

除气方法对 AZ91 镁合金氢含量及力学性能的影响

贾 征 喻 兵 王芷苗 于永治 韩 旭 闫丽媛 宋婧怡 柳 鑫 潘 鹏
(沈阳大学机械工程学院)

摘 要 研究了 C₂Cl₆ 除气、超声除气、熔剂除气及氩气除气 4 种方法对 AZ91 镁合金氢含量及力学性能的影响。结果表明,氩气除气效果最佳,每 100 g 镁中氢含量可减少到 7.3 cm³。对应的抗拉强度为 200 MPa,屈服强度为 128 MPa,伸长率为 5.2%。研究了氢含量与合金力学性能的相关性,结果表明,每 100 g 镁中氢含量低于 11 cm³ 时,进一步除氢对 AZ91 镁合金力学性能的影响不明显。

关键词 AZ91 镁合金;除气;含氢量;力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.011 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Different Degassing Methods on Hydrogen Content and Mechanical Properties of AZ91 Magnesium Alloy

Jia Zheng, Yu Bing, Wang Zhizhuo, Yu Yongzhi, Han Xu, Yan Liyuan, Song Jingyi, Liu Xin, Pan Peng
(College of Mechanical Engineering, Shenyang University)

Abstract: The effects of C₂Cl₆, ultrasonic, flux and argon degassing on hydrogen content and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy were investigated. The results show that argon has the satisfieid hydrogen removal effect, where the hydrogen content can be decreased to 7.3 cm³/100 g. The corresponding tensile strength, yield strength and elongation reach 200 MPa, 128 MPa and 5.2%, respectively, at room temperature. Meanwhile, the effects of hydrogen content on the mechanical properties of AZ91 magnesium alloy were investigated. When the hydrogen content in AZ91 alloy is less than 11 cm³/100 g, further degassing of hydrogen content has little effect on mechanical properties.

Key Words: AZ91 Magnesium Alloy, Degassing, Hydrogen Content, Mechanical Properties

镁合金作为最轻的结构材料,在军工、交通、3C 及生物领域都有重要的应用^[1~3]。但是,目前镁合金在实际应用中仍然存在着较多的问题^[4~6]。近年来,除去镁合金中的氢以提高力学性能的研究逐渐引起重视。而除氢方法主要包括超声除氢、熔剂除氢、氩气除氢和稀土固氢法等^[7~11]。采用 C₂Cl₆ 所产生的活化气体对镁液进行除氢^[12],由于氯气是有毒气体且具有很强的腐蚀性,因此并未得到应用。吴国华等^[13,14]研究了熔剂及复合熔剂对镁合金的净化作用,表明熔剂具有良好的净化效果,但除氢效果一般;ESKIN G I^[15]、LIU X 等^[16]、CHEN X R 等^[17]、贾征等^[18],张海静等^[19]也研究了超声除氢的效果,发现超声不仅具有良好的除氢效果,细化效果也比较稳定。胡中潮等^[20]及许四祥^[21]研究了氩气对 AZ91 镁合金的除氢效果,发现该方法不仅绿色环保,而且效果良好稳定,但对比这几种除氢效果

的报道较少。因此,本课题以 AZ91 镁合金为例,研究了除气剂(C₂Cl₆)、熔剂(RJ-2)、外场(超声波)及惰性气体(高纯氩气)4 种方法对合金除气的影响。研究了含氢量对 AZ91 镁合金力学性能的影响,为镁合金的广泛应用提供参考。

1 试验设备及材料

试验设备包括 YPZ57B-ZB-20K 工业级金属熔体设备超声波发生器、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)、RH-404 测氢仪、45 号钢杆、石墨探头、电偶表;试验材料包括 C₂Cl₆、AZ91 镁合金小块、RJ-5 熔剂、高纯氩气及自制水冷铜模;S4800 扫描电镜,将熔体进行处理后浇注到水冷铜模中得到铸锭,试样取铸锭中心位置进行观察分析。

收稿日期:2021-02-13;修改稿收到日期:2021-03-14
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,王芷苗,等. 除气方法对 AZ91 镁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(8):982-987.
JIA Z, YU B, WANG Z Z, et al. Effects of different degassing methods on hydrogen content and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):982-987.

2 除气方式分析

2.1 AZ91 镁合金的 C₂Cl₆ 除气

为了研究 C₂Cl₆ 对 AZ91 合金的影响,每炉熔体的质量均为 1.5 kg 左右,C₂Cl₆ 加入温度为 730 ℃,其添加量分别为熔体质量的 0、0.5%、1%、2% 及 3%,除氢后静置 20 min 后测氢含量,待温度达到 720 ℃ 后浇注到模具中。

除气率公式为:

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\%$$
 (1)

式中,η 为除气率;C₀ 为熔体中的初始含氢量;C 为除氢后熔体中的含氢量。

图 1 为 C₂Cl₆ 对 AZ91 镁合金除气的影响。可以看出,最大除气率出现在 C₂Cl₆ 添加量为 3% 时,此时除气率达到 41.8%。AZ91 镁合金除气后的显微组织见图 2。从图 2a 中观察到,未除气的 AZ91 镁合金组织形成了 240 μm 左右的枝晶,同时相邻枝晶还伴有小孔存在;随着添加量增大到 2%,晶粒明显细化,晶粒尺寸达

110~120 μm,此时细化效果最佳,见图 2d;随着除气剂进一步增加,组织有变粗大的趋势,见图 2e。所以 C₂Cl₆ 对 AZ91 镁合金具有良好的细化作用。一般认为,反应形成的 Al₄C₃ 相钉扎了晶界从而细化晶粒。因此,加入一定量的 C₂Cl₆ 会使 AZ91 镁合金组织细化,但 C₂Cl₆ 过量会导致组织不易分解而使合金组织粗化。另外,除气时由于熔融状态的 MgCl₂ 和镁熔体的密度相差不大,会导致 MgCl₂ 和 MgO 的熔体相混合形成杂质且不易除去,所以 C₂Cl₆ 的添加量应保持在 2%~3%,以免使熔体质量受到影响。

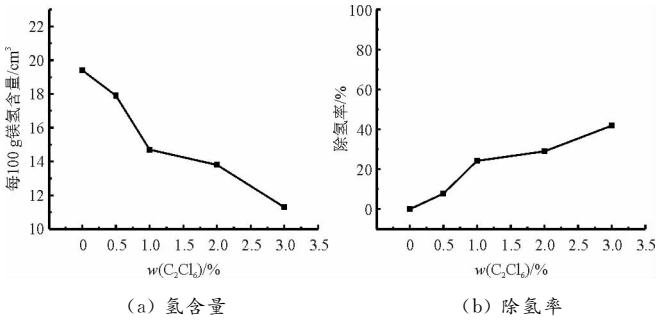


图 1 C₂Cl₆ 加入量对 AZ91 镁合金除气效果的影响
Fig.1 Effect of C₂Cl₆ on degassing of AZ91 alloy

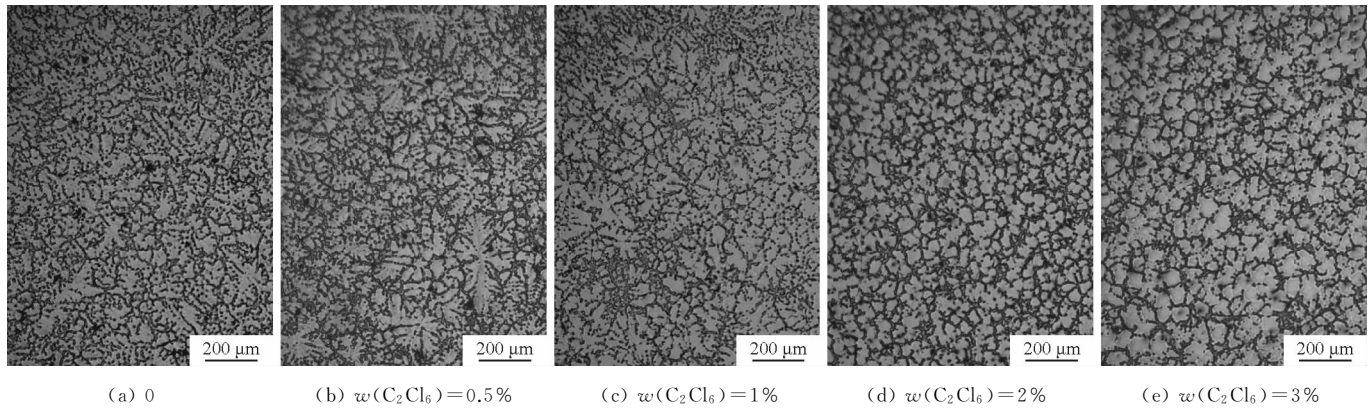


图 2 C₂Cl₆ 加入量对 AZ91 镁合金微观组织的影响
Fig.2 Effect of C₂Cl₆ on microstructure of AZ91 alloy

图 3 为 C₂Cl₆ 加入量对 AZ91 镁合金力学性能的影响。可以看出,当 C₂Cl₆ 加入量增加时,铸锭的抗拉强度、屈服强度及伸长率均有一定的提高。当 C₂Cl₆ 加入量达到 2%~3% 时,铸锭的力学性能最佳。

2.2 AZ91 镁合金的超声除气

AZ91 镁合金超声处理后的含氢量和除气率见图 4,其中,超声功率为 150 W,超声频率为 20 kHz。超声

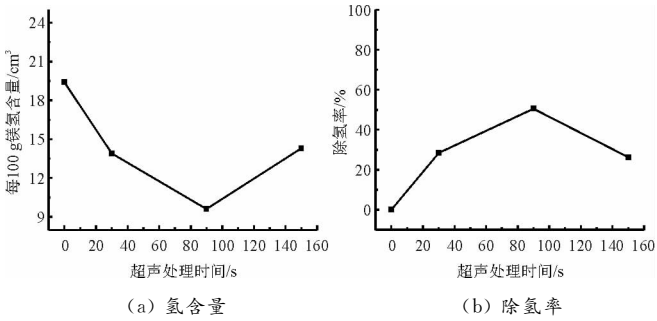


图 4 超声处理时间对 AZ91 镁合金除气效果的影响
Fig.4 Effects of ultrasonic treatment time on degassing of AZ91 alloy

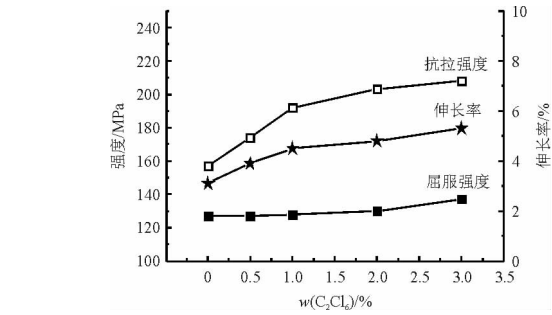


图 3 C₂Cl₆ 加入量对 AZ91 镁合金力学性能的影响
Fig.3 Effects of C₂Cl₆ on mechanical properties of AZ91 alloy

探头需要插入液面下 20 mm,经过 0、30、90 和 150 s 超声处理后,静置 10 min,在 700 ℃ 时将其浇注到模具中。可以看出,每 100 g 镁氢含量最低值为 9.6 cm³,对应的处理时间为 90 s,除气率为 50.5%,进一步延长处理时间除气率下降至 26.3%。

图 5 为不同超声处理时间的 AZ91 镁合金显微组织。可以发现,未经过超声除气的组织存在较大的气孔

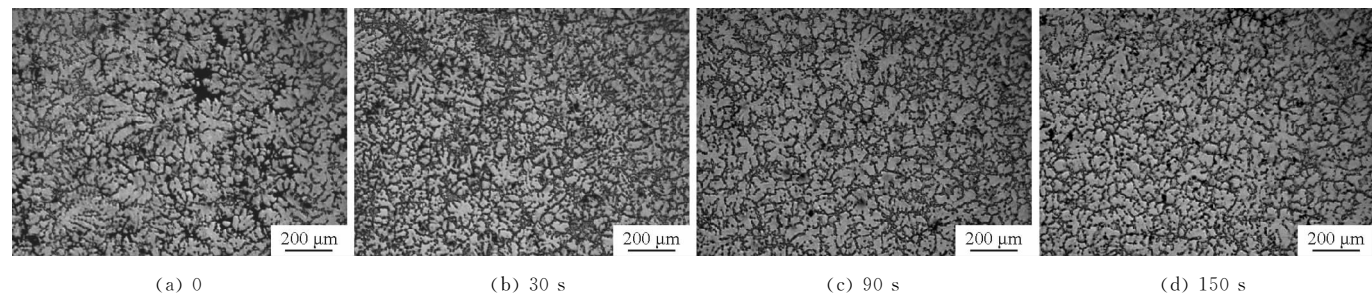


图 5 不同超声处理时间的 AZ91 合金显微组织

Fig.5 Effect of ultrasonic treatment time on microstructure of AZ91 alloy

较多的缩松和气孔出现,见图 5d。

超声除气过程中,AZ91 镁合金的晶粒尺寸得到了一定程度的细化。这可从细化和除气两个方面来分析。当使用超声处理熔体时,产生的空化气泡会在正负周期中长大和收缩。熔体经超声处理后晶粒细化的原因有两个:一是空化气泡的生长可以吸收熔体中的热量,然后在气泡界面受到冷却影响而形核;二是空化气泡的破裂产生巨大能量,粉碎熔体中的初始晶核和枝晶,导致晶核数量增加,晶粒尺寸变小,且产生的声流是一种由于声压梯度引起的液体流动,也有利于晶粒细化。

图 6 为超声除气原理示意图,当施加适宜的超声波处理熔体时,产生的空化气泡吸附周围的氢原子,此时气泡会迅速长大析出,达到除气目的。这是因为,镁熔体中一般都含有过量的氢,当超声探头插入熔体中时,长时间的超声处理产生空化效应具有除气作用,因此,铸锭的密度及除气率的提高可以通过超声处理实现。但超声时间不宜过长,如延长超声处理时间到 150 s 后,由于镁液温度的下降导致熔体粘度过大,会阻碍气体上浮,超声波作为一种干扰会破坏熔体的氧化膜,从而导致氢含量升高,最终导致除气率下降。

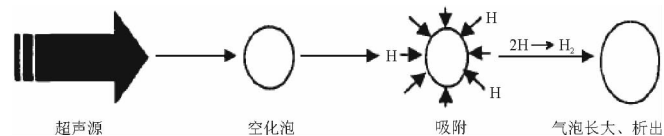


图 6 超声除气原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of ultrasonic degassing

图 7 为 AZ91 镁合金力学性能和超声处理时间的关系。可以看出,当经过 90 s 的超声处理后,力学性能最佳,抗拉强度达到 194 MPa,屈服强度变化不大,伸长率为 4.8%。增加超声时间并不能提升屈服强度,反而

和粗大的树枝晶,气孔尺寸最大为 110 μm 左右(见图 5a)。而超声处理后,铸锭的粗大枝晶得到改善,气孔明显缩小。经过 30 s 超声处理后,组织中的等轴晶增加,但组织中的枝晶和小气孔仍然较多,细化效果不明显,见图 5b。在处理 90 s 后,镁合金由细小均匀分布的等轴细晶和少量的气孔组成,且气孔尺寸较小,见图 5c。当超声处理时间增至 150 s 时,组织基本不再细化,且有

会导致合金的力学性能下降。

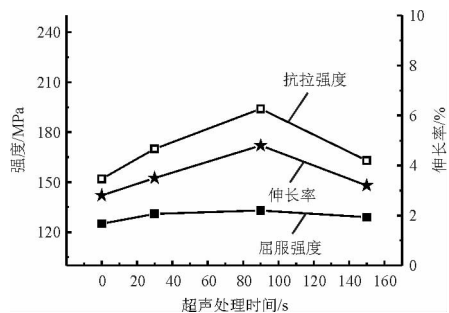


图 7 超声时间对 AZ91 合金力学性能的影响

Fig.7 Effects of ultrasonic time on mechanical properties of AZ91 alloy

2.3 AZ91 镁合金熔剂除氢与对力学性能的影响

为了考察熔剂添加量对 AZ91 合金含氢量及力学性能的影响,每炉熔体的质量均为 1.2 kg 左右,熔剂选用 RJ-2,加入温度为 730 ℃,按照熔体质量分别加入 0.5%、1%、1.5% 及 2%,除气后静置 20 min,待熔体温度降低至 700 ℃ 浇注到水冷铜模中。图 8 为熔剂量与 AZ91 镁合金氢含量及除气率的关系。可以看出,随着熔剂增加,熔体的氢含量降低,最低每 100 g 含氢量为

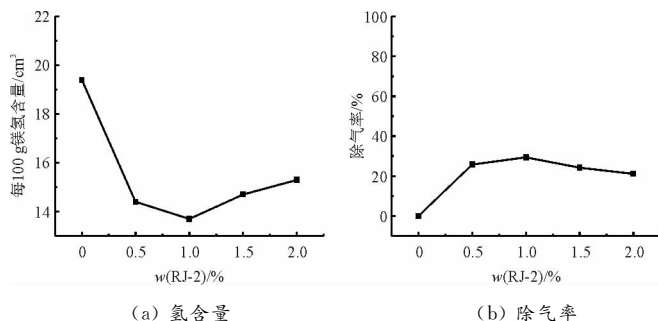


图 8 熔剂量对 AZ91 合金除气效果的影响

Fig.8 Effects of flux content on degassing of AZ91 alloy

13.7 cm³, 除气率为 29.4%, 继续添加熔剂会导致氢含量及除气率下降。

不同熔剂加入量的 AZ91 镁合金显微组织见图 9。

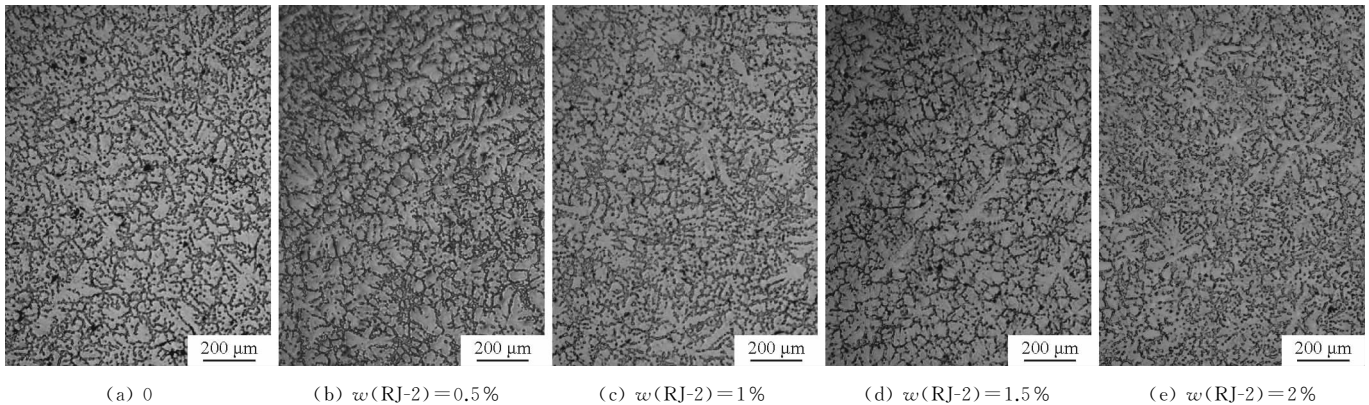
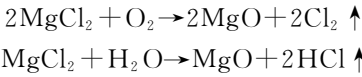


图 9 不同熔剂添加量下 AZ91 镁合金显微组织

Fig.9 Microstructures of AZ91 alloy degassed by different amounts of RJ-2

化效果不明显。

熔体中存在的夹杂物可以吸氢, 存在渣-气共存, 而熔剂的添加可去除熔体中的夹杂物, 因此具有除氢效果。而且 RJ-2 熔剂中的 MgCl₂ 能与空气中的氧及水气发生如下反应:



这也是熔剂具有除氢效果的另一原因。但是加入过多熔剂时会加大熔剂夹杂可能, 也会导致氢含量升高。所以, 加入 1% 熔剂静置 10 min, 除氢效果最好。图 10 为熔剂对 AZ91 镁合金力学性能的影响。可以看出, 当熔剂加入量为 0.5%~1% 时, 铸锭的力学性能最佳。与 C₂Cl₆ 对比可知, 熔剂添加量为 0.5%~1% 可达到较好的除氢效果, 但对力学性能影响较 C₂Cl₆ 稍差, 这与 C₂Cl₆ 还有细化作用有关。

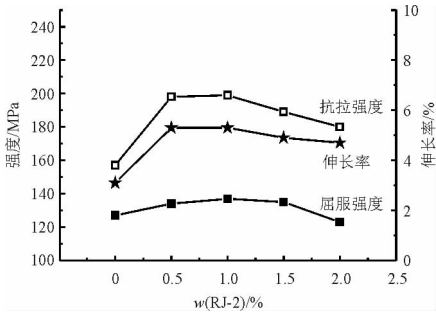


图 10 熔剂量对 AZ91 合金力学性能的影响

Fig.10 Effects of flux amount on mechanical properties of AZ91 alloy

2.4 氩气除气对 AZ91 镁合金的影响

将 1.5 kg 左右的 AZ91 镁合金放入铁坩锅中升温熔化, 达到 730 ℃ 时保温 10 min, 然后将高纯氩气通入到熔体中, 速率为 0.5 L/min, 通气 10 min, 然后人工搅拌, 在 700 ℃ 时浇注到模具中。表 1 为氩气处理后的含

可以看出, 未添加溶剂的铸锭组织中粗大的树枝晶较多, 而且随着熔剂量增加, 凝固组织中粗大的树枝晶没有发生细化, 因此认为熔剂对 AZ91 合金凝固组织的细

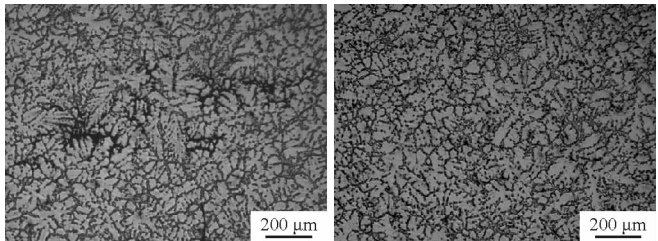
氢量及除气率。可以看出, 将每 100 g 镁氢含量降低至 7.3 cm³ 后, 除气率为 50.7%。

表 1 氩气处理后镁合金中的氢含量及除气率

Tab.1 Hydrogen content and degassing rate after argon treatment

	无除氢每 100 g 镁 中氢含量/cm ³	氩气除氢每 100 g 镁 中氢含量/cm ³	除氢效率/ %
AZ91	14.8	7.3	50.7

图 11 为 AZ91 镁合金使用氩气除氢前后的组织对比。可以发现氩气处理前后的凝固组织均由粗大的枝晶组成, 无明显变化。但相比氩气处理前, 处理后凝固组织更加致密。



(a) 无除氢 (b) 氩气除氢

图 11 氩气除氢前后 AZ91 镁合金的微观组织

Fig.11 Microstructure of AZ91 alloy before and after argon dehydrogenation

图 12 为氩气除氢前后 AZ91 镁合金的力学性能。

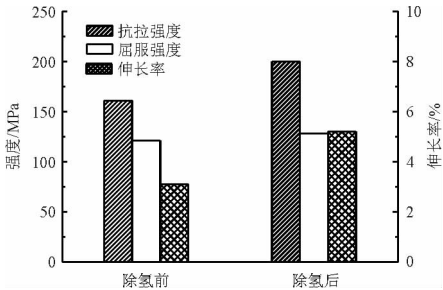


图 12 氩气除氢前后 AZ91 镁合金的力学性能

Fig.12 Effects of argon dehydrogenation on mechanical properties of AZ91 alloy

可以看出,试样室温抗拉强度为 200 MPa,屈服强度为 128 MPa,伸长率为 5.2%。

2.5 除氢工艺对 AZ91 镁合金力学性能的影响

图 13 为 4 种除氢工艺下的 AZ91 合金的氢含量和

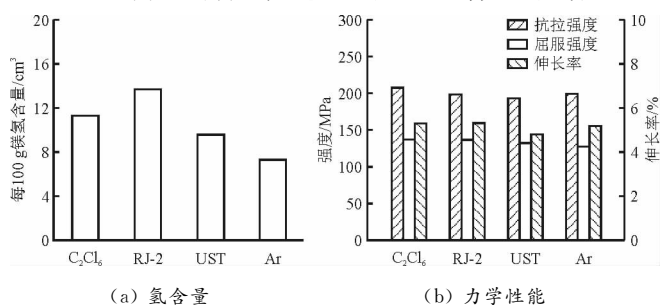


图 13 AZ91 合金不同除氢方法的氢含量及力学性能

Fig.13 Hydrogen content and mechanical properties of AZ91 alloy with different dehydrogenation methods

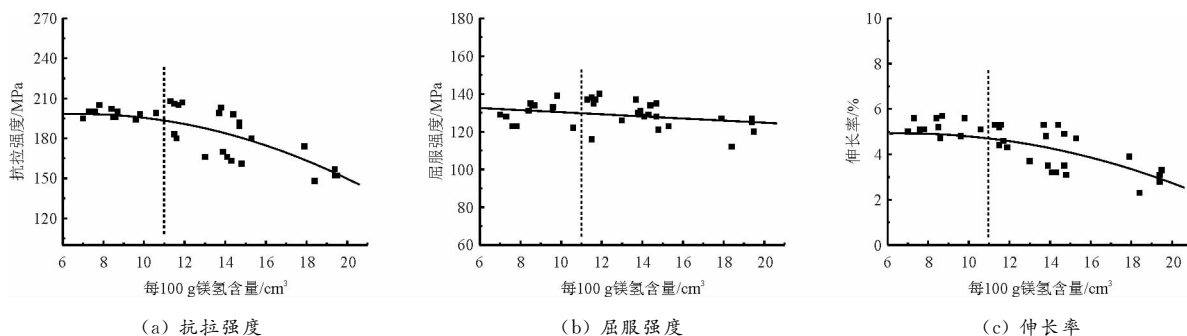


图 14 含氢量与 AZ91 合金力学性能的相关性

Fig.14 Effect of hydrogen content on mechanical properties of AZ91 alloy

上述原因主要考虑与熔体的吸氢特性有关,镁熔体在熔炼时会吸入铝熔体自身的两个数量级以上的氢,此时氢含量相当高,镁熔体在凝固时,生成的 MgH_2 化合物不易分解。在熔体凝固的过程中虽然一部分氢会离开,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)使用 C_2Cl_6 、超声处理、熔剂和氩气对 AZ91 镁合金的除氢中,对应的氢含量从大到小排序为熔剂除氢 $> C_2Cl_6$ 除氢 $>$ 超声除氢 $>$ 氩气除氢,氩气除氢效果最佳,每 100 g 镁氢含量为 7.3 cm^3 。

(2)镁合金铸锭的室温力学性能可以通过降低自身的氢含量来提高。但是如果镁合金每 100 g 镁氢含量低于 11 cm^3 时,继续降低含氢量对力学性能的提升作用不大。

参 考 文 献

[1] 杨细莲,邹宇,黄文婷,等.超声表面滚压对 AZ31B 镁合金摩擦磨损

力学性能。可以看出,氩气除氢后的含氢量最低,每 100 g 镁氢含量可达 7.3 cm^3 。对应的氢含量从大到小排序为熔剂除氢 $> C_2Cl_6$ 除氢 $>$ 超声除氢 $>$ 氩气除氢;从力学性能来看,虽然氩气除氢的氢含量低于 C_2Cl_6 除氢的效果,但其对应的力学性能却较 C_2Cl_6 略低,这可能与 C_2Cl_6 具有较好的细化作用有关。

2.6 氢含量对 AZ91 镁合金力学性能的影响

图 14 为 AZ91 镁合金中含氢量与力学性能的关系。可以看出,每 100 g 镁中氢含量在 11 cm^3 以上时,氢含量的降低会使铸锭的抗拉强度和伸长率增大;而当氢含量小于 11 cm^3 时,氢含量的降低对铸锭的力学性能提升不明显。从图 14b 中可以看出,氢含量对屈服强度影响较小。在氢含量较低时,继续除氢无法进一步提高合金的力学性能。

性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1214-1218.

[2] 费卓铭,林冲,李浩,等.超声及电磁场对铝合金熔体影响的数值模拟及试验研究[J].特种铸造及有色合金,2020,40(4):435-440.

[3] JIA Z, ZHANG Z Q, LE Q C, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on degassing of Mg-6Zn-1Ca alloy[J]. China Foundry, 2015, 12(1): 15-19.

[4] 赵正任,贾征,王彤,等.氩气处理对 AZ91 镁合金高温力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(4):445-448.

[5] 贾征.几种镁合金与铝合金熔体的除氢工艺研究[D].沈阳:东北大学,2013.

[6] 郭二军,张志,冯义成,等.Mg-7Sm-4Al 细化剂对 Mg-6Al 合金细化的研究[J].哈尔滨理工大学学报,2020,25(6):119-125.

[7] 邱玮,余容众,周兵,等.铸造镁合金晶粒细化研究进展[J].铸造技术,2020,41(11):1077-1087.

[8] 龙琼,胡素丽,李娟,等.提高镁合金耐蚀性的最新研究进展[J].电镀与涂饰,2020,39(15):1047-1052.

[9] 刘美娟,孙明,李家浩,等.Mg-Al 合金非连续析出相改性的研究进展[J].有色金属材料与工程,2020,41(4):39-47.

[10] 崔晓明,于智磊,白朴存,等.Mg-Al-Zn-Nd 合金微观组织演变及稀土相强化行为[J].稀有金属材料与工程,2020,49(6):2059-2066.

[11] TAMURA Y, KONO N, MOTEGI T, et al. Grain refinement of cast Mg-Al alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1998, 48(4): 395-399.

Mg-xGd-1Er-0.5Zr 合金的铸造流动性研究

伍迪灿¹ 杜文博¹ 丁宁¹ 李淑波¹ 王云峰² 朱训明² 王朝辉¹

(1.北京工业大学材料与制造学部; 2.威海万丰镁业科技发展有限公司)

摘 要 采用螺旋试样法研究了 Mg-xGd-1Er-0.5Zr($x=8, 10, 12$, 质量分数/%) 合金的铸造流动性能。结合 XRD 及热分析法, 研究了合金凝固过程中的析出行为, 分析了微观组织变化。结果表明, Gd 含量的增加会抑制 α -Mg 的形核析出, 使液相线温度降低, 合金熔体自由流动时间增加, 使凝固温度区间变窄, 能有效改善合金的流动性能。此外, Gd 含量的增加使 Mg-xGd-1Er-0.5Zr 合金的晶粒尺寸下降, 流动长度增加, 这是由于细化晶粒提高了合金流动时液流前端枝晶搭接时的固相率, 延迟了枝晶的搭接。

关键词 Mg-Gd-Er-Zr 合金; 凝固; 微观组织; 流动性能

中图分类号 TG146.22; TG113.26⁺1

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2021.08.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Casting Fluidity of Mg-xGd-1Er-0.5Zr Alloy

Wu Dican¹, Du Wenbo¹, Ding Ning¹, Li Shubo¹, Wang Yunfeng², Zhu Xunming², Wang Zhaohui¹

(1.Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology;

2.Weihai Wanfeng Auto Holding Group Co., Ltd.)

Abstract: The casting fluidity of Mg-xGd-1Er-0.5Zr ($x=8, 10, 12$, in mass fraction) alloy was investigated by spiral specimen method. The phase precipitation and microstructure of the alloy during solidification were analyzed by XRD and thermal analysis. The results show that with the increase in Gd content, the nucleation and segregation of α -Mg can be inhibited, and the liquidus is decreased and the free flow time of the alloy melt is increased, reducing the solidification temperature range and improving the fluidity of the alloy. In addition, the grain size of Mg-xGd-1Er-0.5Zr alloy is decreased and the flow length is increased with increasing in the Gd content, which is attributed to grain refinement that improves the solid phase ratio of dendrite lapping at the front of liquid flow and delays the dendrite lapping.

Key Words: Mg-Gd-Er-Zr Alloy, Solidification, Microstructure, Fluidity

镁合金具有密度低、比强度、比刚度高等特点, 被广泛运用于航空航天、汽车和 3C 领域^[1]。铸造是批量生

收稿日期: 2021-01-15; 修改稿收到日期: 2021-02-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301001, 2016YFB0301101); 北京市教委科技发展基金资助项目(KZ201810005005)

第一作者简介: 伍迪灿, 男, 1995 年出生, 硕士研究生, 北京(100124), E-mail: DicanWu@163.com

通信作者: 杜文博, 男, 1964 年出生, 教授, 北京(100124), E-mail: duwb@bjut.edu.cn

引用格式: 伍迪灿, 杜文博, 丁宁, 等. Mg-xGd-1Er-0.5Zr 合金的铸造流动性研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 987-991.

WU D C, DU W B, DING N, et al. Casting fluidity of Mg-xGd-1Er-0.5Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8): 987-991.

[12] THOMSON J P, LIU P, SADAYAPPAN M, et al. Effect of C₂Cl₆ on mechanical properties and microstructure of gravity permanent mold cast AZ91E[J]. AFS Transactions, 2004(112): 995-1 006.

[13] WANG W, WU G H. Investigation of flux containing GdCl₃ on recycling Mg-Gd-Y-Zr Scraps [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18S1, 292-298.

[14] 孙明, 吴国华, 王玮, 等. 镁合金纯净化研究现状与展望[J]. 材料导报, 2008, 22(4), 88-92.

[15] ESKIN G I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts[M]. Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 1998.

[16] LIU X, ZHANG Z Q, HU W Y, et al. Study on hydrogen removal of AZ91 alloys using ultrasonic argon degassing process[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26: 73-80.

[17] CHEN X R, LIAO Q Y, NIU Y X, et al. Comparison study of hot deformation behavior and processing map of AZ80 magnesium alloy casted with and without ultrasonic vibration[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 585-596.

[18] 贾征, 张志强, 乐启炽, 等. GW103K 镁合金熔体超声净化工艺[J]. 东北大学学报, 2011, 32(3): 396-399.

[19] 张海静, 陈星瑞, 乐启炽, 等. 变频超声半连续铸造 ZK60 锭坯的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(3): 283-287.

[20] 胡中潮, 张二林, 曾松岩. AZ91 镁合金旋转喷吹除气理论分析及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(9): 1 622-1 627.

[21] 许四祥. 镁合金熔体含氢量测试系统及除氢工艺的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.

(编辑: 张正贺)