

## 矿冶技术

# 7075 铝合金厚板淬火残余应力的数值模拟

李 涛<sup>1,2</sup> 吴运新<sup>1\*</sup>

(中南大学机电学院<sup>1</sup>,长沙 410083;长沙航空职业技术学院机械系<sup>2</sup>,长沙 410124)

**摘要** 利用 ABAQUS 有限元软件,首先针对铝合金试件的淬火过程建立了数学模型,进行热传导分析,根据所求得的瞬态温度场修正该瞬时的材料弹塑性性质。在分析瞬态应力场时,导入已生成的温度场,从而实现准耦合模拟。在此基础上分析了板材内外部的温度变化情况及热应力分布情况。

**关键词** 有限元 仿真 温度场 热应力

**中图法分类号** TG156. 36; **文献标志码** A

目前,7075 铝合金材料被广泛用来制作航空航天产品结构的主要受力构件,如大梁、桁条、隔框、蒙皮、翼肋、接头及起落架等零件<sup>[1]</sup>。7075 铝合金在经过熔炼、铸造、固溶到最后的机械加工后,特别是在固溶处理—淬火过程中将出现较严重的淬火残余应力。残余应力的存在会导致材料在后续加工过程中产生严重的变形,而板材内部残余应力引起的加工变形直接影响零部件的机械性能、疲劳强度、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性与使用寿命。因此,研究淬火后的残余应力大小及分布情况就显得十分重要。

## 1 铝合金厚板淬火过程的数值模型

### 1.1 热处理过程的基本方程和边界条件<sup>[2]</sup>

根据 Fourier 传热定律(Heat Transfer Theorem)和能量守恒定律(Energy Conservation Theorem),可以建立传热分析问题的控制议程(Governing Equa-

tion),即物体的瞬态温度场  $T(x, y, z)$  应满足以下方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q = \rho c_r \frac{\partial T}{\partial t}$$

其中: $\rho$ —材料密度; $c_r$ —材料比热,J/(kg·K); $k_x$ , $k_y$ , $k_z$ —沿  $x$ , $y$ , $z$  方向的热传导系数,W/(m·K); $Q$ —物体内部的热源强度,W/kg。

铝合金淬火冷却应尽量保证第二相不从固溶体中析出,因此可令  $Q=0$ <sup>[3]</sup>。

边界条件可用如下方程表达:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = \bar{h}_c (T_\infty - T)$$

其中: $n_x$ , $n_y$ , $n_z$ —边界外法线的方向余弦; $\bar{h}_c$ —物体与周周介质的对流换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K); $T_\infty$ —环境温度。

## 2 淬火残余应力模拟

### 2.1 几何建模与单元选择

选取模拟对象为  $800 \times 300 \times 50$  mm<sup>3</sup> 的 7075 铝合金厚板,淬火开始温度即固溶时效温度为 473℃<sup>[4]</sup>,采用 10℃ 淬火介质水冷却。采用 ABAQUS 进行数值模拟分析,网格划分采用 8 节点六面体单元,热传导单元类型号为 DC3D8,热应力分析单元类型号为 C3D8T。

2010 年 6 月 21 日收到,7 月 6 日修改  
国家重点基础研究发展计划项目 973 项目(2005CB623708)资助  
第一作者简介:李 涛(1978—),男,汉族,中南大学工程硕士。长沙航空职业技术学院机械系讲师,研究方向:机电一体化。E-mail:849373096@qq.com。

\* 通讯作者简介:吴运新(1963—),男,广东兴宁人,教授,博士生导师,研究方向:机械结构动力学、机电控制、冶金机械。

## 2.2 材料参数选择

7075 铝合金主要热物理参数及力学性能参数(热传导系数、比热、弹性模量、热平均膨胀系数、屈服强度、换热系数等)均随温度变化<sup>[5,6]</sup>,这在一定程度上弥补了因忽略潜热、相变塑性而引起的误差。

## 2.3 温度场模拟

首先对模拟对象求解其温度场,如图 1,在模拟过程中选用 heat transfer 的分析步。从沿着 Z 轴相距为 10 mm 的 A( $p_1$ )、B( $p_2$ )、C( $p_3$ )三个点的温度变化曲线可以看出,由于在淬火开始时板材与淬火介质间温度差别很大,故在淬火的初始阶段,板材从表面 A 点到内部 C 点的冷却速度都比较快,表现

为在图中曲线斜率都比较大,在淬火 16 s 后表面 A 点迅速降到约 100℃,而 C 点约 130℃;随着淬火过程的进行,板材淬火介质间的温差逐渐减小,冷却速度逐渐减慢,到淬火后期,板材与淬火介质间趋于热平衡,曲线趋于重合。另外,在淬火初期,A 点冷却速度远大于 B、C 点冷却速度,A 点和 B 点在 2.48 s 时达到最大温差 114.8 ℃,而 A 点和 C 点在 3.3 s 左右达到最大的 165℃ 的温差;同时也可以看到,随着淬火时间的延续,内外温度逐渐接近。到了淬火后阶段,C 点的冷却速度反而大于了 A 点的冷却速度,这是因为 A 点的温度先接近淬火介质温度,使得外表面的温度梯度差逐渐比内部小的原因。

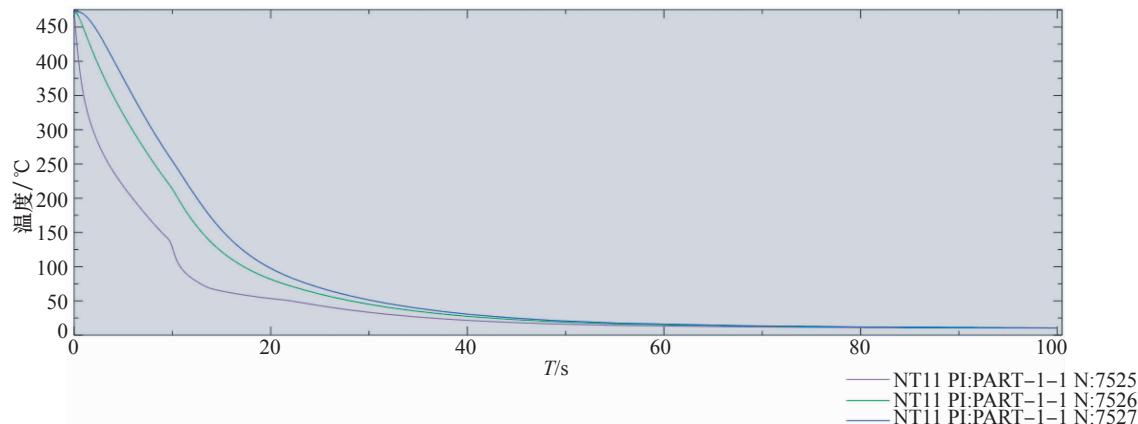


图 1 A、B、C 点随时间的温度变化曲线

## 2.4 应力场模拟

本文中的模拟忽略了组织转变对应力的影响,但材料的弹性模量等参数随温度变化而变化,因此淬火过程应力场模拟中要利用热传导分析中求得的温度场来确定材料的物性参数,并且将温度场模拟得到的各单元节点处温度随时间变化的规律作为结构热应力分析的热载荷边界条件,同时将 heat transfer 分析步用 coupled temp-displacement 分析步代替,设置适当的约束条件,并将单元类型由热分析时的 DC3D8 改为 C3D8T,完成热传导、热应力的准耦合分析。

从图 2 以看出,在淬火开始阶段,由于表面点的

冷却速度远大于内部点,因此表面收缩速度大于内部,此时表面就受到来自内部材料的限制而呈现拉应力状态,相反,内部点则呈压应力;随着淬火的进行,内部冷却速度逐渐增大超过表面的冷却速度,导致最终应力反向,呈现外压内拉的分布。另外,观察可以发现,应 s11 > s33 > s22,且 s11 和 s33 的曲线较陡,而 s22 曲线接近于坐标 0 轴,且几乎与横坐标轴重合,这说明板材中的残余应力主要为沿着轧制方向和宽度方向存在,而沿着厚度方向的值很小,几乎可以忽略不计。所以板材的残余应力可以近似地看成二维应力场分布。其表面残余应力值与文献[6,7]的实验也是基本吻合的。

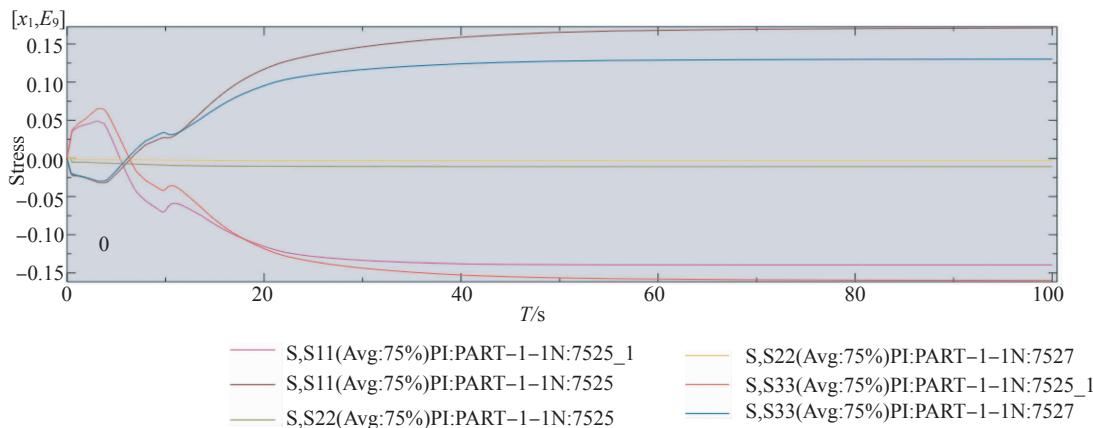


图2 A、C点随时间的X、Y、Z三方向应力变化曲线

### 3 结论

本文在ABAQUS有限元软件的基础上采用准耦合的方法,预测了7075铝合金板材的温度场及应力场随时间的变化状态,得到了瞬态过程的最终温度场和应力场,模拟过程中尊重了材料各特性参数随温度变化而变化的事实,其最终模拟的残余应力与实验中用X射线法测得的值基本吻合。另外笔者将通过改变淬火过程中的水温及淬火方式(如喷淬)得到铝合金淬火残余应力与ABAQUS的模拟结果相比较也得出大致相当的结果,说明用ABAQUS软件对铝合金残余应力的模拟是可信的。

### 参 考 文 献

- 王祝堂,田荣璋.铝合金加工手册.长沙:中南工业大学出版社,1988;1015—1017
- 赵腾伦.ABAQUS6.6在机械工程中的应用.北京:中国水利水电出版社,2006:157—159
- 董湘怀、郑廷顺,杨文敏,等.铝合金锻件热处理过程的热力耦合分析.热加工工艺,2002;3(5):17—19
- 白博峰,武文裴.内含集中热源空调房间内表面对流换热系数初探.包头钢铁学院学报,1998;9(2):24—27
- 董辉跃,柯映林,孙杰,等.合金厚板淬火残余应力的有限元模拟及其对加工变形的影响.航空学报,2004;(4):429—432
- 张园园.铝合金厚板淬火过程及预拉伸热力学仿真与实验研究.长沙:中南大学硕士论文,2008
- 姚灿阳.7050铝合金厚板淬火温度场及内应力场的数值模拟研究.长沙:中南大学硕士论文,2007

## Numerical Analysis of Residual Stress Fields in Quenching 7075 Aluminum Alloy Thick Plates

LI Tao<sup>1,2</sup>, WU Yun-xin<sup>1\*</sup>

(College of Mechanical and Electric Engineering, Central South University<sup>1</sup>, Changsha 410083, P. R. China;

Department of Mechanical Engineering, Changsha Aeronautical Vocational and Technical College<sup>2</sup>, Changsha 410124, P. R. China)

**[Abstract]** A mathematical model of quenching process for 7075 aluminum model was simulated by ABAQUS-a powerful FEA, carrying out analysis of thermal conduction, according to analysis of transient temperature field to revise the elastic-plastic properties of materials. Read in the transient temperature field generated when analyzing the transient stress field, thus realize accurate coupling simulation. On the basis of the sheet internal temperature changes in the plate and the thermal stress distribution.

**[Key words]** finite element    emulation    temperature field    thermal stress