

Effect of Heat-treatment Processing on Mechanical Properties of Conductive Aluminum Alloys

Yuling Liu¹, Chen Wang², Xiuqing Zhang¹

¹East China University of Science and Technology, Shanghai

²Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy, Baiyin Gansu

Email: liuyulingchn@163.com, zhangxq@ecust.edu.cn

Received: Aug. 28th, 2019; accepted: Sep. 12th, 2019; published: Sep. 19th, 2019

Abstract

Conductive aluminum alloys have become one of the research hotspots in the area of conductive materials because of its light weight, good conductivity and low cost. In this paper, we prepared Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B alloy, and studied the effect of heat-treatment processing parameters on mechanical properties of the alloys. The results indicated that the strength of the alloys increased with the increase of solution temperature, solution time, aged temperature and aged time, and it reached the highest value quickly. Then the strength decreased with improvement of those parameters above on the contrary. At last, solution at 440°C for 12 h, and aged at 205°C for 16 h was gained as optimal heat-treatment processing. Data in this research will provide support for application of electrical aluminum alloys.

Keywords

Conductive Aluminum Alloys, Mechanical Properties, Solution Treatment, Aging Treatment

热处理工艺对导电铝合金力学性能的影响

刘玉玲¹, 王 晨², 张修庆¹

¹华东理工大学, 上海

²西北矿冶研究院, 甘肃 白银

Email: liuyulingchn@163.com, zhangxq@ecust.edu.cn

收稿日期: 2019年8月28日; 录用日期: 2019年9月12日; 发布日期: 2019年9月19日

摘 要

导电铝合金以其质量轻, 导电性能好, 成本低等优点, 成为了目前导电材料领域的研究热点之一。本文

制备了新型Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B合金, 讨论了热处理工艺参数对其力学性能的影响规律。研究表明: 随固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间的增加, 合金的强度都随之增加, 并达到一个最大值。随后, 随这些工艺参数的增加, 材料性能反而降低。由此, 得到了合金的最佳热处理工艺为在440℃固溶12小时, 水淬后在205℃时效16小时。本文的研究为导电铝合金的应用提供了数据支持。

关键词

导电铝合金, 力学性能, 固溶处理, 时效处理

Copyright © 2019 by author(s) 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

导电铝合金是电力行业应用最广泛的导电材料, 在世界范围内有很大的市场量。目前较为成熟的铝合金电工杆主要有 6201、6101、3003 等合金, 其具有导电性能好、质量轻、弧垂特性好等优点[1] [2] [3]。但是, 技术发展要求导电铝合金具有更高的强度和导电率。因此, 对高强高导铝合金的研究成为目前的研究热点之一。根据导电理论, 合金元素在基体中形成细小弥散的析出相时, 对合金的导电性能影响最小。Zr 合金元素在铝合金中可使退火态合金中的析出相更加细小、弥散, 显著提高退火态合金的力学性能[4] [5] [6]。在导电铝合金中, 通过适当的硼化处理, 可以使铝中的 Ti、V 等元素含量大幅度降低, 从而提高材料的导电性能和力学性能[7]。稀土元素也可以细化铝合金的铸态组织, 并和 Fe、Si 等元素结合生成了二元或三元稀土化合物相, 去除有害杂质元素, 净化合金[8] [9] [10] [11]。根据目前的研究, Zr、RE、B 等元素在铝合金中可以形成细小弥散析出相, 不仅可以对基体进行强化, 还可以在在一定程度上保证合金的导电性[12]。在这类铝合金中, 析出相的形态和分布对合金性能影响较大。所以对合金进行合适的热处理, 控制其析出相的尺寸、形态和分布, 可以有效控制材料的力学性能[13] [14] [15]。Huang 等人研究表明, 在 Al-Er-Zr 合金时效过程中, Zr 可以延缓析出相的长大速度, 使析出相细化, 从而提高材料性能[16]。因此, 本文制备了 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金, 讨论了固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间等热处理工艺条件对其力学性能的影响, 以获得最佳的热处理工艺参数。

2. 实验材料与方法

实验所用 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金是用纯度均大于 99.0%的 Al、Zr、RE 和 B, 按质量分数配比后, 进行感应熔炼, 合金熔炼后浇注成试块和标准试样, 然后在电阻加热炉中进行固溶 - 时效处理。采用 DLZ-35 中频感应加热设备, 振荡功率 35 KW, 冷却水压 0.2 MPa。选择 HB-3000 布氏硬度仪测定合金的硬度, 载荷 50 kg, 加载时间 30 s。试块大小为 $\Phi 20 \times 15$ mm 的圆柱体。每个样品的测试点不少于 5 个, 实验数据最终取该 5 点的平均值作为测定结果。利用 WRX-12-11 型卧式电阻加热炉对试块和标准试样进行固溶 - 时效处理。该过程在氮气保护, 真空度为 66.7 MPa 下进行。固溶温度为 420℃~460℃, 固溶时间为 2~60 h, 时效温度为 160℃~220℃, 时效时间为 0~60 h, 固溶后水淬冷却。合金力学性能测试在 Zwick T1-FRO20 电子万能材料试验机上进行, 应变速率为 0.5 mm/min。拉伸试验测试内容包括: 抗拉强度、屈服强度和延伸率。标准试样如图 1 所示。

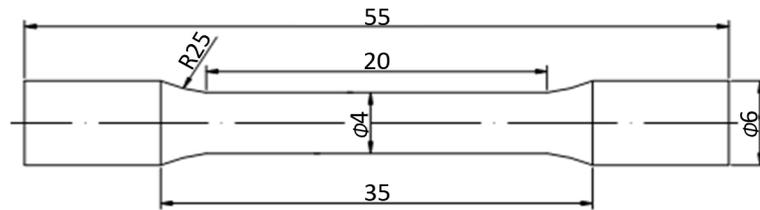


Figure 1. Dimension of samples for tensile test (mm)
图 1. 拉伸试样尺寸(单位为 mm)

3. 实验结果与讨论

3.1. 固溶温度对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

图 2 为固溶温度对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响。合金的力学性能拉伸测试状态为在不同固溶温度下固溶 12 h 后水冷, 不进行时效处理。从图中可以看出, 随着固溶温度的升高, Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金材料的拉伸强度增加, 延伸率增加。当固溶温度为 440℃ 时, 合金的拉伸强度和延伸率达到最大, 随着固溶温度继续升高, 合金的拉伸强度和延伸率反而下降。

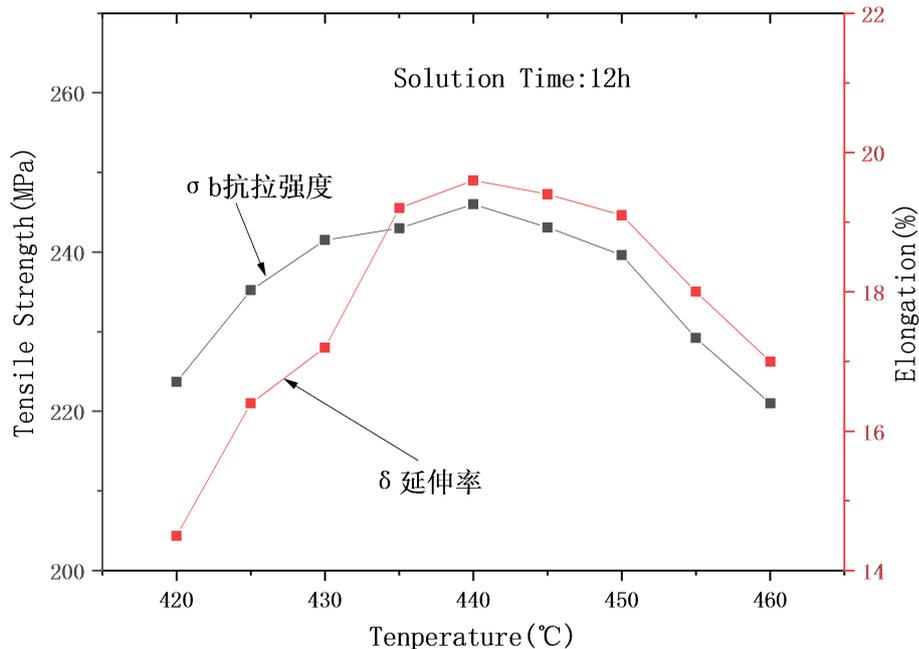


Figure 2. Effect of solution temperature on mechanical properties of Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B alloy
图 2. 固溶温度对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

在固溶过程中, Al_3Zr 相主要经历溶解和扩散两个阶段。在溶解过程中, Al_3Zr 相在细小处断裂, 分割成短的片段, 溶解阶段一般在较短的时间内完成; 固溶过程中的扩散过程主要是 Zr 在 Al 基体中的扩散和原子置换。由于析出相的生成, 在 Al 合金中引入了位错和界面, 促进了 Zr 在基体中的扩散, 使得 Zr 元素的扩散能力得到了很大的提高, 从而降低了 Al_3Zr 相固溶的阻力[17]。合金元素在基体中的扩散能力主要由扩散系数和扩散激活能来体现, 而扩散系数取决于扩散激活能和温度。扩散激活能与扩散系数之间有如下关系[18]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中, Q 为扩散激活能, D_0 为扩散常数, R 为气体常数, T 为温度。铝合金中的位错和界面降低了扩散激活能, 从而提高了扩散系数, 促进了 Zr 在 Al 基体中的扩散, 促进固溶。

随着固溶温度的升高, Zr 在 Al 基体中固溶度增加, Zr 可以充分固溶到 Al 基体中, 在随后的冷却过程中, 形成过饱和固溶体, 提高材料的强度。当固溶温度低时, Zr 在 Al 基体中固溶不完全, 有部分凝固形成的粗大 Al_3Zr 相存在, 降低了材料强度。当固溶温度过高时, 会引起铝基体晶粒长大, 造成晶粒粗化, 从而降低材料强度。对于 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金, 固溶温度设为 440°C 。

3.2. 固溶时间对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

图 3 是固溶温度为 440°C 时, 固溶时间对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响。铝合金的测试状态为在 440°C 时固溶不同时间后进行水冷, 不进行时效处理。从图 3 中可以看出, 对于 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金, 随着固溶时间的增加, 合金的强度增加, 延伸率增加。但当固溶时间达到 12 h 后, 延长固溶时间, 合金的延伸率和强度反而降低。

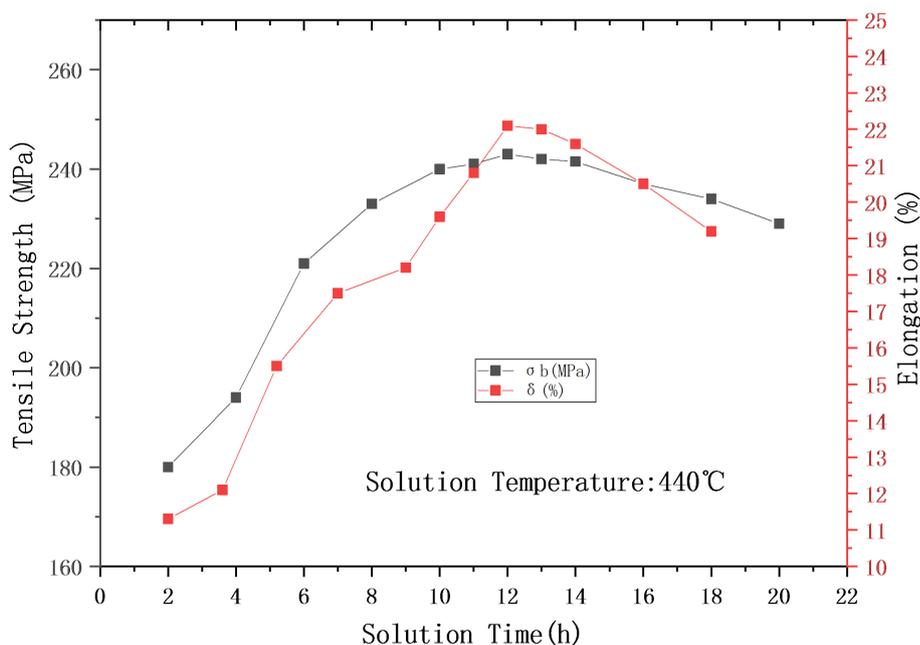


Figure 3. Effect of solution time on mechanical properties of Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B alloy
图 3. 固溶时间对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

在铝合金中, 随着固溶时间的延长, Zr 在 Al 基体中固溶度增加, 充分固溶到 Al 基体中, 在随后的冷却过程中, 形成过饱和固溶体, 提高材料的强度。当固溶时间过短时, Zr 在 Al 基体中固溶不完全, 有部分凝固形成的粗大 Al_3Zr 相存在, 降低了材料强度。但长时间处于固溶温度下, 会导致铝基体晶粒长大, 造成晶粒粗化, 降低合金强度。对于 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金, 固溶时间选择为 12 h。

3.3. 时效时间对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

图 4 是时效时间对纯铝和 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金材料硬度的影响。处理状态为在 440°C 固溶 12 h 后水冷, 然后在 200°C 时效。随着时效时间的延长, 纯铝和 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金的硬度都大幅度增加, 但是当时效达到一定程度后, 时效时间继续延长, 材料的硬度反而会下降。Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金在 12 h 时达到时效硬化峰值, 而纯铝在 16 h 达到时效硬化峰值。

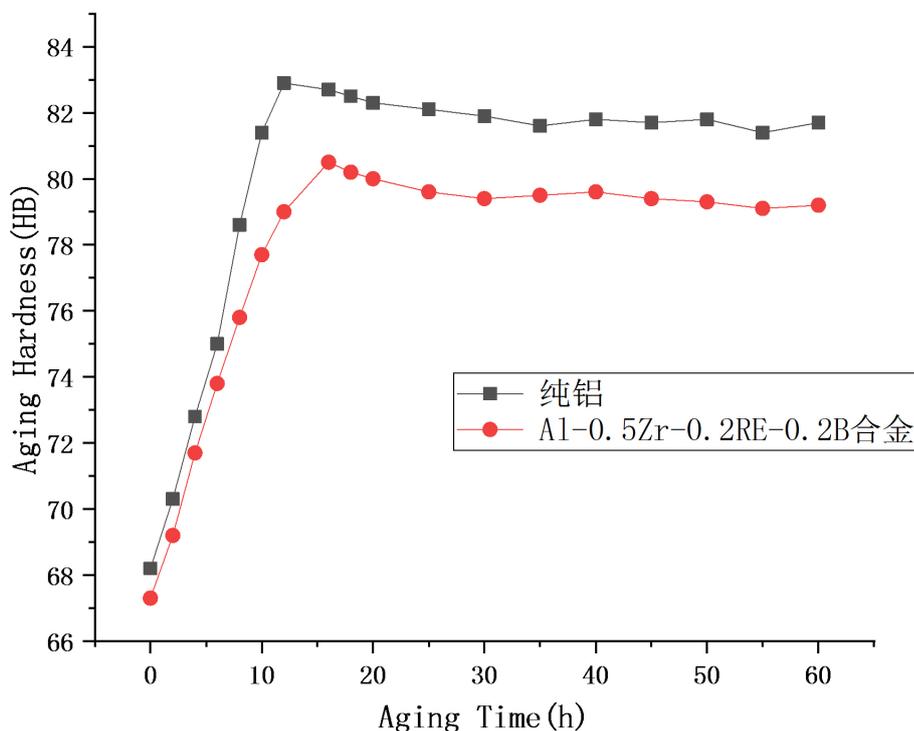


Figure 4. Effect of aging time on hardness of material at 200°C

图 4. 在 200°C 下时效时间对材料硬度的影响

图 5 为 440°C 固溶 12 h, 时效温度为 200°C 后, 时效时间对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响。从图中可以看出, 随着时效时间的增加, Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金的延伸率持续降低, 但是合金的拉伸强度增加, 当时效时间达到 12 h 时, 铝基合金的拉伸强度达到最大。继续进行时效处理, 合金的拉伸强度降低。

Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金中, Al_3Zr 时效沉淀相析出, 提高了材料的硬度和强度。所以随时效的进行, 纯铝和 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金的硬度增加。当出现时效硬化峰后, 继续进行时效处理, 会导致晶粒的粗化和析出相的聚集长大, 从而降低材料的硬度。合金的力学性能与合金的显微组织有着密切的联系。时效处理时, 时效阶段的析出相(主要是 Al_3Zr 相)强化了合金基体组织, 从而合金抗拉强度得到大幅提高。随着时效时间的延长, Al_3Zr 析出相数量增加, 对合金的强化效果加强。时效处理 16 h 后, Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金的抗拉强度却有所下降。综合分析, 对于 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金而言, 时效时间选择为 12 h。

3.4. 时效温度对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

图 6 为 440°C 固溶 12 h, 时效 12 h 状态下, 时效温度对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响。从图中可以看出, 对于 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金, 时效温度影响合金的强度和延伸率。随着时效温度的升高, 合金的强度增加, 延伸率增加, 而且延伸率增加明显。在时效温度为 205°C 时, 合金的强度达到最大。当时效温度超过 205°C 后, 随着时效温度的升高, 合金的延伸率和强度都有所降低。

文献认为, 由金属间化合物和合成和析出相的析出, 使得合金内部的能量或者晶体缺陷数量增加, 主要认为是由于位错密度的增加和界面数量的增多[19]。一方面铝合金存在的各种缺陷中产生了大量的非均匀形核部位, Al_3Zr 时效沉淀相的析出, 同时降低了 Al_3Zr 时效沉淀相形成时所需的激活能; 另一方面, 原子可通过缺陷进行短程扩散, 扩散速度加快, 因而促进了析出相的形核和长大。具体表现为, 微观上

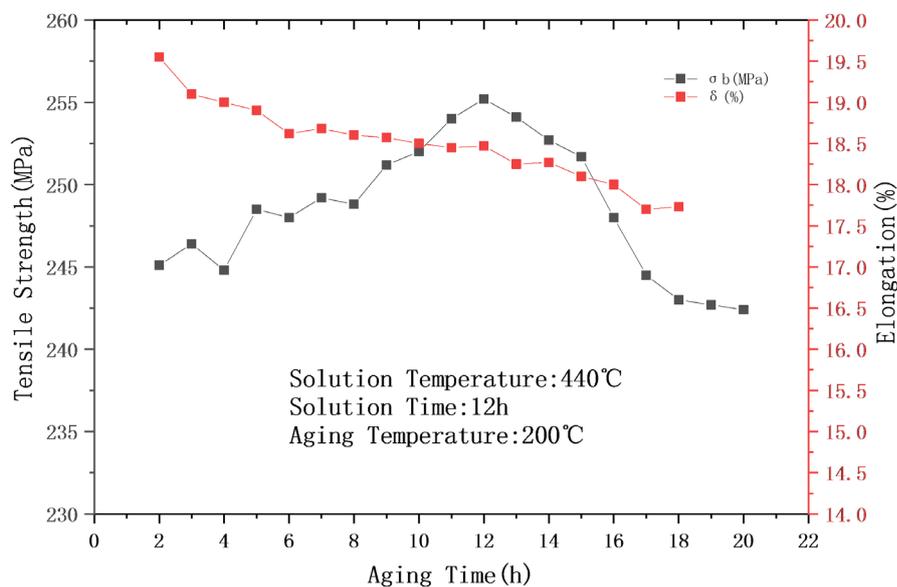


Figure 5. Effect of aging time on mechanical properties of Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B alloy

图 5. 时效时间对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

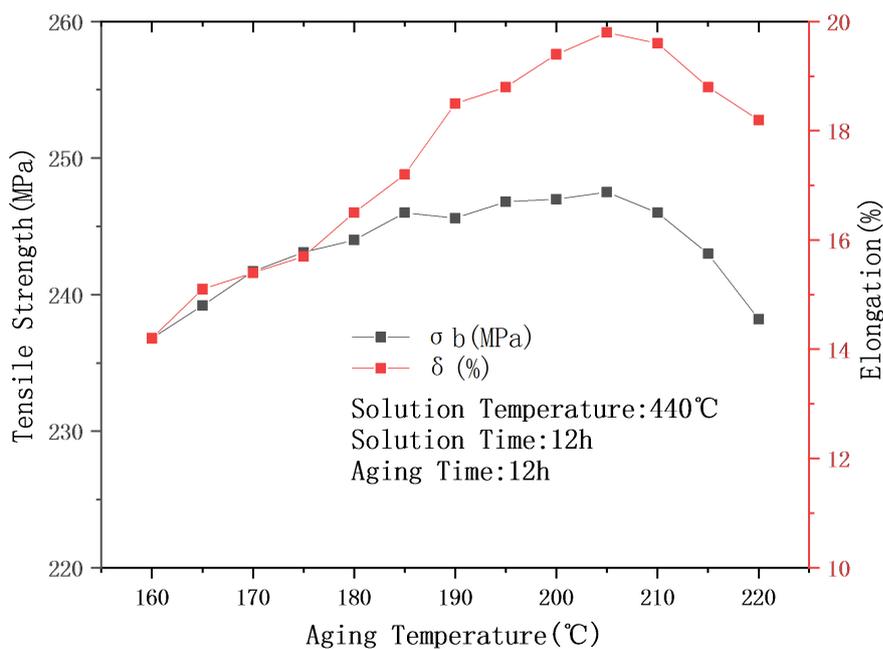


Figure 6. Effect of aging temperature on mechanical properties of Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B alloy

图 6. 时效温度对 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金力学性能的影响

Al_3Zr 时效沉淀相的析出加快, 宏观上 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金硬化速度提高。随着时效温度的升高, 合金中析出相所占比例增大, 合金的强度增加。但是当时效温度达到 205°C 时, 继续升高时效温度会导致 Al_3Zr 析出相快速长大粗化, 从而降低材料强度[20]。对于 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 合金, 时效温度选择为 205°C。

3. 结论

本文制备了新型的 Al-0.5Zr-0.2RE-0.2B 导电合金, 研究了固溶-时效处理工艺参数对合金力学性能的影响规律。研究表明:

1) 随固溶温度的升高和固溶时间的延长, 合金元素在铝基体中固溶充分, 合金的强度提高, 塑性提高。在固溶温度为 440℃时, 固溶时间为 12 h 时合金的强度和塑性达到最高。此后固溶温度继续升高, 固溶时间继续延长, 合金中析出相逐渐变得粗大, 合金的强度和塑性反而降低。

2) 随时效时间的延长, 时效温度的升高, 合金中析出相数量增加, 合金的强度、硬度都大幅度增加。在时效时间为 12 h, 时效温度为 205℃时, 合金的强度达到最大。此后, 时效时间继续延长, 时效温度的升高, 材料的强度、硬度反而会下降。

3) 在本实验范围内, 合金的最佳热处理工艺为在 440℃固溶 12 h, 水淬后在 205℃时效 12 h。

参考文献

- [1] 刘东雨, 侯世香, 刘静静, 等. 中强度全铝合金导线的发展[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(2): 25-28.
- [2] 孙睿, 庆毅, 庄景巍, 等. 铝合金及铝基复合材料导电性能的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(2): 9-15+37.
- [3] 章德胜, 刘平, 刘新宽, 等. 高导电率、高强度耐热铝合金导体材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 24-27.
- [4] Zhang, J.C., Ding, D.Y., Zhang, W.L., *et al.* (2014) Effect of Zr Addition on Microstructure and Properties of Al-Mn-Si-Zn-Based Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **24**, 3872-3878. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63545-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63545-7)
- [5] 孙彦华, 杨钢, 胥福顺, 等. 金属元素与稀土复合添加对铝合金性能影响的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(7): 15-17.
- [6] 侯雅尘, 杨昇, 蔡彬, 等. Er、Zr、B 对耐热导电铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(5): 550-553.
- [7] 张强, 郭锋, 李志强, 鲍永强. 硼化处理对导电铝 Ti、V 含量以及性能影响的研究[J]. 铸造技术, 2007, 28(10): 1338-1340.
- [8] 王庆良, 郑雪萍. 稀土导电铝合金的铸态组织和相组成[J]. 稀土, 1998, 15(1): 53-56.
- [9] 邵明星, 马永泉, 张鸿武. 稀土 Er 对 6201 导电铝合金微观组织和性能的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2018, 46(6): 13-18.
- [10] 程晓敏, 韩加强, 喻国铭, 等. Ce 对导电用 6063 铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 41(20): 38-41+46.
- [11] 李思. Si、Mg、Fe 含量对 6063 铝合金抗拉强度、导电性能的影响[J]. 电工材料, 2019(2): 3-6+17.
- [12] Oladeji, F., Rachel, C., Violet, T., Sanders, P.G. and Odegard, G.M. (2019) Investigation of Al-Zn-Zr and Al-Zn-Ni alloys for High Electrical Conductivity and Strength Application. *Materials Science and Engineering: A*, **743**, 785-797. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.111>
- [13] 郑振兴, 丁霞, 王景辉, 等. 时效工艺对熔铸制备的导电铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 831-833.
- [14] 菅晓君, 张明山, 王俊升. 热处理工艺对 6061 铝合金硬度和导电率的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(1): 83-90.
- [15] Pankade, S.B., Khedekar, D.S. and Gogte, C.L. (2018) The Influence of Heat Treatments on Electrical Conductivity and Corrosion Performance of AA7075-T6 Aluminium Alloy. *Procedia Manufacturing*, **20**, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.007>
- [16] Huang, H., Wen, S.P., Gao, K.Y., Wang, W. and Nie, Z.R. (2013) Age Hardening Behavior and Corresponding Microstructure of Dilute Al-Er-Zr Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, **44**, 2849-2856. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1600-z>
- [17] Wang, F., Qiu, D., Liu, Z.L., *et al.* (2014) Crystallographic Study of Al₃Zr and Al₃Nb as Grain Refiners for Al Alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **24**, 2034-2040. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63309-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63309-4)
- [18] 胡庚祥, 蔡珣. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [19] Song, Y. and Baker, T.N. (1995) A Calorimetric and Metallographic Study of Precipitation Process in AA6061 and Its Composites. *Materials Science and Engineering A*, **201**, 251-260. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09781-3](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09781-3)
- [20] Nardone, V.C. and Prewo, K.W. (1987) On the Strength of Dislocation Silicon Carbide Reinforced Aluminum Composites. *Scripta Metallurgica*, **20**, 43-48. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(86\)90210-3](https://doi.org/10.1016/0036-9748(86)90210-3)