

稀土元素钇及热处理对ZL101铝合金组织与力学性能的影响

王舒琪, 曾丽君, 陈舒宇, 郭正华, 刘大海, 杨亮*

南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌

收稿日期: 2023年12月21日; 录用日期: 2024年1月19日; 发布日期: 2024年1月29日

摘要

本文研究了稀土元素钇(Y)和固溶处理对Al-Si-Mg系ZL101微观组织以及力学性能的影响。结果表明, 添加0.5%稀土Y可使合金内粗大的 α -Al转变为均匀珊瑚状, 发挥了明显的变质作用, 同时可明显降低合金的抗拉强度和硬度, 但对伸长率的提升并不显著。在固溶温度为525°C和时效温度为170°C时, 依次对添加0.5% Y的ZL101进行1 h、2 h、3 h的固溶 + 时效处理。固溶 + 时效处理1 h时, 珊瑚状 α -Al变得粗大, 共晶硅从过饱和固溶体中析出, ZL101的抗拉强度和伸长率明显提高。随着热处理时间的增加, 共晶硅的形状逐渐粗化为长条状, 拉伸断口解理断裂程度增加, 力学性能逐渐下降。

关键词

ZL101, 稀土元素, 固溶时效, 微观组织, 力学性能

The Effect of Rare Earth Element Yttrium and Heat Treatment on the Structure and Mechanical Properties of ZL101 Aluminum Alloy

Shuqi Wang, Lijun Zeng, Shuyu Chen, Zhenghua Guo, Dahai Liu, Liang Yang*

College of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Received: Dec. 21st, 2023; accepted: Jan. 19th, 2024; published: Jan. 29th, 2024

Abstract

This article investigates the effects of rare earth element yttrium (Y) and solid solution treatment

*通讯作者。

文章引用: 王舒琪, 曾丽君, 陈舒宇, 郭正华, 刘大海, 杨亮. 稀土元素钇及热处理对 ZL101 铝合金组织与力学性能的影响[J]. 材料科学, 2024, 13(1): 61-69. DOI: 10.12677/ms.2023.141009

on the microstructure and mechanical properties of the Al-Si-Mg ZL101 system. The results show that the addition of 0.5% rare earth Y can make the coarse α -Al in the alloy into a uniform coral shape, which plays an obvious metamorphic effect, and can significantly reduce the tensile strength and hardness of the alloy, but the increase of the elongation is not significant. When the solution temperature was 525°C and the aging temperature was 170°C, the ZL101 with 0.5% Y was treated with solution and aging for 1 h, 2 h and 3 h successively. After solution and aging treatment for 1 h, the coral-like α -Al became coarse, the eutectic silicon was precipitated from the supersaturated solid solution, and the tensile strength and elongation of ZL101 were significantly improved. With the increase of heat treatment time, the shape of eutectic silicon gradually coarsened into long strips, the tensile cleavage fracture degree increased, and the mechanical properties gradually decreased.

Keywords

ZL101, Rare Earth Element, Solution Aging, Microstructure, Mechanical Property

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

Al-Si 合金由于其优异的铸造性、高比强度、廉价的制造工艺和高温下良好的机械性能，常作为铸造铝合金应用于航空航天和汽车工业等诸多领域[1] [2]。在一般铸造条件下，ZL101 的组织往往存在大量粗大脆性的板条状、针状共晶硅，因此使得铸造合金的力学性能较差[3]。研究表明，淬火[4] [5]、热处理[6] [7]、外加磁场[8] [9] [10]、添加化学元素[11]等方法能有效改善铸造铝合金的机械性能。其中，比较常用的方法是添加化学元素，而稀土元素(例如，镧 La、铈 Ce、钇 Y 和钕 Nd)的添加又是应用最为广泛的[12] [13]。郑志强等人[14]研究了稀土元素 Ce、La 对 ZL101 合金的影响，发现稀土元素阻碍了 α -Al 相的生长，细化了晶粒。Knuutinen 等人[15]研究了稀土 Y、Yb、Ca、Ba 对 A356 的变质作用，发现 Y 和 Yb 会使共晶硅的组织形态转变成盘状，而 Ca 和 Ba 可使组织转变为纤维状。张赛楠等人[16]研究了稀土元素 La 和 Ce 对 ZL201 铝合金微观组织和抗拉强度的影响，适量稀土的添加能够细化铝合金基体组织和缩短枝晶间距，添加 0.2% La 和 0.6% Ce 的 ZL201 比未添加时的抗拉强度分别提高了 10.7% 和 19.3%。

林枫等人[17]研究了固溶和时效对压铸铝合金 ZL102 的影响，发现时效处理能够兼顾合金的力学性能与导热性能。范耀强[18]研究了热处理工艺对 ZL114A 铝合金的影响，该合金在 530°C 下固溶 12 h、175°C 下时效 9 h 时，具有较高的抗拉强度，同时保持良好的韧性。康福伟等人[19]在 505~550°C 固溶温度和 140~170°C 时效温度范围内研究了固溶温度和时效温度对 ZL114A 组织和力学性能的影响，发现在 535°C/12 h (60°C 水冷) + 155°C/6 h (空冷) 热处理工艺下 ZL114A 综合力学性能最佳。肖远伦等人[20]研究了淬火介质对 ZL114A 铝合金性能和组织的影响，发现水溶性聚合物 PAG 相比水和聚乙烯醇具有更好的淬火效果；当 PAG 的使用温度为 40°C、质量分数为 15% 时，工件的淬火质量相对最好。因此，为进一步改善 ZL101 合金的微观组织与力学性能，本研究尝试通过添加稀土元素 Y 和不同工艺的热处理，并探究二者对 ZL101 组织和性能的影响规律及机理。本项工作将有助于为改善该合金的组织、使用性能、生产工艺和降低生产成本等方面提供理论指导。

2. 试验材料及方法

本次实验所选用的材料为 ZL101 合金(化学成分见表 1)。针对原始 ZL101 合金, 将采用两种处理方法以改变其微观组织和性能: ① 在真空熔炼炉中熔炼 ZL101 铝合金锭, 熔炼温度为 800℃。待金属液呈熔融状态后, 降温至 730℃加入 Al-Y 二元中间合金进行变质处理。同时, 充入高纯氩气除气。待变质剂充分溶解, 在 710℃静置 20 分钟后取料扒渣, 最后浇注得到尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的 0.5% Y 含量 ZL101 铝合金铸件; ② 对于 Y 处理后的 ZL101 (即 0.5% Y + ZL101), 再进行不同工艺的固溶 + 时效热处理, 固溶温度和时效温度分别设为 525℃和 170℃, 固溶时间和时效时间依次为 1 h、2 h 和 3 h, 固溶和时效之后分别水冷和空冷处理, 具体热处理方案见表 2。

Table 1. Chemical composition of ZL101 aluminum alloy

表 1. ZL101 铝合金的化学成分

元素	Si	Mg	Cu	Mn	其他	Al
含量(wt%)	6.5~7.5	0.25~0.45	< 0.2	< 0.35	≤ 0.1	剩余

Table 2. Experimental schemes of heat treatment

表 2. 热处理工艺的试验方案

编号	固溶处理	时效处理
1	525℃ × 1 h, 水冷	170℃ × 1 h, 空冷
2	525℃ × 2 h, 水冷	170℃ × 2 h, 空冷
3	525℃ × 3 h, 水冷	170℃ × 3 h, 空冷

采用 MR5000 型金相显微镜观察试样的微观组织, 所使用的腐蚀剂为 1% HF 溶液, 腐蚀时间为 20~25 s。采用 HV-1000IS 型维氏显微硬度计表征试样的硬度, 载荷设为 200 g, 保持负载 20 s。利用 INSTRON8801 型电液伺服疲劳试验机测量试样的拉伸性能, 拉伸样品尺寸如图 1 所示, 拉伸速率均为 1 mm/min。利用 SU1510 型钨灯丝扫描电子显微镜观察断口形貌, 加速电压为 20 KV。

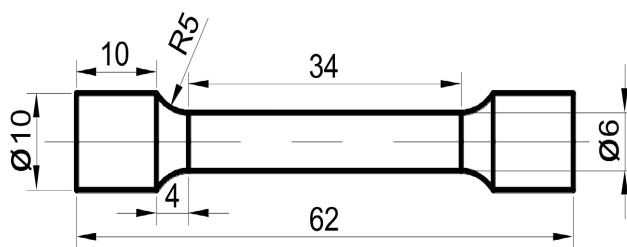


Figure 1. Schematic diagram of tensile specimen

图 1. 拉伸试样尺寸示意图

3. 实验结果与分析

3.1. 微观组织分析

图 2 所示为原始 ZL101 和 0.5% Y + ZL101 的微观组织。由图 2 可知, 铸态下 ZL101 和 0.5% Y + ZL101 微观组织都是由 α -Al (明亮部分) 和共晶硅 (颜色较暗部分) 组成。对比图 2(a) 和 2(b) 可发现, 铸态下 ZL101 的 α -Al 尺寸不均匀且部分较为粗大, 共晶硅分布于枝晶之间; 当加入 0.5% Y 后, α -Al 的形态发生显著

变化,粗大的 α -Al 变成珊瑚状,晶粒间距增大,共晶硅数量增加且在基体间均匀分布。稀土 Y 对 α -Al 起细化作用,发挥了明显的变质作用。

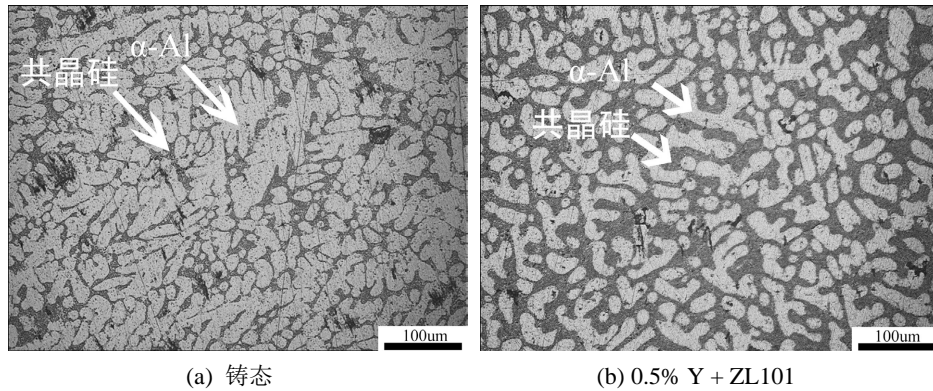


Figure 2. Microstructure of ZL101 and 0.5% Y + ZL101
图 2. ZL101 和 0.5% Y + ZL101 的显微组织

图 3 所示分别为 0.5% Y + ZL101 及固溶 + 时效 1 h、2 h 和 3 h 状态下的显微组织。对比图 3(a)和 3(b)可看出,经过固溶 + 时效 1 h 后, α -Al 由珊瑚状变得粗大,晶界处共晶硅大部分呈颗粒状,少数短杆状,组织中细小的共晶硅会从过饱和固溶体中析出,并均匀弥散的分布于基体中。由图 3(b~d)可看出,当固溶时效 2 h 和 3 h 后, α -Al 尺寸与固溶时效 1 h 无明显差别,但分布更为杂乱,颗粒状的共晶硅逐渐转细长的条状,且有部分共晶硅变得粗大。当时效时间增加时, Al 基体中析出细小弥散的 β , 共格强化相对位错阻碍运动能力减弱,影响共晶硅的分布[21]。

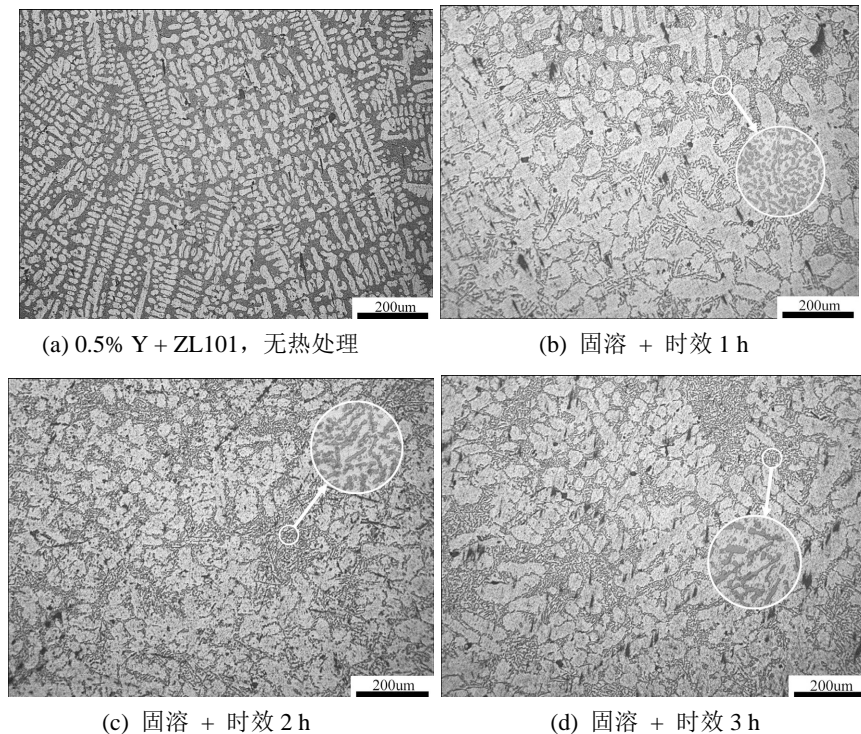


Figure 3. Microstructure for 0.5% Y + ZL101 under different heat treatments
图 3. 不同热处理工艺所得 0.5% Y + ZL101 显微组织

3.2. 力学性能分析

图 4 为初始 ZL101 和 0.5% Y + ZL101 应力 - 应变曲线图。由图可知, 初始和添加 0.5% Y 的 ZL101 抗拉强度分别为 152.1 MPa 和 118.8 MPa, 而伸长率分别为 2.58% 和 2.89%。与初始材料相比, 经过 Y 变质后合金的抗拉强度下降(约为 22%), 但其伸长率提升并不显著。这表明添加 0.5% 稀土元素 Y 能够降低合金的强度, 但对塑性的提高非常有限。导致强度下降的原因可能是添加 0.5% 稀土元素 Y 会合金大块相的聚集, 易导致 0.5% Y + ZL101 合金拉伸过程裂纹的形成。相对而言, 石博等人[22]发现添加 0.3% Sc 后 ZL101 的抗拉强度和伸长率分别为 197.3 MPa 和 11.06%, 也即强度和塑性均得到提高。由此可见, 不同稀土元素对 ZL101 组织与性能的影响可能显著不同。结合图 2 中微观组织可知, 变质后合金的组织更为粗大, 且共晶硅的分布相对更为均匀, 从而造成了强度降低而伸长率升高。同时, 从图 4 中可看出, 当应变达到 0.015~0.025 范围内, 应力 - 应变曲线出现微小波动, 这可能是由于合金内一些气孔等铸造缺陷导致的。

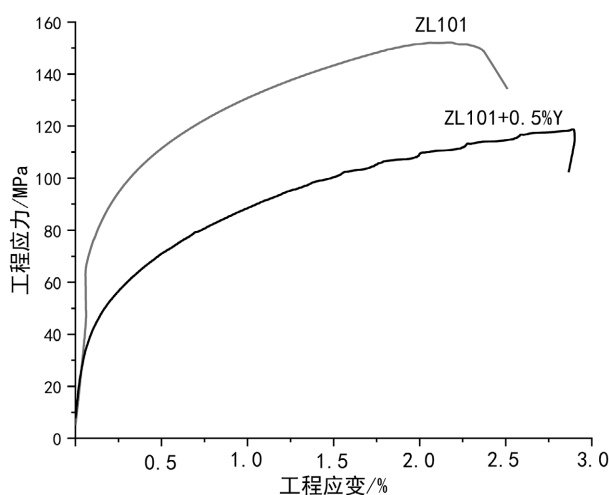


Figure 4. Stress-strain curve of ZL101 and 0.5% Y + ZL101

图 4. ZL101 和 0.5% Y + ZL101 的应力 - 应变曲线

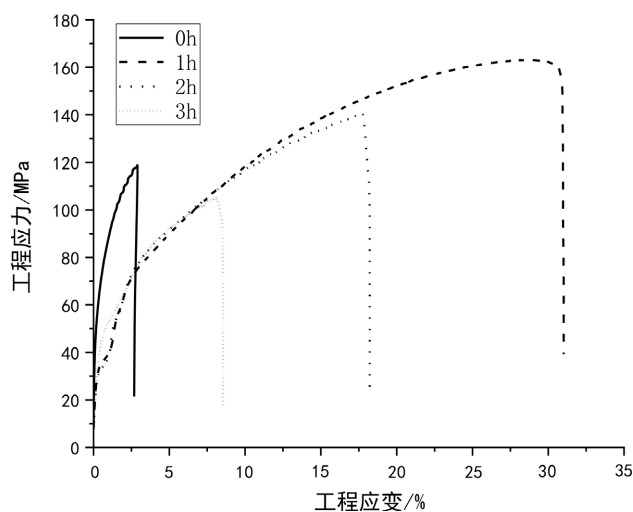
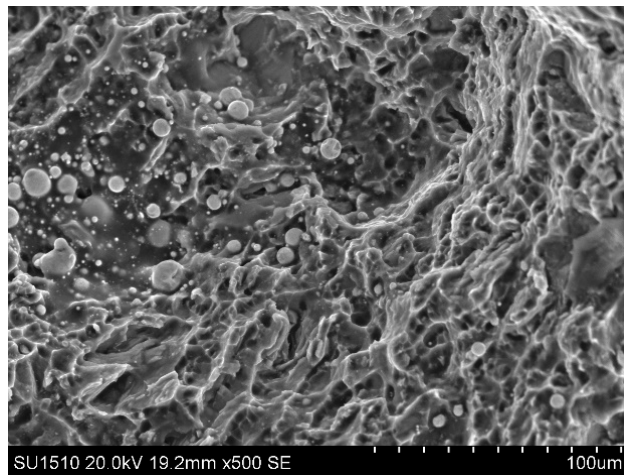


Figure 5. Stress-strain curves of 0.5% Y + ZL101 after different heat treatments

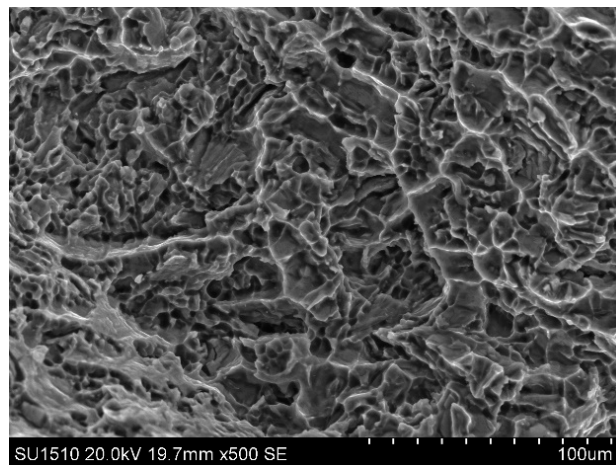
图 5. 不同固溶 + 时效时间下 0.5% Y + ZL101 的应力 - 应变曲线

图5为不同热处理下0.5% Y + ZL101应力-应变曲线。由图可知, 固溶 + 时效1 h、2 h和3 h后的抗拉强度分别为163.1 MPa、140.3 MPa和105.2 MPa。三种状态对应的伸长率分别为31.0%、18.2%和8.5%。显然, 与未进行热处理0.5% Y + ZL101合金相比, 固溶 + 时效1 h后合金的强度提升37.2%, 伸长率提升约10倍, 也即塑性得到极为显著的改善。随着固溶时效时间的延长, 抗拉强度逐渐下降, 伸长率明显减低。经固溶 + 时效1 h处理后, 细小的共晶硅会从过饱和固溶体中析出, 并均匀弥散的分布于基体中, 对材料的强度和伸长率有明显提升的, 但随着固溶 + 时效时间的增加, α -Al基体分布趋于杂乱, 且共晶硅由颗粒状变得粗大, 导致了0.5% Y + ZL101综合力学性能下降。这说明适当时间的固溶时效热处理工艺可同时改善ZL101的强度和塑性。

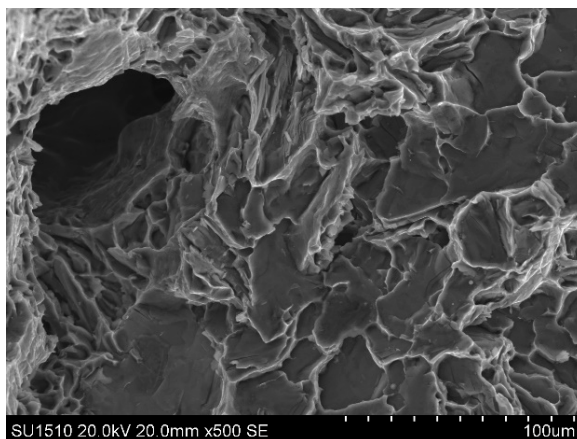
由拉伸性能测试可知, 热处理对ZL101的强度和塑性有明显的影响, 在固溶时效1 h下添加0.5% Y + ZL101的力学性能显著改善。因此, 有必要进一步观察热处理对ZL101断口形貌的影响。图6提供了不同热处理下0.5% Y + ZL101合金的断口形貌。由图可知, 在固溶 + 时效1 h后, 断口组织中有许多细小的韧窝; 当固溶 + 时效2 h时, 断口组织中细小的韧窝减少, 出现部分平滑而不规则的平面; 固溶 + 时效3 h时, 断口组织中存在大量尺寸较大的光滑解理面, 仅有少量韧窝。显然, 随着固溶 + 时效时间的增加, 合金的韧性断裂程度不断减少, 而解理断裂程度增加。因此固溶 + 时效1 h表现出最好的塑性, 随着热处理时间的增加, 合金的抗拉强度和伸长率均降低。



(a) 固溶 + 时效1 h



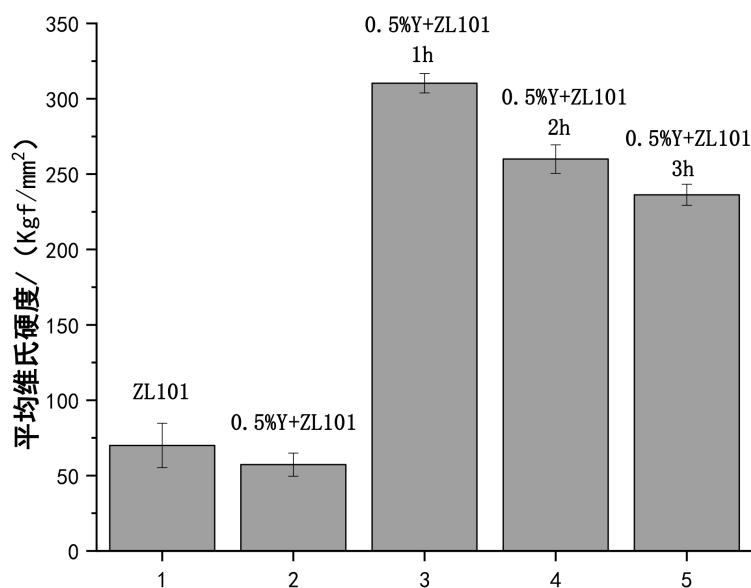
(b) 固溶 + 时效2 h



(c) 固溶 + 时效 3 h

Figure 6. Fracture morphologies of 0.5%Y + ZL101 after different heat treatments**图 6.** 不同热处理 0.5%Y + ZL101 合金的断口形貌

图 7 给出了初始状态、变质处理、变质处理 + 固溶 + 时效处理 1 h、2 h 和 3 h 后 ZL101 的硬度值，分别图中对应 1~5 号样品。从图可看出，铸态铝合金的硬度处于一个相对较低值，只有约 70 Kgf/mm²。当向其添加 0.5% Y 时，合金的硬度为 57.3 Kgf/mm²，下降约 18%。结合上文图 5 中分析可知，添加稀土后材料的塑性可以得到改善，但其硬度和强度均有所下降。变质处理加固溶时效 1 h、2 h 和 3 h 后的硬度分别为 310.3 Kgf/mm²、260 Kgf/mm² 和 236.3 Kgf/mm²，1 h 固溶时效相比初始状态提升约 342%，经固溶时效处理后的 ZL101 其硬度显著提高。结合上文和图 7 分析可知，固溶时效热处理提高了合金的强度硬度，但随着固溶时效时间的延长，强化效果逐渐降低。

**Figure 7.** Comparison of hardness for ZL101 alloys under different conditions**图 7.** 不同状态下 ZL101 合金硬度的对比

4. 结论

- 1) 在铸造 ZL101 合金时加入 0.5% 的稀土元素 Y 后，粗大的 α -Al 转变为珊瑚状， α -Al 间距增大，共

晶硅数目增加, 其伸长率提高, 但抗拉强度和硬度降低, 说明稀土元素 Y 对 ZL101 合金起到细化作用, 发挥了明显的变质作用。

2) 固溶 + 时效 1 h 时, α -Al 由珊瑚状变得粗大, 共晶硅从过饱和固溶体中析出, 均匀弥散地分布于基体中。随着固溶时效时间逐渐延长, 颗粒状共晶硅发生钝化, 逐渐粗化成长条状。

3) 随着固溶时效时间延长, ZL101 铝合金的抗拉强度、塑性、硬度均随时间逐渐降低; 拉伸断口中, 韧性断裂减少, 解理断裂程度增加。固溶 + 时效 1 h 时, 具有最佳力学性能, 抗拉强度为 163.1 MPa, 伸长率为 31.0%, 硬度为 310.3 Kgf/mm²。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(52065045); 江西省教育厅科技项目(DA202203123)。

参考文献

- [1] Zamani, M., Dini, H., Svoboda, A., *et al.* (2017) A Dislocation Density Based Constitutive Model for As-Cast Al-Si Alloys: Effect of Temperature and Microstructure. *International Journal of Mechanical Sciences*, **121**, 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.003>
- [2] Chen, J., Wen, F., Liu, C., *et al.* (2021) The Microstructure and Property of Al-Si Alloy Improved by the Sc-Microalloying and Y₂O₃ Nano-Particles. *Science and Technology of Advanced Materials*, **22**, 205-217. <https://doi.org/10.1080/14686996.2021.1891841>
- [3] 檀廷佐. 变质及热处理对铸造铝硅合金组织及性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [4] Zhang, D.X., Chen, J., Wang, H.Z., *et al.* (2022) Effect of Quenching Water Temperature on Mechanical Properties of ZL101A. *Key Engineering Materials*, **922**, 117-122. <https://doi.org/10.4028/p-9m5ov7>
- [5] Kumar, S.R. and SreeArravind, M. (2022) Influence of Si Content on Fatigue Life for Heat Treated Cast Al-Si-Mg Alloy Using Different Quenching Technique. *Silicon*, **14**, 977-987. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00874-8>
- [6] Vandersluis, E. and Ravindran, C. (2020) Effects of Solution Heat Treatment Time on the As-Quenched Microstructure, Hardness and Electrical Conductivity of B319 Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **838**, Article 155577. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155577>
- [7] Bian, X. and Wang, W. (2000) Thermal-Rate Treatment and Structure Transformation of Al-13 wt.% Si Alloy Melt. *Materials Letters*, **44**, 54-58. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00011-2)
- [8] Zhang, S., Zhao, Y., Cheng, X., *et al.* (2009) High-Energy Ultrasonic Field Effects on the Microstructure and Mechanical Behaviors of A356 Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **470**, 168-172. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.02.091>
- [9] Zhang, Z., Li, J., Yue, H., *et al.* (2009) Microstructure Evolution of A356 Alloy under Compound Field. *Journal of Alloys and Compounds*, **484**, 458-462. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.125>
- [10] Jian, X., Xu, H., Meek, T.T., *et al.* (2005) Effect of Power Ultrasound on Solidification of Aluminum A356 Alloy. *Materials Letters*, **59**, 190-193. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.09.027>
- [11] Öztürk, İ., Ağaoglu, G.H., Erzi, E., *et al.* (2018) Effects of Strontium Addition on the Microstructure and Corrosion Behavior of A356 Aluminum Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **763**, 384-391. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.341>
- [12] Wang, J., He, S., Sun, B., *et al.* (2003) Grain Refinement of Al-Si Alloy (A356) by Melt Thermal Treatment. *Journal of Materials Processing Technology*, **141**, 29-34. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01007-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01007-5)
- [13] Liao, H., Sun, Y. and Sun, G. (2002) Correlation between Mechanical Properties and Amount of Dendritic α -Al Phase in As-Cast Near-Eutectic Al-11.6% Si Alloys Modified with Strontium. *Materials Science and Engineering A*, **335**, 62-66. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01949-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01949-9)
- [14] 郑志强, 熊新根, 陈克燕, 等. 稀土元素对 ZL101 合金中 α 相生长过程的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(3): 171-172.
- [15] Knuutinen, A., Nogita, K., McDonald, S.D., *et al.* (2001) Porosity Formation in Aluminium Alloy A356 Modified with Ba, Ca, Y and Yb. *Journal of Light Metals*, **1**, 241-249. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(02\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(02)00006-8)
- [16] 张赛楠, 潘利文, 罗涛, 等. 稀土 La 和 Ce 及超声处理对 ZL201 铝合金显微组织及抗拉强度的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(12): 11-14.

2018, 32(14): 2452-2457.

- [17] 林枫, 陆文兴, 吴孟武. 热处理对压铸铝合金 ZL102 力学及导热性能的影响[J]. 铸造, 2022, 71(6): 683-688.
- [18] 范耀强. ZL114A 合金热处理工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2015.
- [19] 康福伟, 李如一, 乔昕, 等. 热处理工艺对 ZL114A 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(1): 113-117.
- [20] 肖远伦, 赵强, 黄志伟, 等. 淬火介质对 ZL114A 铝合金性能、变形和组织的影响[J]. 精密成形工程, 2013, 5(5): 13-17.
- [21] 接金川. 钇元素对 ZL101A 合金组织和性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [22] 石博, 崔晓明, 王伟, 等. Sc 含量对 ZL101 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 41(6): 726-730.