

文章编号 1004-924X(2017)增-0095-09

## 7075 铝合金厚板淬火残余应力的测试与分析

秦国华<sup>1\*</sup>, 辛志文<sup>1</sup>, 林 锋<sup>1</sup>, 叶海潮<sup>1</sup>, 韩 雄<sup>2</sup>

- (1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063;
2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司 数控加工厂, 四川 成都 610092)

**摘要:**对 7075 铝合金厚板进行固溶处理, 研究不同厚度的板材在相同介质中进行喷淋淬火和浸没淬火所产生的残余应力水平。首先对喷淋与浸没淬火过程进行有限元建模与计算, 通过盲孔法和裂纹柔度法进行残余应力测试, 对比分析后认为: 残余应力的分布趋势, 仿真值与实验结果较为吻合。其次, 通过研究厚向残余应力的分布状态, 分析不同厚度铝厚板喷淋淬火和浸没淬火的工艺差异, 结果表明: 淬火冷却速度和板材厚度是影响淬火后残余应力的关键因素, 浸没淬火残余应力在板厚 70 mm 后无明显增幅, 而喷淋淬火增幅比较均匀, 淬火冷却速度越大残余应力越大; 板厚在 30 mm 以下采用喷淋淬火产生的残余应力很小, 几乎为零, 而板厚从 30 mm 增加到 100 mm 过程中, 喷淋淬火引起的表层压应力减小的幅度较心部拉应力要快, 30 到 60 mm 之间心部拉应力的降幅不明显, 并且两者之间的差异越来越小, 呈下降趋势; 喷淋淬火与浸没淬火的优劣性随着厚度的增加逐渐缩小。

**关键词:**7075 铝合金; 淬火; 残余应力; 冷却速度; 有限元模型

**中图分类号:**TG156.3; TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0095

## Testing and analysis of residual stresses in quenched 7075 aluminum alloy thick plate

QIN Guo-hua<sup>1\*</sup>, XIN Zhi-wen<sup>1</sup>, LIN Feng<sup>1</sup>, YE Hai-chao<sup>1</sup>, HAN Xiong<sup>2</sup>

- (1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Numerical Control Machining Factory, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

\* Corresponding author, E-mail: qghwzx@126.com

**Abstract:** After solution treatment of 7075 aluminum alloy plates, the residual stresses were respectively investigated in the processes of spraying quenching and immersion quenching with the same medium. Firstly, the finite element model was established for the spray-and immersion-quenching. The blind-hole method and crack compliance method were respectively adopted to measure the residual stresses, thus validating the FEM of quenching processes. The comparison analysis show that the simulated values of the residual stress distribution are in good agreement with the experimental meas-

**收稿日期:**2017-05-15; **修订日期:**2017-07-06.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51765047, No. 51465045); 江西省主要学科学术和技术带头人资助计划(No. 20172BCB22013); 航空科学基金资助项目(No. 2016ZE56011); 江西省自然科学基金资助项目(No. 20161BAB206114)

urement data. Secondly, the influence of plate thickness on the residual stress distribution was revealed for the spray quenching and immersion quenching. Obviously, the quenching cooling rate and plate thickness are critical to residual stresses. The residual stress remains unchanged when the plate thickness is more than 70 mm in the immersion quenching. However, the spray quenching can make the residual stress increase uniformly. In addition, the residual stress can increase with the increment of cooling rate. The residual stress in plates with thickness less than 30 mm is small. The surface compressive stresses, induced by the spray quenching, decrease faster than the interior tensile stresses when the plate thickness varies from 30 mm to 100 mm. Nevertheless the interior tensile stress decreased rarely if the plate thickness is from 30 mm to 60 mm. The difference between spraying quenching and immersion quenching gets smaller and smaller. Moreover, the advantage of spray quenching on immersion quenching is gradually decreased with the increase of plate thickness.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; quenching; residual stress; cooling temperature; Finite Element Model(FEM)

## 1 引言

7 系铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝,是可热处理强化的高变形铝合金,用于制造飞机结构以及其它强度要求高、抗腐蚀性能强的高应力结构件,是目前航空、航天领域使用最广泛的铝合金,具有密度低、强度高、加工性能好等特点<sup>[1]</sup>。板料经过淬火工艺后的加工变形、破裂、残余应力分布和大小、机械性能一直是人们所重点关注的问题。虽然淬火工艺能极大强化铝合金的性能,但强烈的温度梯度导致复杂的残余应力分布,直接造成了后续的加工变形。

随着有限元仿真技术的普及,运用有限元方法来模拟淬火这种瞬态热处理过程被视为一种行之有效的办法,不仅可以用来预测而且能不断优化淬火过程。Tanner 等人<sup>[2-3]</sup>运用仿真和实验相结合的方法对残余应力进行了分析,得到了 X 射线衍射法、钻孔法以及层削法的验证。吴运新等人<sup>[4-5]</sup>通过裂纹柔度法和 X 射线衍射法对喷淋和浸没两种淬火工艺实现了不同的预拉伸量和不同介质温度下残余应力的测量,后者还测量了淬火后的表面硬度。Prime 等人<sup>[6]</sup>最先采用裂纹柔度法对美铝产品进行了残余应力测试,得到了淬火板与相应的预拉伸板内的残余应力分布。

当淬火介质和淬火温度一定时,影响淬火后残余应力的主要有板料厚度、冷却速度等因素。当冷却速率快的时候,能获得良好的机械性能但

不可避免地会产生较大的残余应力和变形;而当冷却速率相对慢的时候,淬火后产生的残余应力和加工变形会小从而无法保证强度<sup>[7-9]</sup>。为了兼顾良好性能与小变形量,有必要研究不同的淬火工艺<sup>[10]</sup>。本文采用准耦合法(忽略组织应力和潜热的影响)对 7075 铝合金厚板进行喷淋和浸没淬火的有限元仿真分析,并与实验测得的结果进行对比,验证了淬火有限元仿真方法的有效性。在此基础上,进一步分析了不同淬火工艺中板材厚度对残余应力的影响规律。

## 2 基本方程与边界条件

淬火过程中的热传导属于瞬态热传导问题,其控制方程为:

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + \frac{\partial T}{\partial z^2} \right) + q_v - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

式中:  $x, y, z$  为任意点的位置坐标;  $\lambda$  为材料的导热系数;  $\rho$  为材料密度;  $c$  为定压比热;  $q_v$  为每个相释放的热量,当且仅当淬火介质温度不超过临界相变温度  $T_n$  时,  $q_v = 0$ 。

热处理传热问题的边界条件主要是构件与淬火介质间的对流换热,满足牛顿对流边界条件,即:

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{n}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{n}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{n}_z \right) = H(T_w - T_c), \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z$  为法向量;  $H$  为换热系数;  $T_w$  为工件表面温度;  $T_c$  为介质温度。

### 3 有限元方法

淬火过程是一个高度非线性过程,其中包含了热传导、应力相互作用、相变之间复杂的耦合关系。为了便于研究和建立理想的数值模型,做出如下假设:

- (1)材料为各向同性、均匀连续固体介质;
- (2)忽略淬火转移时间对固溶温度的影响,淬火介质恒温;
- (3)在厚板进入淬火槽前视为无内应力,淬火槽足够大;
- (4)忽略板料微观组织转变等影响。

#### 3.1 浸没淬火

7075 铝合金厚板<sup>[11]</sup>的长度为  $l=280$  mm,宽度为  $w=26$  mm,厚度为  $h=12$  mm。铝厚板的固溶温度为  $473$  °C,淬火介质为  $26$  °C 的水,淬火时长  $t=8$  min。

7075 铝合金材料的力学性能参数和热物理性能参数<sup>[12]</sup>分别如表 1 和表 2 所示,厚板与介质接触的表面换热系数<sup>[4]</sup>如表 3 所示。

在数值模拟过程中,材料的密度、导热系数、定压比热、弹性模量、热胀系数等均随温度的变化而变化,这在一定程度上弥补了因潜热、相变塑性而引起的误差<sup>[13-14]</sup>,故采用准耦合分析法进行淬火仿真。首先,对于热问题采用热传导方法求解淬火过程中的温度场,然后将得到的温度场导入到应力分析模块得到应力场,从而实现准耦合模拟。

表 1 7075 铝合金的力学性能参数

Tab.1 Performance parameters of 7075 aluminum alloy

温度 T/°C	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\alpha_s$ /MPa	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} K^{-1})$
0	73 330	286.7	22.6
25	72 000	277.3	23.5
50	71 200	253.3	24.0
100	69 070	220.0	24.9
200	61 870	125.3	28.4
300	53 870	77.3	29.9
400	48 530	32.0	31.4
500	44 500	20.0	31.7

表 2 7075 铝合金的热物理性能参数

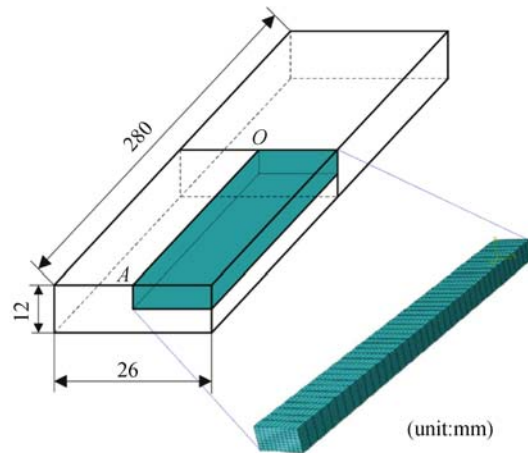
Tab.2 Material parameters of 7075 aluminum alloy

温度 T/°C	导热系数 $\lambda$ /kW(m×°C) <sup>-1</sup>	比热 $c$ /J(kg×°C) <sup>-1</sup>	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-2})$
0	155	830	2 800
25	156	860	2 788
50	158.3	870	2 781
100	161	900	2 775
200	175	970	2 750
300	185	1 020	2725
400	193	1 120	2 700
500	197	1 320	2 675

表 3 对流热换系数

Tab.3 Convective heat transfer coefficients

浸没淬火		喷淋淬火	
温度 /°C	对流换热系数/ $10^6$ (kW·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	温度 /°C	对流换热系数/ $10^6$ (kW·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )
50	200.1	32.9	0.8
100	4	68.8	7.9
150	9	77.2	9.1
200	13.5	116.2	23.9
250	17.5	159.8	12.4
300	16	204.9	2.9
350	13	250.8	2.1
400	11	296.6	1.5
450	9	324.9	1.1
500	7	417.4	1.2
550	5.8	459.5	0.3



(a)有限元模型  
(a)Finite element model

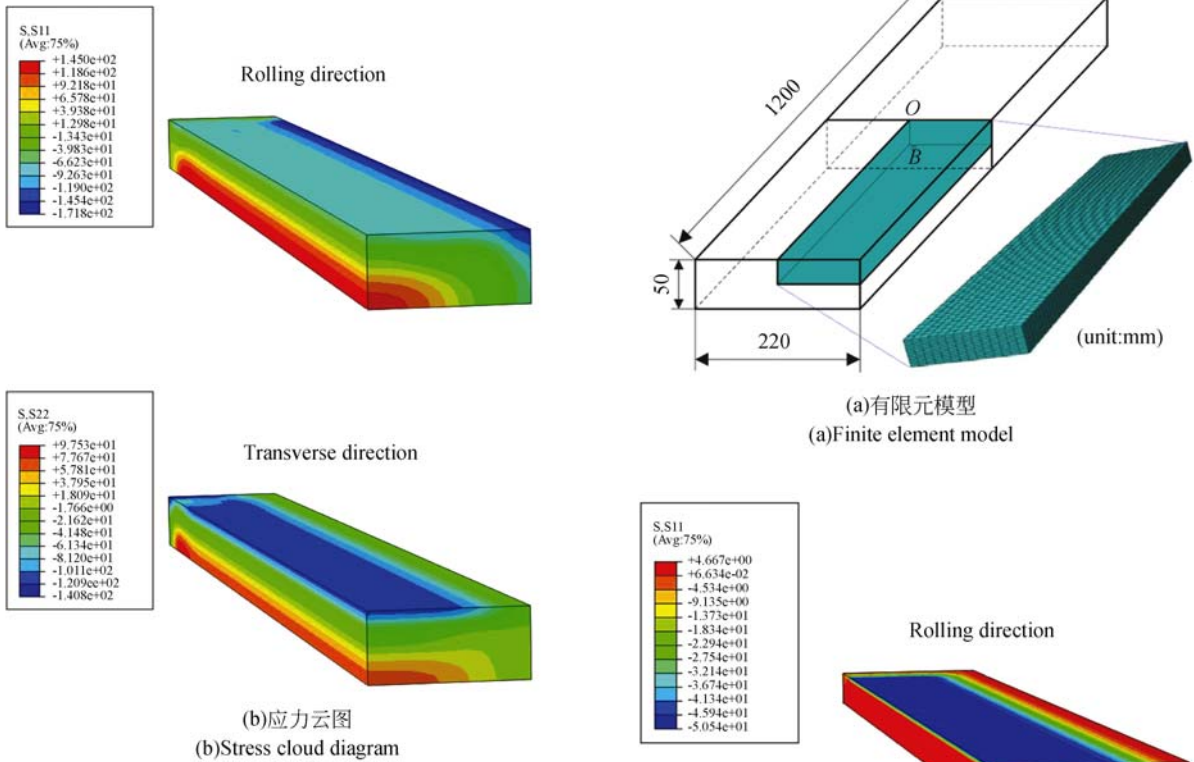


图 1 浸没淬火的有限元仿真

Fig. 1 Finite Element Analysis (FEA) of immersion quenching

根据几何结构对称性和边界条件对称性,选取铝合金厚板的 1/8 进行仿真,整体网格密度设定为 12,厚度方向划分 20 层,宽度方向等分网格 10 份,总共有 11 000 个单元,热传导分析步中单元类型为 DC3D8,应力分析步中所用单元类型为 C3D8R,如图 1(a)所示。分别对 3 个对称面施加对称约束,经计算后应力云图见图 1(b)所示。

### 3.2 喷淋淬火

浸没淬火是直接将板料投入水槽中,令铝板完全与介质接触。而喷淋淬火则是将铝合金厚板侧立放置,在水槽两侧壁各安置一组喷嘴,每组上下各一排,每排 9 个,对称放置,水流量约为  $Q=136 \text{ L/min}$ ,水压为  $p=0.34 \text{ MPa}$ 。7075 铝合金厚板<sup>[15]</sup>的长度  $l=1200 \text{ mm}$ ,宽度  $w=220 \text{ mm}$ ,厚度  $h=50 \text{ mm}$ ,如图 2(a)所示。与浸没淬火仿真过程类似,取铝合金厚板的 1/8 进行模拟,淬火温度为  $475 \text{ }^\circ\text{C}$ ,淬火介质为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  的自来水,弹性模量、对流换热系数等参见表 1~表 3。

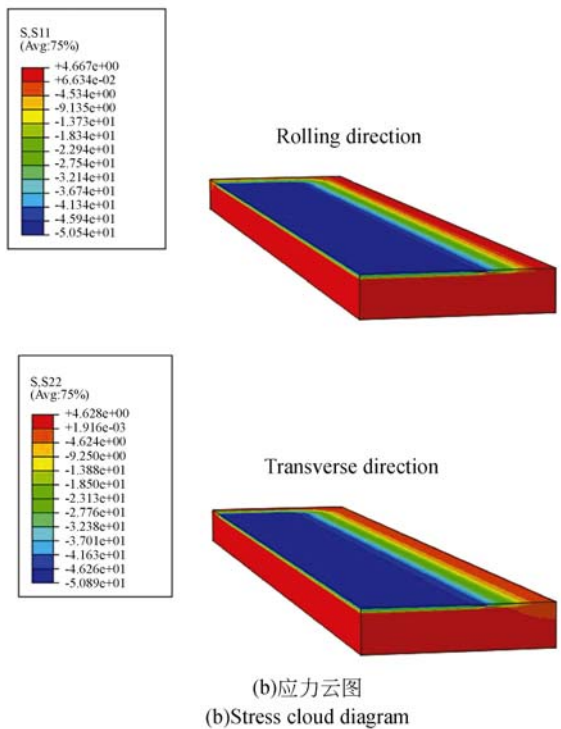


图 2 喷淋淬火有限元仿真

Fig. 2 FEA of spraying quenching

考虑到喷淋淬火在实际中是将板侧立放置,淬火槽两侧设置两排喷嘴喷水,溅到 4 个侧面的水量很少,因此模拟过程中假设只有厚板的上下表面与介质接触。类似于浸没淬火仿真方法,计算后的应力云图如图 2(b)所示。

### 3.3 实验验证

现有的残余应力测量方法主要包括无损检测(机械法)和无损检测(物理法)两大类:前者对试件具有一定破坏性,通过应力释放的方式进行测

量,主要包括盲孔法、层剥法、裂纹柔度法等;后者为非破坏性的测量方式,包括 X 射线衍射法、磁应力法、超声法、重力衍射法等。

本文采用盲孔法测量 7075 铝厚板浸没淬火产生的残余应力。由于每次只能测量一个点,且两个点之间的距离不能太小,每个试件选取上表面长度方向中心线上的 6 个点进行测量,第一个测量点距试件左端 40 mm,接着每两个点的间距为 50,50,25,50,50 mm,如图 3 所示。

事实上,按照图 3 测得的应力值,根据几何结构和边界条件的对称性可知,若以 0 点为基点,那么 1,3,5 的应力值与 I、III、V 的应力值相同,而 2,4 的应力值则和 II、IV 相同,如图 4 所示。实验中,测量时间为淬火后 30 min,重复该实验 5 次,最后结果取 5 次结果的平均值,如图 5 所示。

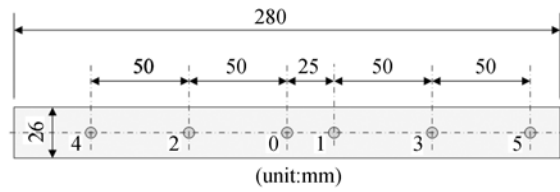


图 3 试件规格及测试点的确定

Fig. 3 Determination of sample dimension and measurement points

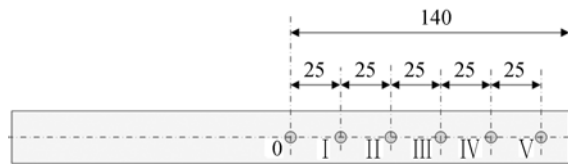
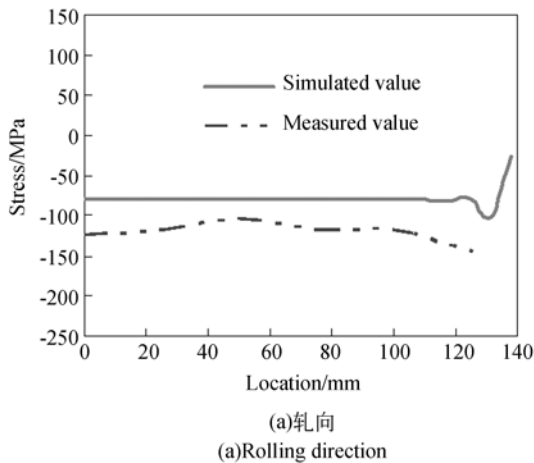
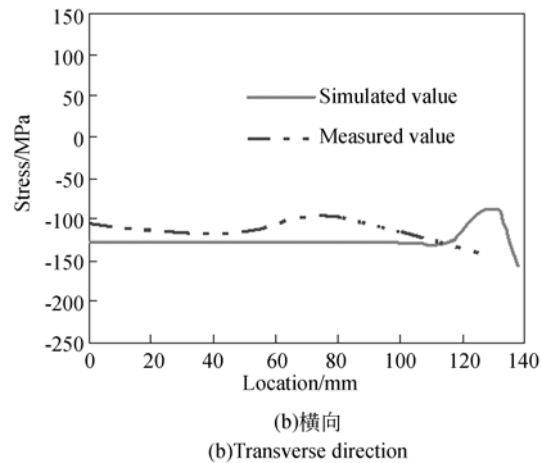


图 4 应力测试点的等效

Fig. 4 Equivalence of measurement points



(a)轧向  
(a)Rolling direction



(b)横向  
(b)Transverse direction

图 5 浸没淬火时 OA 轴线上的残余应力

Fig. 5 Residual stresses along OA axis in immersion quenching

由应力测试结果可以看出,淬火后试件上表面长度方向中心线 OA 上的残余应力均为压应力,靠近中心大范围内的残余应力幅值为  $-120 \sim -100$  MPa。总体来说,长度方向的残余应力略大于宽度方向的残余应力。而依据仿真结果获得的应力分布规律是:淬火后试件上表面长度方向中心线 OA 上的残余应力均为压应力,靠近中心大范围内的残余应力幅值在  $-80 \sim -100$  MPa 之间,整体上长度方向的残余应力略大于宽度方向的残余应力。通过对比分析可知,仿真值与测试两者之间存在着 40 MPa 的误差,但总体趋势较为一致,轧向和横向的应力均为压应力,且

横向应力略大于轧向应力。这是因为由铝合金厚板内外温度差引起的温度梯度是淬火残余应力的主要来源。淬火刚开始时,外表面的冷却速率相对心部较快,导致内外温度差达到最大值。由体积不变原则可知外表面因为冷却而收缩,与此同时心部为了阻碍其收缩使得外表面受到拉应力而心部受压应力。随着淬火过程的结束,内外温差渐渐趋于一致,温度差达到最小,心部因收缩而受到拉应力,外表面则为压应力。

喷淋淬火后的 7075 铝厚板则采用裂纹柔度法测量其残余应力。考虑到铝厚板淬火过程中存在边缘效应,从相应的淬火板的长度和宽度中间

部位应力分布较为均匀的区域中截取尺寸为 120 mm(长)×120 mm(宽)×50 mm(厚)的试件。在锯床上通过慢速切割加工进行试件截取,旨在减少加工对试件初始残余应力的影响。

应力测试实验过程中,为了保证数据的可靠性,3 片应变片的贴片位置并排安置在中间,而裂纹则是通过数控线切割机床 DK7750 引入,进给

速度为 1 mm/min。每次切割后的应变可通过静态应变仪 YE2533 读取,通过计算得到的应力如图 6 所示。由此可知,铝厚板中心线 OB 沿横向分布的残余应力幅值略小于轧向,误差在±20 MPa 以内,此外无论是轧向还是横向,仿真结果与裂纹柔度法所测得的实验值都非常接近,而且分布趋势也大体一致,呈现出“外压内拉”的分布特点。

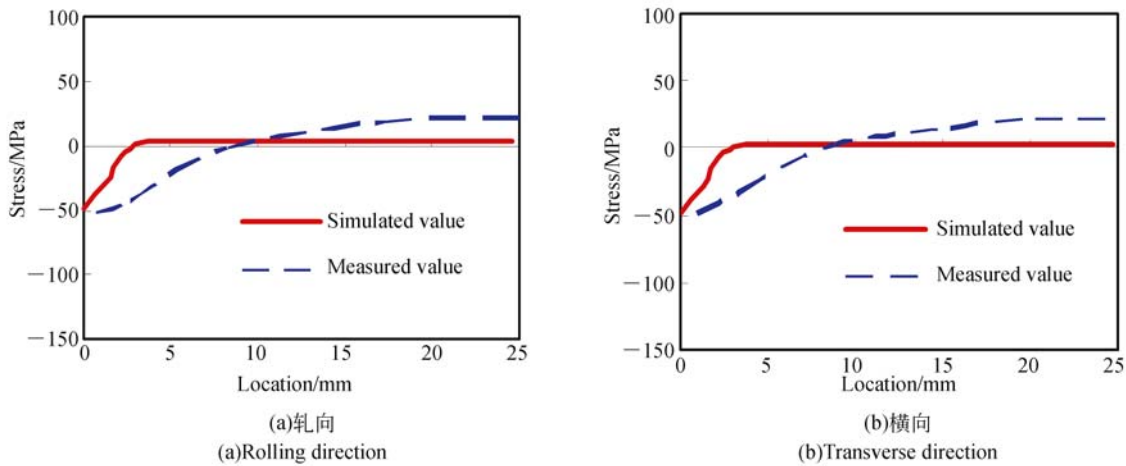
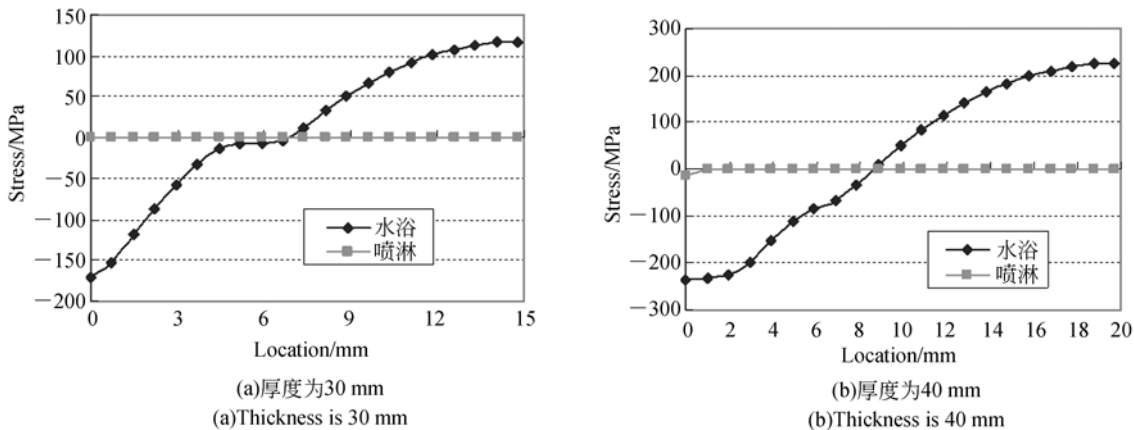


图 6 喷淋淬火时 OB 轴的残余应力  
Fig. 6 Residual stresses along OB axis in spraying quenching

#### 4 板厚对淬火应力的影响

以图 2 的板材为依据,对厚度依次为 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 和 100 mm 的铝合金厚板分别进行水浴和喷淋淬火,中心线 OB 沿厚度方向的残余应力仿真结果如图 7 所示。

对于浸没淬火,当板厚达到 70 mm 以后,随着厚度的增加,其心部拉应力的最大值并无明显增幅,并且表面残余压应力接近材料的屈服强度;而表面压应力在厚度 40 mm 以后就无明显增长。反观喷淋淬火,随着厚度的不断增加,表层和心部的残余应力呈比较均匀的增长态势。



(a)厚度为30 mm  
(a)Thickness is 30 mm

(b)厚度为40 mm  
(b)Thickness is 40 mm

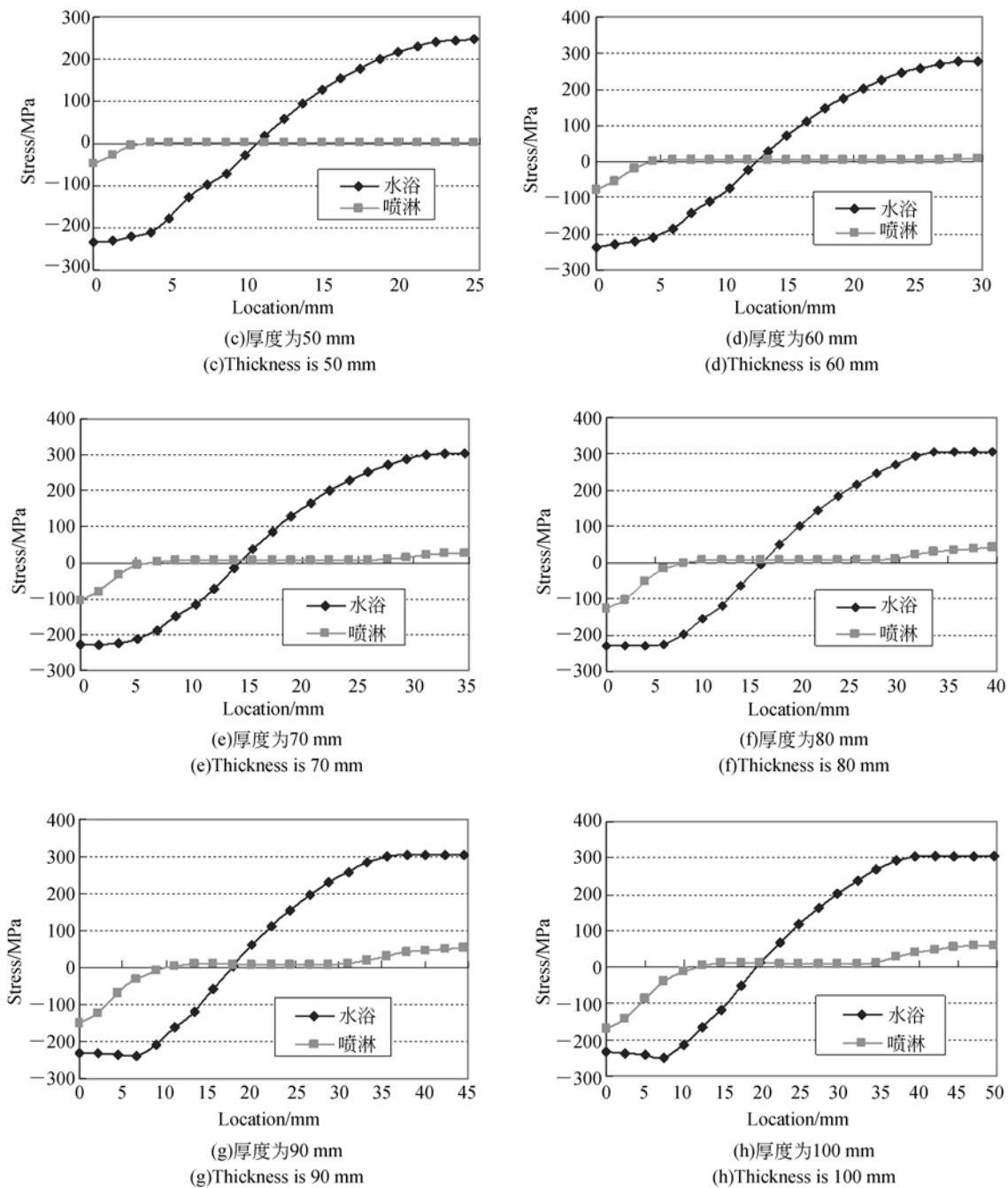


图 7 厚度对残余应力的影响

Fig. 7 Influence of thickness on residual stress

当厚度为 30 mm 时,喷淋淬火产生的残余应力很小,几乎为零。随着厚度从 30 mm 增加到 100 mm,喷淋比浸没的外表面压应力依次下降了 99.9%、93.6%、79.5%、67.3%、54.8%、44.2%、34.9%、26.7%,同时心部拉应力依次下降了 99.9%、99.7%、98.7%、96.6%、91.6%、86.7%、82.9%、80.4%,可以看出,随着厚度的增加,喷

淋淬火引起的表层压应力减小的幅度较心部拉应力要快,30~60 mm 之间心部拉应力的降幅不明显。喷淋淬火与浸没淬火的优劣性随着厚度的增加逐渐缩小,可见铝合金厚板越薄,喷淋淬火的优势越明显,因此厚度越小的板更应选用喷淋淬火工艺,这是由两种淬火工艺不同的淬火速率引起的。

## 5 结 论

本文对 7075 铝合金薄板分别在浸没淬火和喷淋淬火下的残余应力进行了有限元分析和实验验证。结果表明:厚板内部分布规律呈现出“外压内拉”形式。随着厚度的增加,浸没淬火的残余应力值在 80 mm 后无明显增幅,喷淋淬火增幅比较均匀,而且淬火速率越大,残余应力越大。铝合金厚板厚度在 30 mm 以下,喷淋淬火产生的残余应

力几乎为 0。厚度从 30 mm 增加到 100 mm,喷淋淬火引起的表层压应力减小的幅度较心部拉应力要快,30 到 60 mm 之间心部拉应力的降幅不明显,并且两者之间差异越来越小,呈下降趋势。喷淋淬火与浸没淬火的优劣性随着厚度的增加逐渐缩小。

有限元模拟能够较精准地预测残余应力分布,由于裂纹柔度法实验过程中的各种因素造成的误差无法反映真实的残余应力分布情况,需要与其它实验对比进行综合性评判。

### 参考文献:

- [1] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2000.  
WANG ZH T, TIAN R ZH. *Handbook of Aluminum Alloys and Their Manufacturing*[M]. Changsha: Central South University Press, 2000. (in Chinese)
- [2] TANNER D A, ROBINSON J S. Residual stress prediction and determination in 7010 aluminum alloy forgings [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40: 75-82.
- [3] JEANMART P, BOUVAIST J. Finite element calculation and measurement of thermal stresses in quenched plates of high strength 7075 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Technology*, 1985, (1): 765-769.
- [4] 龚海,吴运新. 不同淬火工艺对 7075 铝合金板残余应力的影响[J]. 中南大学学报, 2010, 33(4): 1354-1359.  
GONG H, WU Y X. Influence of different quenching techniques on residual stress of 7075 aluminum alloy thick-plate [J]. *Journal of Central South University*, 2010, 33(4): 1354-1359. (in Chinese)
- [5] 李淑明,廖凯,胡永会. 淬火温度对 7075 铝合金厚板残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(2): 198-200.  
LI SH M, LIAO K, HU Y H. Influence of quenching temperature on residual stress of 7075 aluminum alloy thick plate [J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(2): 198-200. (in Chinese)
- [6] PRIME M B, HILL M R. Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate [J]. *Scripta Materialia*, 2002, 46(1): 77-82.
- [7] GUR C H, TEKKAYA A E, SCHULER W. Effect of boundary conditions and workpiece geometry on residual stress and microstructure in quenching process [J]. *Steel Research*, 1996, 67 (11): 501-506.
- [8] RASOULI Y S, RETRAINT D, LU J. Study of through-thickness residual stress by numerical and experimental techniques [J]. *J. Strain Analysis*, 1998, 33(6): 449-458.
- [9] FENG X, ZHANG L, LI Z G, *et al.*. FEM simulation and experimental study on the quenching residual stress of aluminum alloy 2024 [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(7): 954-964.
- [10] 王秋成,柯映林. 航空高强度铝合金残余应力的抑制与消除[J]. 航空材料学报, 2002, 22(3): 59-62.  
WANG Q CH, KE Y L. Control and relief of residual stress in high-strength aluminum alloy parts for aerospace industry [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2002, 22(3): 59-62. (in Chinese)
- [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 C C, LUO J Y, LI D F, *et al.*. Numerical simulation and experimental investigation of the aluminum alloy quenching-induced residual stress by considering the flow stress characteristic [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46 (22): 41-46. (in Chinese)
- [12] 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[D]. 长沙:中南大学, 2007.  
YAO C Y. *Investigation on Numerical Simula-*

- tion of Temperature Fields and Stress Fields for Quenched 7075 Aluminum Alloy Thick Plate [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)
- [13] BROWN S, SONG H. Finite element simulation of welding of large structures [J]. *ASME Journal of Engineer for Industry*, 1992, 114(11): 441-451.
- [14] WANG K F, CHANDRASCEKAR S, YANG H T Y. An efficient 2D finite element procedure for the quenching analysis with phase change [J]. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1993, 115(2): 124-137.
- [15] 王光宇, 吴运新, 闫鹏飞, 等. 试样尺寸对淬火铝合金厚板残余应力的影响[J]. *材料热处理学报*, 2011, 32(4): 150-153.
- WANG G Y, WU Y X, YAN P F, *et al.*. Influence of sampling dimension on residual stresses of aluminum alloy thick plate [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(4): 150-153. (in Chinese)

#### 作者简介:



秦国华(1970—),男,江西南昌人,教授,2002年、2005年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事工件装夹分析与优化、加工过程力学分析与仿真、残余应力分析与预测、健康诊断与故障预测、制造业信息化技术等方面的研究。E-mail: qghwzx@126.com



辛志文(1993—),男,江西景德镇人,硕士研究生,2015年于南昌航空大学获得学士学位,主要从事残余应力分析与预测、淬火工艺规划等方面的研究。