熔体超声处理对 Al-Si-Cu 合金组织和硬化的影响①

钟千禧，柏松，刘志义
（中南大学 材料科学与工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：借助维氏硬度测试、金相显微镜、扫描电子显微镜、电子背散射衍射和透射电子显微镜等分析手段，研究了熔体超声处理对 Al-Si-Cu 合金组织和硬度的影响。结果表明，熔体超声处理促进了 Si 相的分散，降低了第二相的面积分数并细化了晶粒，有效提高了 Al-Si-Cu 合金的硬度；熔体超声处理 2 min 的 T6 态 Al-Si-Cu 合金板材硬度比未超声处理的 T6 态合金板材硬度提高了 9.2%。定量透射分析结果显示，熔体超声处理能显著促进时效过程 θ′相的析出并抑制其快速粗化，提高了 Al-Si-Cu 合金的硬度和组织热稳定性。

关键词：铝合金；Al-Si-Cu；熔体超声处理；硬化；晶粒细化；硬度；析出相
中图分类号：TB302；TG156　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.029
文章编号：0253-6099(2025)06-0162-05

Effect of Ultrasonic Melt Treatment on Microstructures and Hardening of Al-Si-Cu Alloys

ZHONG Qianxi, BAI Song, LIU Zhiyi
(*School of Materials Science and Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: The effect of ultrasonic melt treatment (UMT) on the microstructures and hardness of Al-Si-Cu alloy was investigated by Vickers hardness test, optical microscopy, scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction and transmission electron microscopy (TEM). The results show that UMT promotes the dispersion of Si phase, reduces the area fraction of secondary phase and refines grains, thereby raising the hardness of Al-Si-Cu alloy. After 2 min UMT, the hardness of T6-tempered Al-Si-Cu alloy sheet increases by 9.2% compared to that of UMT-free sheet. Quantitative TEM analysis indicates that UMT can significantly promote the precipitation of θ′ phase and inhibit its rapid coarsening during the aging process, which enhances the hardness and microstructural thermal stability of Al-Si-Cu alloy.

Key words: aluminum alloy; Al-Si-Cu; ultrasonic melt treatment (UMT); hardening; grain refinement; hardness; precipitate

Al-Si 合金具有铸造性能好、密度低和价格低廉的特点，常被用于生产制造轻质高性能的复杂铸件，是目前工业应用极为广泛的铸造铝合金之一[1-2]。不同于传统的变质方法，熔体超声处理通过超声波空化气泡和强对流的物理方法实现合金晶粒细化和第二相均匀化，是一种无污染、有前景的新型应用技术，许多研究已证明超声处理能够有效细化合金晶粒和改善合金机械性能[3-4]。文献[5]研究了超声处理对 A356 合金中 Si 相形核和生长的影响，高强度超声处理能显著细化硅相，促进硅相的均匀分布。对于 Al-5Cu-*x*Li 合金，文献[6]的实验证明，超声处理可通过减少偏析和细化晶粒有效改善合金的机械性能。超声处理还能有效减少含 Fe 的金属间化合物，提高合金的强度[7]。此外，超声处理对提高 Al-7Si-0.4Mg 合金的耐腐蚀性有积极作用[8]。

前人关于超声处理对铝合金微观结构的研究多聚焦在晶粒细化效应上，少有探讨熔体超声处理对 Al-Si-Cu 合金组织中强化相演变过程及其硬化的影响。因此，本文借助金相显微镜、扫描电镜、电子背散射衍射和透射电镜等分析手段，揭示超声处理对 Al-Si-Cu合金组织及硬化的影响。

① **收稿日期**：2025-06-11
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52071341)
作者简介：钟千禧(2000—)，女，广东广州人，硕士，主要从事铝硅合金热处理工艺研究。E-mail：2473990826@qq.com
通信作者：柏松(1984—)，男，江苏盐城人，副教授，主要从事铝合金组织调控与强韧化研究。E-mail：baisongmse@163.com

1　实验材料与方法

表 1 列出了本研究所用 Al-Si-Cu 合金的化学成分。两种合金通过熔化 99.99% Al、Al-20% Si、Al-52% Cu 和 Al-4%Ti 中间合金制备而成的。所有合金均在 750 ℃的石墨坩埚中熔化。使用六氯乙烷对熔体进行除气后,将 AS1 合金的熔体直接倒入约 200 ℃的金属模具中,AS2 合金的熔体在除气后进行了2 min的超声处理,超声振动功率为 2 kW,振动频率为 20 kHz。

表 1　Al-Si-Cu 合金化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical compositions of Al-Si-Cu alloys　%

合金名称	Si	Cu	Fe	Ti	Al
AS1	10.6	1.50	0.22	0.13	余量
AS2	10.5	1.54	0.17	0.15	余量

将尺寸 120 mm×110 mm×28 mm 的铸锭分为两部分,一部分用作铸态组织分析,另一部分铸锭经铣面后在 460 ℃下热轧成 2 mm 厚的板材,热轧工艺参数见表 2。热轧后的板材经 540 ℃/2 h 固溶处理后立即水淬,随后在 180 ℃下时效不同时间后进行硬度测试。

表 2　热轧工艺参数

Table 2　Parameters of hot rolling

轧辊直径/mm	铸锭尺寸/mm	热轧道次	热轧温度/℃	终轧厚度/mm
420	120×110×28	9	460	2

采用 HV-10B 型硬度仪测试样品维氏硬度,同状态均选取 3 个样品进行测试,每个样品随机测试 4 个点,取平均值作为实验结果。使用 DMM-900C 型金相显微镜观察铸态和 T6 态样品中硅相的形态和分布。使用 Tescan Mira 3 场发射扫描电镜(SEM)观察第二相的形态分布并进行成分分析。利用配备 Oxford EBSD 检测器的 Tescan Mira 4 场发射扫描电镜(EBSD)分析合金晶粒结构,并使用 AZtecCrystal 2.1 软件对 EBSD 数据进行分析。在 Tecnai G2 20 型透射电镜(TEM)上观察晶内析出相的特征。TEM 样品以厚度 100 μm、直径 3 mm 的小圆片为基材,在−20 ℃和 100 mA电流条件下,使用体积比 3∶7的硝酸和甲醇混合溶液经电解双喷制得。

2　实验结果与分析

2.1　T6 态合金的硬度分析

图 1 为两种合金在 180 ℃下的时效硬化曲线。在时效早期,AS1 和 AS2 合金的硬度均急剧上升,并在 20 h 时达到最大值,分别为 80.3$HV_{0.5}$和 87.7$HV_{0.5}$;相较于未超声处理的 T6 态合金(AS1),超声处理后合金(AS2)硬度提高了 9.2%。随后延长时效时间,合金硬度逐渐下降。整个时效过程中,AS2 合金的硬度均高于 AS1 合金,且 AS2 合金的硬度在时效后期下降速度更慢。

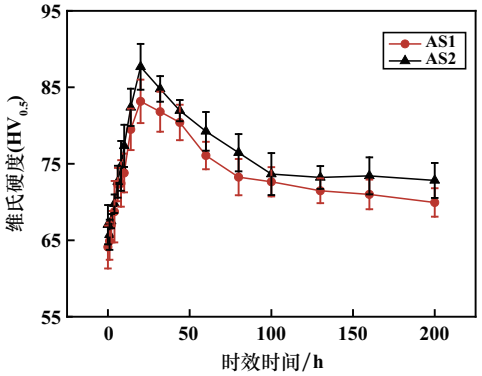


图 1　合金在 180 ℃下的时效硬化曲线

Fig. 1　Age-hardening curves of alloys at 180 ℃

2.2　铸态和 T6 态合金的金相组织分析

图 2 显示了铸态和 T6 态合金中硅相的形态特征。由图 2 可见,铸态 AS1 合金基体中可以观察到大量针

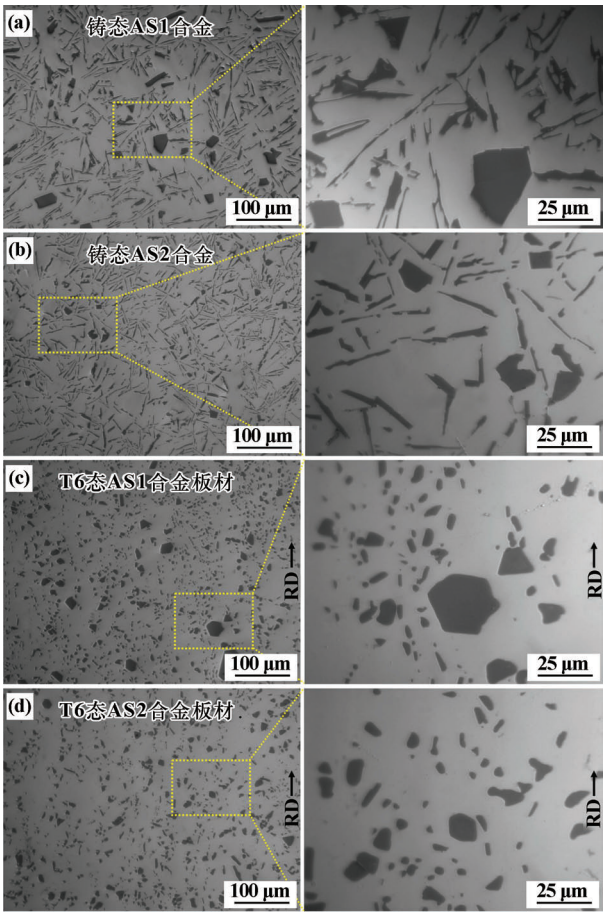


图 2　铸态和 T6 态合金的金相组织

Fig. 2　Metallographic structures of as-cast and T6-tempered alloys

状硅相,且存在明显的不规则粗大初生硅相;经超声处理后,铸态 AS2 合金中的针状及初生不规则硅相均得到明显细化,尺寸明显降低;T6 态 AS1 合金中硅相边缘变得圆滑;T6 态 AS2 合金中硅相分布更均匀且尺寸更小;超声处理通过超声波空化效应和声流发挥作用,空化气泡和强对流会将硅颗粒排出枝晶,并使之均匀分散到金属液体中[5,9]。这些行为阻止了硅相在现有枝晶上成核,减少硅相定向聚集的概率,从而使硅相以更小尺寸均匀析出,避免了大片硅相对基体的割裂作用,减小应力集中。

2.3 铸态和 T6 态合金的 SEM 组织分析

铸态和 T6 态合金的 SEM 形貌见图 3。图 3 中标记点的能谱分析结果见表 3,铸态合金中基体成分的能谱分析结果见表 4。铸态合金中的灰色硅相呈不连续的网状分布。不规则含铁杂质相在铸态合金组织中清晰可见,即位于点 4和点 7 的 β-Al_5FeSi 相。位于

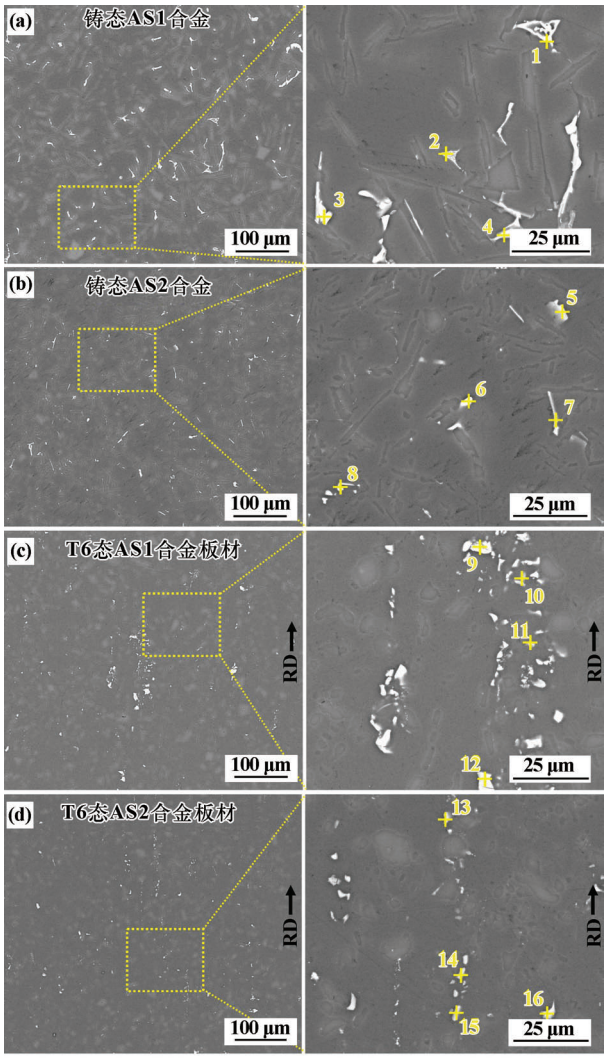


图 3 铸态和 T6 态合金的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM images of as-cast and T6-tempered alloys

表 3 图 3 中标记点的能谱分析结果(原子分数)

Table 3 EDS analysis of the points marked in Fig. 3 %

位置	Al	Si	Cu	Ti	Fe
1	79.33	3.90	13.29	0.16	3.32
2	74.10	17.34	8.13	0.20	0.23
3	71.38	4.73	22.48	0.13	1.28
4	74.16	16.00	0.74	0.34	8.76
5	74.45	19.28	0.39	0.23	5.65
6	80.73	2.02	16.97	0.00	0.28
7	58.95	34.50	0.87	0.12	5.56
8	70.90	20.46	1.55	0.12	6.97
9	76.86	10.98	1.50	0.26	10.39
10	78.16	9.21	2.36	0.28	10.00
11	82.82	9.42	1.58	0.25	5.93
12	76.16	11.47	1.70	0.14	10.54
13	80.86	14.07	1.22	0.14	3.71
14	74.38	19.16	0.62	0.19	5.66
15	85.46	9.34	0.68	0.21	4.31
16	70.30	22.27	1.81	0.17	5.45

表 4 铸态合金中基体成分的能谱分析结果(质量分数)

Table 4 EDS composition analysis of as-cast alloys matrix %

合金名称	Al	Si	Cu	Ti	Fe
AS1	76.25	21.03	1.88	0.33	0.51
AS2	76.17	20.81	1.99	0.50	0.54

点 1、点 3 和点 6 的亮白色相可确定为 Al_2Cu 相和含 Fe 相的共晶相。测量结果表明,AS1 和 AS2 铸态合金第二相面积分数分别为 1.4%和 0.8%,说明超声处理降低了第二相的面积分数。相较于 AS1 合金,AS2 合金基体中的 Cu 含量有所增加,说明超声处理促使更多 Cu 溶进基体。

与铸态合金相比,所有 T6 态合金的第二相均部分溶解到基体中,面积分数显著降低。表 3 结果表明,T6 态 AS1 和 AS2 合金板材中的第二相主要是 β-Al_5FeSi 相和 Al_2Cu 相。T6 态 AS1 和 AS2 合金板材中第二相面积分数分别是 0.66%和 0.61%。第二相团聚体附近的基体显示出更小的滑移空间,产生局部变形所需应力更小[10-11],这将导致合金机械性能降低。超声处理引起层流和紊流,起到一定的搅拌作用并使第二相粒子均匀分散到金属液体中,明显改善了第二相的团聚,避免了应力集中,有效提高了合金的强度。

图 4 为铸态和 T6 态合金板材的元素面分布,箭头表示轧制方向。由图 4 可见,铸态和 T6 态合金板材中第二相主要富含 Si、Cu 和 Fe,元素分布情况与能谱分析结果一致。可见超声处理促进了元素的均匀分布,合金中含 Cu 相大部分溶解,基体中增大的铜含量使

固溶强化效应增强,与表 4 结果相吻合。

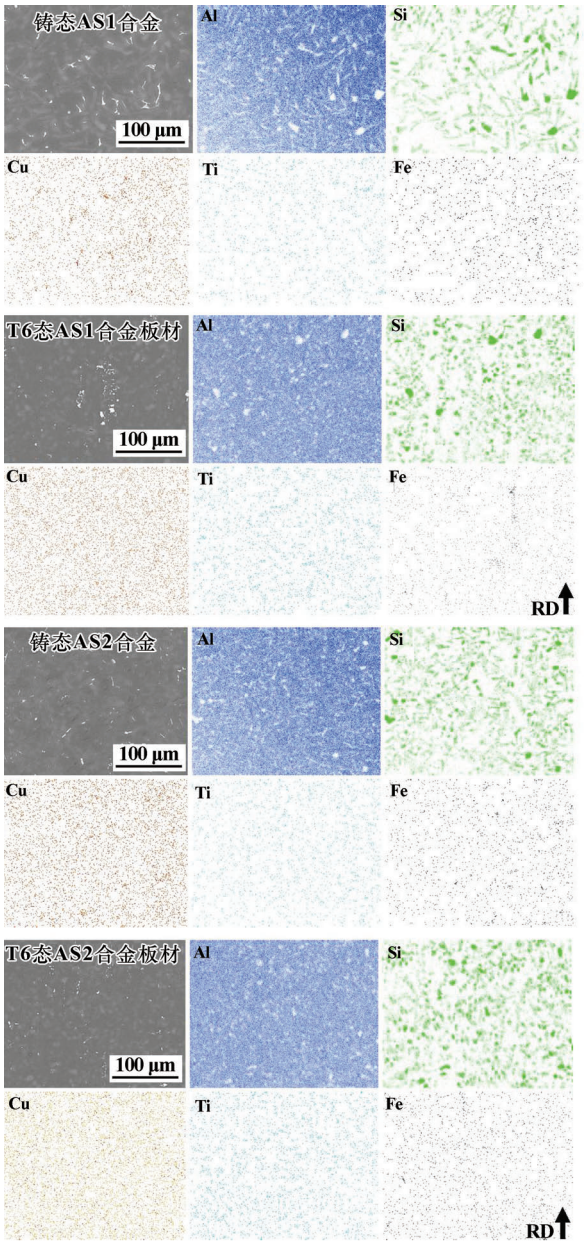


图 4　铸态和 T6 态合金的元素面分布图

Fig. 4　Elemental mappings of as-cast and T6-tempered alloys

2.4　铸态和 T6 态合金晶粒组织的 EBSD 分析

图 5 是铸态和 T6 态合金晶粒的 EBSD 分析结果,表 5 列出了平均晶粒尺寸的定量统计结果。IPF 图表明不同合金的晶粒取向均呈随机分布。对比相占比图可见,超声处理后,粗大硅相减少,且趋向于以分散的形式出现。经超声处理后,铸态合金晶粒尺寸从大约 170.9 μm 减小到大约 144.3 μm,硅相尺寸由大约 67.6 μm 减小到大约 55.6 μm。T6 态合金板材的晶粒尺寸和硅相也存在类似的变化。上述结果表明,超声处理能细化 Al-Si-Cu 合金的晶粒和硅相尺寸。超声处理增大了形核过冷度,进而增加了形核率,最终达到晶粒细化的效果[12-13],故超声处理后的 Al-Si-Cu 合金表现出更高的硬度。

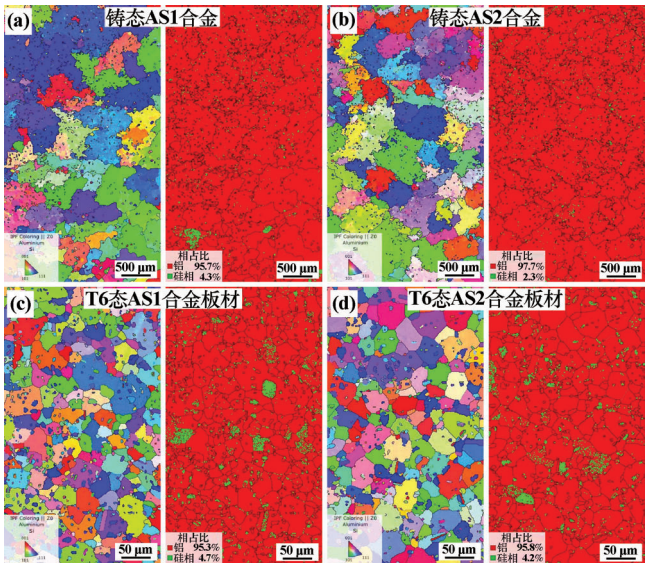


图 5　铸态和 T6 态合金的 IPF 图和相占比图

Fig. 5　IPF and phase diagrams of as-cast and T6-tempered alloys

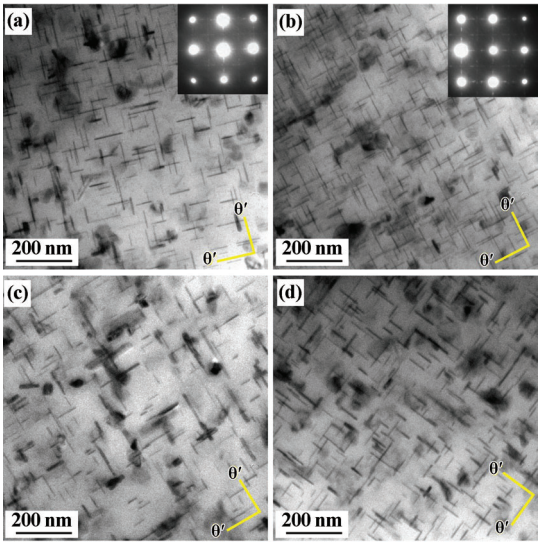
表 5　铸态和 T6 态合金晶粒尺寸与硅相尺寸

Table 5　Grain size and Si-phase size of as-cast and T6-tempered alloys

合金名称	合金晶粒尺寸/μm	硅相尺寸/μm
铸态 AS1 合金	170.9±134.7	67.6±37.1
铸态 AS2 合金	144.3±126.1	55.6±31.8
T6 态 AS1 合金	13.9±11.7	7.1±3.0
T6 态 AS2 合金	12.0±10.5	6.3±3.5

2.5　T6 态合金的 TEM 分析

图 6 显示了 180 ℃下时效 20 h 和 200 h 后合金板材的微观组织形貌和衍射花样,θ′相的定量分析结果见表 6。在图 6 中,T6 态合金板材中析出相主要为 θ′相,这与 1/2{200}$_\alpha$ 位置的衍射花样一致。与 AS1 合金相比,AS2 合金 T6 态板材中 θ′相的分布更均匀且数量密度显著增加(表 6),这表明超声处理促进了 θ′相的析出和弥散分布。180 ℃时效 20 h 后,合金板材的 θ′相长度和厚度分别从约 67.5 和 7.5 nm 减小到约 53.2 和 6.6 nm,表明超声处理能显著细化 θ′相尺寸。这是因为超声处理促进了过饱和溶质原子与空位结合的扩散过程,为 θ′相析出提供了许多形核位点,进而促进了 AS2 合金 T6 态板材中高密度细小 θ′相的析出。根据 Orowan 机制[14],细小 θ′相的均匀分布可确保析出强化效果,即超声处理通过促进 θ′相的高密度析出有效提高 Al-Si-Cu 合金的硬度。



(a) AS1,180 ℃/20 h; (b) AS2,180 ℃/20 h;
(c) AS1,180 ℃/200 h; (d) AS2,180 ℃/200 h

图 6 时效态合金板材近<100>$_\alpha$ 晶带轴微观组织的 TEM 形貌

Fig. 6 TEM images of microstructures of aged alloy sheets near <100>$_\alpha$ zone axis

表 6 不同状态合金板材内 θ′ 相统计结果

Table 6 Statistics of θ′ phase in alloy sheets after different aging treatments

样品	状态	θ′相长度/nm	θ′相厚度/nm	θ′相数量密度/10^3 μm^{-3}
AS1	180 ℃/20 h	67.5±21.0	7.5±1.6	1.61±0.13
AS2	180 ℃/20 h	53.2±17.5	6.6±1.4	2.44±0.12
AS1	180 ℃/200 h	67.8±36.1	11.0±4.0	1.00±0.22
AS2	180 ℃/200 h	56.1±21.9	9.5±2.0	1.71±0.14

时效 200 h 后,T6 合金态板材内 θ′相明显粗化且数量减少(表 6)。这是由于时效后期基体中溶质原子浓度大幅下降且 θ′相尺寸增大,相邻相之间的扩散场发生重叠,加剧了析出相之间的竞争,大尺寸 θ′相继续长大,小尺寸 θ′相被限制长大或消失[15]。基于 TEM 结果,长时间时效后 T6 态 AS1 和 AS2 合金 θ′相长度分别约为 67.8 和 56.1 nm,平均厚度分别约为11.0 和 9.5 nm,表明超声处理能够抑制 θ′相的粗化,使得 AS2 合金板材的硬度在时效后期下降更缓慢,组织热稳定性更高。

3 结论

1) 熔体超声处理能有效分散 Al-Si-Cu 合金中的 Si 相,并降低第二相的体积分数和尺寸。

2) 熔体超声处理能细化铸态和 T6 态 Al-Si-Cu 合金的晶粒尺寸。

3) 熔体超声处理能促进 θ′相析出并细化其尺寸,提高合金的硬度和组织热稳定性,并降低长时间时效过程中 θ′相的粗化速度。

参考文献(References):

[1] 陈安柱,周鹏飞. Zr 对 Al-Si-Mg-Mn 合金凝固过程、时效组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):156-160.
CHEN Anzhu, ZHOU Pengfei. Effect of Zr on Al-Si-Mg-Mn alloy solidification process and its microstructure and properties after aging treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):156-160.

[2] 徐小科,彭晓东,谢卫东,等. 铸造铝合金的强化研究[J]. 材料导报, 2008,22(增刊 1):409-411.
XU Xiaoke, PENG Xiaodong, XIE Weidong, et al. Research on strengthening of casting aluminum alloy[J]. Materials Review, 2008, 22(S1):409-411.

[3] 夏峰,闫志义,梁民宪,等. 熔体超声处理对 Al-Si 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021,50(3):60-63.
XIA Feng, YAN Zhiyi, LIANG Minxian, et al. Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Si alloy[J]. Hot Working Technology, 2021,50(3):60-63.

[4] 冯海阔,于思荣,李英龙,等. 超声对过共晶铝硅合金组织和性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009,39(3):608-614.
FENG Haikuo, YU Sirong, LI Yinglon, et al. Effect of ultrasonic treatment on microstructures and properties of hypereutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009,39(3):608-614.

[5] JIAN X, XU H, MEEKT T, et al. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials Letters, 2005, 59(2/3):190-193.

[6] LI J Y, PAN Y, YAN Z X, et al. Effects of Li content on microstructure evolution and mechanical properties of squeeze-cast Al-5Cu-xLi alloy assisted with ultrasonic treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023,961:171083.

[7] ZHANG Y B, JIE J C, GAO Y, et al. Effects of ultrasonic treatment on the formation of iron-containing intermetallic compounds in Al-12% Si-2%Fe alloys[J]. Intermetallics, 2013,42:120-125.

[8] KIM S B, KIM D H, KANG J W, et al. Role of ultrasonic melt treatment in the improvement of corrosion resistance of Al-7Si-0.4Mg cast alloy[J]. Metals and Materials International, 2023,29(3):705-714.

[9] LIU Z F, ZHANG S R, CAO F, et al. Effect of ultrasonic vibration treatment on microstructure evolution and mechanical properties of Cu-TiB_2 composites[J]. Materials Characterization, 2024,211:113912.

[10] HATCH J E. Aluminum: Properties and physical metallurgy[M]. US: ASM International, 1996.

[11] 吴奭登. 7050 铝合金时效强化行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
WU Shideng, Precipitation hardening behavior of 7050 aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

(下转第 171 页)

scale precipitates in Al-Zn-Mg alloys after various heat treatments[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002,327(1):59-64.

[6] 刘文军. Al-Zn-Mg-Cu 铝合金淬火析出行为及淬火敏感性研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
LIU Wenjun. The research about the quench induced precipitation and quenching sensitivty of Al-Zn-Mg-Cu alloys[D]. Changsha: Central South University, 2011.

[7] SHA G, CEREZO A. Early-stage precipitation in Al-Zn-Mg-Cu alloy (7050)[J]. Acta Materialia, 2004,52(15):4503-4516.

[8] LI Z H, XIONG B Q, ZHANG Y A, et al. Ageing behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy pre-stretched thick plate[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2007,14(3):246-250.

[9] STILLER K, WARREN P J, HANSEN V, et al. Investigation of precipitation in an Al-Zn-Mg alloy after two-step ageing treatment at 100 ℃ and 150 ℃[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 270(1):55-63.

[10] CINA B M, GAN R. Reducing the susceptibility of alloys particularly aluminum alloys to stress corrosion cracking: US Patent 3856584[P]. 1974-12-24.

[11] 冯迪,张新明,邓运来,等. 预时效温度及回归加热速率对 7055 铝合金组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5):1141-1150.
FENG Di, ZHANG Xinming, DENG Yunlai, et al. Effect of pre-ageing temperature and retrogression heating rate on microstructure and properties of 7055 aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014,24(5):1141-1150.

[12] 辛星. 回归再时效中预时效对 7050 铝合金热轧板抗腐蚀性能的影响[D]. 长沙:中南大学, 2013.
XIN Xing. Effect of pre-aging in RRA on corrosion resistance of 7050 aluminum alloy hot-rolled plates[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[13] 沈茹娟,肖代红. 时效热处理对 7B50 超强铝合金组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016,21(1):78-84.
SHEN Rujuan, XIAO Daihong. Effect of aging treatment on microstructure and properties of 7B50 super strength aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2016, 21(1):78-84.

[14] LIU J, KERSKER M M. Heat treatment of precipitation hardening alloys: US5108520[P]. 1992-04-28.

[15] ROMETSCH P A, ZHANG Y, KNIGHT S. Heat treatment of 7xxx series aluminium alloys: Some recent developments[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014,24(7):2003-2017.

[16] 张新全,臧金鑫,邢清源,等. 时效工艺对新型铝合金超厚板组织与性能的影响[J]. 航空材料学报, 2021,41(3):120-125.
ZHANG Xinquan, ZANG Jinxin, XING Qingyuan, et al. Effect of ageing process on microstructure and properties of new super thick aluminum alloy plate[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(3):120-125.

[17] SONG R G, DIETZEL W, ZHANG B J, et al. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2004,52(16):4727-4743.

[18] 冯朝辉,王少华,臧金鑫,等. 新型 Al-Zn-Mg-Cu 合金双级时效制度研究[J]. 航空材料学报, 2012,32(2):32-37.
FENG Zhaohui, WANG Shaohua, ZANG Jinxin, et. al. Investigation of two-step aging treatment of new type Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012,32(2):32-37.

引用本文:郑皓,沈松,顾斌,等. RRA 过程中 7B50 铝合金厚板预时效工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):167-171.
ZHENG Hao, SHEN Song, GU Bin, et al. Effect of pre-aging process in RRA treatment for 7B50 aluminum alloy plate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):167-171.

(上接第 166 页)

[12] 郄喜望,李捷,马晓东,等. 超声场作用下 Al-Si 合金的除气效果及晶粒细化[J]. 金属学报, 2008,44(4):414-418.
XI Xiwang, LI Jie, MA Xiaodong, et al. Degassing effect and grain refinement of Al-Si alloy under ultrasound field[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008,44(4):414-418.

[13] 赵君文,吴树森,毛有武,等. 超声振动对过共晶 Al-Si 合金半固态浆料凝固组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008,18(9): 1628-1633.
ZHAO Junwen, WU Shusen, MAO Youwu, et al. Effect of ultrasonic vibration on microstructure of semi-solid hypereutectic Al-Si alloy slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008,18(9): 1628-1633.

[14] CAO B Y, JOSHI S P, RAMESH K T. Strengthening mechanisms in cryomilled ultrafine-grained aluminum alloy at quasi-static and dynamic rates of loading[J]. Scripta Materialia, 2009,60(8):619-622.

[15] BAHL S, XIONG L H, ALLARD L F, et al. Aging behavior and strengthening mechanisms of coarsening resistant metastable θ′ precipitates in an Al-Cu alloy[J]. Materials & Design, 2021,198: 109378.

引用本文:钟千禧,柏松,刘志义. 熔体超声处理对 Al-Si-Cu 合金组织和硬化的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):162-166.
ZHONG Qianxi, BAI Song, LIU Zhiyi. Effect of ultrasonic melt treatment on microstructures and hardening of Al-Si-Cu alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):162-166.