

[文章编号] 1004- 0609(2002)01- 0044- 04

# 脉冲进气旋转喷吹技术的水力模拟<sup>①</sup>

蒋海燕<sup>1, 2</sup>, 孙宝德<sup>1</sup>, 倪红军<sup>1</sup>, 丁文江<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**[摘要]** 在铝合金熔体净化旋转喷吹技术的基础上, 采用水力模拟实验研究了脉冲进气方式对气泡大小的影响。实验结果表明: 脉冲进气方式有利于产生射流, 使气泡变小, 并增加了气泡与熔体接触的比表面积, 从而改善了除氢的动力学条件, 有利于提高除氢效果。

**[关键词]** 脉冲气流; 旋转喷吹; 水力模拟

**[中图分类号]** TG 292

**[文献标识码]** A

氢在液态铝中的溶解度比在固态铝中的溶解度大 19 倍, 氢是造成铝合金铸件和铸锭气孔缺陷的主要原因<sup>[1~ 3]</sup>。铝合金熔炼过程中, 除氢处理是一个重要环节。除氢可采用化学方法, 也可采用物理方法。常用的是气泡浮游法, 其中旋转喷吹技术是目前世界上最流行、效果最好的一种除氢方法<sup>[4~ 8]</sup>, 它是使惰性气体通过旋转的转杆和转头喷入到铝合金熔体内部, 由于初始气泡中氢的分压为零, 所以熔体中的氢在压力差的作用下会扩散进惰性气泡中, 并随气泡的上浮而被排除。气泡的大小是除氢效果的关键因素<sup>[9, 10]</sup>, 气泡尺寸越小, 与熔体接触的比表面积就越大, 氢扩散进气泡的几率就越大; 同时气泡尺寸越小, 上浮速度越慢, 与熔体作用时间越长, 除氢效果越好。旋转喷吹技术是利用转头的高速旋转对气泡进行剪切破碎, 一般情况下气泡的尺寸为 3~ 8 mm<sup>[11]</sup>。为了进一步减小气泡的尺寸, 提高除氢效果, 本文作者在常规旋转喷吹技术的基础上, 首次提出采用脉冲进气方式, 旨在获得更为细小的气泡, 并对脉冲进气用于旋转喷吹技术进行初步的水力模拟研究。

拍下旋转喷吹过程坩埚中气泡的大小和分布情况。进气方式分为两种, 一种是常规的恒压进气, 另一种是脉冲进气, 以便作对比研究。

转头的材质为石墨, 形状结构如图 1 所示, 其中喷气孔是 5 个  $d2\text{ mm}$  的直孔。

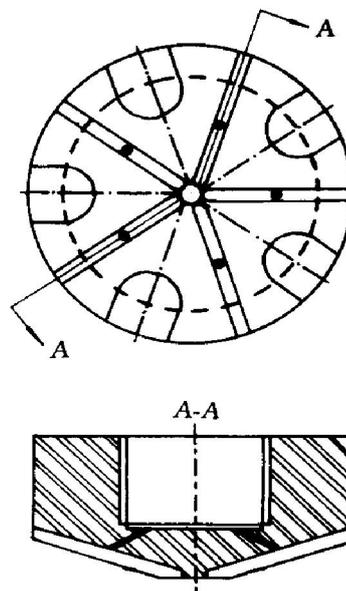


图 1 转头结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of rotating impeller head

## 1 实验

实验中采用 Pyrotek 公司生产的 Calgas2000 型旋转喷吹除气机和一个透明的有机玻璃坩埚( $d610\text{ mm} \times 900\text{ mm}$ ) 研究喷吹出的气泡大小。在有机玻璃坩埚中注入清水, 将除气机的转头降至水中, 通气后使转头旋转, 转速固定为 350 r/min, 用照相机

## 2 脉冲气流的产生

在 Calgas2000 型旋转喷吹除气机的气路中并联电磁阀, 一个控制电路可产生 0~ 100 Hz 的电脉冲输出, 控制着电磁阀的通闭, 如图 2 所示。当电磁阀打开时, A, B 两点均为高压, 当电磁阀关

① [基金项目] 国家重点研究开发规划资助项目(G1999064900); 中国博士后科学基金资助项目; 上海市博士后基金资助项目  
[收稿日期] 2001- 03- 31; [修订日期] 2001- 07- 02 [作者简介] 蒋海燕(1970- ), 男, 博士后。

闭时, 该支路无气体流过, 气体需经减压阀流过 (该支路是保证转头出口处有一个基本的压力, 以防止液体倒流), 此时 A 点为高压, B 点为低气压。因此, 随着电磁阀的不断通闭, B 点的压力变化为高—低—高—低……, 其频率取决于控制电路, 在 0~100 Hz 之间可调, 这样, 熔体中气体的吹入为脉冲方式。本文脉冲频率固定为 15 Hz。

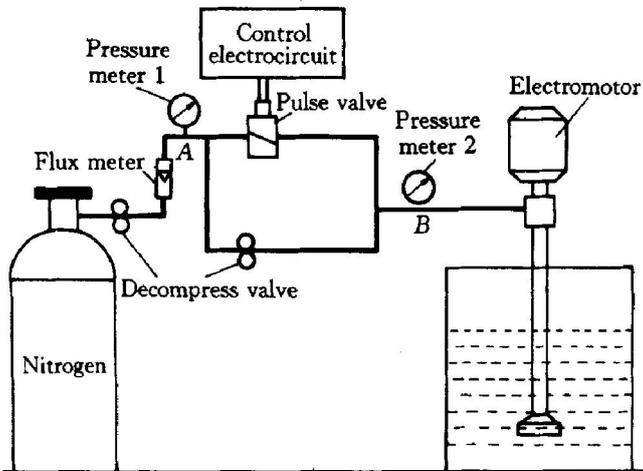


图 2 脉冲进气法工作原理示意图

Fig. 2 Scheme of principle of rotating and pulse puffing gas method

### 3 结果及讨论

实验中发现, 无论是恒压进气还是脉冲进气都存在相同的规律; 随着气流量的增大, 气泡的尺寸变小, 个数变多, 密度变大, 出现旋涡的时间滞后; 而相同气流量下, 脉冲进气可获得更为细小的气泡, 出现旋涡的时间也延长, 如图 3 所示。

向液体中吹气形成气泡有两种模型<sup>[12, 13]</sup>。一种是气流量较小情况下的鼓泡模型, 认为气体在孔口处扩大而形成气泡, 气泡达到一定大小后则脱离孔口, 这样周期地进行着; 鼓泡模型中气泡是在静力学条件下形成的, 尺寸较大, 主要取决于液体的密度和表面张力等因素。另一种模型是气流量较大情况下的射流模型, 认为气体在孔口处不扩大, 而形成连续的气体射流侵入到液体中, 在放射状射流区域的边界层附近可形成许多大小不同的气泡, 这些气泡在离开孔口一定距离后从射流中分离出来, 形成气泡群, 当射流断裂时也会形成气泡群; 射流模型中气泡是在动力学条件下形成的, 相比之下, 射流形成的气泡尺寸要比鼓泡形成的小得多。

Farlas 和 Robertson<sup>[14]</sup>的研究认为, 当喷射数  $N_i > 0.4$  时, 形成射流, 小于此值时则形成鼓泡。

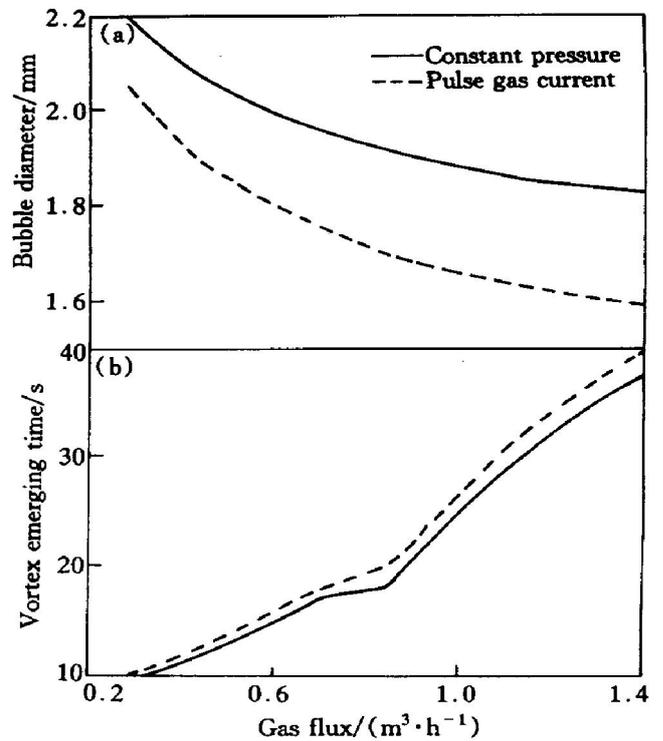


图 3 气流量对气泡尺寸(a)和出现旋涡时间(b)的影响

Fig. 3 Effect of gas flux on bubble size (a) and emerging vortex time (b)

$$N_i = \left[ \frac{2\pi^2 v_0^2}{d_0 g} \right]^{2/5} \left[ \frac{\rho_g}{\rho_l} \right] \quad (1)$$

式中  $v_0$ —喷嘴出口的气流速度, m/s;  $d_0$ —孔口直径, m;  $\rho_g$ —气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_l$ —液体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

研究认为, 一股气流射入到液体中, 既有鼓泡模型产生的气泡, 又有射流模型产生的气泡, 各占一定的比例。气泡的平均直径随雷诺数的增大而减小<sup>[15]</sup>。

将本实验条件下各个气体流量换算成气流速度并代入式(1)计算出喷射数, 如表 1 所示。可以看

表 1 气流速度和喷射数的计算值

Table 1 Calculated value of speed and  $N_i$  of gas current

Gas flux $/(m^3 \cdot h^{-1})$	Constant pressure		Pulse gas current	
	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$N_i$	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$N_i$
0.283	5	0.070	10	0.123
0.425	7.5	0.098	15	0.170
0.566	10	0.123	20	0.214
0.708	12.5	0.147	25	0.256
0.849	15	0.170	30	0.296
0.991	17.5	0.192	35	0.335
1.132	20	0.214	40	0.372
1.274	22.5	0.235	45	0.409
1.415	25	0.256	50	0.445

出,无论是恒压进气还是脉冲进气,随着气流量的增加,喷射数  $N_i$  也增加,所以射流程度增加。另外气流量增加使气流速度和雷诺数也增加,气泡尺寸变小。实验中,恒压进气下所有的实验点都不满足产生射流的条件,而脉冲进气在气流量大于  $1.274 \text{ m}^3/\text{h}$  时即可产生射流。因为,电磁阀的通闭占空比为 1:1,也就是通断时间的分配比例各为 50%,相同条件下脉冲进气的气流速度要比恒压进气的大 1 倍,所以脉冲进气更有利于射流的产生。从能量的角度看,脉冲进气势必会造成出口处的压力波动,增加紊流程度,也有利于减小气泡的尺寸。

以上讨论是基于转头静止的情况,气泡的尺寸

一般在 10 mm 以上,实际上在铝合金熔体净化旋转喷吹技术中,小气泡的获得主要是靠转头的旋转对大气泡进行剪切破碎来实现。但是,初始气泡的大小至关重要,因为初始气泡越小,破碎后的气泡也越小。由于气泡在液体中上浮的速度较快,剪切破碎的作用时间较短,因此减小初始气泡的尺寸就显得尤为重要。脉冲进气与恒压进气相比,在相同的气流量条件下可减小气泡的初始尺寸,因此也减小了破碎后的气泡尺寸,图 4 是一组不同气流量、不同进气方式下,旋转喷吹后气泡大小的对比照片,从中可以看出脉冲进气的优点。

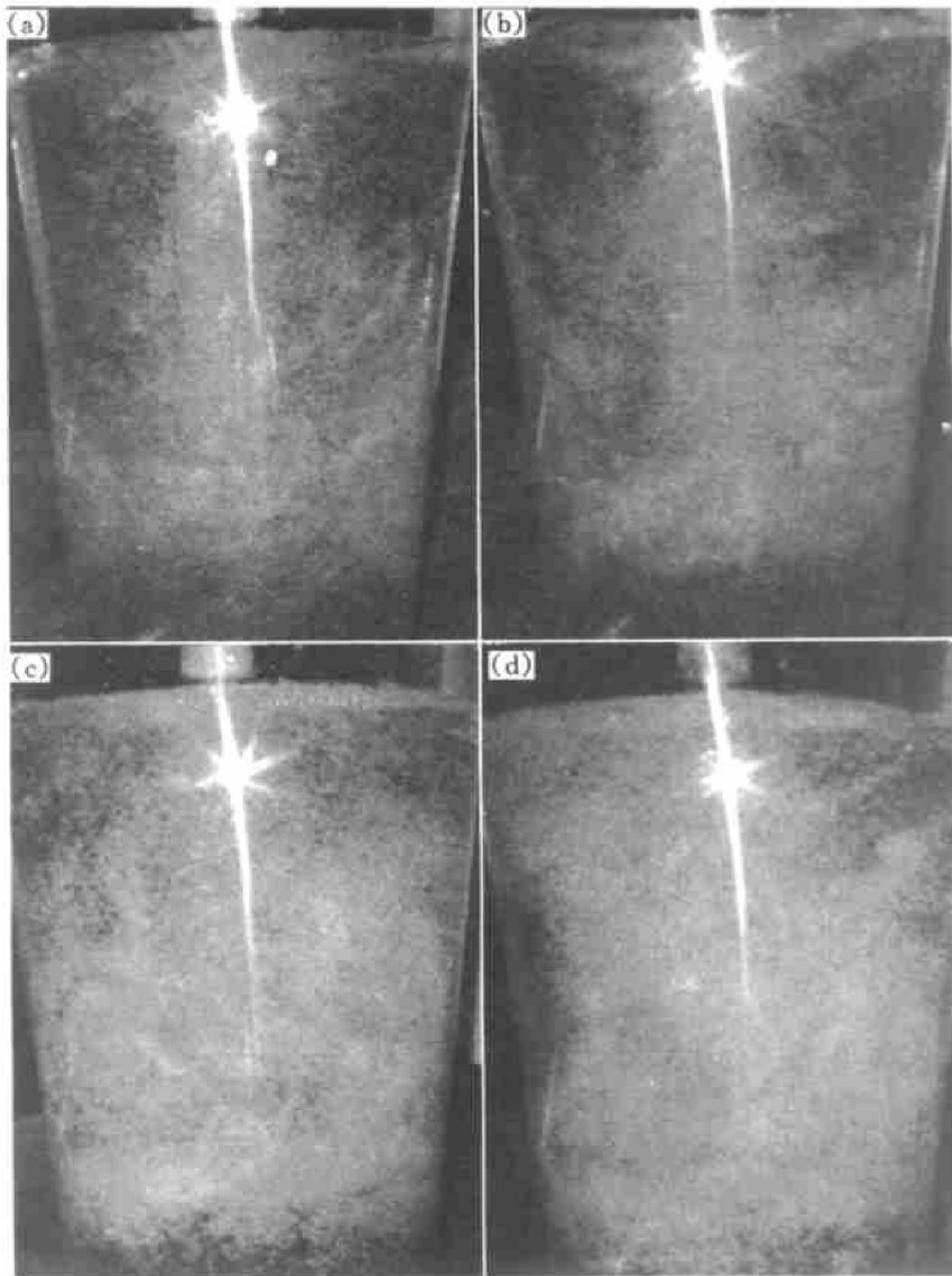


图 4 恒压进气和脉冲进气旋转喷吹后气泡的大小对比

Fig. 4 Comparison between sizes of bubble inputted with constant pressure or pulse gas current  
(a) —Gas flux  $0.283 \text{ m}^3/\text{h}$ , constant pressure; (b) —Gas flux  $0.283 \text{ m}^3/\text{h}$ , pulse gas current;  
(c) —Gas flux  $0.849 \text{ m}^3/\text{h}$ , constant pressure; (d) —Gas flux  $0.849 \text{ m}^3/\text{h}$ , pulse gas current

## 4 结论

- 1) 在气路中应用电磁阀可以产生气流的脉冲输出。
- 2) 相同气流量下, 脉冲进气方式有利于提高气流速度和喷射数, 有利于增加射流程度。
- 3) 在相同气流量、相同转头转速情况下, 脉冲进气比恒压进气可获得更为细小的气泡尺寸。
- 4) 脉冲进气可以应用于铝合金熔体净化旋转喷吹技术中。

### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] Rooy E L. Hydrogen: the one-third solution [ J ]. AFS Transactions, 1993, 101: 961– 964.
- [ 2 ] Sigworth G K. A scientific basis for degassing aluminum [ J ]. AFS Transactions, 1987, 95: 73– 78.
- [ 3 ] Corns R R, Rack T P. Practical implementation of aluminum degassing using a new non-toxic gas mixture [ J ]. AFS Transactions, 1989, 97: 983– 988.
- [ 4 ] Groteke D E. Influence of SNIF treatment on characteristics of aluminum foundry alloys [ J ]. AFS Transactions, 1985, 93: 953– 960.
- [ 5 ] Chen X G. Efficiency of impeller degassing and regassing phenomena in aluminum melts [ J ]. AFS Transactions, 1994, 102: 191– 197.
- [ 6 ] 党惊知, 武殿梁, 程 军. 铝合金旋转喷吹技术用于动态小熔池的研究 [ J ]. 华北工学院学报, 1998, 2: 133– 137.  
DANG Jing-zhi, WU Dian-liang, CHENG Jun. Study on the dynamic degassing of aluminum alloy melt with rotary impeller in small melting-pot [ J ]. Journal of North China Institute Technology, 1998, 2: 133– 137.
- [ 7 ] Christophe L, Gerard P. The use of rotating-impeller gas injection in aluminum processing [ J ]. JOM, 1991, 9: 27– 30.
- [ 8 ] 杨长贺. 旋转喷头法除氢效率的剖析与探讨 [ J ]. 轻合金加工技术, 1995, 2: 5– 10.  
YANG Chang-he. Light Alloy Fabrication Technology, 1995, 2: 5– 10.
- [ 9 ] Anderson A R. Rotary impeller degassing: practical observations [ J ]. AFS Transactions, 1987: 533– 536.
- [ 10 ] Bob M. Beyond rotary degassing [ J ]. Foundry Trade Journal, 1995, 6: 298– 300.
- [ 11 ] Stephen K, John R. Flux injection/ rotary degassing process provides cleaner aluminum [ J ]. Modern Casting, 1995, 4: 37– 40.
- [ 12 ] Farias L R. A unified approach to bubbling-jetting phenomena in powder injection into iron and steel [ J ]. Metall Transactions B, 1985, 16B: 211– 225.
- [ 13 ] 李沛勇, 贾 均, 陈玉勇. 熔剂喷吹处理过程的两种物理模型 [ J ]. 铸造, 1994, 2: 1– 8.  
Li Pei-yong, JIA Jun, CHEN Yu-yong. Two physical models in the process of flux injection [ J ]. Foundry, 1994, 2: 1– 8.
- [ 14 ] Farlas L R, Robertson D G C. Injection Phenomena in Extraction and Refining [ M ]. New York: Butterworth & Co Ltd, 1982. E1– 25.
- [ 15 ] 张信昭. 喷粉冶金基本原理 [ M ]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 890– 9.  
ZHANG Xin-zhao. Basic Principles of Powder Injection Metallurgy [ M ]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988. 890– 903.

## Water modeling of rotating impeller degassing with pulse gas current

JIANG Hai-yan<sup>1, 2</sup>, SUN Bao-de<sup>1</sup>, NI Hong-jun<sup>1</sup>, DING Wen-jiang<sup>1</sup>

( 1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ Abstract ]** Based on the technology of rotating impeller degassing in aluminum alloy melt, the effect of pulse gas current on the gas bubble size by studied with the water modeling method. Pulse gas current can be generated by using a pulse valve in the gas transportation system. The results show that, pulse gas current is advantageous to producing efflux and decreasing the gas bubble size, thus, the contact surface area between the melt and the gas is increased and the kinetic condition of degassing for hydrogen is improved.

**[ Key words ]** pulse gas current; rotating impeller degassing; water modeling

( 编辑 杨 兵 )