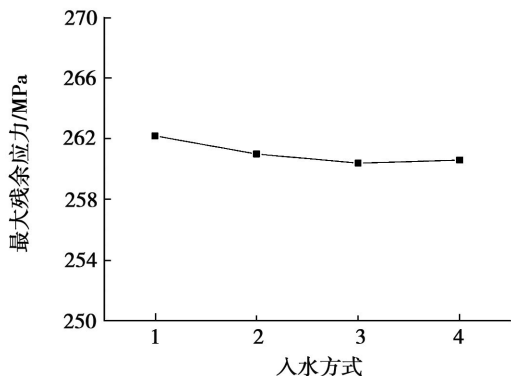


图 8 不同入水方式下锻件最大淬火残余应力
Fig. 8 Maximum residual stress of forging under different ways of immersing into water

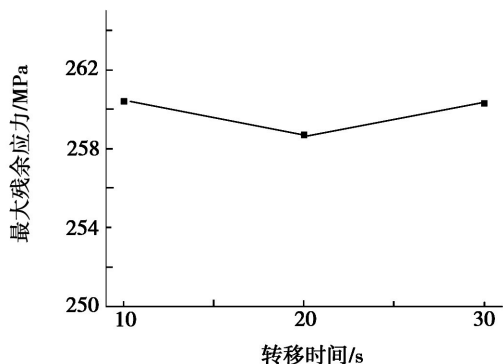


图 9 不同转移时间下锻件最大淬火残余应力
Fig. 9 Maximum residual stress of forging under different transfer times

由上述分析可知, 影响大型框梁结构航空模锻件淬火残余应力的主要因素是淬火温度, 其次为锻件的固溶温度, 锻件的淬火入水方式与转移时间对大型锻件的残余应力影响最小。因此, 在实际生产中适当提高淬火温度与降低固溶温度有利于减小锻件的残余应力。

3 结论

(1) 框梁类航空模锻件淬火残余应力呈现外部

受压, 内部受拉分布特点, 而且主要集中于筋板与腹板交汇处。这些部位应当作为锻件结构设计与制定淬火残余应力消除工艺时主要考虑的关键部位。

(2) 淬火温度对残余应力有显著影响。淬火温度由 20℃ 升高至 50℃ 时, 锻件残余应力明显减小, 但继续提高淬火温度, 残余应力减小程度降低; 降低固溶温度可减小锻件残余应力, 但效果不及淬火温度。

(3) 大型框梁结构航空模锻件的入水方式与转移时间对残余应力的影响很小, 实际生产可适当提高淬火温度与降低固溶温度, 以降低锻件的淬火残余应力水平。

参考文献

- [1] Xiao Yaqing, Xie Shuisheng, Liu Jingan, et al. Practical Handbook of Aluminum Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 10-12
- [2] Mei Zhongyi, Gao Hong, Wang Qiaoqiao. Analyzing and controlling distortion of aircraft aluminium alloy structural part in NC machining [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 146-150
- [3] Tanner D A, Robinson J S. Reducing residual stress in 2014 aluminium alloy die forgings [J]. Materials and Design, 2009, 29: 1489-1496
- [4] Muammer Koc, John Culp, Taylan Altan. 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
- [5] Hossain S, Daymond M R, Truman C E, et al. Prediction and measurement of residual stresses in quenched stainless-steel spheres [J]. Materials Science and Engineering, 2004, 37: 339-349
- [6] Jaroslav Mackerle. Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes [J]. Computational Materials Science, 2003, 27: 313-332
- [7] Zhu Wei, Chen Mengxiong, Zhang Hui. Reducing residual stress process for quenched 7075 aluminium [J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(7): 50-53
- [8] Ke Yinglin, Dong Huiyue. Pre-stretching process and its application in reducing residual stress of quenched 7075 aluminium alloy thick-plates [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 639-645
- [9] Zhang Yuanyuan, Wu Yunxin, Li Limin, et al. Finite element simulation of residual stress in pre-stretching thick-plates of 7075 aluminium alloy after quenching [J]. Material and Heat Treatment, 2008, 37(14): 88-91

(编辑 任涛)