

不同除气方法对 2024 铝合金氢含量及力学性能的影响

贾 征 喻 兵 宋婧怡 韩 旭 闫丽媛 郝明珠 潘 鹏 付 丽
(沈阳大学机械工程学院)

摘 要 研究了 C₂Cl₆除气、超声除气、C₂Cl₆-超声联合除气、氩气除气对 2024 铝合金氢含量及力学性能的影响。发现 C₂Cl₆-超声联合除气后合金氢含量最低,对应的力学性能最高;研究了 2024 铝合金氢含量与力学性能的相关性。结果表明,铸锭抗拉强度随氢含量降低而升高,当每 100 g 铝的氢含量小于 0.12 cm³时,屈服强度随氢含量的降低升高不显著。

关键词 2024 铝合金;氢含量;力学性能;C₂Cl₆-超声联合

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.009 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Different Degassing Methods on Hydrogen Content and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy

Jia Zheng, Yu Bing, Song Jingyi, Han Xu, Yan Liyuan, Hao Mingzhu, Pan Peng, Fu Li
(College of Mechanical Engineering, Shenyang University)

Abstract: Effects of four methods including C₂Cl₆ degassing, ultrasonic degassing, C₂Cl₆/ultrasonic combination degassing and Ar degassing on hydrogen content and mechanical properties of 2024 alloy were investigated. The results indicate that after C₂Cl₆-ultrasonic combination degassing, the hydrogen content reaches the minimum, corresponding to the optimal properties. The correlation of hydrogen content with mechanical properties of 2024 alloy was investigated. The result reveal that tensile properties and elongation at room temperature are continuously increased with the decrease of hydrogen content. When the hydrogen content is less than 0.12 cm³/100 g Al, the yield strength has no significant increase with the decrease of hydrogen content.

Key Words: 2024 Alloy, Hydrogen Content, Mechanical Properties, C₂Cl₆-Ultrasonic Combination

铝合金因其具有导热性能高、成本低及耐蚀性能好等特点,作为军民两用的轻质材料而得到广泛的关注,在很多领域得到广泛应用^[1~3]。

一般来说,铝合金的制备都要经过熔炼过程,这将导致铝熔体大量吸气(主要是氢),如果合金凝固前氢来不及排出而形成气孔,会使合金的力学性能和耐蚀性降低^[4~8]。因此,铝熔体除气是必须解决的问题,而除气方法主要包括除气剂除氢、氩气除氢、超声除氢及稀土固氢法等^[9~20]。对于 C₂Cl₆除气来说,虽然除氢效果较好,但其具有一定的毒性;氩气除氢所用的旋转喷吹除气率可达 70%左右,但是进行深度除气较为困难;超声场作为一种广泛使用而绿色环保的物理方法,得到了学者及企业的广泛关注。但是,超声目前主要以细化为主,除氢虽然有所涉及,但是由于超声的功率受限,且无法处理大量熔体而很少被企业使用;对于稀土固氢法,

由于添加了稀土元素导致除氢成本大幅上升,且由于混进了稀土元素导致使用范围受限。综上,每种除氢方法都有各自的优缺点,在一定程度上制约了除氢方法的发展。除氢后氢含量与力学性能的关系报道较少,但通过氢含量间接判断合金力学性能的好坏十分重要,所以研究氢含量与力学性能的相关性意义明显。基于此,以 2024 铝合金为例,本课题研究了 C₂Cl₆、超声、C₂Cl₆-超声、氩气除气对 2024 铝合金的影响,考察了氢含量与力学性能的关系,并进行了分析。最后,将氢含量与力学性能进行了相关拟合,为铝合金的进一步应用提供参考。

1 试验方法

试验设备包括超声波发生器、熔体控温仪、井式电阻炉、超声波支架(可实现超声探头的上下前后移动)、

收稿日期:2021-02-01;修改稿收到日期:2021-04-30
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:贾征,男,1982 年出生,副教授,沈阳(110044),E-mail:jz140@163.com
引用格式:贾征,喻兵,宋婧怡,等. 不同除气方法对 2024 铝合金氢含量及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):837-841.
JIA Z, YU B, SONG J Y, et al. Effects of different degassing methods on hydrogen content and mechanical properties of 2024 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):837-841.

Alscan 铝液测氢仪、石墨搅拌杆及探头、电偶表；试验材料包括 C₂Cl₆、2024 铝合金小块、高纯氩气及自制水冷铜模。

除气剂除氢的试验条件如下：每炉熔体的质量均为 1.5 kg 左右，以 C₂Cl₆ 为除气剂，在 730 ℃ 加入，加入量分别为熔体质量的 0、0.5%、1%、2% 及 3%，静置 20 min 后利用测氢仪测氢含量，待温度降至 720 ℃ 浇注到水冷铜模中；超声处理试验参数为 150 W 下分别处理 0、40、80 和 120 s，温度为 730 ℃，然后将熔体静置 10 min，测出氢含量后待温度降至 720 ℃ 浇注到水冷铜模中；作为对比，也进行了 2024 铝合金的氩气除气试验，首先通入 0.5 L/min 氩气并持续 10 min，同时不断搅拌使氩气在熔体中均匀化，随后静置 10 min，待温度达到 720 ℃ 后浇注到水冷铜模中。

2 试验结果与讨论

2.1 2024 铝合金的 C₂Cl₆ 除气

图 1 为 C₂Cl₆ 除气剂添加量对 2024 合金除气的影响。可以看出，熔体的氢含量随着除气剂的增加而降低，当添加 1% 的除气剂时，其每 100 g 铝氢含量达 0.108 cm³，除气率为 37.9%；当除气剂添加量达到 2% 时，其每 100 g 铝氢含量达到 0.096 cm³，除气率达 44.8%。但继续添加 C₂Cl₆，导致除气率下降。因此，C₂Cl₆ 的添加量在 1%~2% 时除氢效果较好。图 2 为不同 C₂Cl₆ 添加量的 2024 铝合金的力学性能，熔体中添加 C₂Cl₆ 会发生如下反应：



反应产生的 AlCl₃ 为气态，在熔体中就会有大量的气泡生成，而气泡内因不受分压，在浓度差的作用下熔体中的氢将会不断地进入气泡中，这个过程会持续到气泡内和熔体中的氢浓度相等，之后气泡会浮出熔体，只

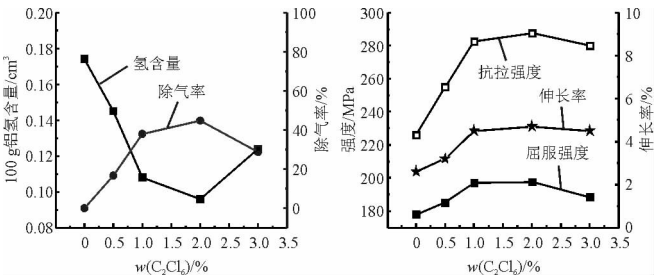


图 1 不同除气剂下 2024 合金氢含量和除气率的变化
Fig.1 Variation of hydrogen content and degassing rate of 2024 alloy with different degassing agents

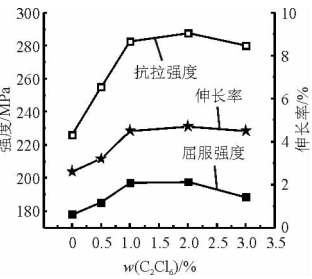


图 2 除气剂添加量对 2024 合金力学性能的影响
Fig.2 Effect of amount of degassing agent on mechanical properties of 2024 alloy

要时间足够，该过程就一直能够持续。所以，C₂Cl₆ 除氢效果随保温时间延长得到较大程度的发挥，当加入量太大时，除气剂会有所团聚，分解时间也较长，因此除气效果下降。

2.2 2024 铝合金的超声除气

图 3 为不同超声处理时间对 2024 铝合金氢含量与除气率的影响。可以看出，氢含量随超声处理时间的延长而不断降低，超声处理 80 s 后，每 100 g 铝氢含量为 0.085 cm³，除气率为 51.1%，当超声处理 120 s 后，除气率反而恶化。

图 4 为超声处理时间对 2024 合金力学性能的影响。可以看出，超声处理 80 s 后铸锭抗拉强度、屈服强度及伸长率达到最高，分别为 288 MPa、190 MPa 和 4.9%。

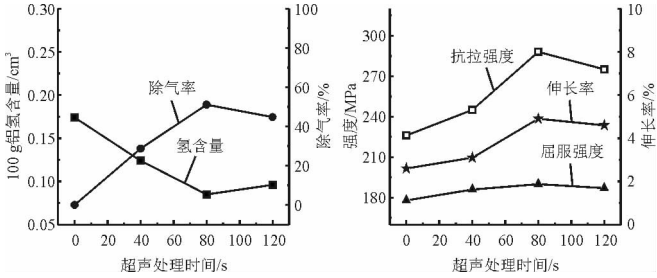


图 3 超声处理时间对 2024 合金氢含量和除气率的影响
Fig.3 Effect of ultrasonic treating time on 2024 alloy

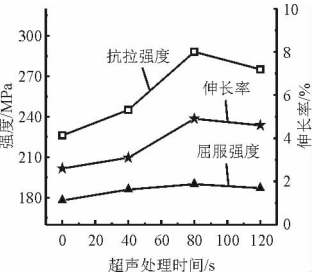


图 4 超声处理时间对 2024 合金力学性能的影响
Fig.4 Effect of ultrasonic treating time on mechanical properties of 2024 alloy

2.3 2024 铝合金的 C₂Cl₆-超声复合除气

图 5 为 2024 合金熔体添加 1% 的 C₂Cl₆ 前后氢含量与超声处理时间的变化。可以看出，没有施加超声振动时，添加 C₂Cl₆ 的熔体中氢含量大大低于没有添加 C₂Cl₆ 的。对两者施加较短时间的超声处理后发现，氢含量均快速下降，此时二者之间的氢含量差别较大，但随着处理时间延长，两者的氢含量差开始缩小，超声处理时间过长时，添加 C₂Cl₆ 的熔体氢含量略有升高的趋势。因此，在添加 C₂Cl₆ 的熔体中，只需要较短的超声

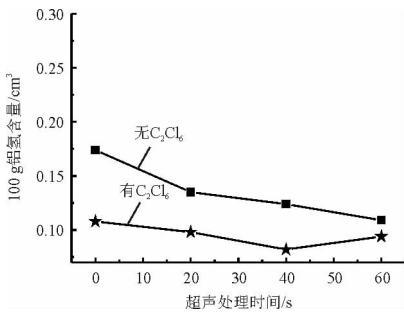


图 5 不同超声处理时间下 2024 铝合金氢含量的变化
Fig.5 Variation of hydrogen content in 2024 aluminum alloy with different ultrasonic treatment time

时间就可以得到理想的除氢效果,超声时间过长将导致氢含量上升,而未添加 C_2Cl_6 的熔体则需超声处理较长时间才能达到添加 C_2Cl_6 的除氢效果。由此可见,2024 铝合金先经 C_2Cl_6 进行预处理后,再施加超声处理 40 s,每 100 g 铝氢含量最低为 0.082 cm^3 ,但继续使用超声处理时氢含量则会有所上升。

图 6 为不同除气方法对 2024 铝合金力学性能的影响。可以看出, C_2Cl_6 -超声联合除气时,2024 铝合金的抗拉强度、屈服强度及伸长率达到最大值,分别为 290 MPa、190 MPa 和 5.0%。

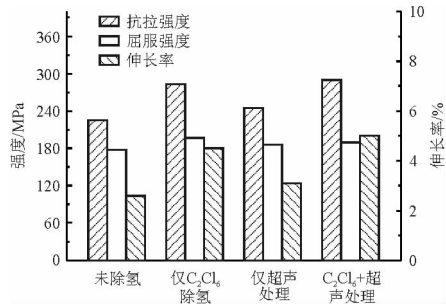


图 6 除气方法对 2024 合金力学性能的影响

Fig.6 Effects of different degassing methods on mechanical properties of 2024 alloy

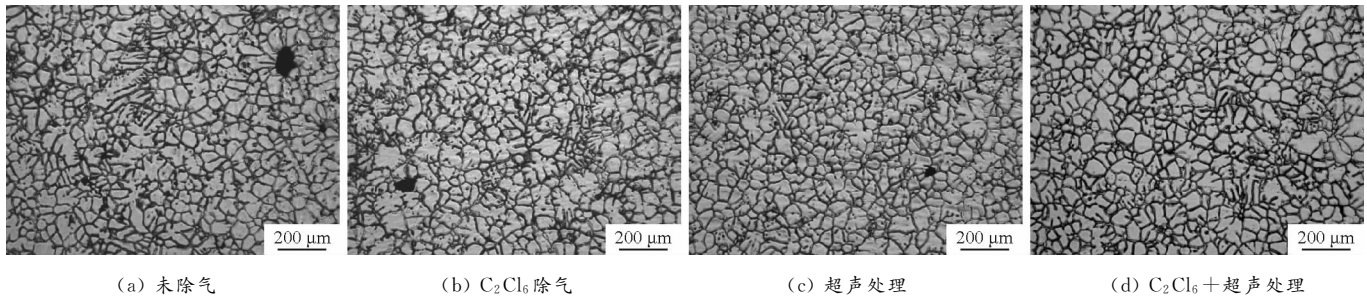


图 7 不同方法除气前后 2024 合金的显微组织

Fig.7 Microstructures of 2024 alloy before and after degassing by different methods

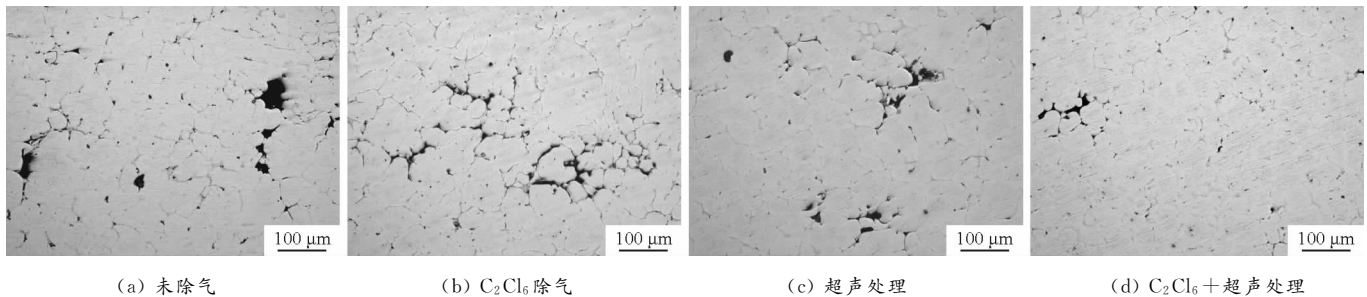


图 8 除气前后的 2024 合金气孔

Fig.8 Microporosity of 2024 alloy treated with or without dehydrogenation

但由于熔体中的氢较多,该过程持续的时间也就更久。此外,由于熔体界面处同时存在着吸氢和溢氢两种完全相反的过程,当熔体中氢含量较低时,超声波作为一种外加的干扰会使少量的气体有进入熔体的趋势,因此施加较长的超声时间会导致氢含量升高, C_2Cl_6 -超声波联合处理示意图见图 9。

图 7 为 2024 合金除气和未除气的显微组织。可以看出,未进行除气时,凝固组织主要由粗大的树枝晶和细小等轴晶组成,同时可观察到较多的气孔;而使用 1% 的 C_2Cl_6 进行除气时,发现 2024 合金组织变化不大,见图 7b;超声处理 40 s 和添加 1% 的 C_2Cl_6 后再超声处理 40 s 组织有所细化,但仍有小枝晶存在,见图 7c 和图 7d。

图 8 为除氢前后 2024 合金中的气孔形貌。可以看出,未除气时有较多的大气孔存在,尺寸为 $5\sim150\text{ }\mu\text{m}$;但除氢处理后,铸锭中心部位的大气孔数量和位置发生了明显变化。当每 100 g 铝氢含量达到 0.082 cm^3 时,气孔和缩松都很少,其尺寸为 $1\sim10\text{ }\mu\text{m}$,见图 8d。

使用 C_2Cl_6 进行预除气后,此时熔体中的气体明显减少,而再经超声处理后,熔体中发生空化作用,产生了大量的空化气泡,这些气泡在熔体中会一直处于脉动状态并在熔体中快速地运动着^[21],同时吸收熔体中存在的氢,只需要较短的超声时间空化气泡就会长大浮出熔体,实现除氢目的。相反,在未进行预除气的熔体中存在大量的气体,施加超声处理熔体时,产生的大量的发达空化泡同样会处于脉动状态,仍然会吸附周围的氢,

几种不同除气方法的氢含量及力学性能见图 10。可以看出, C_2Cl_6 +超声处理后氢含量最低,每 100 g 铝中氢含量约为 0.08 cm^3 。对于力学性能,除气剂、超声波及 C_2Cl_6 +超声处理后的抗拉强度及屈服强度比较接近,但是 C_2Cl_6 +超声的伸长率较高,达到 5% 左右,而氯气除气后力学性能较低。

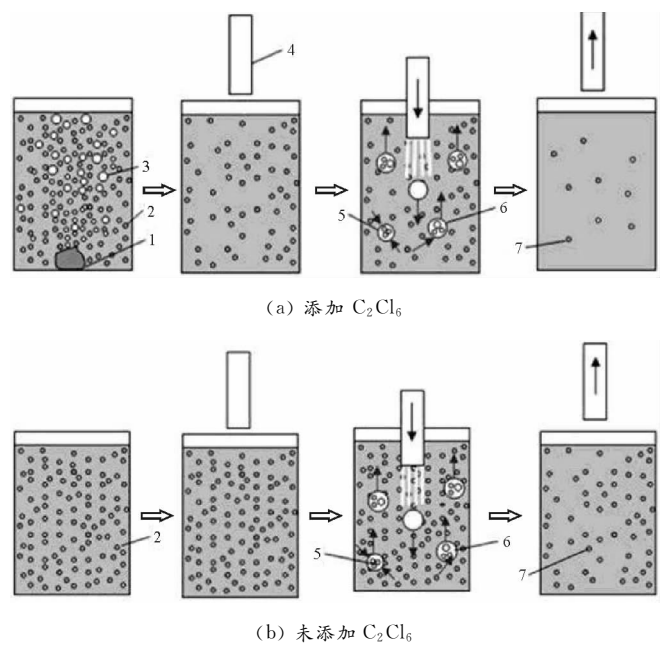


图 9 C₂Cl₆-超声波联合处理铝熔体除气示意图
Fig.9 Schematic diagram of C₂Cl₆-ultrasonic combination degassing on dehydrogenation of aluminum melt
1.C₂Cl₆ 2.熔体中的气体 3.C₂Cl₆所产生的气泡 4.超声探头
5.脉动的空化气泡 6.空化气泡 7.剩余气体

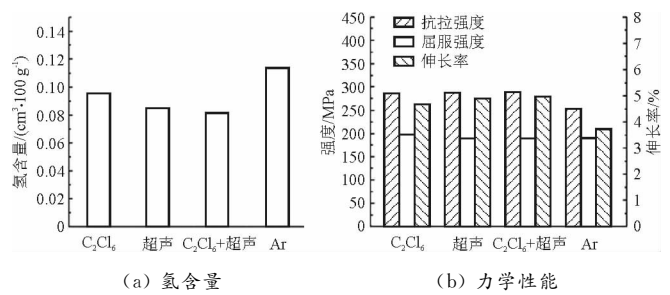


图 10 2024 合金不同除气方法的氢含量及力学性能
Fig.10 Hydrogen content and mechanical properties of 2024 alloy with different dehydrogenation methods

2.4 氢含量对 2024 铝合金力学性能的影响

图 11 为 2024 合金在不同除气工艺下氢含量和力学性能关系的拟合图。可以看出,当每 100 g 铝氢含量大于 0.12 cm³时,熔体中氢含量的降低会使屈服强度有所增加;氢含量低于 0.12 cm³时,随着氢含量的降低,屈服强度则变化不大,抗拉强度及伸长率出现缓慢升高的趋势,见图 11a 和图 11c。

图 12 为 AZ91 镁合金氢含量与力学性能的相关性拟合图。氢含量在 11 cm³/100 g Mg 以上时,氢含量的降低会使 AZ91 镁合金的抗拉强度和伸长率增大;而当

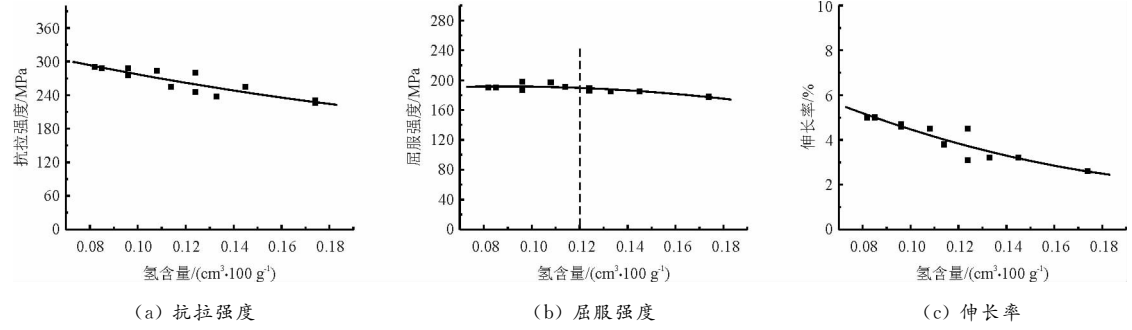


图 11 氢含量对 2024 合金力学性能的影响
Fig.11 Effect of hydrogen content on mechanical properties of 2024 alloy

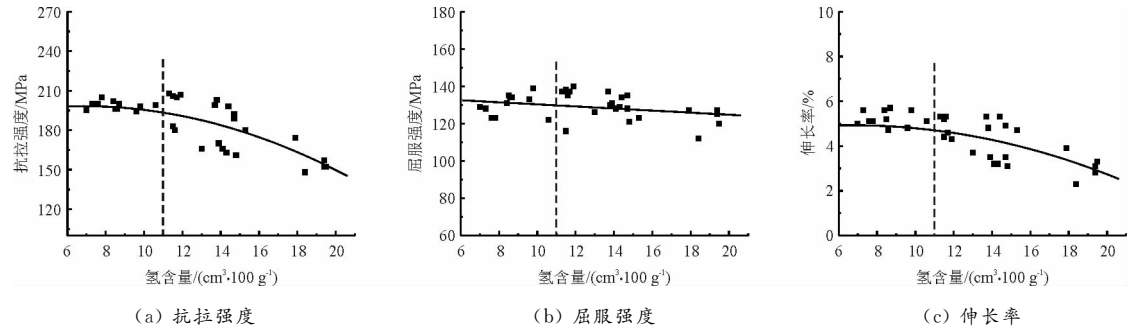


图 12 氢含量与 AZ91 合金力学性能的相关性
Fig.12 Correlation of hydrogen content with mechanical properties of AZ91 alloy

氢含量小于 11 cm³/100 g Mg 左右时,氢含量的降低对 AZ91 镁合金的力学性能提升无明显效果。从图 12b 可以得出,AZ91 镁合金中氢含量对屈服强度影响较小。在 AZ91 合金中氢含量较低时,继续除氢无法进一步提高合金力学性能。

这可能主要与熔体的吸氢特性有关,镁熔体在熔炼时会吸入比铝熔体高两个数量级以上的氢,此时氢含量相当高,凝固时生成的 MgH₂ 化合物不易分解。在熔体凝固的过程中虽然一部分氢会溢出,但液态与固态中氢并不会因为冷却过程而发生太大的溶解,这与铝凝固时

氢大量析出有很大不同。因此,当氢含量降到一定程度时,镁合金中的气孔没有铝合金严重,故对力学性能的影响较铝合金小。

3 结 论

(1)分析了 C_2Cl_6 除气、超声除气、 C_2Cl_6 -超声联合除气及氩气除气 4 种方法对 2024 铝合金中的氢含量及其对力学性能的影响。其中, C_2Cl_6 -超声波联合处理后氢含量最低,约为每 100 g 铝中氢含量 0.08 cm^3 ,对应的力学性能也最高。

(2)2024 铝合金的力学性能随氢含量降低而不断升高,但每 100 g 铝氢含量小于 0.12 cm^3 时,屈服强度变化不明显。

参 考 文 献

- [1] 吴道祥,梁强,王敬.2024A 铝合金高温流变行为及本构关系研究[J].特种铸造及有色合金,2020,40(3):233-238.
- [2] 温璐,徐仕豪,刘文才,等.汽车用铝合金应力腐蚀开裂敏感性研究现状与展望[J].特种铸造及有色合金,2020,40(12):1 339-1 348.
- [3] LIU X D, ZHU Q F, ZUO Y B, et al. Effect of the intensity of melt shearing on the as cast structure of direct chill cast 2024 aluminum alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, A50(12): 5 727-5 733.
- [4] NIKOLAOS D, NIKOLETA, CHRISTINA-MARGARITA, et al. Simulation of the corrosion-induced damage on aluminum alloy 2024 specimens with equivalent surface notches[J]. Fracture and Structural Integrity, 2019, 13(50): 342-353.
- [5] 刘川,沈嘉斌,林昌华,等.超声冲击处理对高强度多道焊接焊缝力学性能的影响研究[J].石油管材与仪器, 2020, 6(6): 38-42.
- [6] 林顺岩,林林,温庆红,等.先进民用铝合金材料加工技术的研究与发展[J].铝加工, 2020(6): 4-7.
- [7] 许四祥. 镁合金熔液氢含量测试系统及除氢工艺的研究[D].武汉:华中科技大学, 2007.
- [8] PRADIPTA K J, KUMAR K S, MANDAL R K, et al. An experimental study on the fracture behavior of different aluminium alloys subjected to ballistic impact [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 17: 957-964.
- [9] 孙有政,高鸽,曹善鹏,等.细化剂对 2026 铝合金组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(9): 946-949.
- [10] 唐靖川,阳培,熊能.超声作用下氧化夹杂促进铝熔体晶粒细化及机理分析[J].南方农机, 2020, 51(23): 55-57.
- [11] 左玉波,蔺玥,康轶瑶,等.转子转速和气体流量对 2524 铝合金除气效果的影响[J].东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 653-657.
- [12] WANG L, GUO E J, HUANG Y C, et al. Rotary impeller refinement of 7075Al alloy[J]. Rare Metals, 2009, 28(3): 309-312.
- [13] 程书建,邱立宝,刘峰,等. A356 铝合金双重除气工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(9): 1 028-1 030.
- [14] 左玉波,康轶瑶,蔺玥,等.强剪切作用下氩气泡破碎行为及其对 7075 铝合金除气效果的影响[J].中国有色金属学报, 2016, 26(3): 486-493.

- [15] DAVIS J R. ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys[M]. OH: ASM International, 1993.
- [16] WARKE V S, SHANKAR S, MAKHLOUF M M. Mathematical modeling and computer simulation of molten aluminum cleansing by the rotating impeller degasser part II. removal of hydrogen gas and solid particles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(1): 119-126.
- [17] WARKE V S, TRYGGVASON G, MAKHLOUF M M. Mathematical modeling and computer simulation of molten metal cleansing by the rotating impeller degasser part I. Fluid flow[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(1): 112-118.
- [18] WU S S, LIN C, LÜ 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.
- [19] WU S S, LÜ 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.
- [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] 马艳,申学鹏,徐洁. 声场中双空化气泡之间的相互作用及气泡动力学研究[J]. 云南大学学报(自然科学科学版), 2019, 41(4): 718-723.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

《特种铸造及有色合金》杂志社

地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

