

高强超声处理对 2024 铝合金除气的影响

喻 兵 贾 征 宋婷婷 付 丽
(沈阳大学机械工程学院)

摘 要 针对工业铝合金容易形成气孔及组织不均匀问题,以 2024 铝合金为研究对象,采用高强超声场处理,通过改变超声功率、处理时间、熔体温度及 C₂Cl₆ 预处理后施加超声的措施考察其对合金除气、组织细化及力学性能的影响。结果表明,在本研究范围内,除气率随着超声功率增加而提高;当超声功率不变时,除气率随着超声处理时间的增加而升高,但当超声处理时间过长时其除气率无明显变化;提高处理温度可改善除气率;经过 1% 的 C₂Cl₆ 预处理后,功率为 150 W 超声所需处理时间降低了 40 s,同时铸锭的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别提高了 28.3%、6.7% 和 2.4%。

关键词 超声处理;2024 铝合金;C₂Cl₆ 除气剂;氢含量;力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of High-intensity Ultrasonic on Degassing of 2024 Aluminum Alloy

Yu Bing, Jia Zheng, Song Tingting, Fu Li
(College of Mechanical Engineering, Shenyang University)

Abstract: Aiming at the pores and uneven structure common in 2024 industrial aluminum alloy, effects of ultrasonic power, treatment time, melt temperature and C₂Cl₆ pretreatment on degassing, refining and mechanical properties were investigated by high-strength ultrasonic field. The results indicate that degassing efficiency is increased with the increase of ultrasonic power and ultrasonic treatment time with a given the ultrasonic power. However, when the ultrasonic treatment time is excessive, the degassing efficiency keeps a stable. The increase of treatment temperature can greatly promote the degassing efficiency. After degasser pretreatment of 1% C₂Cl₆, the ultrasonic treatment time with 150 W is reduced by 40 s, and the tensile strength, yield strength and elongation of the ingot are increased by 28.3%, 6.7% and 2.4%, respectively.

Key Words: Ultrasonic Degassing, 2024 Aluminum Alloy, C₂Cl₆ Degasser, Hydrogen Content, Mechanical Properties

铸锭的凝固组织在经施加超声处理(UST)后会得到细化,同时铸锭的宏观及微观偏析也得到改善^[1~4]。但铸锭经超声波处理后,其获得全部等轴晶的同时不仅会在铸锭内产生气孔,还会产生缩松,降低其力学性能及耐蚀性能,同时,熔体也会因含有气体而使流动性下降,从而影响铸造性能。因此,在施加超声的同时,还需考虑防止和控制气孔的形成。

虽然常用的铝合金的除气方法有真空除气法、吹入惰性气体法和稀土固氢法等^[5~9],但 20 世纪 20 年代就发现超声波在液体中同样可以产生除气效果^[10]。CAMPBELL J^[11] 也指出超声振动对金属液具有除气作用,同时还发现将足够的超声功率作用于质量很大的液态金属中不太容易,而在超声波振动处理的铸锭中,主

要关注组织细化的问题,而对于除气的问题关注较少。有研究发现,超声除气效果与空化效应密切相关^[12,13];另外,针对大气湿度、金属熔体温度及熔体体积的除气进行了研究^[14];PUGA H 等^[15]发现熔体体积、熔体温度、超声波处理时间对 AlSi9Cu3 合金熔体的除气均有重要的影响;李晓谦等^[16,17]对超声施振参数(超声功率、频率、施振深度)进行了研究,结果表明,各种参数对除气均有较大的影响;NAJI M A R 等^[18]建立了一个数学模型和物理模型来模拟 Al-Cu 熔体中单个气泡的长大特性,结果表明,频率在 25~35 kHz 间变化时,水中气泡内气体质量随着频率的降低而增大;李争彩等^[19]应用 Matlab 软件对超声波空化进行数值模拟,结果表明,较低的频率能够使得空化泡产生变得容易,这

收稿日期:2020-10-29;修改稿收到日期:2020-12-09
基金项目:辽宁省自然科学基金指导计划资助项目(2019-ZD-0561,2019-ZD-0544)
第一作者简介:喻兵,男,1998 年出生,硕士研究生,沈阳(110044),E-mail:3127567079@qq.com
通信作者:贾征,男,1982 年出生,副教授,沈阳(110044),E-mail:jz140@163.com
引用格式:喻兵,贾征,宋婷婷,等. 高强超声处理对 2024 铝合金除气的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(4):458-461.
YU B, JIA Z, SONG T T, et al. Effects of high-intensity ultrasonic on degassing of 2024 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(4):458-461.

与李晓谦的结论相吻合;LI J W 等^[20,21]也对超声波除气进行了研究,发现适当的施加功率以及时间才能获得良好的除气效果;WU S S 等^[22~25]对超声振动半固态浆料的微观结构演化和除气结果进行了研究,发现氢气促进了空化气泡的成核。本课题以 2024 铝合金为对象,系统研究了超声功率、温度、时间以及是否使用 C₂Cl₆ 预处理等对 2024 工业铝合金除气的影响,并测试了除气后铸锭的力学性能,以期为超声在工业铝合金中的应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试验装置

试验装置示意图见图 1,其超声波发生器的输出功率最高可达 150 W,超声频率为 20 kHz,并搭配有机械移动装置,控制超声波探头位置,以及相应的测温仪器控制熔体温度。

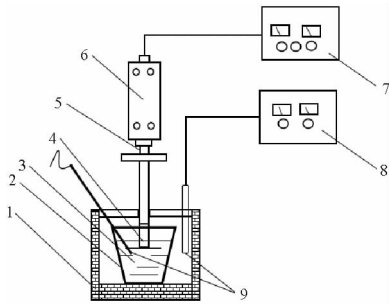


图 1 超声场装置布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic field device

1.电阻保温炉 2.坩埚 3.2024 铝合金熔体 4.超声波探头 5.变幅杆 6.超声波换能器 7.超声波发生器 8.控温仪 9.热电偶

1.2 试验过程

将一定质量的铝合金放入粘土-石墨坩埚中,并在井式电阻炉中熔化,温度达到 1 033 K 时保温 10 min,随后需将熔体浇注到预热至 1 003 K 的粘土-石墨坩埚中,待温度稳定后,立即将预热的超声波发射器探头(预热温度要与处理温度一致)插入液面下 10 mm,用 Alscan 铝液测氢仪测量熔体中的氢含量;测完后继续将铝合金熔体维持在 993 K 倒入水冷铜模中冷却。将凝固后的试样沿着凝固方向切开并加工成拉伸试样,在试样的中心部位取样进行组织观察。

2 试验结果及分析

2.1 超声功率对 2024 铝合金除气率的影响

图 2 为在同一温度下经不同的超声功率处理不同时间 2024 铝合金除气率。可以明显看到,随着施振功率增加,2024 铝合金的除气率也不断的提高。对于每

一个功率值,达到一定时间后,除气率趋于稳定值,进一步延长时间时,除气率会有所降低。当施振功率达到 75 W 时,其除气率最高可达到 31.7%,而当施振功率调节到 150 W 时,除气率可以达到 52.5%。初步分析这和熔体中超声振动声压值大小有关,而声压值又与超声功率具有如下关系^[26]:

$$P_k = \sqrt{\frac{2P\rho_L c_L}{S}}$$
 (1)

式中, P 为超声功率, W; ρ_L 为铝合金熔体的密度, kg/m³; c_L 为超声波在铝合金熔体中的传播速度, m/s; S 为超声波发射器的探头端面面积, m²。

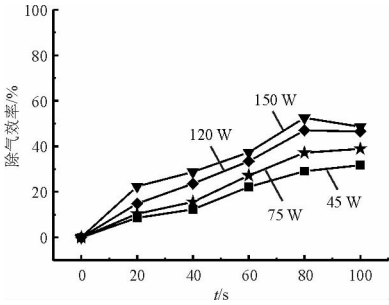


图 2 不同超声功率下除气率与超声处理时间的关系

Fig.2 Relationship between degassing efficiency and ultrasonic duration with different UST powers

在特定条件下,超声功率与熔体中声压成相关,但当熔体的声压较低时,空化气泡则需要较长的时间形成,从而使空化气泡的数量减少,这就使得原本溶解在铝熔体中的气体不能完全移动至空化气泡中,因而造成除气率偏低;当超声功率过大时会使空化气泡较易成形,使其数量增多,此时空化气泡会非常活跃,空化气泡之间也会更加容易结合长大,最后气泡在熔体浮力的作用下逸出液体,使熔体中的气体减少。所以,当增大超声功率时,超声振动的声压值也会增大,进而产生空化效应,使合金的除气效果越来越明显。但由于铝液界面处于空气中,将会同时产生吸收氢气和逸出氢气这两种过程,在氢含量不高的铝合金熔体中,外界的部分气体也会在超声波作用的同时进入熔体中,因此若超声时间过长会造成除气率略有下降。

2.2 处理温度对 2024 铝合金除气率的影响

图 3 是超声功率为 150 W、不同的熔体处理温度时 2024 铝合金熔体的除气率。可以看出,当处理温度为 953 K 时,除气率为 32.8%,但当处理温度为 1 003 K 时,其除气率高达 52.5%。

这和铝合金的熔体粘度与温度有关,温度下降会使合金熔体粘度增大,从而阻碍空化气泡的运动,导致其扩散系数降低,最终使空化气泡不易汇集,也不易浮到液面。同时,粘度过大会使产生空化气泡的半径变小,

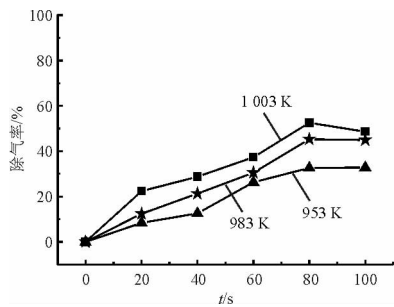


图 3 不同温度下除气率与超声处理时间的关系

Fig.3 Relationship between the degassing efficiency and the ultrasonic duration at different temperature

从而使声压值变大,令产生空化效应的难度提高。声压与空化气泡临界半径关系如下^[26]:

$$R_0^3 + \frac{2\sigma}{p_0} R_0^2 - \frac{32\sigma^3}{27p_0(p_0 - p_c)^2} = 0 \quad (2)$$

式中, R_0 为产生声空化气泡的最小半径; σ 为熔液的表面张力; p_0 为声压幅值; p_c 为静压力。其中, σ 、 p_c 均可以看作恒量。

2.3 C₂Cl₆-超声复合处理对 2024 铝合金除气率的影响

图 4 为 2024 铝合金熔体使用与未用 C₂Cl₆ 除气剂条件下,经超声功率为 150 W 处理不同时间熔体中氢含量。可以看出,当用 C₂Cl₆ 除气后,熔体中每 100 g 铝中氢含量从 0.174 mL 下降至 0.108 mL,而当经过除气剂处理+超声处理 40 s,氢含量下降到 0.082 mL,满足工业化生产要求(<0.1 mL),进一步施加超声波振动

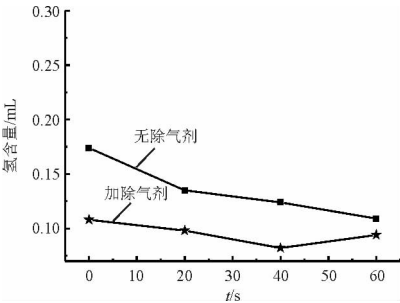
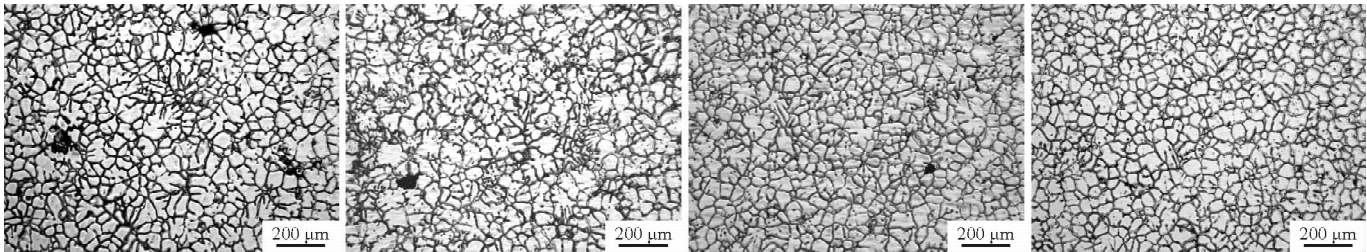


图 4 经 150 W 超声处理不同时间与 2024 铝合金每 100 g 铝熔体中氢含量

Fig.4 Relationship between ultrasonic duration and hydrogen content of 2024 aluminum alloy



(a) 未处理 (b) 40 s 超声处理 (c) 1% 的 C₂Cl₆ 处理 (d) 1% 的 C₂Cl₆+40 s 超声处理

图 6 不同除气条件下 2024 铝合金的微观组织

Fig.6 Microstructure of the 2024 aluminum alloy under different degassing conditions

会使得氢含量有所增加。

在使用除气剂时熔体内的气体本身就被消耗了一部分,随后再经过短时间的超声处理就可以达到较低的氢含量(<0.1 mL),而对于没有添加除气剂的铝合金熔体其氢含量较高,若要达到除气剂预处理的水平则需要较长的超声处理时间。而超声波在作用的同时会由于铝液界面处吸入一部分气体从而导致氢含量有所升高。

图 5 为 2024 铝合金未除气、仅用 1% 的 C₂Cl₆ 除气、超声处理 40 s 及 1% 的 C₂Cl₆ 处理+超声处理 40 s 等 3 种工艺的力学性能。可以看出,经 1% 的 C₂Cl₆ 处理和 40 s 超声处理后铸锭的抗拉强度及伸长率相比未处理合金分别提高了 28.3% 和 92.3%,而屈服强度仅提高了 6.7%。这是因为施加超声 40 s 后氢含量比用 1% 的 C₂Cl₆ 除气剂的略高。因此,超声处理 40 s 试样比仅 C₂Cl₆ 除气试样的伸长率略低(因为氢含量略高导致),并且发现氢含量略高对于强度的影响不那么明显。

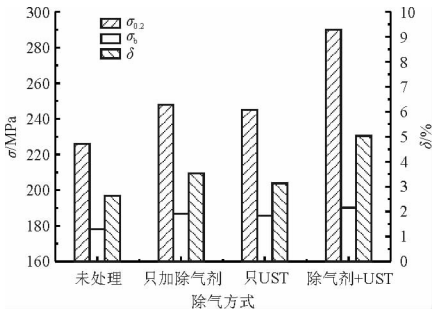


图 5 除气方法与 2024 铝合金力学性能的关系

Fig.5 Relationship between ultrasonic degassing duration and mechanical properties of 2024 aluminum alloy

2024 铝合金除气前后的微观组织见图 6。可以看出,除气前后合金的凝固组织相差不大,均为细小的等轴晶和枝晶混合组成。未处理时,由于金属液浇注到水冷铜型中时,熔体的冷却速度很快,因此形成了一些均匀细小的等轴晶组织;而超声处理后静置 10 min,使得合金熔体中的气体有足够的时间逸出,但同时超声所产生的细化作用已经明显衰减,被搅碎及细化的枝晶会再次重熔,使得合金组织有所粗化,最后导致了不同处理

状态下组织相差不大。因此,可以认为性能的提高主要是氢含量的变化所造成的。

3 结 论

(1)在研究范围内,在超声功率增大的同时,2024 铝合金的除气率会随着超声波处理时间的增加而提高。当超声功率过低(45 W 和 75 W)时,除气率会随着处理时间的延长而趋于稳定,而当功率为 120 W 和 150 W 时,除气率会随着超声波处理时间的增加而略趋下降。此外,当温度升高时,2024 铝合金的除气率也会提高。

(2)使用 C_2Cl_6 和超声波联合除气的方法,可以缩短超声处理所需时间,提高超声处理效率。

(3) 经过 1% 的 C_2Cl_6 和 150 W 超声联合除气后, 2024 铝合金的力学性能会得到显著提高, 比未除气的合金, 抗拉强度提高了 28.3%, 伸长率提高了 92.3%, 但屈服强度仅提高了 6.7%。

参 考 文 献

- [1] JIAN X, MEEK T T, HAN Q. Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration[J]. Script Materialia, 2006, 54: 893-896.
- [2] TSUNEKAWA Y, OKUMIYA M, MOTOMURA T. Semi-solid casting with ultrasonically melt-treated billets of Al-7Si alloys[J]. China Foundry, 2012, 9(1): 78-83.
- [3] LIN C, WU S S, ZENG J B, et al. Combined effects of ultrasonic vibration and manganese on Fe-containing intermetallic compounds and mechanical properties of Al-17Si alloy with 3% Fe[J]. China Foundry, 2013, 10: 148-154.
- [4] ZHONG G, WU S S, JIANG H W, et al. Effects of ultrasonic vibration on the iron-containing intermetallic compounds of high silicon aluminum alloy with 2% Fe[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492: 482-487.
- [5] FU Y, LI J W, SONG X Y, et al. Restraining solute segregation of Al-1Si alloy in diverse physical field[J]. Materials Technology, 2012, 27(2): 173-175.
- [6] ESKIN G I. Influence of cavitation treatment of melts on the processes of nucleation and growth of crystals during solidification of ingots and castings from light alloys[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1994, 1(1): S59-S63.
- [7] XU H, HAN Q, MEEK T T. Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2008, A473: 96-104.
- [8] ESKIN G I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts[M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [9] ABRAMOV O V. High-intensity Ultrasonics: Theory and Industrial Applications[M]. US: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [10] ROOZBEH A, RICHARD S C C. A pioneer in the development of modern ultrasound: Robert William Boyle (1 883-1 955)[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2007, 33(1): 3-14.

- [11] CAMPBELL J. Effect of vibration during solidification[J]. International Metals Review, 1981, 26(2): 71-104.
- [12] ABRAMOV O V. Ultrasound in Liquid and Solid Metals[M]. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- [13] ESKIN G I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts[M]. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998.
- [14] XU H B, JIAN X G, MEEK T T, et al. Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic variation[J]. Materials Letters, 2004, 58: 3 669-3 673.
- [15] PUGA H, TEIXEIRA J C, BARBOSA J, et al. The combined effect of melt stirring and ultrasonic agitation on the degassing efficiency of AlSi₉Cu₃ alloy[J]. Materials Letters, 2009, 63: 2 089-2 092.
- [16] 李晓谦, 陈铭, 赵世班, 等. 功率超声对 7050 铝合金除气净化的试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 41-45.
- [17] 李晓谦, 许显华. 超声频率对铝合金除气影响的试验研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(11): 981-984.
- [18] NAJI M A R, HADAN M. A study of hydrogen bubble growth during ultrasonic degassing of Al-Cu alloy melts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 147: 311-320.
- [19] 李争彩, 林书玉. 超声空化影响因素的数值模拟研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 38-42.
- [20] LI J W, MOMONO T, YOSHINORI T, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots[J]. Materials letters, 2008, 62: 4 152-4 154.
- [21] LI J W, MOMONO T. Effect of distribution coefficient K_0 on the structure of ultrasonic ingots during solidification of aluminum alloys[J]. Mater. Technol., 2005, 20(4): 202-207.
- [22] WU S S, LIU L F, MA Q Q, et al. Degassing effect of ultrasonic vibration in molten melt and semi-solid slurry of Al-Si alloys[J]. China Foundry, 2012, 9(3): 201-206.
- [23] WU S S, LIN C, LU S L, et al. Research progress on microstructure evolution of semi-solid aluminum alloys in ultrasonic field and their rheocasting[J]. China Foundry, 2014, 11(4): 258-267.
- [24] LU S L, WU S S, DAI W, et al. Preparation of semi-solid 5052 aluminum alloy slurry by indirect ultrasonic vibration[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(5): 634-640.
- [25] WU S S, LU S L, AN P, et al. Microstructure and property of rheocasting aluminum-alloy made with indirect ultrasonic vibration process[J]. Materials Letters, 2012, 73: 150-153.
- [26] JIA Z, ZHANG Z Q, LE Q, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Mg-6Zn-1Ca alloy [J]. China Foundry, 2015, 12(1): 15-19.

(编辑:栗万仲)

欢迎使用在线稿件处理系统
投稿、查稿、审稿
敬请登录 www.special-cast.com