

文章编号: 1004-0609(2004)04-0639-07

7075 铝合金厚板预拉伸模拟分析及 其在淬火残余应力消除中的应用^①

柯映林, 董辉跃

(浙江大学 机械与能源工程学院, 杭州 310027)

摘 要: 运用有限元软件 ABAQUS, 对 7075 铝合金板材淬火过程进行了模拟。比例件的加工变形表明淬火模拟所得的残余应力是可信的。在获得淬火残余应力的基础上, 模拟了不同预拉伸量对毛坯的淬火残余应力的消除。结果表明: 拉伸量为 3% 时, 毛坯产生 2.1%~2.6% 的永久变形, 残余应力消除量约为 86%, 完全符合航空铝合金厚板生产工艺的规定。

关键词: 预拉伸; 7075 铝合金; 淬火; 残余应力; 变形

中图分类号: TG 54; TG 659

文献标识码: A

Pre-stretching process and its application in reducing residual stress of quenched 7075 aluminum alloy thick-plates

KE Ying-lin, DONG Hu-yue

(College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A quenching process of 7075 aluminum plates was simulated by ABAQUS—a powerful FEA program. To verify the simulation result of quenching process, a reduced-scale part was machined and tested. The result between FEA and experiment was discovered accordantly. With FEA based quenched stress, different stress distributions were obtained under different conditions of pre-stretching. The research shows that the blank is pre-stretched about 3%, the magnitude of plastic strain is between 2.1%~2.6%, and the quenched stress is removed about 86%. All these quantities agree well with the manufacturing technics of aviation aluminum alloy thick-plate.

Key words: pre-stretching; 7075 aluminum alloy; quenching; residual stress; distortion

高强高韧的高性能铝合金材料是现代航空、航天、武器装备发展必不可少的关键材料, 其中铝合金厚板是一种用量较大, 加工技术高度集中的新型关键性结构材料^[1]。航空工业中大量的整体结构件, 如隔框、接头等都使用了这种铝合金材料。但是由这类铝合金生产的航空整体结构件形状复杂, 尺寸较大, 数控加工后, 极易引起变形甚至报废, 经济损失巨大。引起加工变形的主要因素是铝合金厚板淬火残余应力^[2, 3], 而预拉伸可以有效消除厚

板的残余应力, 从而减小工件的变形。有限元是研究从淬火、预拉伸到加工过程的有效手段。本文作者首先利用非线性计算功能强大的有限元软件 ABAQUS 对毛坯淬火过程进行了模拟, 而后对含有淬火残余应力的毛坯进行了拉伸模拟, 将整个过程中的残余应力、应变的变化过程进行了对比。为了验证拉伸对加工变形的影响, 对拉伸后的毛坯进行了材料去除, 把由拉伸量不同的毛坯得到的工件的变形进行了对比。

① 基金项目: 国防型号工程资助项目(00-1810-0785); 国家自然科学基金资助项目(50175102)

收稿日期: 2003-08-07; 修订日期: 2003-10-13

作者简介: 柯映林(1963-), 男, 教授。

通讯作者: 柯映林, 教授; 电话: 0571-87951061, 87952337, 13116741089; E-mail: ciomdhy@163.net

1 理论模型

1.1 淬火模拟的基本方程和边界条件

析出型铝合金通过淬火处理来获得高的强度,同时由于淬火过程热应力的作用而产生残余应力。残余应力的存在一方面使得超厚板机加工过程产生变形,另一方面会影响材料的动态使用性能,对于超厚板的后续加工是极为有害的^[4, 5]。弹塑性有限元数值模拟技术是研究淬火过程中残余应力的一种有效方法,将其分为热和力 2 部分进行准耦合分析:对于热的问题采用热传导求解淬火过程的温度场,对于力的问题采用不同温度的材料力学性能预测残余应力,读入已生成的温度场,从而实现准耦合模拟^[6~8]。

淬火过程中热传导问题的控制方程是瞬态热传导方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + Q = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

式中 ρ 为密度; c 为比热容; k 为热传导系数; θ 为温度; t 为时间; Q 为相变潜热。

假设材料的热传导性能是各向同性的。热处理过程中 θ 随 t 变化,而 c 、 k 、 Q 都是 θ 的函数。铝合金热处理过程中可令 $Q = 0$ ^[9]。假设厚板无限大,则热传导主要发生在垂直于无限大平面方向上,即 Z 向(图 1),则上式变为^[10]

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

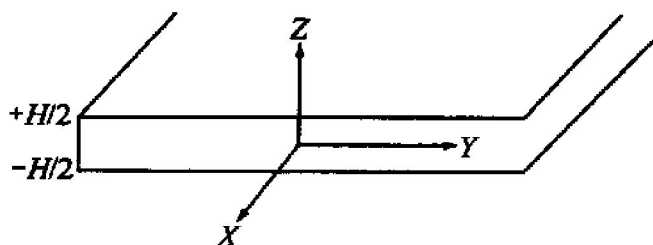


图 1 无限大厚板的坐标系统

Fig. 1 Coordinate system for infinite plate of thickness H

热处理传热问题的边界条件主要是毛坯与淬火介质之间的对流换热。由于对于对流换热问题采用固体与流体之间的热力耦合分析过于复杂,因此简化为毛坯与冷却介质之间的换热边界条件,当 $Z = (\pm) \frac{1}{2}H$ 时,

$$(\pm) \frac{\partial \theta}{\partial z} + h_f (\theta_d - \theta_o) = 0$$

式中 h_f 为毛坯与介质之间的换热系数; θ_d 为随时间变化的毛坯表面温度; θ_o 为介质温度(假定为常数); H 为毛坯厚度。

冷却过程中的温度分布为弹塑性厚板的力学问题提供了初始输入数据,因为弹性模量 E , 应变硬化系数 H' , 屈服应力 $\bar{\sigma}_y$, 线性热膨胀系数 λ 都随温度而变化。

1.2 拉伸消除残余应力的基本原理

淬火过程中,板材在轧制过程中形成的残余应力应当消除。将加热后的板材快速放入冷水中,此时由于板材表层金属和内部金属冷却速度不均,使得最后表层金属有残余压应力,内层金属有残余拉应力。对淬火后的板材进行预拉伸的实质是使板材内部沿厚度在轧制方向上的残余应力重新分布。对淬火后的板材进行拉伸,无论是受压应力的表层金属,还是受拉应力的内层金属,它们在受到外力的作用后都将发生变形,当给予的拉伸力超过该金属的弹性极限后,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,所以它首先超过弹性极限进入塑性变形,这显然造成了内层金属的变形速度比表层金属快,但是由于板材仍然是一个整体,表层金属将牵制内层金属的变形,所以在塑性变形发生后,表层金属将产生拉应力,内层金属产生压应力,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将是淬火后板材中的残余应力与拉伸变形时所产生的内应力之差^[9]。如图 2 所示,如果拉伸量选择恰当,其差可以接近于零。

2 淬火的有限元模拟与试验

2.1 淬火模拟残余应力的验证

为了验证前述淬火有限元模型,首先对 70 mm 厚的 7075 铝合金板材进行了淬火模拟。在整个分析过程中,材料的导热系数 α 、比热容、密度、线性热膨胀系数、弹性模量以及塑性模量 E' 等均随温度而变化,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^[11~13]。

有限元模拟的位移边界条件是在工件的非加工部位选择 3 个点,被约束的平移自由度分别为 X 、 Y 、 Z , 这种约束方式只限制工件的刚体运动,不影响模拟过程中工件的整体变形。将模拟所

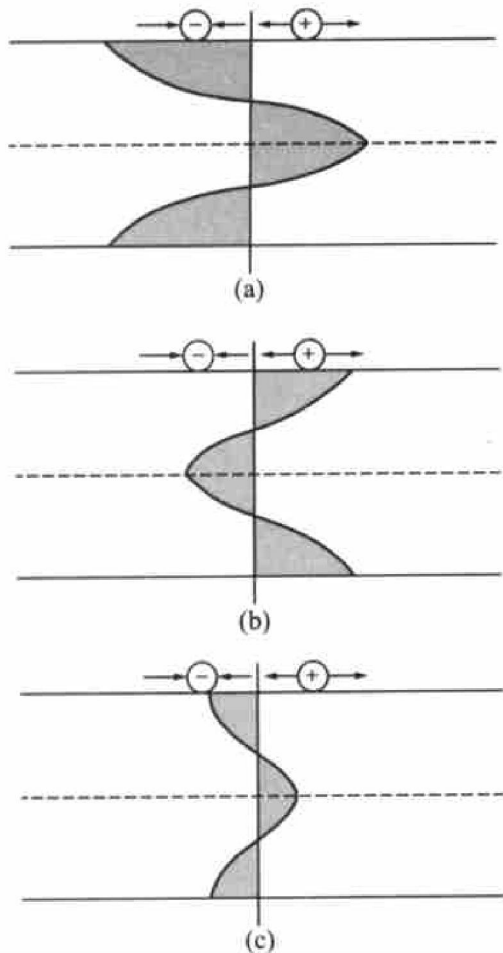


图 2 淬火板拉伸时残余应力重新分布示意图

Fig. 2 Residual stress redistribution of pre-stretching

(a) —Quenched stress; (b) —Pre-stretched stress;
(c) —Residual stress after pre-stretching

得的残余应力同文献[10]的试验结果进行了对比, 如图 3 所示。可以看出: 模拟所得的表面为残余压应力, 内部为残余拉应力, 中性面位置大约在距表面 17 mm 处, 与试验结果完全符合, 从而证明有限元模拟淬火产生的残余应力是可信的。

2.2 隔框毛坯淬火的模拟

2.2.1 隔框毛坯有限元模型

采用的毛坯为矩形截面板材, 毛坯尺寸为 500 mm × 50 mm × 22 mm, 毛坯材料为 7075 铝合金。工件壁厚 4 mm, 材料的力学性能和热物理性能见表 1, 其中部分数据取自文献[10]。采用八节点六面体单元 C3D8R 对模型进行网格剖分, 毛坯有限元模型及比例工件设计形状分别见图 4、图 5。模拟过程中设水温保持 20 °C, 毛坯表面与冷却水进行热交换, 20 °C 水的热交换系数取自文献[14]。

2.2.2 淬火的有限元模拟结果

在垂直于 X 轴截面上取一条路径 ad , 在该直

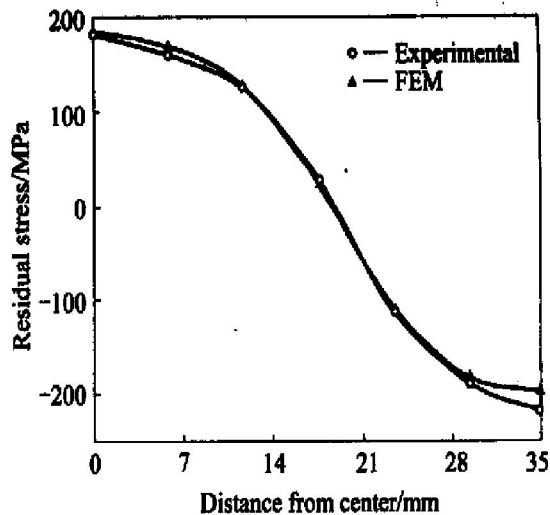
图 3 70 mm 厚的铝合金板材水淬后淬火应力 (σ_1) 分布

Fig. 3 Calculated residual stress distribution (σ_1) in 70 mm thickness aluminum alloy plate after water quench



图 4 毛坯的有限元模型
Fig. 4 Finite element model of blank

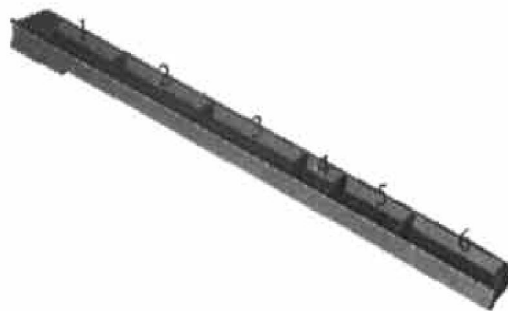


图 5 隔框比例件的设计形状
Fig. 5 Shape of reduced scale spar

线上沿 Y 向取 a 、 b 、 c 、 d 4 个点, 间距为 8 mm, 如图 6 所示。图 6 显示了这 4 个点在淬火过程中温度变化过程, 淬火开始的短时间内温度迅速下降。从 4 个点的温度变化趋势来看, 首先表面温度快速下降, 再是内部温度快速下降, 该过程中的 a 、 d 2 点最大温差为 128 °C, 出现在 0.98 s 时。

淬火结束后, 直线 ad 上的残余应力如图 7 所示。冷却到室温后, X 向残余应力 σ_x 在表面是压应力, 从外到内逐渐变为拉应力; Y 向残余应力 σ_y 为拉应力, 但外部小, 内部大; Z 向残余应力 σ_z 在表层是压应力, 中间部分是拉应力, 心部接近于 0。

表 1 7075 铝合金的力学性能和热物理性能

Table 1 Mechanical and thermal properties of 7075

$\theta/^\circ\text{C}$	E/GPa	E'/MPa	$\bar{\sigma}_y/\text{MPa}$	$\alpha/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$N(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	$\rho/(10^4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Poisson ratio
20	71.000	250	455.9	114.8	835.4	(0~ 20 $^\circ\text{C}$) 21.6		
100	65.193	210	389.1	128.4	897.0	(0~ 100 $^\circ\text{C}$) 23.4		
150	60.594	180	346.6	135.7	916.3	/	2.8	0.3
200	56.262	150	275.7	142.2	974.0	(0~ 200 $^\circ\text{C}$) 24.3		
300	37.982	50	47.1	152.7	1 012.5	(0~ 300 $^\circ\text{C}$) 25.2		
400	31.500	15	33.5	160.8	1 128.0	(0~ 400 $^\circ\text{C}$) 30.7		
500	25.000	10	20	166.7	1 205.0	(0~ 500 $^\circ\text{C}$) 31.4		

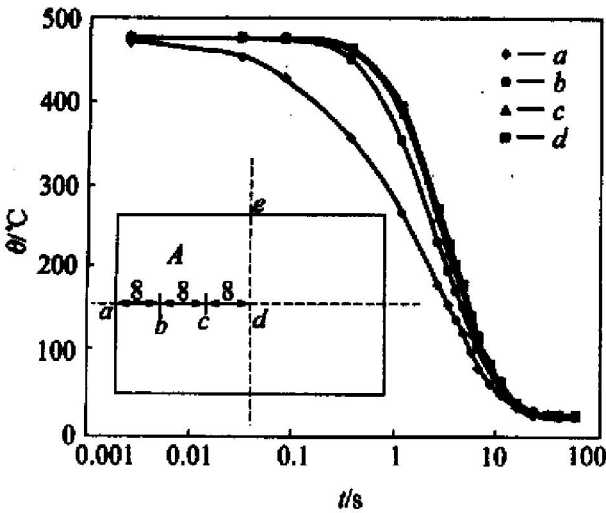


图 6 毛坯在 20 °C 水中的淬火冷却曲线

Fig. 6 Cooling curves of blank quenching in 20 °C water

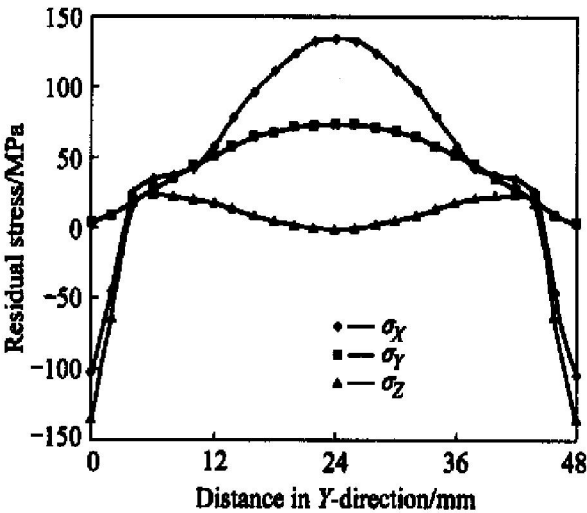


图 7 淬火后路径 ad 上的残余应力分布

Fig. 7 Quenched stress distribution on path ad

图 8 所示为利用有限元模拟对含有淬火残余应力的毛坯进行材料去除后获得的工件变形的情况。该模拟过程假设采用电化学腐蚀法, 不考虑铣削力和铣削热对加工变形的影响, 所以模拟所得的变形完全是由毛坯的淬火残余应力所引起的。

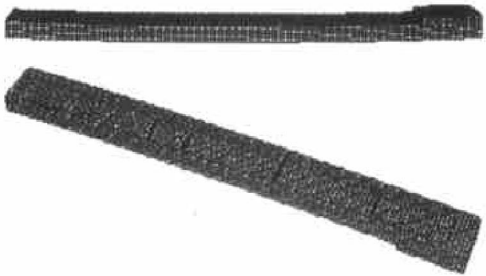


图 8 有限元模拟的零件图片

Fig. 8 Distorted spar of FEM

2.3 隔框比例件淬火与加工试验

比例件的毛坯热处理试验步骤为: 1) 加热至 475 °C, 保温 2.5 h; 2) 接着浸入 20 °C 水中, 冷却 5 min; 3) 空冷至室温。热处理后, 将毛坯材料在数控加工中心进行了加工。加工时, 工件用虎钳夹住两侧面。加工参数为: 主轴转速 2 000 r/min; 轴向切削深度 0.5 mm。加工过程中, 采用冷却液进行冷却, 最大限度地降低加工过程中铣削应力的产生, 降低附加残余应力对加工变形的影响。图 9 所示为实际加工的比

例件的变形情况。测量工件一条边 L (图 5 中粗黑线所示) 上各点的变形值, 将实际工件的测量值同有限元模拟结果对比, 见图 10。从图 8、9、10 中明显看出, 有限元模拟变形结果与实际加工结果的分布趋势相同, 都是中间弯, 两端翘起, 并且弯曲的最大位置相同。

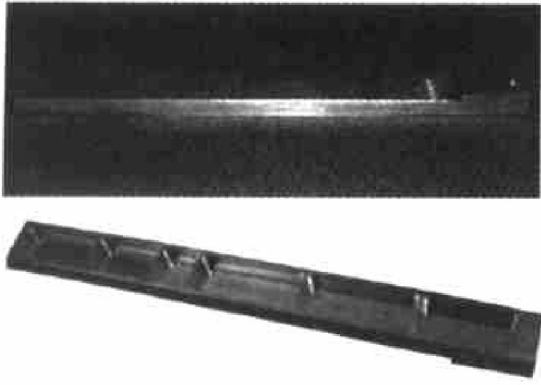


图 9 实际加工的零件图片

Fig. 9 Distorted spar after being machined

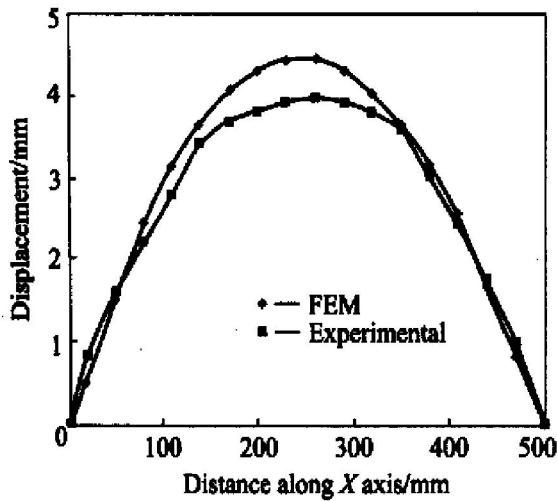


图 10 实际比例工件变形与有限元模拟结果的对比

Fig. 10 Curves of displacement

有限元的变形量略大于试验结果, 但误差在可接受范围之内。

3 拉伸过程的有限元模拟

利用有限元将含有淬火残余应力的铝合金毛坯进行拉伸模拟, 其边界条件是: 约束位于原点 O 且垂直于 X 轴的端面在 X 方向的自由度, 给予垂直于 X 轴的另一端面沿 $+X$ 向一位移值, 同时保持淬火模拟过程中的 3 点约束。

3.1 拉伸对应力应变的影响

在毛坯上取垂直于 X 轴的中间截面, 因为对称性, 只取该截面的 $1/4$ 部分进行分析, 见图 6 中 A 所示部分。图 11~ 14 为淬火毛坯在拉伸前和拉伸过程中其残余应力和等效塑性应变的分布。通过比较发现, 拉伸前及拉伸过程中, 残余应力和等效塑性应变的分布规律相似, 但残余应力数值随着拉伸

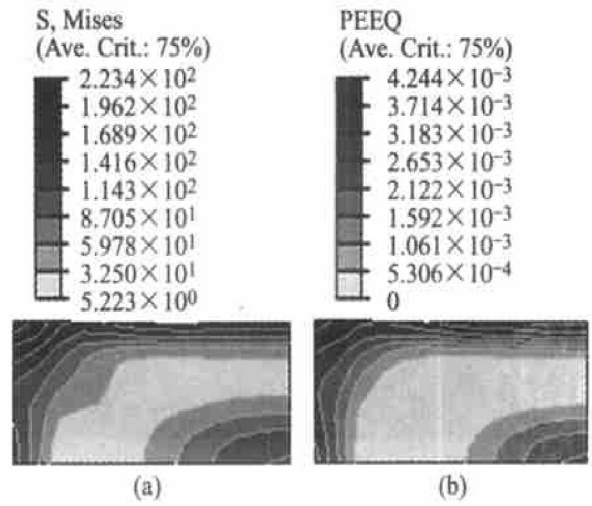


图 11 拉伸前

Fig. 11 Before stretching

(a) —Stress; (b) —Equivalent plastic strain

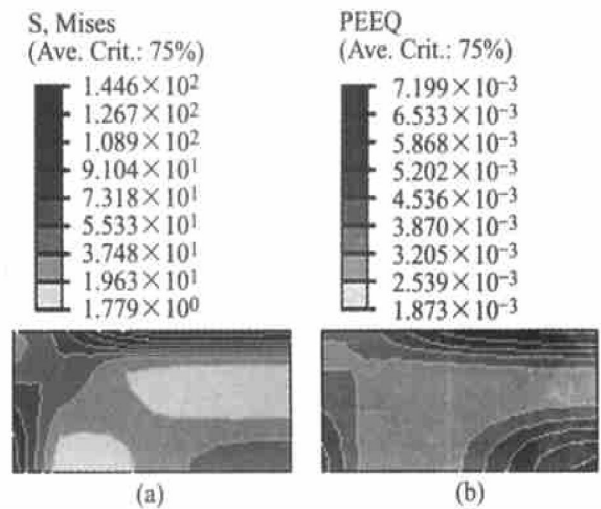


图 12 拉伸 1%

Fig. 12 Pre-stretched by 1%

(a) —Stress; (b) —Equivalent plastic strain

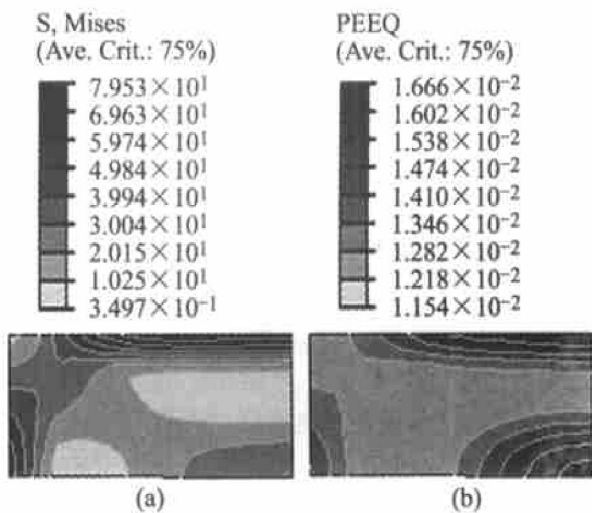


图 13 拉伸 2%

Fig. 13 Pre-stretched by 2%

(a) —Stress; (b) —Equivalent plastic strain

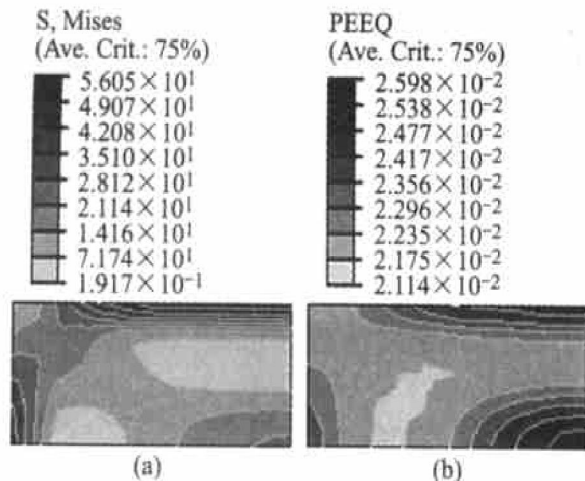


图 14 拉伸 3%

Fig. 14 Pre-stretched by 3%

(a) —Stress; (b) —Equivalent plastic strain
量的加大而减小, 塑性应变不断增大, 而且残余应力绝对值较大的位置塑性应变也较大。拉伸量为 3% 时, 毛坯表面仍为压应力, 内部为拉应力。

图 15 所示为厚度方向残余应力 σ_1 在拉伸过程中的变化过程。虽然随着拉伸量的增大应力绝对值在不断减小, 但是拉伸量从 1% 到 2% 时应力变化最大, 从拉伸 2% 到拉伸量 3% 时的残余应力变化很小。拉伸量增大过程中, 应力中性面逐渐向心部靠近, 但变化量很小。

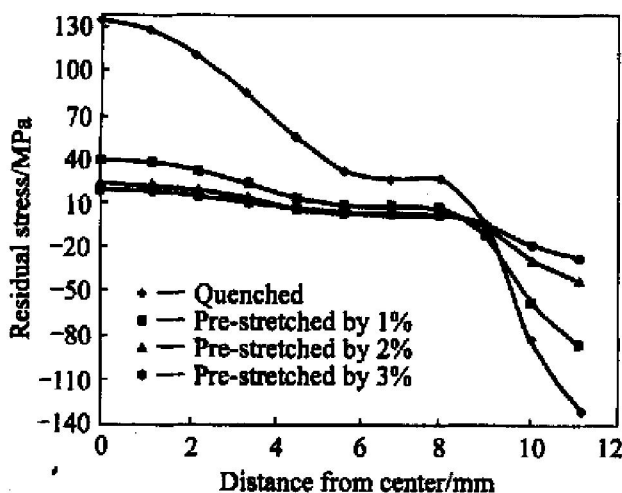


图 15 拉伸对淬火铝合金残余应力的影响

Fig. 15 Effect of pre-stretching on quenched stress

3.2 拉伸对工件变形的影响

利用有限元模拟对含有淬火残余应力的毛坯拉伸后进行材料去除, 所得工件的 L 边变形情况如图 16 所示。比较图 16 与图 10 可明显看出: 毛坯拉伸后, 工件的变形趋势不变, 但工件的变形量大大减小。由拉伸 3% 的毛坯加工所得的工件的最大变形

量比拉伸前减小 94.5%, 这与文献中的试验结果是相符合的^[9, 15], 但是拉伸量从 2% 到 3%, 变形量的变化比较小。

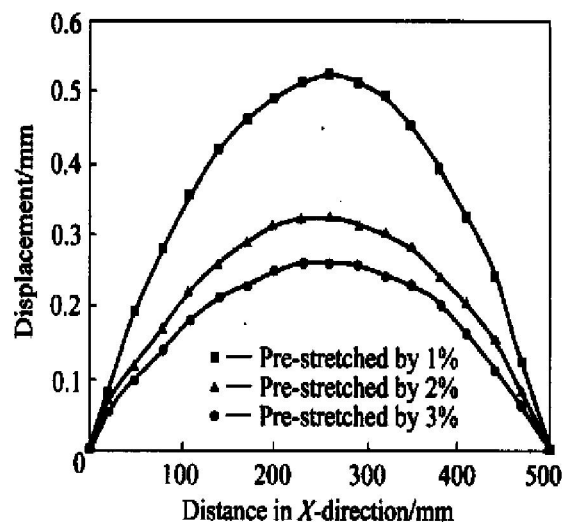


图 16 拉伸量对加工变形的影响

Fig. 16 Effect of pre-stretching on deformation

航空工业所用的铝合金厚板生产工艺规定: 拉伸产生 2% 的永久变形, 但不能小于 1.5%, 也不能大于 3%。对照图 12、13、14 显示的等效塑性应变图和图 16 显示的变形曲线可知, 拉伸量在 3% 时, 毛坯产生大约 2% 永久变形, 残余应力消除量约为 86%, 结果满足航空铝合金厚板的生产工艺所要求的永久变形范围, 从而间接验证了铝合金厚板有限元淬火模拟及拉伸模拟结果的可靠性。

4 结论

1) 从残余应力分布和加工变形的试验验证上明显可以看出, 对于 7075 铝合金, 采用准耦合的淬火模拟能够比较准确地反应其真实的残余应力分布情况。

2) 有限元模拟能够反映预拉伸对 7075 铝合金淬火毛坯的残余应力的消除效果。预拉伸量 2% 和 3% 对残余应力的消除和变形的控制影响相差不大, 所以 7075 铝合金毛坯的预拉伸量不超过 3%, 这完全符合航空铝合金生产工艺的规定。

铝合金厚板有限元淬火模拟及拉伸模拟结果是可靠的, 但加工过程的有限元模型有待进一步完善, 若综合考虑铣削力、铣削热和装夹等因素, 毛坯中的残余应力对加工变形的影响及拉伸对残余应力的消除将更加真实地反映实际情况。

REFERENCES

- [1] 陈康华, 刘允中, 刘红卫. 7075 和 2024 铝合金的固溶处理与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 819 - 822.
- CHEN Kang-hua, LIU Yun-zhong, LIU Hong-wei. Microstructures and mechanical properties of enhanced solution treated 7075 and 2024 aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 819 - 822.
- [2] Brinksmeier E, Hannover, Cammett J T, et al. Residual stress measurement and cause in machining process[J]. Annals of the CIRP, 1982, 31(2): 491 - 509.
- [3] 曾苏民. 降低超厚铝合金锻件残余应力的试验[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(3): 67 - 70.
- ZENG Su-ming. New technique of eliminating residual stress in extra thick aluminum alloy forging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(3): 67 - 70.
- [4] Heinz A, Haszler A, Keidel C, et al. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. Material Science and Engineering A, 2000, A280: 102 - 107.
- [5] 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.
- [6] Tanner D A, Robinson J S. Residual stress prediction and determination in 7010 aluminum alloy forgings[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40: 75 - 82.
- [7] 袁荣发, 伍尚礼. 残余应力测试与计算[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1987. 280.
- YUAN Rong-fa, WU Shang-li. Measurement and calculation of residual stress[M]. Changsha: Hunan University Press, 1987. 280.
- [8] Zhang J, Dong P. Residual stress in welded moment frames and implications for structural performance[J]. Journal of Structure Engineering, 2000, 308(3): 306 - 315.
- [9] 周鸿章. 铝合金预拉伸板[J]. 铝加工, 1999, 22(3): 16 - 19.
- ZHOU Hong-zhang. Pre-stretched plates of aluminum alloy[J]. Machining of Aluminum, 1999, 22(3): 16 - 19.
- [10] Boyer J C, Boivin M. Numerical calculations of residual stress relaxation in quenched plates[J]. Materials Science and Technology, 1985, 1(10): 786 - 792.
- [11] Daan M M. Mathematical Modeling of Microstructure and Residual Stress Evolution Cast in Iron Calendar Rolls[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1994. 90.
- [12] Brown S, Song H. Finite element simulation of welding of large structures[J]. Journal of Engineer for Industry, 1992, 114(11): 441 - 451.
- [13] Wang K F, Chandrasekar S, Yang H T Y. An efficient 2D finite element procedure for the quenching analysis with phase change[J]. Transaction of the ASME, 1993, 115(2): 124 - 137.
- [14] 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.
- [15] 朱伟, 陈梦雄, 张辉, 等. 降低 7075 铝合金厚板淬火残余应力的工艺[J]. 金属热处理, 2002, 27(7): 50 - 53.
- ZHU Wei, CHEN Meng-xiong, ZHANG Hui, et al. Reducing residual stress process for quenched 7075 aluminum thick-plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(7): 50 - 53.

(编辑 李向群)