DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.003

均匀化时间对 6082 铝合金显微组织及性能的影响

谢怡纯[1]，陈文琳[1]，潘琪琛[1]，段平起[1]，阮祥明[2]

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院，安徽 合肥 230009；2. 安徽生信新材料股份有限公司，安徽 宣城 242000)

摘　要：采用差热分析、光学显微镜、扫描电镜及硬度测试、电导率测试等方法，研究了均匀化时间对 6082 铸态合金显微组织和性能的影响。结果表明，经 550 ℃保温 8 h 均匀化处理，晶内偏析已经基本消除，非平衡共晶相几乎完全溶入基体，合金硬度达到峰值 70.02 HV，电导率为 37.59%IACS。继续延长保温时间，合金中第二相粗化，硬度下降，因此 6082 铝合金均匀化最佳工艺为 550 ℃×8 h。

关键词：6082 铝合金；均匀化处理；第二相

中图分类号：TG166　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2021)05-0342-04

Effect of Homogenization Time on Microstructure and properties of 6082 Aluminum Alloy

XIE Yichun[1], CHEN Wenlin[1], PAN Qichen[1], DUAN Pingqi[1], RUAN Xiangming[2]

(1. College of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Shengxin New Material Co., Ltd., Xuancheng 242000, China)

Abstract: The effects of homogenization time on the microstructure and properties of as-cast 6082 alloy were studied by DTA, optical microscopy, scanning electron microscopy, hardness test and electrical conductivity test. The results show that after the homogenization treatment at 550 ℃ for 8 h, the ingrain segregation is basically eliminated, the non-equilibrium eutectic phase is almost completely dissolved into the matrix, the hardness of the alloy reaches the peak of 70.02 HV, and the electrical conductivity is 37.59%IACS. The second phase coarsenes and the hardness decreases with the extension of holding time. The optimal homogenization process of 6082 aluminum alloy is 550 ℃ for 8 h.

Key words: 6082 aluminum alloy; homogenization treatment; second phase

6082 铝合金的主要合金元素为 Mg 元素和 Si 元素，主要强化相是 Mg_2Si 相，属于可热处理强化的铝合金，具有中等强度和良好的耐腐蚀性能、焊接性能[1]。6082 铝合金在汽车、船舶、轨道交通、建筑等行业均有广泛应用。均匀化处理是指将合金在一定的加热温度下保温一段时间的热处理工艺。合金经过均匀化处理后，非平衡共晶组织会减少甚至消除，其分布也会更加均匀，第二相的形貌和分布得到改善，铸造应力被消除，变形抗力减小，塑性得到提升[2-3]，因此均匀化处理是 6082 铝合金在进行塑性变形前一项重要的工艺流程。

由于实际生产中均匀化处理能耗较大，如何节能减排、降低成本是生产商广泛关注的问题。优化均匀化工艺参数要以合金的微观组织和性能为依据，通过研究不同参数条件下合金的成分分布、第二相和性能的变化规律改进生产工艺，对提高材料质量和节约生产成本都有重大意义[4]。均匀化处理的工艺参数有加热温度、保温时间和冷却方式。本文作者以 6082 铝合金为研究对象，研究不同的保温时间下，合金显微组织和性能的变化规律，旨在为 6082 铝合金铸锭均匀化工艺的制订提供理论基础和试验依据。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料

采用半连续水冷铸造方法制备 6082 铝合金铸锭，用直读光谱仪测得试验用 6082 铝合金铸锭主要化学成分 w(%)为：0.82 Mg，0.97 Si，0.45 Mn，0.16 Cr，0.094 Ti，0.083 Cu，0.16 Fe，Al 余量。

1.2　试验方法

利用 STA449F3 型同步热分析仪确定合金中

收稿日期：2021-03-11

基金项目：安徽省 2018 年度重点研究与开发计划项目(1804a09020073)

作者简介：谢怡纯(1997—)，女，安徽安庆人，硕士生. 研究方向：材料改性及热处理. 电话：18325666205，Email：xieyichun1997@163.com

通讯作者：陈文琳(1963—)，女，安徽安庆人，博士，教授. 研究方向：精密塑性成形研究. 电话：13505692392，Email：wlchen8761@126.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

低熔点共晶温度，所得 DSC（Differential scanning calorimetry 即差示扫描量热法）曲线如图 1 所示，在 575 ℃和 650 ℃出现了两个吸热峰，所以 575 ℃即为合金的低熔点共晶温度，650 ℃则是合金的熔点。低熔点共晶温度可以为均匀化温度的选择提供参考，通常将保温温度设定为低于合金中低熔点共晶温度 5~40 ℃[5]。由于试验合金在 570 ℃下保温 2 h 的金相组织中，晶粒交界处出现了三角形的复熔区，如图 2 所示，这是典型的过烧特征。因此本文设定合金的均匀化温度为 550 ℃，保温时间分别为 2、4、6、8、10、12 h，冷却方式为空冷。

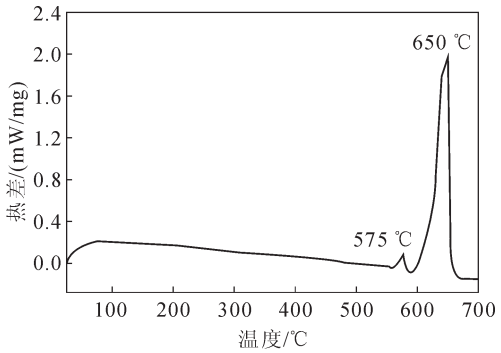


图 1 铸态铝合金的 DSC 曲线
Fig.1 DSC curves of as-cast aluminium alloy

将试样用金相砂纸打磨后进行机械抛光，再用 Keller 试剂（1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO_3）进行腐蚀。在金相显微镜和 Gemini 500 型热场发射扫描电子显微镜下对腐蚀后的试样进行显微组织观察。使用 MH-3L 型显微维氏硬度计进行显微硬度测试，加载载荷为 100 g，加载时间为 15 s。采用

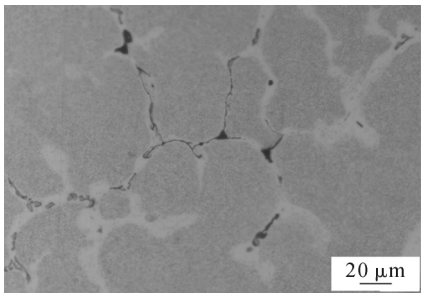


图 2 570 ℃保温 2 h 合金的金相组织
Fig.2 Microstructure of the alloy at 570 ℃ for 2 h

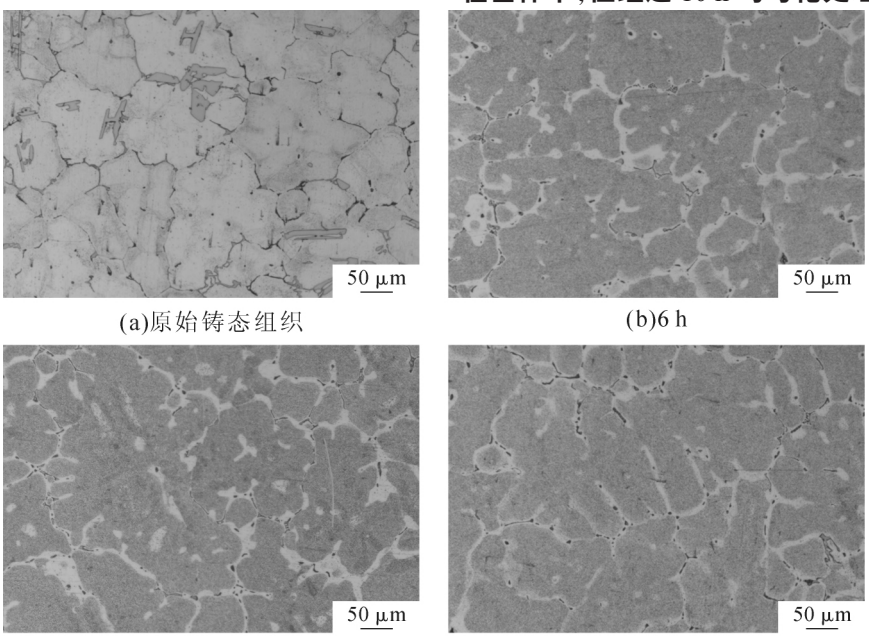
SZ-82 数字式四探针测试仪测试合金的电导率。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织分析

图 3 为试验合金原始铸态组织和在 550 ℃保温 6、8、10 h 的金相组织。对比原始铸态组织，可以看出经过 6 h 均匀化处理，非平衡共晶组织已经基本溶解，但仍然存在着一些沿晶界分布的细长针状相。保温 8 h 后，细长针状相基本已溶入基体或者球化成颗粒状。保温 10 h 后，合金组织中出现大量粗化的第二相，不均匀的分布在基体中。

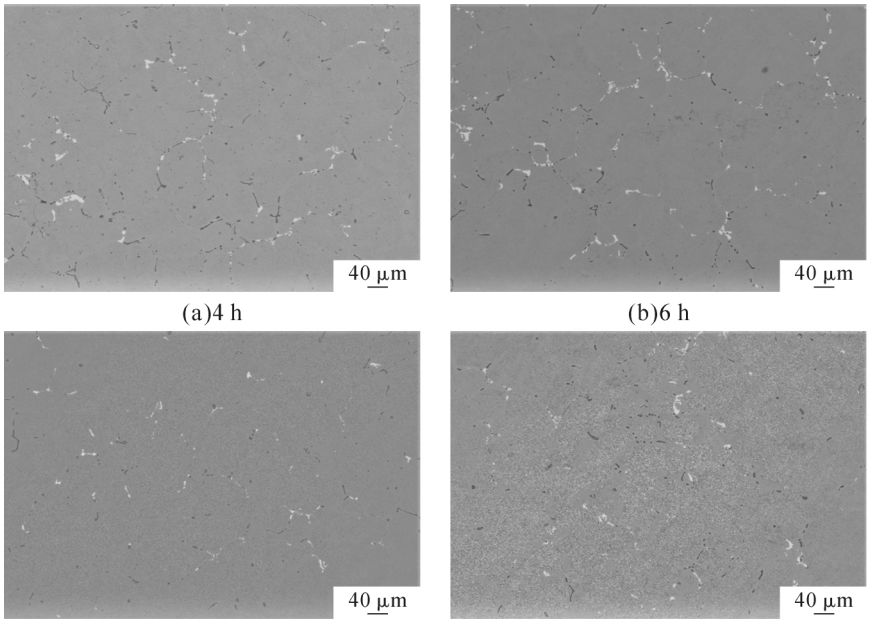
均匀化处理保温时间主要取决于非平衡相溶解及晶内偏析消除所需的时间，图 4 为试验合金在 550 ℃下保温 4、6、8、10 h 后的 SEM 图像，图中灰色部分为铝合金基体，白色部分为第二相。保温时间从 4 h 增加到 6 h，合金中聚集的链状相断裂成细长针状，增加保温时间至 8 h，第二相面积分数明显减少，细长针状相经过破碎球化，最终呈颗粒状均匀分布在基体中，但经过 10 h 均匀化处理第二相的面积分



(a)原始铸态组织　(b)6 h
(c) 8 h　(d)10 h

图 3 原始铸态组织和在 550 ℃保温 6 h、8 h、10 h 的金相组织
Fig.3 Microstructure of the original alloy and the alloys at 550 ℃ for 6 h, 8 h and 10 h

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)4 h (b)6 h

(c)8 h (d)10 h

图 4 不同均匀化时间下合金的第二相形态及分布

Fig.4 Morphology and distribution of the second phase of the alloy at different homogenisation time

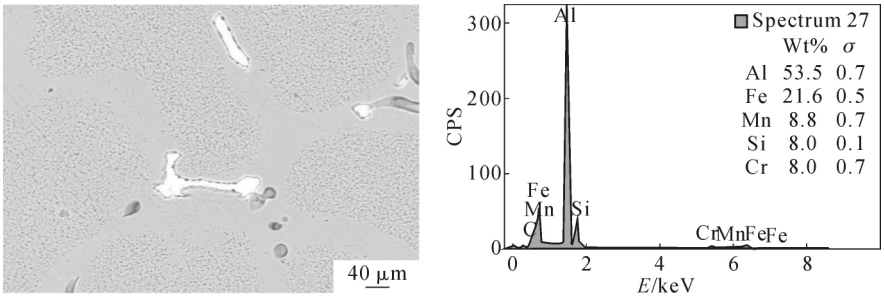
数反而增加。通过对组织中第二相形态和数量变化的分析，得出在保温时间 4~8 h，第二相面积分数的减少是因为可溶相回溶至基体。而继续延长保温时间第二相面积分数的增加，是因为保温 8 h 后合金中细长针状的 β 相几乎完全转变成颗粒状的 α 相，在继续保温的过程中，为了减少界面能，达到热力学更稳定的状态，这些颗粒状的 α 相便会聚集、粗化[6]。

图 5 为试验合金在 550 ℃保温 8 h 时，组织内残余第二相的 EDS 分析结果。发现经过 8 h 均匀化处理后，合金内部残留少量未完全球化的细长针状富铁相，这是因为可溶相在铝基体中的溶解度较高，可以很快发生回溶，而富铁相在铝基体中的溶解度很低，在 655 ℃也仅为 0.052%，主要发生转化相变[7-8]。对有非平衡过剩相的合金，均匀化保温时间主要以非平衡过剩相溶解所需时间为主 [9]，因此，试验合金的最佳均匀化制度为 550 ℃下保温 8 h 左右。

2.2 硬度和电导率测试

图 6 为试验合金硬度与均匀化时间的关系曲线，在试验参数范围内，合金的硬度随保温时间的增加，呈现先增大后减小的趋势，且在 8 h 达到了最大值 70.02 HV。在保温时间不超过 8 h 的范围，相对于保温 2 h 的合金，保温 4、6、8 h 后硬度分别提高了 5.12%、8.76%、15.24%，当保温时间超过 8 h 后，相对于保温 8 h 的合金，保温 10 h、12 h 后硬度分别降低了 10.17%、14.17%。误差棒的高度反映出每组所测 10 个硬度数值的标准差，标准差越小表明这组数据波动越小，即成分更均匀。从图中可以看出，在保温 8 h 时硬度的标准差最小，说明此时合金均匀化的效果最好。

图 7 为试验合金电导率与均匀化时间的关系曲线，在 2~8 h 保温时间范围内，合金的电导率随保温时间的增加有较大幅度上升，而保温 8、10、12 h 合金的电导率数值分别为 37.59 %IACS、37.89 %IACS、37.54 %IACS，数值虽有上下起伏但几乎没有



(a)第二相形貌 (b)能谱

图 5 合金均匀化后第二相形态及能谱分析

Fig.5 Morphology and EDS of the second phase of the alloy after homogenisation

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

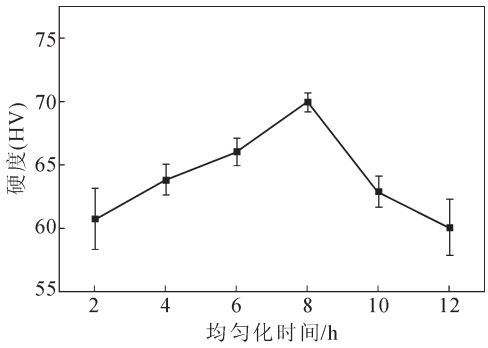


图6 不同保温时间对硬度的影响

Fig.6 Effect of different holding time on hardness

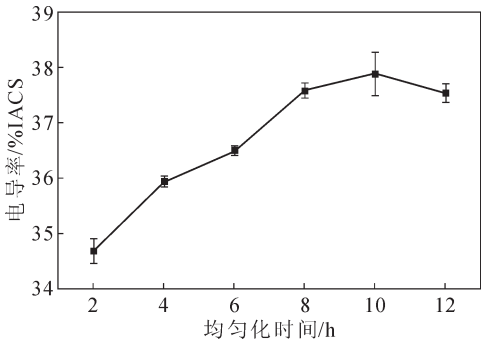


图7 不同保温时间对电导率的影响

Fig.7 Effect of different holding time on electrical conductivity

较大变化，可以说保温8~12 h合金的电导率趋于稳定不变。当电导率趋于稳定时，说明合金组织中晶格畸变和晶内偏析已经基本消失，非平衡共晶相几乎完全溶入基体，这也表明了保温8 h时，合金的均匀化已经基本完成。

3 结论

(1)6082铝合金铸锭均匀化处理的最佳工艺为550 ℃×8 h。

(2)随着保温时间的增加，合金中的非平衡共晶相逐渐溶入基体，在保温8 h后，均匀化过程已经基本完成，合金中少量残留的未溶相为富铁相。继续延长保温时间，析出相会出现聚集、粗大，对合金的性能不利。

(3)在550 ℃保温8 h后，试验合金的硬度达到峰值70.02 HV，电导率为37.59 %IACS。

参考文献：

[1] 王丽萍，曲凤娇，王操，等. 6082铝合金铸锭均匀化工艺及过烧组织研究[J]. 有色金属加工，2019，48(3)：27-29.

[2] 谭国寅，张建宇，胥福顺，等. 均匀化处理对6061铝合金棒材显微组织影响研究[J]. 铸造技术，2020，41(7)：627-629.

[3] 谭国寅，李恒，孙彦华，等. 均匀化处理对6082铝合金冲击性能影响的研究[J]. 铸造技术，2019，40(12)：1337-1339.

[4] 孟冬凝. 均匀化热处理工艺过程对6061铝合金组织和性能的影响[D]. 秦皇岛：燕山大学，2015.

[5] 杨银. 高品质6061铝合金成分优化及均匀化工艺研究 [D]. 北京：北京有色金属研究总院，2011.

[6] 李灿，陈文琳，雷远. 微量Sr及均匀化工艺对Al-Mg-Si-Cu-Mn变形铝合金铸态组织与性能的影响 [J]. 材料工程，2019，47(2)：90-98.

[7] Richard A. Jeniski, Buncha Thanaboonsombut, T. H. Sanders. The effect of iron and manganese on the recrystallization behavior of hotrolled and solution-heat-treated aluminum alloy 6013[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(1):19-27.

[8] 杜鹏，闫晓东，李彦利，等. 6061铝合金中富铁相在均匀化过程中的相变机理[J]. 中国有色金属学报，2011，21(5)：981-987.

[9] 王祝堂. 变形铝合金热处理工艺 [M]. 长沙：中南大学出版社，2011.

新书邮购

《消失模铸造工艺学》

《消失模铸造工艺学》由化学工业出版社2019年5月20日出版发行。（书号：ISBN978-7-122-34175-4）

《消失模铸造工艺学》作者刘立中，历经三十多年现场实践经验的总结和理论的升华。全书总结136个案例，选用1718帧彩色照片，撰写583千字创造性的提出了消失模铸造“三场理论”，详细解读在“流场、热场、负压场”理论指导下的“消失模铸造浇注系统设计原则”，提出了“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”新的理念，在国内外均属首创。奠定了消失模铸造的理论基础，提出了消失模铸造研究与发展的方向。

定价：498元

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　微信：13991824906

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net