



淬火及预拉伸对铝锂合金板材 残余应力的影响

杨胜利¹, 刘乐乐¹, 李亚楠², 沈健²

(1. 中国船舶重工集团公司 第七二五研究所, 洛阳 471039;

2. 有研科技集团有限公司, 北京 100088)

摘要: 通过有限元分析与钻孔法残余应力测试相结合, 研究了淬火介质参数、预拉伸对铝锂合金板材淬火残余应力分布与演变的影响。结果表明: 淬火介质冷却速率越慢, 板材残余应力越小, 淬火介质对合金冷却能力由大到小的顺序为 10%NaCl > 水 > 5%PAG; 随着预拉伸量的增加, 板材表层压应力减小, 并逐渐转变为拉应力。预拉伸量为 2.5% 时, 残余应力绝对值稳定在 25 MPa 内。有限元点追踪表明, 在 40 °C 水温淬火过程中, 板材体中心点(A)与上表面中心(B)在三个方向上的残余应力变化规律相反, 最终均呈平面应力状态; 而板材宽向线中心(C)与长向线中心(D)演变规律相似, 但分应力的方向不同; 板材顶点(E)在三个方向上的残余应力均较小。

关键词: 铝锂合金; 淬火; 预拉伸; 残余应力; 有限元

文章编号: 1004-0609(2022)-04-0975-11

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

引文格式: 杨胜利, 刘乐乐, 李亚楠, 等. 淬火及预拉伸对铝锂合金板材残余应力的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4): 975–985. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37930

YANG Sheng-li, LIU Le-le, LI Ya-nan, et al. Effects of quenching and pre-stretching on residual stress of Al-Li alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(4): 975 – 985. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37930

残余应力在铝合金工件中普遍存在, 时效强化型铝合金板材的残余应力主要是由淬火过程中板材的温度梯度引起, 它严重影响了板材的加工和使用性能。一方面, 导致板材淬火后或后续机加工易产生弯曲或翘起等变形; 另一方面, 残余应力会严重影响合金板材的服役性能, 如断裂韧性、抗应力腐蚀性能和疲劳性能等^[1-6]。铝锂合金因其较高的比强度、比刚度和弹性模量等特点而在航空航天领域得到越来越广泛的应用^[7-9]。但目前鲜见关于不同淬火介质对铝锂合金板材残余应力影响的研究。淬

火工艺是时效强化铝合金不可或缺的重要工序, 但淬火过程是涉及多维物理量的变化过程, 如热场、相变、力场及其耦合作用等^[10-13]。淬火残余应力可通过改变淬火工艺、淬火后预拉伸、去应力退火以及其他机械或热处理方法适当消减^[14-17]。目前还未找到一种合适的方法测量淬火过程应力的动态演变过程, 传统的钻孔法^[18]、X射线法^[19]和裂纹柔度测试^[20]等方法只能测量淬火后残余应力的状态分布, 且测量过程复杂, 耗时长且成本高。有限元数值模拟能克服上述问题, 通过建立有限元仿真模

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(202300410005)

收稿日期: 2021-03-16; 修订日期: 2021-07-14

通信作者: 杨胜利, 高级工程师, 博士; 电话: 0379-67256994; E-mail: bravictors@126.com

型,可快速有效获得淬火过程应力的演变和分布规律,因此受到国内外学者日益重视^[21-23]。

本研究采用钻孔法测量铝锂合金板材表层参与应力,分析淬火参数和预拉伸量对板材残余应力影响。并结合有限元模型构建,分析淬火过程残余应力的分布与演变过程,最终为铝锂合金板材淬火过程残余应力的控制和消减提供实验依据和理论支持。

1 实验

本实验采用国内某铝业公司生产的45 mm厚铝锂合金热轧板,经线切割加工为350 mm(RD)×100 mm(TD)×22 mm(ND)规格尺寸,然后进行(530 ℃, 2 h)固溶处理;采用浸入式淬火,淬火介质参数分别为不同温度的水(20 ℃、40 ℃和60 ℃)、10%NaCl溶液(质量分数)以及不同浓度的PAG淬火液(5%、10%和15%,质量分数);淬火前试样两端侧边埋入热电偶,利用温度测量仪进行冷却曲

线测定,淬火转移时间小于3 s。

采用钻孔法测量淬火板材残余应力,所用设备为RSD1型钻孔装置和ASMB2-32型变阻箱,测量过程分为三个步骤:贴片、钻孔、测量计算。根据测量结果,计算释放应变、轧向应力和横向应力。所研究铝锂合金的弹性模量 $E=75.1$ GPa,泊松比 $\nu=0.38$,在计算理论释放系数后分别求得轧向应力(σ_{RD})和横向应力(σ_{TD})。如图1所示,轧向相邻测量点(1~5)之间间隔60 mm,共5个点,宽向测量点(A~C)之间间隔30 mm,共3个点。

有限元数值模拟在ANSYS软件上进行,模拟几何模型与实验试样尺寸相同(350 mm(RD)×100 mm(TD)×22 mm(ND))。鉴于试样几何结构和边界条件的对称性,取其八分之一构建几何模型(175 mm(RD)×50 mm(TD)×11 mm(ND)),如图2(a)所示,其中A为试样的体中心,B点为试样上表面中心,C为试样宽向线中心,D为长向线中心,E为试样顶点。几何模型均采用六面体二十节点3D实体单元进行网格划分(见图2(b))。其中温度场采用SOLID90单元,应力场采用SOLID186单元。合金

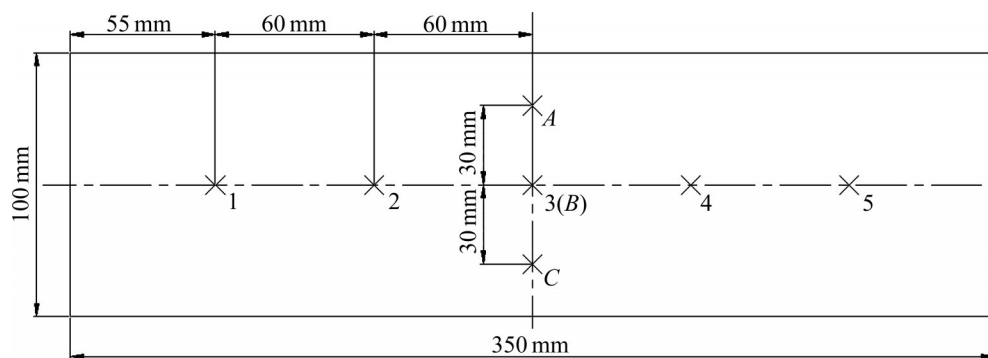


图1 板材轧向和宽向残余应力测量点分布

Fig. 1 Plate rolling and width direction to residual stress measurement position distribution

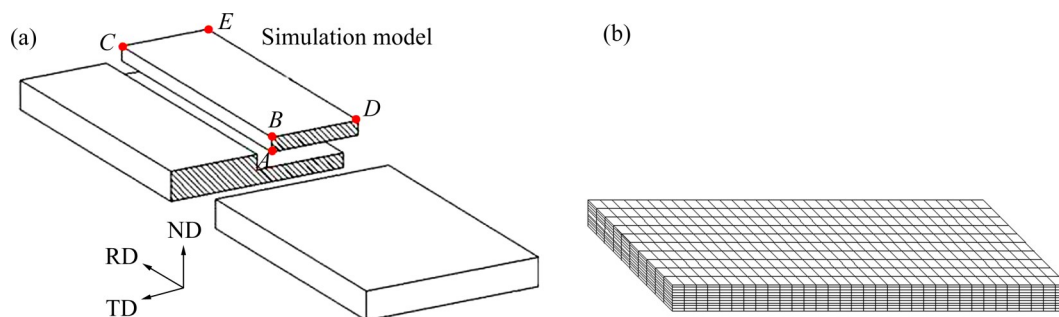


图2 几何模型的构建和网格划分

Fig. 2 Construction of geometric model and mesh generation: (a) Geometric model; (b) Mesh generation

在不同温度下的材料参数如表1所示。

2 结果与讨论

2.1 淬火介质对残余应力的影响

图3所示为NaCl和不同温度的水介质淬火过程中试样温度随时间的变化曲线。由图3可以看出, 水温由20℃升高至60℃时, 试样的冷却速率不断

降低, 由61.4℃/s降低至26.9℃/s; 在相同的温度下, 当介质为10%NaCl溶液时, 试样的冷却速率高达107.5℃/s。图4所示为试样经不同介质淬火后的残余应力。由图4可以看出, 淬火后表层残余应力均为负值, 即为压应力; 随着冷却速率的增加, 试样的残余应力 σ_{RD} 和 σ_{TD} 逐渐升高。由图3和4可知, 随着淬火水温的不断升高, 试样的冷却速率逐渐降低; 10%NaCl(20℃)溶液冷却能力比同温度水

表1 在不同温度下铝锂合金的材料参数

Table 1 Material parameters of Al-Li alloy at different temperatures

$t/^\circ\text{C}$	E/GPa	$\rho/(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	Coefficient of thermal conductivity, $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	Coefficient of thermal expansion, $\alpha/10^{-6}$	Specific heat capacity, $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$
20	75.1	2650	9000	21.6	852.3	258
100	70.3	2631	14500	22.65	894.5	206
200	64.6	2614	11000	23.95	940.5	179
300	55.5	2597	6500	24.2	982.5	121
400	18.8	2579	3000	26	1003.2	39
500	10.6	2562	500	27.5	1045	8

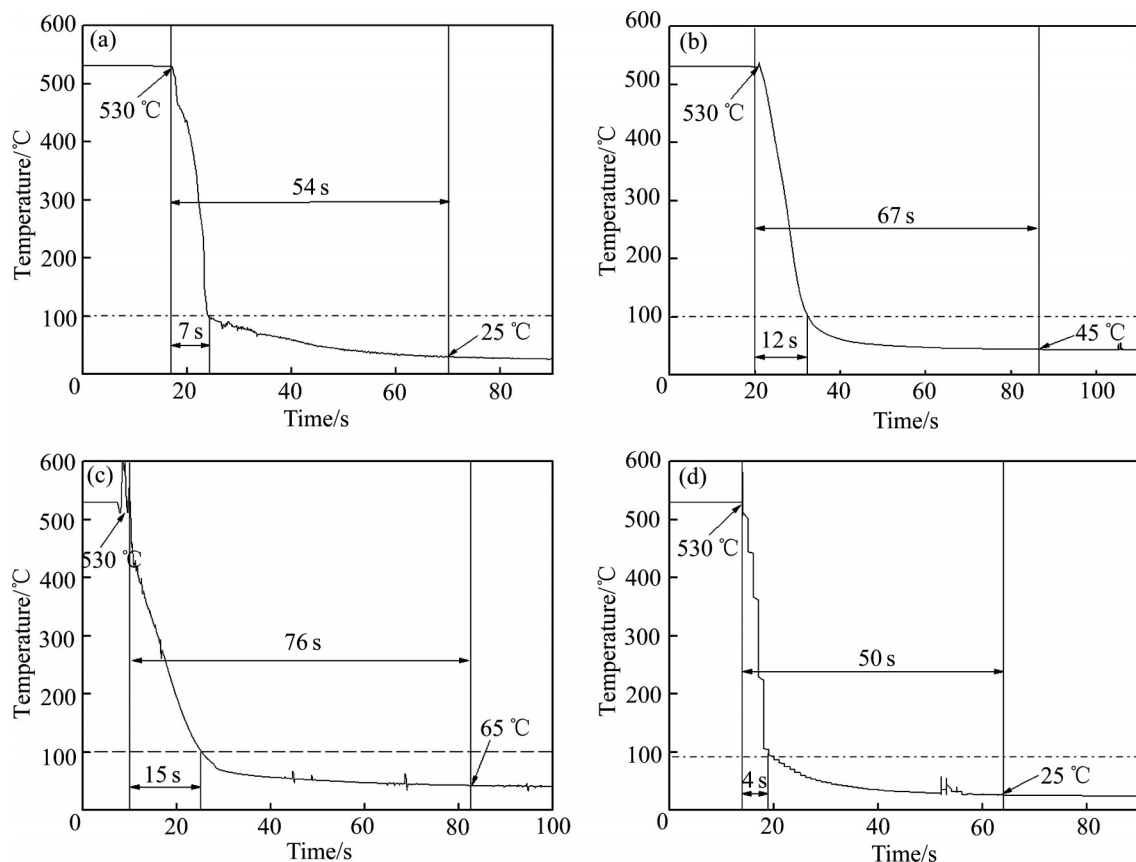


图3 铝锂合金试样在不同介质中的淬火冷却曲线

Fig. 3 Quenching cooling curves of Al-Li alloy specimens in different media: (a) Water (20 °C); (b) Water (40 °C); (c) Water (60 °C); (d) 10%NaCl (20 °C)

的冷却能力大；随着冷却速率的逐渐升高，试样内外层的冷却速率差异性扩大。试样表层因与淬火液接触面积大，其温度下降速度比较快。而试样芯部热量扩散速度较低，一定时间内仍接近固溶温度。试样内外层巨大的温差致使表层和芯部的热膨胀系数、导热率和弹性模量等参数不同，导致两者内外层变形不同，从而形成热应力。所以，淬火溶液温度越低，或其冷却能力越强，试样内外层的温度场梯度将越大，导致对应的热应力不均匀程度增加，试样 σ_{RD} 和 σ_{TD} 应力绝对值升高；反之，淬火溶液温度越高，残余应力绝对值降低。高温试样浸入淬火液中，试样与淬火液之间的导热过程由三个阶段构成：1) 蒸汽膜阶段：高温试样导致淬火液瞬间气化，在其表面形成一层连续的蒸汽膜，阻止了溶液与试样的直接接触，蒸汽膜不利于热传导，从而降低了试样的冷却速率。2) 淬火液沸腾阶段：淬火时间延长，试样温度不断降低，蒸汽膜变薄直至破裂，淬火液与试样直接接触，热量快速从试样中传至淬火液，导致其沸腾并产生大量气泡，试样温降速率加快。3) 对流导热阶段：当试样温度低于淬火介质沸点以下，此时试样的热传导由介质流动的速度以及淬火介质与试样之间的温差决定。对冷却速率与 σ_{RD} 、 σ_{TD} 方向残余应力进行拟合，结果如图5所示。由图5可以看出， σ_{RD} 、 σ_{TD} 均与冷却速率呈一定的线性关系，相关系数分别为0.998和0.921。

图6所示为铝锂合金试样经40℃水淬火后试样

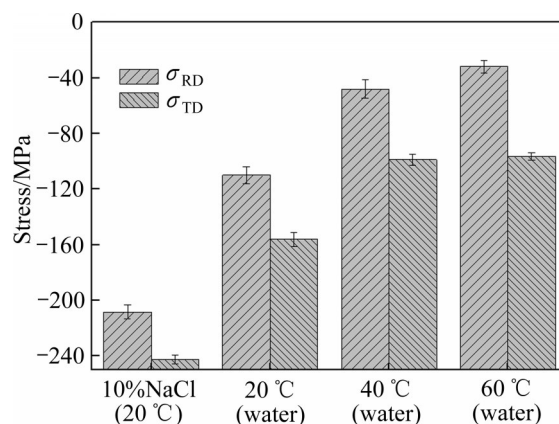


图4 淬火介质参数对铝锂合金试样残余应力的影响

Fig. 4 Effect of quenching medium parameters on residual stress of Al-Li alloy specimens

沿轧向和宽向等距离位置处的表面残余应力。由图6可以看出，试样表面残余应力均为压应力。 σ_{RD} 和 σ_{TD} 成对称分布，靠近试样棱边位置(见图1中1、5和A、C点)的压应力大，中心位置(图1中3(B)点)压应力小。这是淬火过程，试样边缘和角端效应所引起^[24]。在试样的棱边处其表面积大，距离试样中心位置距离远，不能及时从试样内部得到热量补充，因而冷却速率大，温度梯度大。相反，试样表面中心位置处距离试样中心距离近，能够从试样内部较快得到热量补充，因而冷却速率相对缓慢，温度梯度小。因此，最终导致在试样近棱边位置处具有较大的残余应力，而表面中心位置具有较低的残余应力。

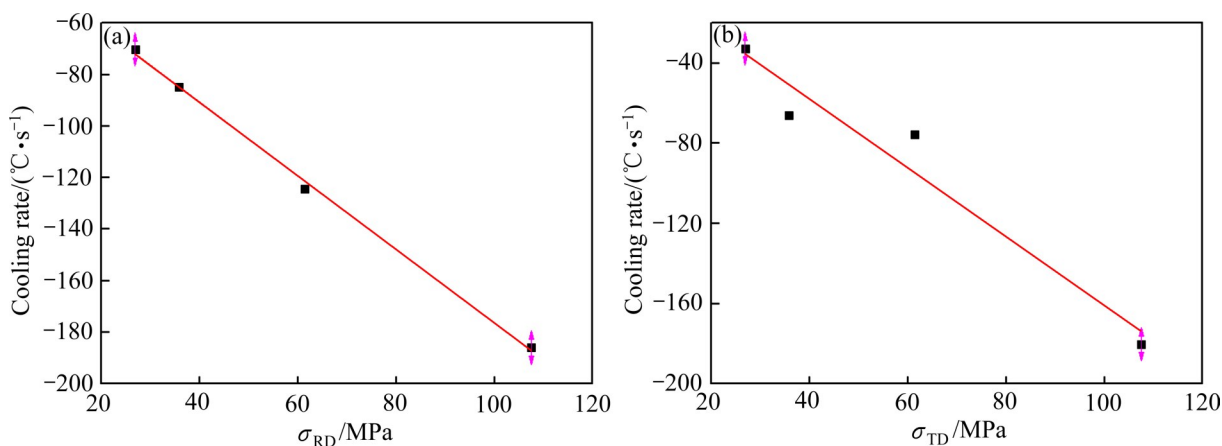


图5 冷却速率与轧制方向、宽度方向残余应力的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between cooling rate and residual stress in Rolling direction(a) and Width direction(b)

2.2 PAG 淬火液浓度对残余应力的影响

图7所示为铝锂合金试样经不同浓度的PAG溶液(20℃)淬火后的冷却曲线和相应的残余应力。由图7可以看出, 随PAG溶液浓度的升高, 试样冷却速率不断降低, 其表层残余应力也逐渐降低。对比图4、7(d)可知, PAG溶液淬火试样比同温度的水

淬火试样具有更低的表面残余应力。这与PAG溶液淬火过程形成的聚合物薄膜密切相关。随PAG溶液浓度的提高, 淬火初期在试样表面可形成的聚合物膜厚度增加, 降低试样冷却速率, 试样内部热量具有更长的时间扩散, 试样不同部位之间的温度差较小, 降低了试样淬火开始瞬间的热应力。当试

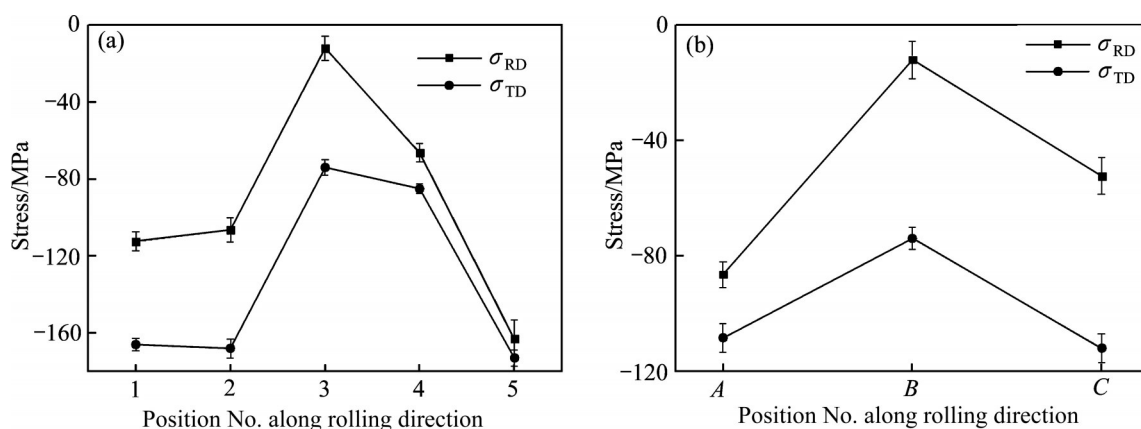


图6 铝锂合金试样经40℃水淬火后沿轧向和宽向的残余应力

Fig. 6 Residual stress along rolling direction direction(a) and width direction(b) of Al-Li alloy specimens quenched by water at 40 °C

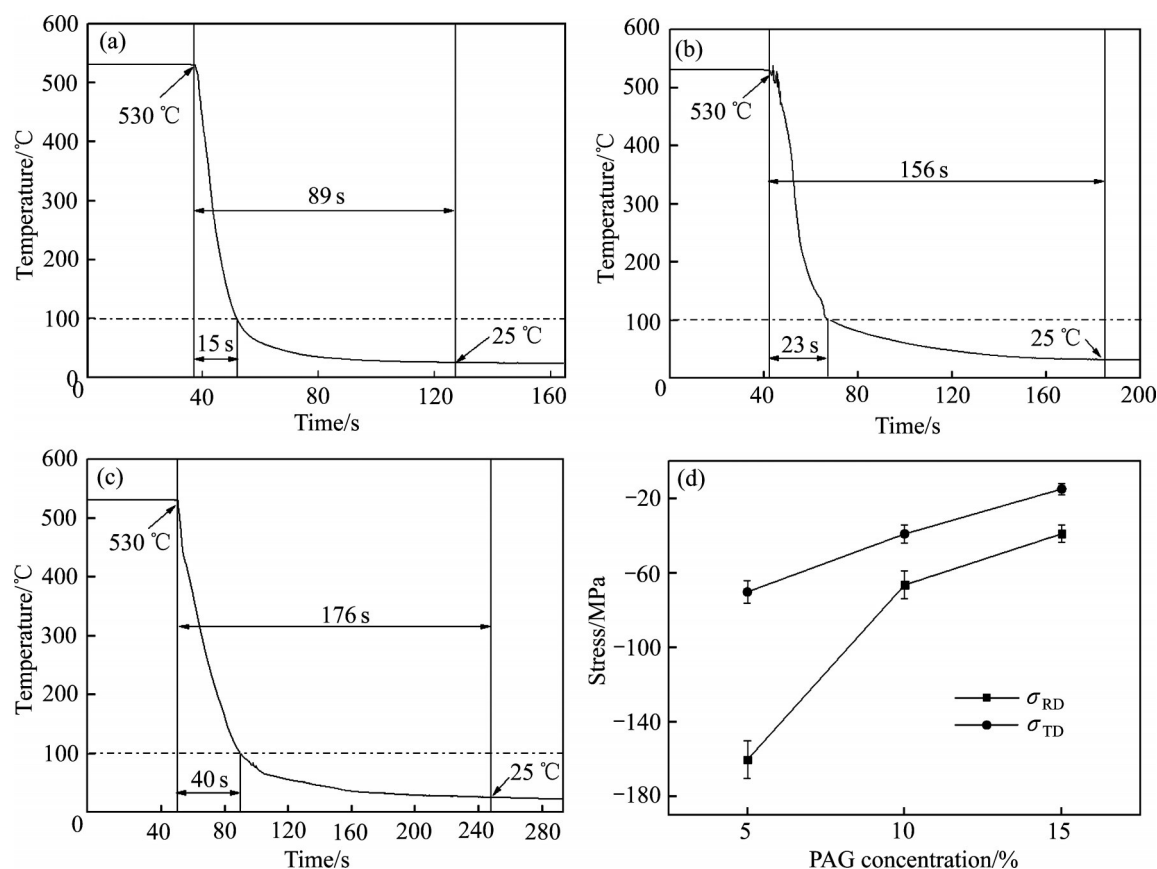


图7 不同浓度PAG溶液淬火后的冷却曲线和对应的残余应力

Fig. 7 Cooling curves and corresponding residual stress of Al-Li alloy specimens after PAG solution quenching treatment with different concentrations: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) Residual stress

样温度降低到聚合物溶解温度时, 聚合物薄膜逐渐溶解, 试样与淬火液接触, 冷却速率提高, 但因前一段阶段的大幅度降温, 试样内部的温差已较小, 引起的热应力很难引起塑性变形, 从而不会产生较大的残余应力。

2.3 预拉伸对残余应力影响

图8所示为不同预拉伸量对20℃水淬火试样表层残余应力的影响。由图8可以看出, 当预拉伸量1%时, σ_{RD} 和 σ_{TD} 应力分别为-81.2 MPa和-33.6 MPa, 相对淬火态两个方向的残余应力分别消减了34.7%和56%; 当预拉伸量为2.5%时, 对应 σ_{RD} 和 σ_{TD} 应力分别仅为2.2 MPa和-4.7 MPa; 预拉伸量达

4%后, 试样表层应力转变为拉应力, σ_{RD} 和 σ_{TD} 应力分别为76.1 MPa和35.3 MPa, 即产生了新的残余拉应力, 表明预拉伸量过大。图9所示为预拉伸量为2.5%时试样沿轧向的应力分布。由图9可以看出, 经2.5%预拉伸后, 试样残余应力基本在20 MPa以内, 板材整体残余应力水平降低, 淬火残余应力消减效果良好。

2.4 淬火过程的有限元模拟

2.4.1 淬火态残余应力的分布规律

图10~12所示分别为铝锂合金试样经40℃水淬火后轧向、宽向和法向三个方向分应力分布的有限元分析。可以看出, σ_{RD} 、 σ_{TD} 和 σ_{ND} 的应力分布

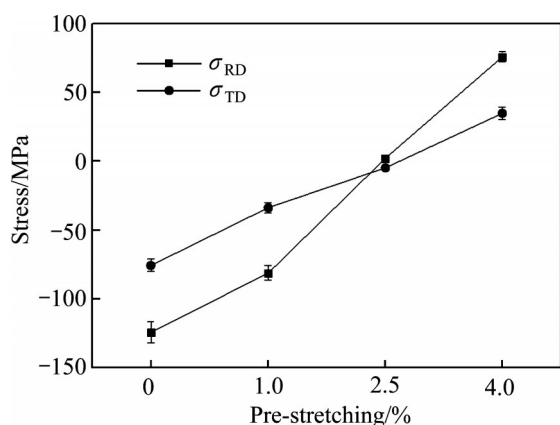


图8 预拉伸量对铝锂合金试样残余应力的影响

Fig. 8 Effect of pre-stretching on residual stress of Al-Li alloy specimens

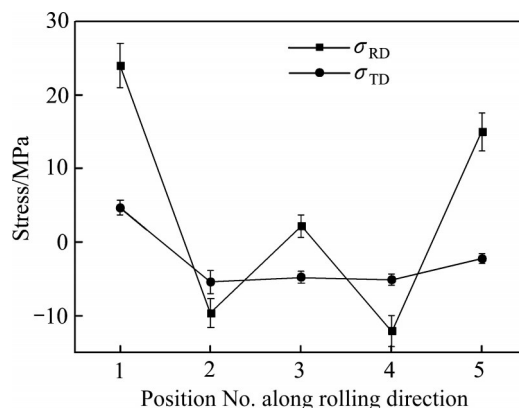


图9 预拉伸量为2.5%的铝锂合金试样的轧向应力分布

Fig. 9 Distribution of residual stress along length direction in Al-Li alloy specimens with 2.5% pre-stretching

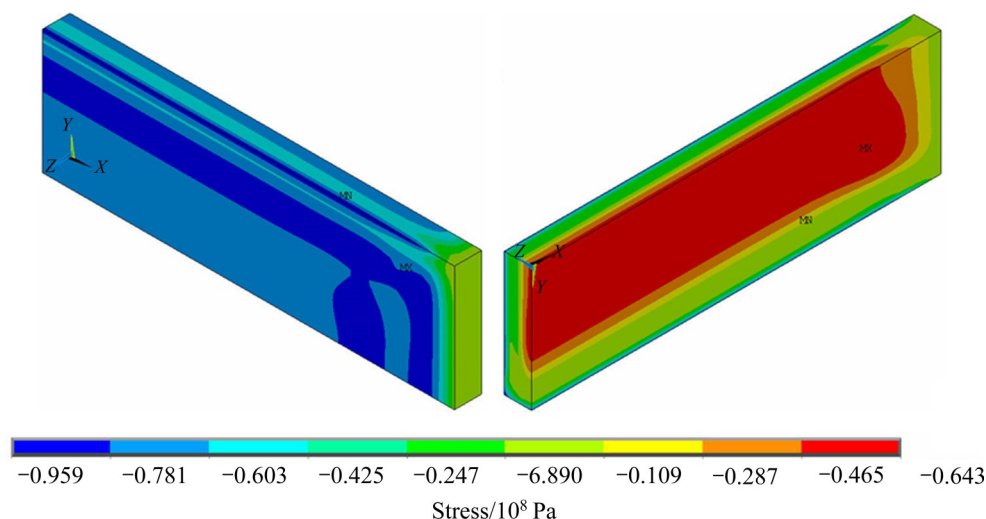
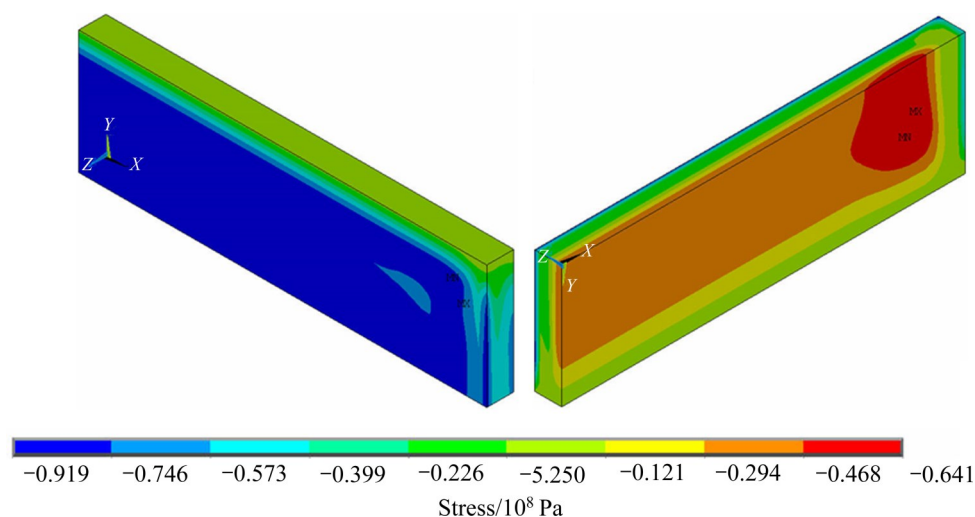
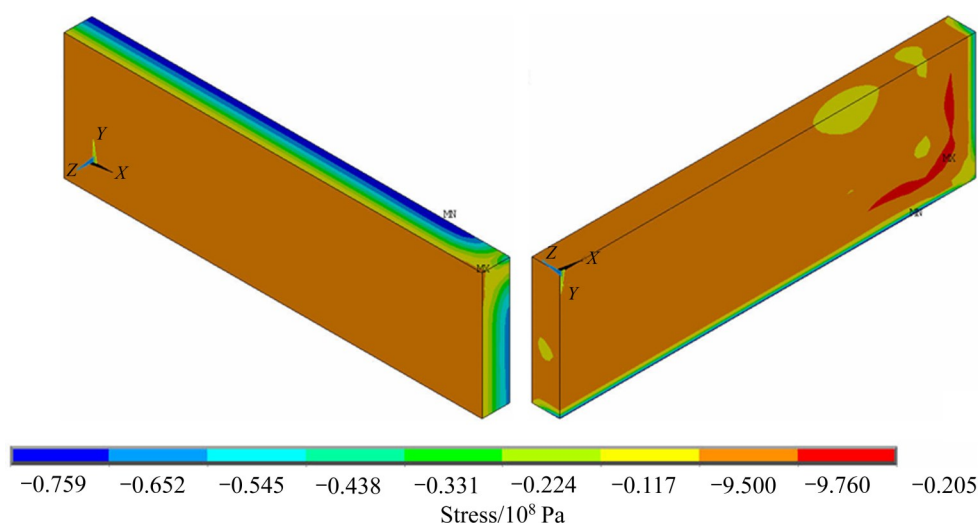


图10 40℃水淬火后铝锂合金试样 σ_{RD} 向分应力分布云图

Fig. 10 Distribution of σ_{RD} Al-Li alloy specimens after quenching in 40℃ water

图 11 40 °C 水淬火后铝锂合金试样 σ_{TD} 分布云图Fig. 11 Distribution of σ_{TD} Al-Li alloy specimens after quenching in 40 °C water图 12 40 °C 水淬火后铝锂合金试样 σ_{ND} 分布云图Fig. 12 Distribution of σ_{ND} Al-Li alloy specimens after quenching in 40 °C water

规律相同,即表层为压应力,芯部为拉应力,峰值出现在板材棱边位置和板材芯部的端部位置。但 σ_{ND} 的绝对值较小,大范围内的压应力仅为 -9.5 MPa 左右;芯部拉应力峰值仅 20.5 MPa。

图 13 所示为沿铝锂合金试样厚向路径(见图 2(a)中 A-B)的三向应力分布规律。由图 13 可以看出, σ_{RD} 和 σ_{TD} 分布规律相似,即从表层到芯部,逐渐由压应力向拉应力转变,且 $\sigma_{RD} \geq \sigma_{TD}$; 而 σ_{ND} 接近零,说明经 40 °C 水淬后的残余应力分布主要沿 RD 和 TD 方向分布。且试样表面的压应力绝对值大于芯部拉应力的绝对值,图 10~12 所示的应力分布云图也呈现同样的规律,这是因为淬火过程中的边角效

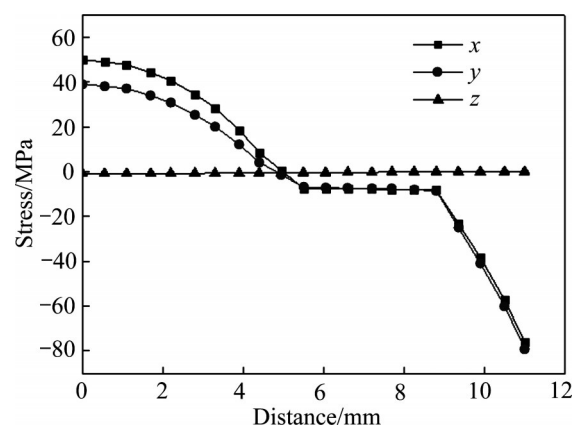


图 13 沿铝锂合金试样厚向路径(A-B)的应力分布

Fig. 13 Stress distribution along ND direction path (A-B) of as shown in Fig. 2(a)

应影响了试样表面的应力分布^[24]。

2.4.2 淬火过程中应力的演变规律

图 14 所示为利用时间历程后处理器中的点追踪技术获得的 40 °C 水温淬火过程中铝锂合金试样特征点的应力随时间延长的演变规律, A~E 点分布如图 2(a) 所示。由图 14 可以看出:

A 点 σ_{RD} 和 σ_{TD} 的变化规律相似, 淬火初期, σ_{RD} 和 σ_{TD} 均为压应力, 其绝对值随着冷却时间的延长而逐渐增大, 2.4 s 时达到峰值。之后, 压应力开始减小, 4.9 s 时转变为拉应力, 然后随着冷却时间的

延长拉应力逐渐增加, 在 15 s 后趋于稳定, 约 49 MPa。在整个淬火过程中, σ_{ND} 始终很小, 说明 A 点的应力状态为典型的平面应力。B 点应力变化规律与 A 点规律相反, B 点亦为平面应力状态。

C 点 σ_{TD} 在淬火初期为拉应力, 随时间延长而逐渐增加, 在 1.4 s 时达到峰值 131.8 MPa, 之后不断降低, 在 4.1 s 时转变为压应力, 随后压应力不断增加, 在 16.5 s 时到达稳定值 -89 MPa, 而 σ_{RD} 和 σ_{ND} 随时间变化较小, 因为 C 点为板材宽向线中心, 冷却过程中宽向(即 TD 方向)受到较大的收缩变形,

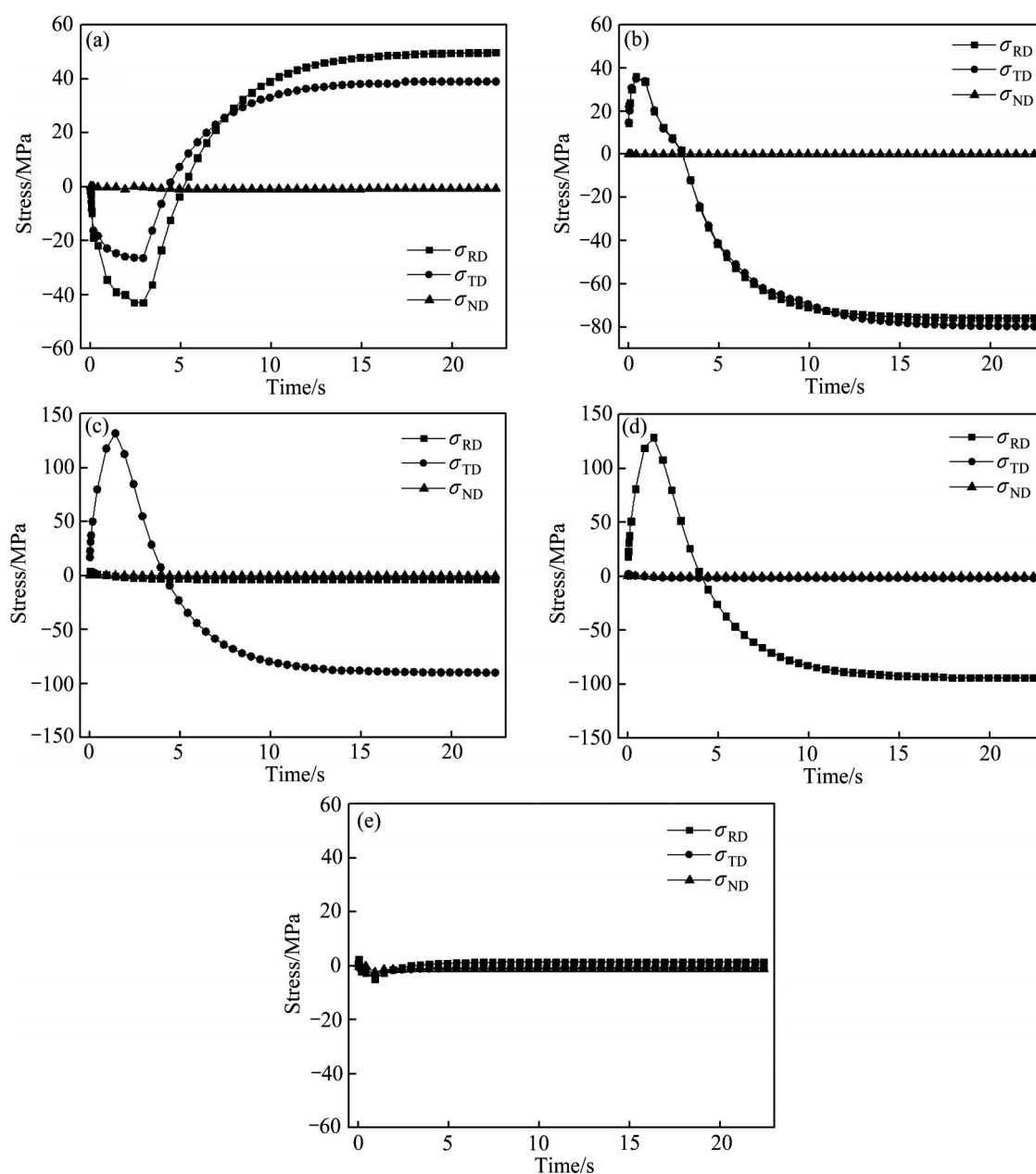


图 14 淬火板材特征点应力随时间变化的演变过程

Fig. 14 Evolution with time for characteristic point stress on quenching plate: (a) Position A; (b) Position B; (c) Position C; (d) Position D; (e) Position E

而长向(RD方向)和高向(ND向)收缩不明显,导致其 σ_{TD} 出现上述演变,而 σ_{RD} 和 σ_{ND} 较小且变化不明显。 D 点产的演变规律生与 C 点类似,只是分应力的方向不同。

E 点残余应力仅在 ± 4 MPa内波动,因为其在淬火过程中,顶点处冷却速度快,但其自由度也大,冷收缩可以自由进行,导致其应力值较小;而因三个方向的尺寸效应不明显,其三向应力的差别也较小。

3 结论

1) 三种淬火介质(20℃)对合金冷却能力由大到小的顺序为: 10%NaCl>水>5%PAG; 且随水温升高或PAG溶液浓度的升高,铝锂合金板材残余应力减小。

2) 随预拉伸量的增加,铝锂合金板材残余应力逐渐减小,当预拉伸量达4%,铝锂合金板材表层压应力转变为拉应力。预拉伸量为2.5%时,铝锂合金板材淬火残余应力绝对值稳定在25 MPa以内,消减效果较好。

3) 构建了铝锂合金有限元淬火模型,采用点追踪技术分析铝锂合金板材特征点应力随时间的演变规律: 芯部压应力在4.9 s时转变为拉应力,在15 s后趋于稳定值49 MPa; 表层拉应力在3.4 s时转变为压应力,17 s后趋于稳定值-79 MPa。

REFERENCES

- [1] 唐志涛,刘战强,艾兴,等. 基于裂纹柔度法的铝合金预拉伸板内部残余应力测试[J]. 中国有色金属学报, 2007, 9: 1404-1409.
TANG Zhi-tao, LIU Zhan-qiang, AI Xing, et al. Measuring residual stresses depth profile in pre-stretched aluminum alloy plate using crack compliance method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 9: 1404-1409.
- [2] QIN W J, DONG C. FEM simulation of quenching process and investigation of residual stresses of crankshafts[J]. Key Engineering Materials, 2014, 626: 149-154.
- [3] SINGH A, AGRAWAL A. Investigation of surface residual stress distribution in deformation machining process for aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 195-202.
- [4] WU B, ZHANG L J, ZHANG J X, et al. An investigation of ultrasonic nanocrystal surface modification machining process by numerical simulation[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 83: 59-69.
- [5] 龚海,吴运新,廖凯. 不同淬火工艺对7075铝合金厚板残余应力的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1354-1359.
GONG Hai, WU Yun-xin, LIAO Kai. Influence of different quenching techniques on residual stress of 7075 aluminum alloy thick-plate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1354-1359.
- [6] DING H F, ZHU C C, SONG C S, et al. Effect of the quenching residual stress on ductile fracture behavior of pre-stretched aluminum alloy plates[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(6): 2259-2267.
- [7] LI J F, HUANG J L, LIU D Y, et al. Distribution and evolution of aging precipitates in Al-Cu-Li alloy with high Li concentration[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 15-24.
- [8] 杨胜利,沈健,陈利阳,等. Al-Cu-Li合金热变形过程中微观组织的动态演变规律[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(4): 674-683.
YANG Sheng-li, SHEN Jian, CHEN Li-yang, et al. Dynamic evolution of microstructure of Al-Cu-Li alloy during hot deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(4): 674-683.
- [9] 杨胜利,沈健,蒋鹏,等. 热处理制度对新型Al-Cu-Li合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(6): 1111-1119.
YANG Sheng-li, SHEN Jian, JIANG Peng, et al. Effect of heat treatment on Microstructure and properties of new Al-Cu-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(6): 1111-1119.
- [10] 张维. 2A14铝合金热成形及淬火过程中的残余应力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
ZHANG Wei. Research on residual stress in hot forming and quenching process of 2A14 aluminum alloy[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [11] 张李强,王婧,骆晓萌,顾剑锋. 热处理过程流场-温度场-组织场-应力场耦合模拟研究[J]. 金属热处理, 2017, 42(8): 181-186.
ZHANG Li-qiang, WANG Jing, LUO Xiao-meng, GU Jian-fen. Coupled numerical simulation of flow field, temperature field, microstructure field and stress field on heat treatment

- process[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(8): 181–186.
- [12] TANNER D A, ROBINSON J S. Effect of precipitation during quenching on the mechanical properties of the aluminium alloy 7010 in the W-temper[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153/154: 998–1004.
- [13] 戴晓元, 熊超宇. 数值模拟在铝合金淬火过程中的应用[J]. *金属热处理*, 2019, 44(11): 195–203.
- DAI Xiao-yuan, XIONG Chao-yu. Application of numerical simulation in quenching process of aluminum alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(11): 195–203.
- [14] 范宁, 熊柏青, 李志辉, 等. 预拉伸变形量对 7055 铝合金厚板表面残余应力的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(2): 301–307.
- FAN Ning, XIONG Bai-qing, LI Zhi-hui, et al. Influence of pre-stretched ratio on surface residual stress of 7055 aluminum alloy thick plate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(2): 301–307.
- [15] 罗国云. 7085 铝合金大锻件多向锻造均匀性调控及淬火残余应力消减工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- LUO Guo-yun. Multidirectional forging uniformity control and quenching residual stress reduction process research of 7085 Aluminum alloy large forgings[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [16] LI X G, LIAO H B, MA M L, et al. Effect of pre-stretching process on quenching residual stress of EW75 magnesium alloy[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*. September 12 – 13, 2015. Shenzhen, China. Paris, France: Atlantis Press, 2015.
- [17] 张福全, 杨重, 袁武华, 等. 7050 铝合金淬火残余应力及消减工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(24): 177–180, 185.
- ZHANG Fu-quan, YANG Chong, YUAN Wu-hua, WANG Xiang. Study on quenching residual stress and reducing process of 7050 aluminum alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(24): 177–180, 185.
- [18] 黄超群, 李桓, 罗传光, 等. 盲孔法与压痕法测量 2219 铝合金熔焊焊缝残余应力的对比分析[J]. *焊接学报*, 2017, 38(7): 54–58, 131.
- HUANG Chao-qun, LI Huan, LUO Chuan-guang, et al. Comparative study of blind hole method and indentation method in measuring residual stress of 2219 aluminum alloy arc-welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(7): 54–58, 131.
- [19] 万鑫. X 射线衍射方法分析多晶铝合金和粗晶铁硅合金的残余应力[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- WAN Xin. Residual stresses analysis of polycrystalline Al alloy and coarse-grained Fe-si alloy by X-ray diffraction[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [20] 李亚楠, 张永安, 李锡武, 等. 不同淬火介质下 7055 铝合金厚板淬火内应力测试[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(12): 2467–2472.
- LI Ya-nan, ZHANG Yong-an, LI Xi-wu, et al. Quenching residual stress of 7055 aluminum alloy thick plate with various quenching mediums[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(12): 2467–2472.
- [21] TEIXEIRA J, DENAND B, AEBY-GAUTIER E, et al. Simulation of coupled temperature, microstructure and internal stresses evolutions during quenching of a β -metastable titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 651: 615–625.
- [22] CUI J D, YI Y P, LUO G Y. Numerical and experimental research on cold compression deformation method for reducing quenching residual stress of 7A85 aluminum alloy thick block forging[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017: 7059389.
- [23] CAO H L, LI X W, LI Y N, et al. Numerical simulation of quenching and pre-stretching residual stress in 7085 aluminum alloy plate[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 852: 211–217.
- [24] 胡少虬. 大直径高强度高塑性高弹性模量铝合金研制及淬火残余应力演变规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- HU Shao-qiu. The research of large-diameter aluminum alloy with series of high performance and alteration mechanism of residual stress during quenching[D]. Changsha: Central South University, 2007.

Effects of quenching and pre-stretching on residual stress of Al-Li alloy plate

YANG Sheng-li¹, LIU Le-le¹, LI Ya-nan², SHEN Jian²

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China;

2. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: Combined with finite element analysis and drilling residual stress test, the effects of quenching medium parameters and pre-stretching on the distribution and evolution of residual stress of Al Li alloy plate were studied. The results show that the slower the cooling rate of quenching medium is, the smaller the residual stress is. The cooling capacity of different quenchants from high to low is 10% NaCl > water > 5% PAG. With the increase of pre-stretching amount, the compressive stress on the surface of the plate decreases and gradually changes into tensile stress. When the pre-stretching amount is 2.5%, the absolute value of residual stress is stable within 25 MPa. The finite element point tracing shows that during the quenching process at 40 °C, the variations of residual stresses in the three directions of the center (*A*) and the center (*B*) of the upper surface of the plate are opposite, and all of them are in the plane stress state; while the evolutions of the center (*C*) along ND and the center (*D*) along RD of the plate are similar, but the direction of the partial stresses are different; the residual stresses of the top (*E*) in three directions of the plate are all smaller.

Key words: Al-Li alloy; quenching; pre-stretching; residual stress; finite element method

Foundation item: Project(202300410005) supported by the Natural Science Foundation of Henan Province, China

Received date: 2021-03-16; **Accepted date:** 2021-07-14

Corresponding author: YANG Sheng-li; Tel: +86-379-67256994; E-mail: bravictors@126.com

(编辑 龙怀中)