DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.021
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

基于轧制应力分布的铝合金厚板淬火应力仿真

赵丽丽 张以都

（北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083）

摘 要：利用高度非线性软件MSC.Marc，采用弹塑性大变形有限元法对7075铝合金预拉伸厚板在轧制、淬火过程中残余应力的分布进行数值仿真.文中顺次地仿真出轧制-升温-保温-急冷四个过程中产生的残余应力，研究轧制残余应力、升温-保温应力对最终淬火应力的影响.结果表明小压缩量下，整体轧制应力小于淬火应力，轧制应力在升温-保温过程中减小，在急冷过程中急剧增大，最终表现为淬火应力.轧制应力对淬火应力影响很小，淬火应力却彻底改变了原有轧制应力的大小和分布.

关 键 词：残余应力；冷轧；淬火；热处理；塑性变形

中图分类号：TG 156.34

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0088-04

FEM simulation for residual stress in quenched aeronautics aluminum alloy thick-plate based on rolled residual stresses distribution

Zhao Lili Zhang Yidu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The residual stresses of 7075 aluminum alloy thick-plate in the process of rolling and quenching was simulated by using highly non-liner software MSC.Marc and elas-plastic large deformation FEM methods. In addition, the residual stresses of rolling, temperature rising-preservation-falling were simulated respectively, and the influence of rolling stress and temperature rising-preservation stress towards quenching stress were studied too. The result shows that in small reduction case, the whole rolling stress is smaller than quenching stress; the rolling stress decreases when temperature rising-preservation and increases rapidly when quenching, the last stress remained is quenching stress. The influence of rolling stress towards quenching stress is little, but quenching stress totally changes the original rolling stress.

Key words: residual stresses; cold rolling; quenching; heat treatment; plastic deformation

铝合金预拉伸板内残余应力存在引起的加工变形问题是航空自动化制造领域的瓶颈问题.目前预拉伸板内的残余应力状态不详(国标和军标均没有具体规定)，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1.5%～3%之间，对于拉伸后板材内残余应力究竟是什么状态并不关心.残余应力是影响被加工零件尺寸稳定性的核心因素：首先，被加工毛坯内部携带有残余应力，这种残余应力随着切削过程的进行不断地释放并重新分布；其次，加工过程本身又产生残余应力，这些残余应力在加工边界条件的约束下，相互综合，相互平衡，对零件的尺寸稳定性起破坏作用，致使零件去除约束后发生几何形变.因此研究预拉伸板内残余应力的分布状态迫在眉睫.

铝合金预拉伸板是经过轧制-热处理-拉伸3步得到的，因此在对预拉伸板内残余应力的研究应从这3方面着手依次进行.本文将综合考虑轧制-淬火应力(拉伸应力已在相关文章中研究[1])，顺次模拟出轧制、淬火过程中升温、保温、急冷共

收稿日期：2004-11-12

基金项目：国防基础科研资助项目(59975008)；航空支撑技术预研资助项目(418010-6)

作者简介：赵丽丽(1977－)，女，山东威海人，博士生，lily_buaa2002@sina.com.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计 4 个过程的应力变化,观察淬火温度,淬火残余应力对已有轧制残余应力的影响,得到更为符合实际情况的残余应力、变形分布,为今后残余应力的消除做依据.

淬火过程相当复杂,受多种因素影响,且各因素间相互作用,相互制约.过去只能采用实测或定性分析的方法对工件淬火残余应力进行研究,随着计算机仿真技术的发展,采用数值法对热处理工件残余应力的研究已受到国内外的广泛重视.对硬铝合金 7075 固溶处理过程中产生的残余应力的相关研究也有不少报道[2,3],但目前有关 7075 铝合金淬火过程的仿真主要将重点放在淬火处理的急冷过程中冷却速度、冷却介质及介质温度对残余应力、应变分布的影响,忽略了急冷前材料经过升温、保温产生的残余应力以及材料在加热前经过多道次轧制后残余应力的分布,因此得到的结果不能完整、全面、准确的预测出淬火过程中的物理和力学现象.

1　数值模拟方法

两道次冷轧仿真在有限元仿真中属于结构分析,而淬火处理是热传导分析和热应力分析的耦合,二者在衔接时需要特殊处理.两道次冷轧仿真是进行淬火仿真的前提,淬火过程温度场的数值模拟是在冷轧后的变形网格模型上进行的,因此必须提取冷轧后的变形网格模型,并在此基础上进行淬火过程数值模拟的第一步:温度场的数值模拟.温度场的模拟结果既是零件内组织性能的预测依据,同时又作为输入参数计算工件淬火时应力应变的产生以及对已有轧制残余应力的影响,预测淬火后工件内残余应力和变形的倾向,详细流程图见图 1.

淬火过程瞬态热传导方程是

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho\times c\frac{\partial T}{\partial t}$$

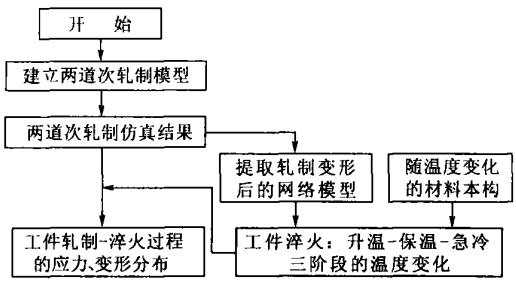


图 1　仿真过程流程图

其中,T 为温度;k 为热传导系数;Q 为相变潜热;ρ 为密度;c 为比热;t 为时间.

热处理过程中不考虑相变潜热,分析板材为无限大平板,热传导主要是在厚度方向进行,因此上式简化为 $\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\rho\times c\frac{\partial T}{\partial t}$;换热边界条件为 $\frac{\partial T}{\partial z}+h_f\left(T_d-T_o\right)=0$,其中,$h_f$ 为板材与介质间的换热系数;T_d 为板材表面温度;T_o 为介质温度.

2　数值模拟的内容

淬火后工件内的应力、应变和开裂等都是由于工件加热和冷却时温度不均匀引起的,但工件在淬火前已经存在的残余应力的大小及分布也是不容忽视的.工件淬火前残余应力主要包括 2 部分:一是轧制残余应力;二是淬火急冷前的升温-保温残余应力.虽然有相关资料指出可以通过无限缓慢升温来减小升温应力的产生,但是无论如何缓慢的升温,工件表层和心部都不可避免存在温度梯度,势必产生热应力、变形.淬火前残余应力的存在对淬火温度,淬火应力都有不同程度的影响,因此根据实际情况,先仿真出两道次冷轧的应力、变形分布,然后再进行升温-保温-急冷过程的仿真,使得仿真结果更为真实.

3　冷轧-淬火过程仿真结果

3.1　仿真过程的假设

1) 冷轧过程为结构分析,材料为各向同性的连续固体介质,具有等向硬化的弹塑性,且材料的机械物理特性不随温度 T 的变化而变化;

2) 淬火过程为热应力分析,材料的弹性模量、泊松比、屈服应力、热膨胀系数、导热系数以及比热等均为温度的函数;

3) 淬火过程忽略工件进入淬火介质的过程,视为整个工件同时全部进入淬火介质.

3.2　仿真过程的参数

为了得到比较均匀的轧制应力,两道次冷轧的压缩量均为较小压缩量 4%.材料为硬铝合金 7075,其力学性能和热物理性能如表 1.轧辊半径 300 mm,轧制速度 10 mm/s.

在升温-保温的前期准备下,淬火开始瞬间,所模拟工件的心部和外部温度分别为 447.1℃和 424.3℃,温度梯度很小,可以忽略不计.淬火介质为 20℃水淬.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 冷轧仿真结果

图2为两道次轧制后Von-mises应力分布示意图,上图为两道次轧制后Von-mises应力分布,下图为轧制释放夹具后的Von-mises应力分布.可以看出,除了材料表面有较大的应力集中外,材料内部的应力比较均匀,且比表层应力小,厚度方向上为对称分布,符合上下轧辊同时轧制的理论.在轧辊释放后,原先集中在材料左侧较大的应力也得到了部分释放,但轧制后板材内厚度方向上存在较大的应力梯度.

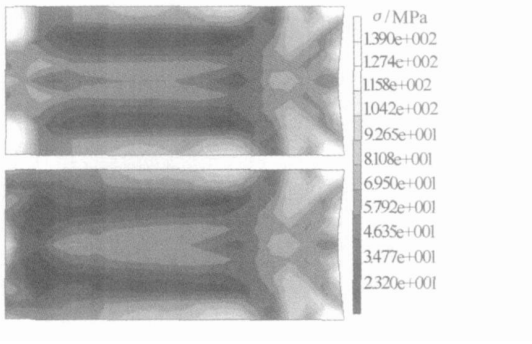


图2 两道次轧制Von-mises应力分布图

3.4 淬火过程温度仿真结果

传统淬火的仿真将重点放在了急冷部分,即仿真时直接将工件温度给为定值,忽略了工件升温时产生的热应力.本文在淬火温度的仿真过程中,采用了升温-保温-急冷3部分综合顺次的仿真,在更加接近实际操作的情况下,不仅能够得到淬火过程升温-保温-急冷3个过程产生的应力,而且还能仿真出这些应力对工件内部已存在的轧制应力的影响.

图3为工件表面点和心部点在升温-保温-急冷3过程中温度变化曲线.升温阶段,由于表层材料和外界热流直接接触,温度迅速上升,而心部温度的上升速度远不如表层材料快,因此在升温结束时,表层和心部之间的温度梯度达到了最大;保温阶段,由于外界不再有热流交换,表层材料温度保持不变,但是由于表层和心部之间存在温度梯度,导致表层材料和心部材料之间仍然存在着热流传导,使得在保温阶段心部材料温度梯度逐渐减小;急冷阶段,表层材料与低温的淬火介质直接接触,温度迅速降低,而心部材料没有与淬火介质直接接触,在温度下降的时间上较表层材料有一定的滞后,滞后的时间与材料本身的导热系数以及淬火介质与材料间的换热系数有关.在心部材料开始降温时,表层和心部之间的温度梯度达到了第二个最大值.

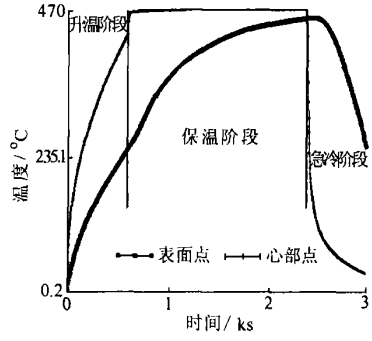


图3 表层-心部点温度变化曲线

表1 7075铝合金力学性能和热物理性能

参数	参数值						
温度/℃	20	100	150	200	300	400	500
弹性模量/GPa	71	65.193	60.594	56.262	37.982	31.5	25
强化模量/MPa	250	210	180	150	50	15	10
屈服应力/MPa	455.9	389.1	346.6	275.7	47.1	35.5	16.3
热传导系数/(W·m·℃$^{-1}$)	114.8	128.4	135.7	142.2	152.7	160.8	166.7
比热/(J·(kg·℃)$^{-1}$)	835.4	897	916.3	974	1012.5	1128	1205
热膨胀系数/(10^{-6}℃$^{-1}$)	0～20℃ 21.6	0～100℃ 24.3		0～200℃ 24.3	0～300℃ 25.2	0～400℃ 30.7	0～500℃ 31.4

3.5 淬火过程应力仿真结果

将轧制-淬火残余应力与单独淬火应力进行比较,研究轧制应力对淬火应力的影响.图4为单独淬火应力分布图.可以看出,温度很高的板材瞬间接触到只有20℃的水中,表层温度迅速下降,内外产生很大的温度梯度,产生热应力.热应力的分布随着材料的层层内进而逐渐减小,由于尖角的传热系数要大于直线的传热系数,导致最大应力出现在4个角点处.

淬火应力在132.4～97.35 MPa之间,且应力梯度不是很大,只有心部的很小部分区域应力是在90 MPa数量级;而轧制后应力分布梯度很大,从139～23.2 MPa之间,且轧制后板材内除表层残余应力在100 MPa左右外,内部大部分材料的残余应力是10 MPa数量级的.整体而言,淬火后板材的残余应力远远大于轧制后残留在板材内部的应力.此分析结果与中南大学实验方法获得的轧制方向对淬火应力的影响相符合,验证了该仿真

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

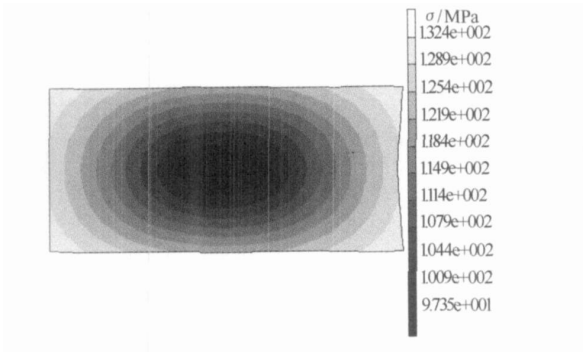


图 4　单独淬火 Von-mises 应力分布图

的合理性.

图 5 为轧制后板材升温瞬间的残余应力分布.由于温度的瞬间上升,内部的应力不仅仅为轧制残余应力,而且产生了热应力,且由于温度的影响,内部轧制应力也发生了改变重新分布.

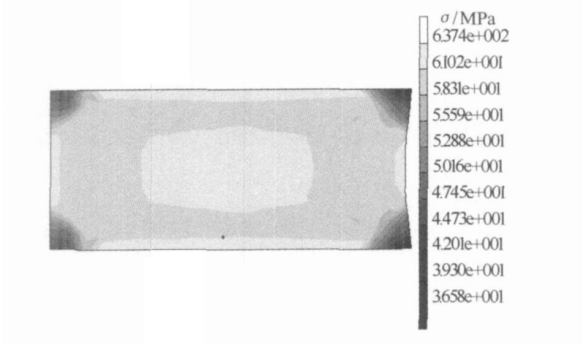


图 5　淬火瞬间 Von-mises 应力分布图

图 6 为在整个轧制-淬火过程中利用点跟踪方法得到的表层点和心部点的 Von-mises 应力曲线图.图中可以看出内外残余应力梯度最大的地方有 2 点:时间步 201 步和 820 步左右.这是因为第 201 步是轧制结束的时间,在较小压缩量下,表层材料受到很大的挤压作用,而心部材料受到很少的挤压而部分变形,导致心部和表层残余应力差别较大.时间步 201～401 为升温阶段,心部和表层点的应力都有所减小,但表层材料由于和外界温度之间对流,应力急剧变化,但达到 801 步,即保温结束时,此时整个板材内外温度梯度最小,内外应力值的差也达到最小.801 步以后为急冷阶段,可以看出,在大约 820 步时,内外温度梯度再次达到最大时(图 3),板材内外的应力梯度再次达到最大.

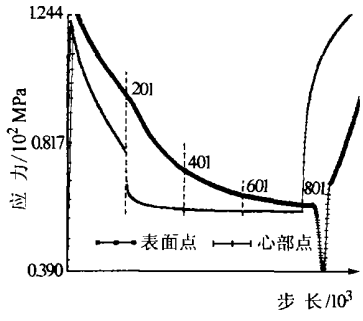


图 6　轧制-淬火过程中单点 Von-mises 应力变化曲线

4　结　论

1) 通过 MSC.Marc 软件,能够仿真出预拉伸板轧制、升温-保温-急冷顺次阶段中板材内应力、应变分布以及板材整体的变形.在仿真淬火应力时,应考虑到淬火前升温-保温过程已经产生的热应力;

2) 在仿真淬火残余应力时,应按照实际情况仿真出升温-保温-急冷 3 阶段各自过程中产生的应力.升温结束时,内外温度梯度大,热应力较大,保温过程中热应力有所减小,在急冷过程中,热应力变化最大,热应力值也最大;

3) 轧制应力小于淬火应力,在升温-保温过程中,轧制应力急剧变化,热应力慢慢覆盖过轧制应力,最终板材内部表现为淬火应力.轧制应力对淬火应力的分布影响不大,淬火应力彻底地改变了原有轧制应力的大小和分布.

参考文献 (References)

[1] 米谷茂. 残余应力的产生和对策[M]. 北京:机械工业出版社,1983.24～27
Mi Gumao. The produce and countermeasure of residual stress [M]. Beijing: China Machine Press, 1983.24～27(in Chinese)

[2] 赵丽丽,张以都.预拉伸板机制-拉伸残余应力的计算机仿真[J].北京航空航天大学学报,2004,30(7):606～609
Zhao Lily, Zhang Yidu. Computer simulation of residual stress for cold rolling prestretching board[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(7): 606～609(in Chinese)

[3] Adluri, Seshu Madhava Rao. Residual stresses and initial out-of-straightness of hot-rolled steel angles[A]. In: Proceeding Annual Technocal Session, Structural Stability Research Council Kansas City [C]. Kansas City, 1995.115～126

[4] 刘　庄,吴肇基,吴景之,等.热处理过程数值模拟[M].北京:科学出版社,1996.116～131
Liu Zhuang, Wu Zhaoji, Wu Jingzhi, *et al*. FEM simulation of heat treatment[M]. Beijing: Science Press, 1996.116～131(in Chinese)

[5] 顾剑峰,潘健生,胡明娟.淬火过程的计算机模拟及其应用[J].金属热处理,2002,5:35～44
Gu Jianfeng, Pan Jiansheng, Hu Mingjuan. Computer simulation of quenching process and its application[J]. Metal Heat Treatment, 2000, 5: 35～44(in Chinese)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net