DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.09.007

# 旋转喷吹对压铸铝合金(ADC12)熔体密度当量的影响

刘王强,马　洪,周　瑞,袁放放,孙春雨,杨新强
(陕西法士特齿轮有限责任公司,陕西 宝鸡 722409)

**摘　要**:研究了旋转喷吹除气工艺中转子转速、气体流量、惰性气体种类和挡板浸入铝液的有效长度对 ADC12 铝合金熔体密度当量的影响。结果表明,转子转速在 0~400 r/min 和气体流量在 0~20 mL/min 时,随着其数值增大,铝液的密度当量越小,除气效果越好;当转子转速和气体流量超高时,造成铝液翻滚重新卷气,除气效果变差。$N_2$ 和 Ar 对 ADC12 铝合金熔体的密度当量无明显影响;挡板烧损超过总长的 1/3 时,铝液的密度当量增大,除气效果变差。在本实验中,转子转速 400~450 r/min,氮气流量 20~25 mL/min 为最佳工艺参数。

**关键词**:压铸;ADC12 铝合金;旋转喷吹;密度当量;转子转速;氮气流量

**中图分类号**:TG243;TG146.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)09-0774-04

# Effect of Rotary Injection on the Melt Density Equivalent of Aluminum Die Casting Alloy ADC12

LIU Wangqiang, MA Hong, ZHOU Rui, YUAN Fangfang, SUN Chunyu, YANG Xinqiang
(Shaanxi Fast Group Co., Ltd., Baoji 722409, China)

**Abstract**: The effects of rotor speed, gas flow rate, inert gas type and effective length of baffle immersed in aluminum liquid on the melt density equivalent of ADC12 aluminum alloy in the process of rotating injection degassing were studied. The results show that when the rotor speed is in the range of 0~400 r/min and the gas flow rate is in the range of 0~20 mL/min, with the increase of the rotor speed, the equivalent density of liquid aluminum is smaller and the degasing effect is better. When the rotor speed and gas flow rate are too high, the liquid aluminum rolls and reenrolls, and the degassing effect becomes worse. $N_2$ and Ar have no significant effect on the density equivalent of ADC12 aluminum alloy melt. When the baffle burns more than 1/3 of the total length, the equivalent density of liquid aluminum increases and the degassing effect becomes worse. In this experiment, the optimum process parameters are rotor speed 400~450 r/min and nitrogen flow rate 20~25 mL/min.

**Key words**: die casting; ADC12 aluminum alloy; rotary degassing; density equivalent; rotor rotation speed; nitrogen flow rate

压铸技术作为铝合金零件生产的一种重要工艺,具有较高的成型精度、生产效率以及优良的表面质量,适合大批量自动化生产,在铸造产业中占据越来越高的地位[1]。ADC12 是一种常见的压铸铝合金,一直是航空、航天、军事和汽车工业中的重要结构材料[2]。然而,在实际生产中,由于熔炼和铸造工艺等诸多因素的影响,氢气通过吸附,扩散浸入铝合金熔体,导致铸件产生气孔、夹渣等缺陷,严重影响铸件的性能和使用寿命[3]。因此,在铸造之前选择合理的工艺除氢,提高铝合金浇注前的熔体质量,是解决压铸件内部缺陷,提高产品性能和使用寿命的一种有效途径。铝合金除气方法主要有:溶剂法、真空除气法、超声振动除气法、旋转喷吹除气等方法[4]。其中,旋转喷吹除气法作为气泡浮游法的一种,是目前被人们在实际工业生产中应用最为广泛且较经济有效的一种方法。本文作者通过铝合金熔体旋转喷吹除气实验,研究了转子转速,氮气流量等工艺参数对压铸铝合金密度当量的影响,并研究了其影响机理,获得了最佳工艺参数范围。

## 1　实验材料、设备及方法

实验材料选用 ADC12 铝合金(成分见表 1),熔炼设备为塔式熔炼炉,除气设备为史杰克西 DC2S 旋转除气机,测量设备是 VN6130DV 的密度当量仪。

**收稿日期**:2021-05-10

**作者简介**:刘王强(1991—),甘肃陇南人,硕士,工程师.主要从事铝合金铸造工艺研究方面的工作.
电话:09178567569,E-mail:1944867316@qq.com

表 1 ADC12 铝合金化学成分 $w$(%)
Tap.1 Chemical composition of ADC12 aluminum alloy

| Si | Fe | Cu | Mn | Ni | Mg | Zn | Sn | Ti | Pb | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9.6～12.0 | 0.55～0.90 | 2.2～3.5 | ≤0.5 | ≤0.5 | ≤0.3 | ≤1.0 | ≤0.2 | ≤0.3 | ≤0.15 | 余量 |

合金在熔化室熔炼，保温室精炼除渣，转运包旋转除气并再次除渣，出铝温度 710~730 ℃，除气时石墨转子通入高纯氮气(纯度 99.99%)，除渣后静置 10 min，用舀勺从已除气的合金液中舀取距液面 5 cm 以下的适量铝液 2 份，一份自然冷却凝固，并测得试样密度 $D_{atm}$，另一份在真空下冷却凝固并测得密度 $D_V$(真空压力为 7～9 kPa，抽真空时间 4 min)，然后计算密度当量 $D_I$。密度当量的计算公式为：

$$D_I=(1-D_V/D_{atm})\times 100\% \quad (1)$$

## 2 结果与讨论

密度当量是利用阿基米德浮力法，通过测试铝液纯度(致密度)从而精确、定量化的反映铝液中存在的氢和各种夹渣对铝合金铸件的综合影响，在一定的真空度下制备试样的过程中，铝液由于内外压力平衡作用，液体内部的气孔、缩松被放大。理论上绝对纯净的铝液，在常压和减压条件下制备的试样数值是一样的，即 $D_{atm}=D_v$，$D_I=0$；越纯净的铝液，$D_v$ 越接近于 $D_{atm}$，即 $D_I$ 值越小。也就是说，密度当量值 $D_I$ 越小，铝液质量越好。由此可知，由 $D_I$ 值的大小，即可准确判断铝液的综合质量。

### 2.1 转子转速对铝液密度当量的影响

氮气流量控制在 20 mL/min，转子转速设置为 200、300、400、500 和 600 r/min，分别测得除气 4 和 6 min 后铝液的密度当量，密度当量与转子转速的关系如图 1 所示。可以看出，转子转速在 0～400 r/min 范围内，随着转子转速的增加，铝液的密度当量数值越小，除气效果越好；当转速超过 400 r/min 后，随着转子转速的增加，铝液的密度当量数值越大。

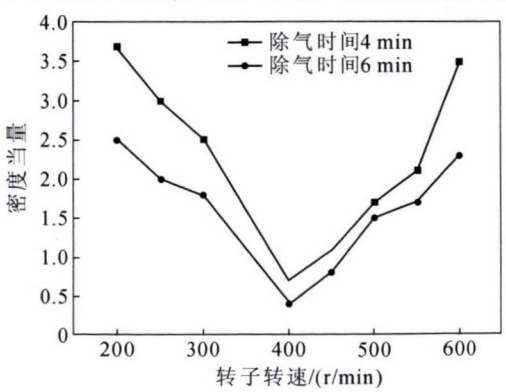



图 1 密度当量随转子转速的变化
Fig.1 Variation of density equivalent as a function of rotor speed

旋转喷吹除气的原理是通过转子向金属液中吹入惰性气体，通过转子的不断旋转，在熔体深处形成快速运动的气、水涡流，使气泡尺寸变得细小，分布均匀，从而实现浮游的目的，其原理见图 2。根据浮游法的分压脱氢原理，利用气体分压对溶解度的影响，控制熔体中的氢分压，造成熔体中的氢分压与外界环境存在很大的分压差，产生脱氢驱动力，使气体排出。采用浮游法除气，速度与铝液中的氢原子向气泡表面的传质速度有关，其传质系数越大，除氢气的速度越快，根据表面更新理论，传质速度 $k$ 可由公式(2)表示[5]。

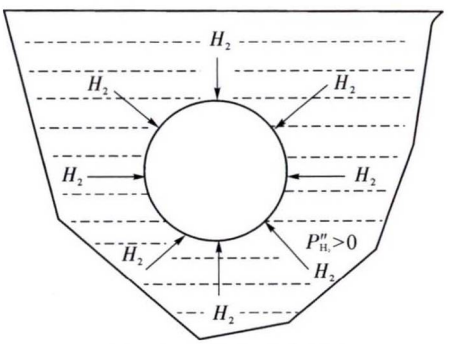



图 2 铝液除氢示意图[5]
Fig.2 Schematic dehydrogenation of aluminum melt

$$k=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{D}{t_S}}\approx 2\sqrt{\frac{DV_b}{\pi d_b}} \quad (2)$$

式中，$D$ 为氢在铝液中的扩散系数；$t_s$ 为气泡与铝液的接触时间；$V_b$ 为气泡的上浮速度；$d_b$ 为气泡的直径。

可以看出，提高旋转喷吹除气效率应尽可能增加气泡的数目，增加铝液与气泡的有效接触时间，减少氢在铝液中的扩散距离。由此，在转子转速在 0～400 r/min，随着转速的增加，能减小气泡直径，增大气泡在铝液中的运动速度，增大传质速度k，提高除气效率。然而，当转子转速超过 400 r/min 时，则会导致铝液翻滚，造成铝液重新卷入气体；并且，由于受到转运包容量的影响，过快的转速还会导致原本打碎的氮气泡重新聚集成大气泡，间接减少铝合金熔体中的气泡数量，导致除气效果下降。还可得知，除气 6 min 时铝液的密度当量会明显低于 4 min，实验结果与浮游法原理基本吻合。

### 2.2 氮气流量对铝液密度当量的影响

将石墨转子转速设置为 400 r/min，氮气流量设置为 15、20、25、30 和 35 mL/min，分别测得除气 4

和 6 min 后铝液的密度当量，不同氮气流量下铝液的密度当量如图 3 所示。

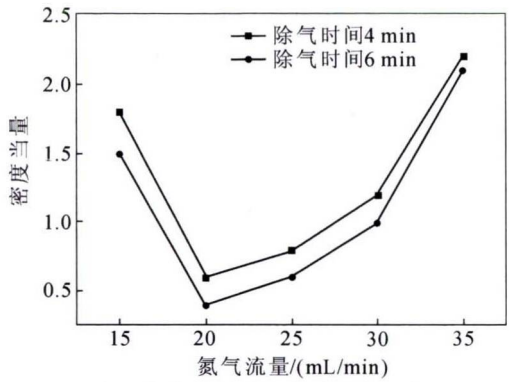
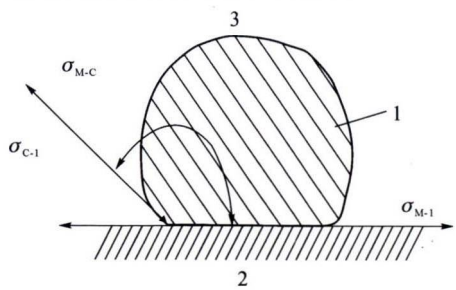



图 3 密度当量随氮气流量的变化

Fig.3 Variation of density equivalent as a function of nitrogen flow rate

分析图 3 中数据可知，氮气流量在 0～20 mL/min，随着大气流量的增大，铝液的密度当量数值越小，即除气效果越好。相反，当氮气流量超过 20 mL/min 时，随着氮气流量的增大，铝液的密度当量越大，除气效果变差。图 4 为浮游法去除夹渣物的原理示意图。可以看出，铝液中的 $Al_2O_3$ 夹渣被气泡吸附后，二者之间的接触表面积 S 上的自由能降低，根据热力学第二定律，系统表面自由能降低的方向为过程自动进行的方向[6]，因此，随着铝液中氮气数量的增加，$Al_2O_3$ 夹渣会随着吸附在其表面的气泡上浮至铝液表面，此为在合适范围内增加氮气流量后密度当量数值降低的一个方面。另一方面，随着氮气流量的增加，铝液中的气泡密度增大，气泡在铝液中的影响范围会增加，氮气与熔体的接触面积也会随之增加。根据斯托克斯定律，见公式(3)：




1- 铝液；2-$Al_2O_3$ 夹渣；3- 炉气

图 4 铝液除渣示意图[5]

Fig.4 The schematic diagram of cleaning aluminum

$$\nu=\frac{2}{9}\frac{r^2g(\rho_{Ar}-\rho_{Al,melt})}{\eta} \tag{3}$$

式中，$\rho$ 为气泡密度；$g$ 为重力加速度。

由公式 2 可知，气泡在铝液中上浮的速度 $\nu$ 跟铝液中气泡的密度 $\rho$ 和气泡的半径 $r$ 成正比，而增加氮气流量正好可以增加单位铝液容积内的气泡数量，增大气泡的上浮速度。根据公式(2)，气泡上浮速度的增加会增大氢气在铝液中的传质速度 $k$，因此会提升除气效果。对本实验所用的 800 kg 除气包，当氮气流量超过 20 mL/min 时，一方面气泡的直径会增大，大气泡的破裂会造成铝液表面不稳定导致铝液翻滚，造成铝液中重新卷入气体，密度当量增大；另一方面，气泡直径的增大导致其在铝液中的影响范围减小，除气效果降低。

### 2.3 其他因素对铝液密度当量的影响

除转子转速和氮气流量外，惰性气体的种类和挡板浸入铝液的有效长度也会影响铝液的除气效果。图 5 为氮气和氩气对压铸铝合金(ADC12)密度当量的影响。分析可知，氮气和氩气对铝液的密度当量没有明显影响，当温度较高时，氩气的除气效果略优于氮气，主要是因为氩气比氮气更稳定，并且 Ar 的相对原子质量比 N 原子大，更有利于排出气体。图 6 为挡板浸入铝液的有效长度对铝液密度当量的影响，其中长挡板为完整挡板，短挡板为烧损超过 1/3 的挡板。由图可知，完整的挡板比烧损超过 1/3 的挡板越有利于打碎铝液中的气泡，增加气泡的数量，提升除气效果。此外，出铝温度也会对铝液的密度当量产生影响，铝液温度越高，铝液的吸气倾向性增大，铝液的氧化烧损越严重，$Al_2O_3$ 夹渣物增加，在

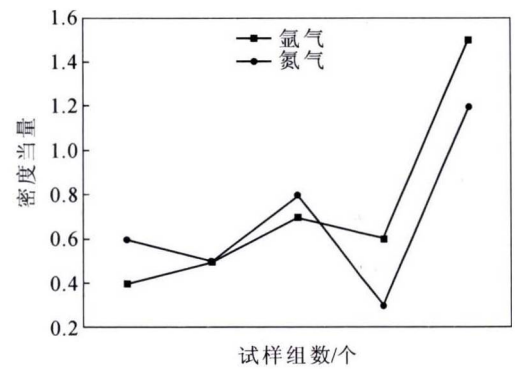



图 5 密度当量随惰性气体种类的变化

Fig.5 Variation of density equivalent as a function of inert gas type

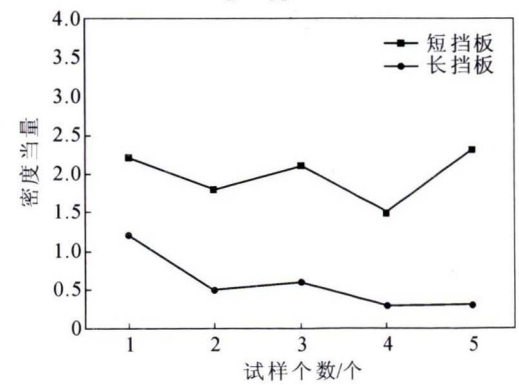



图 6 密度当量随挡板长度的变化

Fig.6 Variation of density equivalent as a function of length of baffle

(下转第 779 页)

量为 1.0%，球化剂为 FeSiMg 合金，

加入量为 1.2%，成分如表 8，出铁温度控制在 1 480~1 500 ℃。检测铸件化学成分、金相及力学性能，均满足 QT600-10 要求（见表 9）。

表8 化学成分 $w$(%)
Tab.8 Chemical composition

| C | Si | Mn | S | P | Mg | RE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.03 | 4.36 | 0.29 | 0.006 | 0.031 | 0.052 | 0.034 |

表9 力学性能
Tab.9 Mechanical properties

| 球化级别 | 抗拉强度 /MPa | 屈服强度 /MPa | 伸长率(%) |
|---|---|---|---|
| 2 | 634 | 540 | 18.6 |
| 2 | 620 | 535 | 17.3 |

## 3 结论

在碳当量在 4.1~4.4 时，采用冲入法添加 0.9%~1.2%FeSiMg 合金，随着硅含量的提高，铁素体含量增多，当硅含量达到 4.28%时，可以生产出满足 QT600-10 的铸件。

**参考文献：**

[1] 杨万虎，周文军，张守全，等. QT500-14、600-10 高硅球墨铸铁研究[J]. 铸造，2014, 63(8)：831-835.
[2] 张伯明. 铸造手册[M]. 北京：机械工业出版社，2002.
[3] 饶磊，张莹，耿茂鹏. 工艺参数对电渣熔铸熔滴形成过程的影响研究[J]. 铸造技术，2010，31(2)：154-157.

（上接第 776 页）

相同工艺参数下除气，其密度当量数值越大。

## 4 总结语

转子转速对压铸铝合金（ADC12）熔体旋转喷吹除气的效果具有重要的影响。当转子转速在 0～400 r/min，增加转子转速会更好的打碎气泡，减小其半径，增加铝液中分布的气泡数量，增加除气效果；当转子转速过高后，会使打碎的氮气泡重新聚集，还会造成铝液表面翻滚卷气，影响除气效率，本实验中最佳的转子转速为 400～450 r/min。

氮气流量对压铸铝合金（ADC12）熔体旋转喷吹除气的效果具有重要的影响。氮气流量在 0～20 mL/min，增大氮气流量会增加铝液中的气泡数量，增加气泡对铝液的作用范围，提升除气效果。当氮气流量过高时气泡的直径增大，大气泡的破裂会造成铝液表面不稳定导致铝液翻滚，铝液中重新卷入气体，降低除气效果。本实验中最佳的氮气流量 20～25 mL/min。

氮气和氩气对压铸铝合金（ADC12）熔体旋转喷吹除气效果的影响不明显；挡板浸入铝液的长度对除气效果具有重要影响，挡板烧损超过总长的 1/3 时，应立即更换挡板。根据现场经验，在满足工艺要求的前提下，尽可能降低出铝温度，减少铝液的烧损和吸气倾向性。

**参考文献：**

[1] 田云龙. 铝合金支架的压铸模具设计及工艺仿真[D]. 济南：山东大学，2015.
[2] 饶劲松，李华基，王翠玲，等. 压铸铝合金 ADC12.1R 的组织、性能及成形性 [J]. 重庆大学学报（自然科学版），2005, 28(10): 24-26.
[3] 李杰华，郝启堂. 铝合金熔体旋转喷吹除气净化设备的研制[J]. 铸造，2007(7): 731-734.
[4] 王丽萍，卢斌，黄永长，等. 7075 铝合金旋转喷吹精炼工艺的研究[J]. 特种铸造及有色合金，2008(11): 831-833.
[5] 米国发，龚海军，文涛. 铝合金旋转喷吹工艺的理论研究及其发展现状[J]. 航天制造技术，2006(6): 9-12.
[6] 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(5): 653-657.

**《铸件均衡凝固技术及应用实例》**

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1 铸铁件均衡凝固与有限补缩；2 铸铁件冒口补缩设计及应用；3 压边浇冒口系统；4 浇注系统大孔出流理论与设计；5 铸件均衡凝固工艺；6 铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7 浇注系统当冒口补缩设计方法；8 铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询：李巧凤 13991824906，技术咨询：13609155628