

Effect of Constant Load in NaCl Solution on Microstructure and Tensile Properties of 7020 Aluminum Alloy Sheet

Huaqiang Lin^{1,2}, Lin Sun¹, Shengdan Liu^{2,3*}, Zhen Zhang^{2,3}, Qing Wang^{2,3}, Yunlai Deng^{2,3}

¹National Engineering Technology Research Center for High-Speed EMU, China CRRC Qingdao Sifang CO., Ltd., Qingdao Shandong

²School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

³Key Laboratory of Nonferrous Materials Science and Engineering of Ministry of China, Changsha Hunan
Email: *394588488@qq.com, *csuliusd@163.com

Received: Sep. 5th, 2017; accepted: Sep. 25th, 2017; published: Sep. 29th, 2017

Abstract

The effect of constant load (200, 250, 300 MPa) in 3.5% NaCl solution on microstructure and tensile properties of 7020 aluminum alloy sheet was investigated by ambient temperature tensile test, optical microscopy, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. It is shown that tensile properties of the sheets decrease after constant load in NaCl solution. With the increase of load, ultimate strength and elongation tend to decrease, while proof yield strength decreases first and then increases slightly. After constant load in NaCl solution, there are a number of corrosion pits and intergranular faults; the corrosion depth tends to increase with the increase of load. During tensile test, stress concentration occurs at these sites, and therefore the number of crack sources is increased; consequently tensile properties are decreased. A load stress of 300 MPa increases slightly dislocation density in the sheet and therefore decreases the decrement of yield strength after constant load in NaCl solution.

Keywords

7020 Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Properties, Constant Load Effect

NaCl溶液中恒载荷作用对7020铝合金板材显微组织和拉伸性能的影响

林化强^{1,2}, 孙琳¹, 刘胜胆^{2,3*}, 张臻^{2,3}, 汪庆^{2,3}, 邓运来^{2,3}

*通讯作者。

文章引用: 林化强, 孙琳, 刘胜胆, 张臻, 汪庆, 邓运来. NaCl 溶液中恒载荷作用对 7020 铝合金板材显微组织和拉伸性能的影响[J]. 材料科学, 2017, 7(6): 633-639. DOI: 10.12677/ms.2017.76084

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 国家高速动车组总成工程技术研究中心, 山东 青岛

²中南大学, 材料科学与工程学院, 湖南 长沙

³教育部有色金属材料重点实验室, 湖南 长沙

Email: *394588488@qq.com, *csuliusd@163.com

收稿日期: 2017年9月5日; 录用日期: 2017年9月25日; 发布日期: 2017年9月29日

摘要

通过室温拉伸测试、光学显微镜、扫描电镜和透射电镜等方法研究了3.5%NaCl溶液中恒载荷(应力值200, 250, 300 MPa)作用对7020铝合金板材显微组织和拉伸性能的影响。结果表明: NaCl溶液中恒载荷作用后, 板材的拉伸性能下降。随着加载应力值增加, 板材的抗拉强度和伸长率不断下降, 而屈服强度先下降后略有所上升。恒载荷作用后, 板材表面出现了腐蚀坑和沿晶腐蚀缺陷, 腐蚀深度随加载应力增加呈上升趋势; 拉伸时这些缺陷处易产生应力集中, 增加了裂纹源数量, 降低了拉伸性能。300 MPa加载时稍增加板材中的位错密度, 减小了NaCl溶液中恒载荷作用后屈服强度的下降程度。

关键词

7020铝合金, 显微组织, 拉伸性能, 恒载荷作用

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

7000 系铝合金广泛用作轨道交通和航空航天领域的结构材料。实际服役时, 这些材料往往会发生局部腐蚀, 如晶间腐蚀和剥落腐蚀等; 局部腐蚀发生后, 它们的拉伸性能、韧性及抗疲劳等性能降低[1]-[6], 构件的可靠性大大降低, 造成巨大的安全隐患。在实际应用时, 这些材料不仅会受到腐蚀介质的作用, 还会同时受到外在载荷的作用。那么, 研究并认识腐蚀介质中外在载荷作用后 7000 系铝合金材料力学性能的变化具有重要的意义, 这能为构件材料的选择、可靠性评价和服役寿命预测等提供有价值的参考。

本文以 7020 铝合金板材为对象, 通过在室温 3.5%NaCl 溶液中的恒载荷作用试验, 研究了加载应力值对显微组织和拉伸性能的影响规律, 探讨了影响机理。

2. 试验材料及方法

试验材料为 7020 铝合金挤压材料, 厚度为 3 mm, 化学成分为: Al-4.46 Zn-1.23 Mg-0.12 Cu-0.31 Mn-0.24 Cr-0.11 Zr-0.21 Fe-0.10 Si (wt%)。依据国家标准 GBT 15970.6-2007 切取试样在室温 3.5%NaCl 溶液中进行恒载荷作用试验, 加载应力值分别为 200 MPa、250 MPa 和 300 MPa, 试验时间为 15 天, 每种状态三个平行试样; 15 天后试样均未断裂, 因此将试样取下在室温测试其拉伸性能。拉伸性能测试在 DDL100 万能试验机上进行, 拉伸速率为 2 mm/min。

从试验前后的材料上切取制备金相样品, 经过粗磨、细磨、抛光后在浸蚀剂(83 mlH₂O + 1 ml HF + 16 ml HNO₃ + 3 gCrO₃)中腐蚀显示出晶粒形貌, 然后在 MX3000 型金相显微镜进行观察和拍照。采用 ZEISS

MA10 型扫描电镜(SEM)来观察样品中的第二相及试样室温拉伸后的断口, 并利用 Oxford EDS 型能谱仪对第二相进行能谱分析(EDS)。另外, 还采用透射电镜(TEM)观察样品中的显微组织; 切取 0.2 mm 的薄片, 依次用水磨砂纸、金相砂纸将其磨至约 80 μm 厚, 冲成 $\Phi 3$ mm 的小圆片后进行双喷减薄; 电解液为 30% HNO_3 + 70% CH_3OH , 使用液氮将温度控制在 -20°C 以下, 电流 50~70 mA, 电压 10~20 V; 样品观察在 FEI TECNAI G² 20 场发射电镜上进行, 加速电压 200 kV。

3. 实验结果

3.1. 力学性能

表 1 给出了试样初始态和 NaCl 溶液中恒载荷作用后的室温拉伸性能。试样在室温 3.5%NaCl 溶液加载后的抗拉强度、屈服强度和伸长率都下降, 但下降率受到加载应力大小的影响。

随着加载应力值的升高, 试样的抗拉强度不断下降, 下降率从 200 MPa 时的 6.3% 上升至 300 MPa 的 11.5%; 但屈服强度却呈现先下降后有所上升的趋势, 加载应力 200 MPa 和 250 MPa 时下降率差别不大, 分别为 8.5% 和 8.8%; 伸长率呈现一直下降的趋势, 下降率从 200 MPa 时的 5.7% 上升至 300 MPa 的 26.1%。

3.2. 显微组织

3.2.1. 初始态显微组织

图 1 是试样初始态的金相照片。由图可知, 板材纵截面上的组织不均匀, 靠近中心区域晶粒组织呈现纤维状, 表层附近主要是细小等轴状晶粒, 但在表面一些区域衬度明显更亮; 在更高倍数下观察发现这些区域是大尺寸晶粒, 如图 1(b)所示, 该晶粒长度约为 100 μm , 厚度约为 18 μm , 远大于附近细小等轴晶粒(≈ 10 μm)。

图 2 是试样初始态的 SEM 照片。铝基体中分布着一些亮色的微米级第二相粒子, EDX 能谱分析表明除了 Al 元素, 这些第二相大都含 Fe、Mn、Si、Zn、Mg 和 Cu 等元素, 含量为(wt%): Fe: 6.14~11.32, Mn: 2.62~2.87, Si: 1.47~3.94, Zn: 2.09~4.56, Mg: 0.81~1.43; Cu: 0.07~1.25。另外, 从图 2 可看到基体中还有许多尺寸很小的第二相粒子, 据后续 TEM 分析可知大部分是含 Mn/Cr 的弥散相。

图 3 是试样初始状态的 TEM 照片及对应的选区衍射花样(SADP)图。一些晶粒内部和晶界上能看到黑色的含 Mn/Cr 元素的弥散相, 尺寸大都在 50~180 nm 范围, 如图 3(a), 这些弥散相可钉扎晶界, 抑制再结晶, 有利于材料综合性能的提高。晶内被高密度的沉淀强化相所覆盖, 但其尺寸不均匀, 一些较大 η 相的尺寸可达约 35 nm; 小的沉淀强化相尺寸大约 8 nm, 图 3(b)中 $\langle 001 \rangle_{\text{Al}}$ 选区衍射花样显示这些沉淀强化相主要为亚稳 η' 相。试样中晶界上 η 相析出状态和无沉淀析出带(PFZ)有较大的差别。一些晶界尤其

Table 1. Room temperature tensile properties of 7020 aluminum alloy samples before and after constant load in 3.5%NaCl solution

表 1. 7020 铝合金试样 3.5%NaCl 溶液恒载荷作用前后的室温拉伸性能

试样状态	抗拉强度 R_m (MPa)		屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa)		伸长率(%)	
	实测值	下降率(%)	实测值	下降率(%)	实测值	下降率(%)
初始状态	384.8 ± 3.1	-	331.5 ± 1.5	-	15.7 ± 0.6	-
200 MPa	360.5 ± 2.1	6.3	303.2 ± 3.2	8.5	14.8 ± 0.5	5.7
室温 3.5%NaCl 溶液加载 15 天	352.9 ± 3.9	8.3	302.2 ± 5.2	8.8	13.2 ± 0.5	15.9
300 MPa	340.6 ± 3.1	11.5	313.2 ± 3.6	5.5	11.5 ± 0.9	26.1

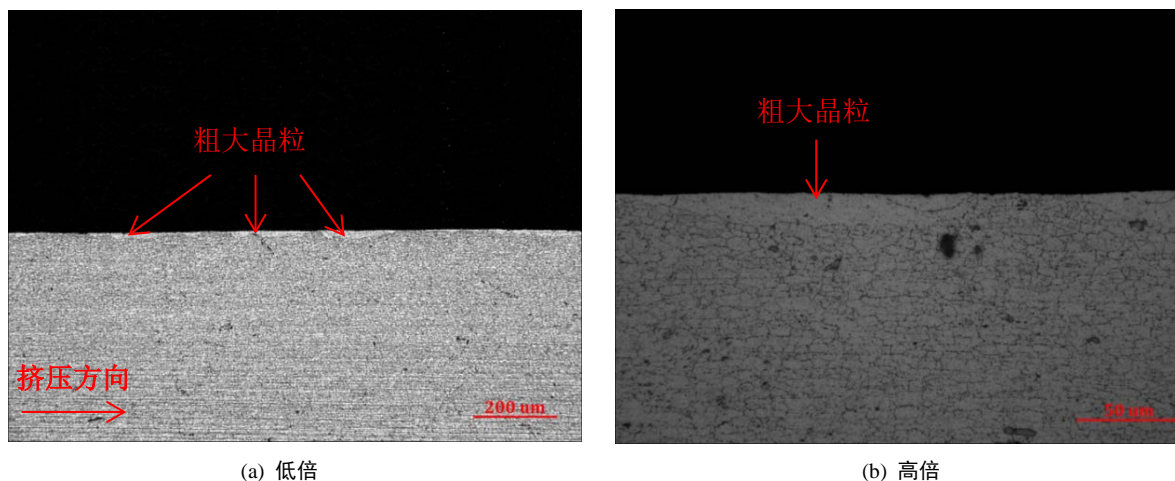


Figure 1. Optical micrographs of the initial sample of 7020 Al alloy sheet
图 1. 7020 铝合金板材初始态金相照片

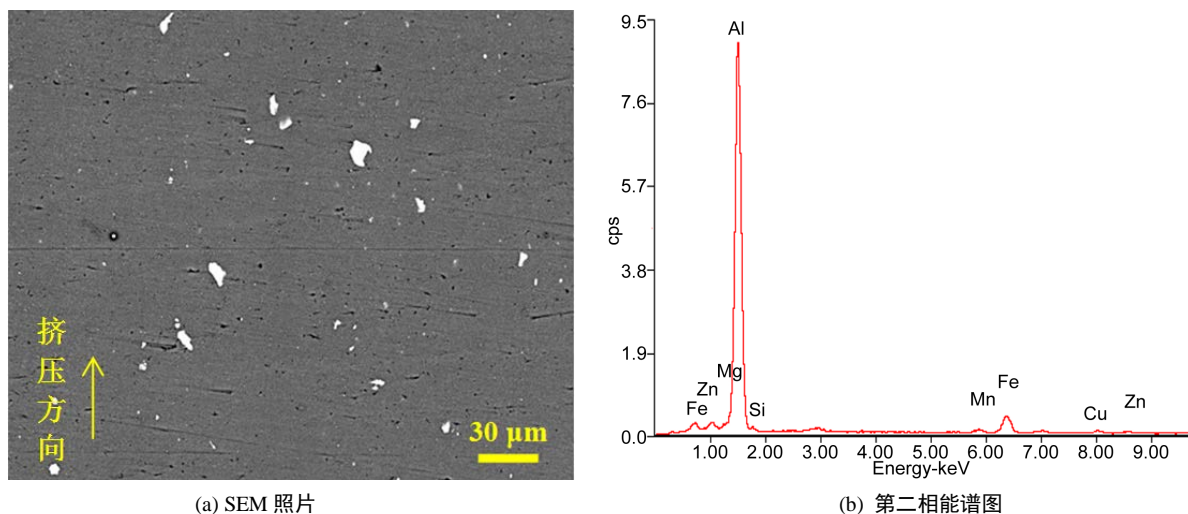


Figure 2. SEM image of the initial sample and EDX spectrum of typical second phase
图 2. 初始态试样的 SEM 照片及典型第二相能谱图

是亚晶界上的 η 相尺寸很小，PFZ 较窄；而有些晶界特别是大角度晶界上的 η 相尺寸很大，PFZ 很宽。例如，图 3(a)中晶界 PFZ-1 的宽度约为 70 nm， η 相很小，尺寸约为 15~45 nm，彼此间距很小；而晶界 PFZ-2 的宽度近 200 nm， η 相很大，尺寸约 200 nm，并且在薄片双喷减薄过程中极易被腐蚀掉而留下亮色的孔洞。

3.2.2. 3.5%NaCl 溶液中恒载荷作用后的显微组织

试样在 3.5%NaCl 溶液中恒载荷作用 15 天后，表层都能看到腐蚀坑等被腐蚀的迹象。作为代表，图 4 和图 5 给出了加载应力为 300 MPa 试样典型的 SEM 和 OM 照片。

由图 4 可知，试样表面有明显被腐蚀的迹象，但不均匀；一些区域出现许多腐蚀坑及沿晶腐蚀特征，一些区域似乎未被腐蚀。能观察到的微米级含 Fe/Mn 等元素第二相粒子数量减少，这可能因为这些第二相颗粒的电极电位较基体更正[7]，在 3.5%NaCl 溶液中浸泡时其周围的基体充当阳极优先被腐蚀，导致这些粒子脱落，形成点蚀坑。

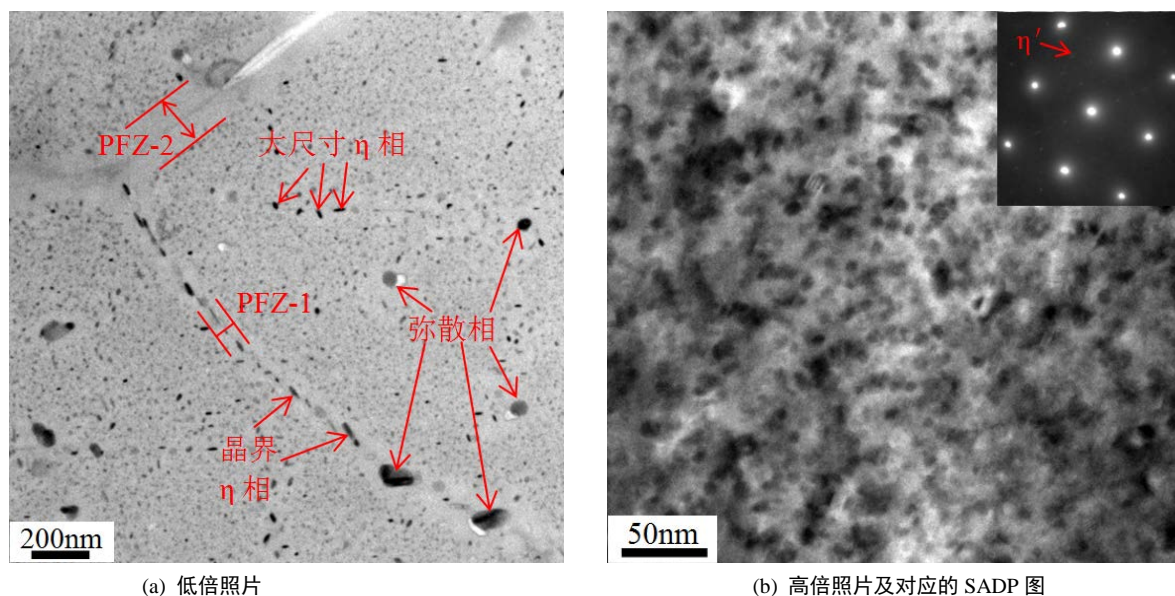


Figure 3. TEM images and corresponding selected area diffraction pattern of hardening precipitates in the initial sample
图 3. 初始态试样 TEM 照片及强化相的选区衍射花样

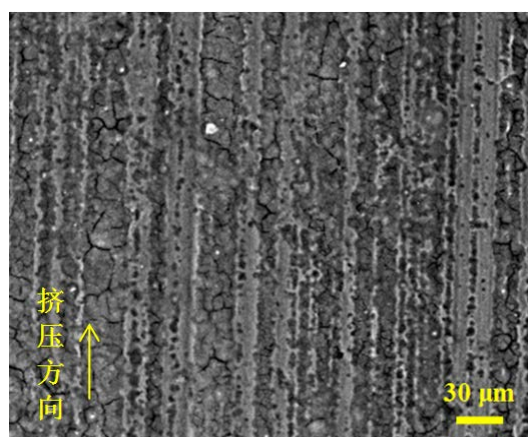


Figure 4. SEM image of the sample after constant load under 300 MPa in 3.5% NaCl solution for 15 days
图 4. 室温 3.5%NaCl 溶液 300 MPa 中加载 15 天后试样的 SEM 照片

从试样纵截面可看出，粗晶粒区域的一些晶粒中出现腐蚀坑，这可能是因为这些晶粒内部分布着含 Fe/Mn 元素的第二相粒子，导致其周围的基体被腐蚀。一些细晶粒区域也有腐蚀坑，仔细观察发现腐蚀有沿晶界扩展迹象；这应该是因为不同的晶界上的 η 相尺寸、间距和无沉淀析出带宽度不同(如图 3(a))；宽无沉淀析出带可加速腐蚀沿晶扩展[8] [9]。随着加载应力的增大，最大腐蚀深度呈增加的趋势，加载应力为 200 MPa 时，最大腐蚀深度为 16 μm ，250 MPa 时约为 23 μm ，300 MPa 时稍稍增大，约为 25 μm 。

此外采用 TEM 对室温 3.5%NaCl 溶液中恒载荷作用后试样进行了观察，发现 200 MPa 和 250 MPa 加载 15 天后的试样的组织特征与初始态的差别不大，但加载应力升高至 300 MPa 时一些晶粒内部可看到很多位错，典型的 TEM 照片如图 6 所示。图中黑色的第二相为含 Mn/Cr 元素的弥散相，能起到钉扎位错的作用，其周围能看到较多的位错线。所研究材料的屈服强度 $R_{p0.2}$ 值大约为 331 MPa，恒载荷加载应力值 300 MPa 大约是 $R_{p0.2}$ 值的 0.9 倍，在此高应力值下加载时试样中某些取向晶粒中的临界剪切应力值有可能达到了 $R_{p0.2}$ 值，因此出现位错的滑移。

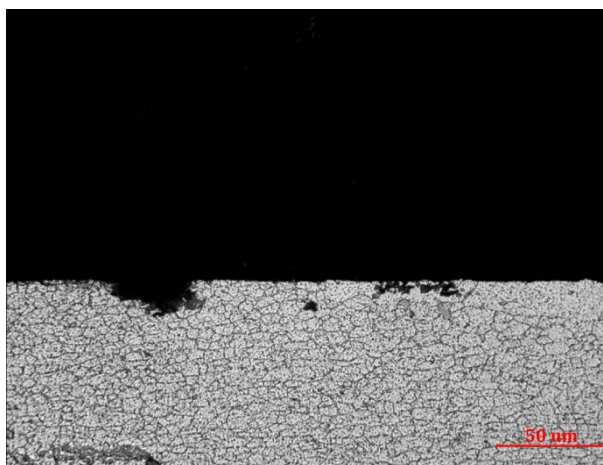


Figure 5. Optical micrograph of the sample after constant load under 300 MPa in 3.5% NaCl solution for 15 days

图 5. 试样在室温 3.5%NaCl 溶液 300 MPa 加载 15 天后表层金相照片

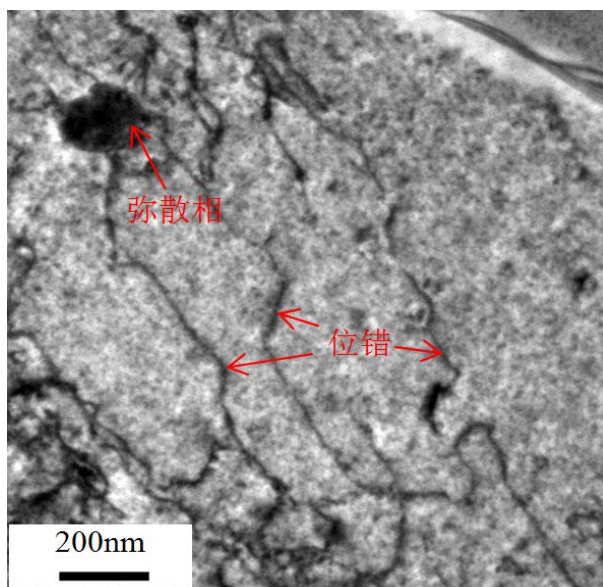


Figure 6. TEM image of the sample after constant load under 300 MPa in 3.5% NaCl solution for 15 days

图 6. 试样在室温 3.5%NaCl 溶液 300 MPa 加载 15 天后的 TEM 照片

4. 分析和讨论

7000 系铝合金是典型的时效强化合金，其屈服强度 $R_{p0.2}$ 主要取决于基体中 η 沉淀强化相的尺寸、分布和体积分数[10] [11]。TEM 显微组织分析表明，7020 铝合金板材试样在室温 3.5% NaCl 溶液不同应力值下加载 15 天后，基体中的 η 沉淀强化相状态基本没有变化，但拉伸强度都下降，据图 3 和图 4 中的显微组织照片认为其原因主要是试样表面出现了腐蚀损伤。试样表面一些区域出现了点蚀坑和沿晶腐蚀裂纹，这相当于在表面形成大量的小缺口。因此，试样拉伸过程中在这些缺口底部易出现应力集中，而且沿晶腐蚀裂纹往往是裂纹源，拉应力促使这些微裂纹沿着晶界快速扩展。这是试样拉伸强度尤其是伸长

率降低的原因之一。此外,试样表面材料被腐蚀后,产生的氢原子可沿着缺口底部处晶界扩散至基体[12],这就降低晶格的结合力,在更小的拉应力作用下裂纹沿着晶界向材料内部快速扩展,这就大大地降低了材料的强度尤其是塑性。这种现象在对局部腐蚀后 7055 铝合金板材拉伸性能的研究中观察到[4] [5]。

恒载荷作用时应力值为 200 MPa 和 250 MPa 时,试样的屈服强度 $R_{p0.2}$ 值虽然相差不大,但 250 MPa 加载时伸长率的下降率却大幅度上升,这说明由于腐蚀损失更严重,拉伸时塑性变形不均匀程度上升,试样中能够容纳位错量减少,加工硬化能力下降,因此抗拉强度下降率也增加。应力值增加至 300 MPa,试样中局部晶粒中发生了位错的滑移,位错密度的增加能稍微增加拉伸变形时位错运动阻力,略提高屈服强度,但试样表面的腐蚀损伤程度增加,腐蚀深度进一步增加,导致伸长率下降率达到了 26.1%,拉伸时变形局部化更严重,加工硬化能力更低,因此抗拉强度进一步降低。

5. 结论

(1) 7020 铝合金板材在室温 3.5%NaCl 溶液中恒载荷作用后的拉伸性能下降,抗拉强度和伸长率的下降率随应力值增加而不断上升,伸长率的下降率的增加幅度最高;屈服强度下降率在 200 MPa 和 250 MPa 加载时差别不大,在 300 MPa 加载时略有减小。

(2) 板材于 3.5%NaCl 溶液中经恒载荷作用后表面均出现了点蚀和晶间腐蚀,最大腐蚀深度随加载应力值增加而上升,拉伸时这些缺陷易产生应力集中,增加了裂纹源数量,是拉伸性能降低的主要原因。

(3) 应力值增加至 300 MPa,试样中局部晶粒中发生了位错的滑移,位错密度的增加稍微降低了屈服强度下降率,但试样表面的腐蚀损伤程度增加导致伸长率下降率达到了 26.1%。

基金项目

国家重点研发计划(2016YFB0300902), 国家留学基金委项目(201706375013)。

参考文献 (References)

- [1] Chubb, J.P., Morad, T.A. and Hockenhull, B.S. (1995) The Effect of Exfoliation Corrosion on the Fracture and Fatigue of 7178T6 Aluminum. *International Journal of Fatigue*, **17**, 49-54. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(95\)93050-C](https://doi.org/10.1016/0142-1123(95)93050-C)
- [2] 安国锋, 吕胜利, 张伟, 等. LC4 铝合金结构腐蚀损失剩余强度预测[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 777-780.
- [3] 张恩山, 郭东旭, 王燕昌, 等. 腐蚀环境中铝合金材料力学性能退化研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 23-26.
- [4] 廖文博, 刘心宇, 刘胜胆, 等. 局部腐蚀对不同热处理状态 7055 铝合金拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8): 1855-1861.
- [5] 廖文博, 刘心宇, 刘胜胆, 等. 剥落腐蚀对 7055 铝合金板材力学性能的影响, 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2137-2141.
- [6] 祁星, 宋仁国, 祁文娟, 等. 7050 铝合金在 EXCO 溶液中的腐蚀与氢脆对拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(11): 2851-2856.
- [7] Polmear, I.J. (2006) *Light Alloys*. 4th Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [8] Liu, S.D., Chen, B., Li, C.B., et al. (2015) Mechanism of low Exfoliation Corrosion Resistance Due to Slow Quenching in High Strength Aluminium Alloy. *Corrosion Science*, **91**, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.11.024>
- [9] Li, D., Yin, B., Lei, Y., et al. (2016) Critical Quenching Rate for High Hardness and Good Exfoliation Corrosion. *Metals and Materials International*, **22**, 222-228. <https://doi.org/10.1007/s12540-016-5504-0>
- [10] Chen, J.Z., Zhen, L.Z. and Yang, S.J. (2009) Investigation of Precipitation Behavior and Related Hardening in AA 7055 Aluminum Alloy. *Materials Science and Engineering A*, **500**, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.065>
- [11] 冯迪, 张新明, 刘胜胆. 非等温回归再时效对 7055 铝合金中厚板的厚向组织及性能均匀性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3000-3010.
- [12] Bobby, K.M. and Raja, V.S. (2006) Hydrogen Embrittlement Susceptibility of over Aged 7010 Al Alloy. *Journal of Materials Science*, **41**, 5495-5499. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0287-1>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ms@hanspub.org