

# 铝合金熔体夹杂物含量快速检测方法

韩朝伟, 李大勇, 陈浩

(哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 为快速检测铝合金熔体夹杂含量, 基于过滤原理, 提出一种定值负压抽滤定时测压评价熔体夹杂含量的新方法, 应用计算机和ADAM模块研制了一种铝合金熔体夹杂含量炉前快速检测装置。通过向铝熔体中加入铝钛硼合金进行模拟试验, 以及对未知含量的熔体进行实测试验, 证明该方法和装置可以用于铝合金熔体夹杂含量炉前快速评价和指导熔体净化处理。

**关键词:** 铝合金熔体; 夹杂物; 抽滤法

随着薄壁复杂铝合金铸件需求量的不断增加和高性能铝合金材料在新兴行业的广泛应用, 铝合金熔体中残留夹杂物的检测和去除在产品质量控制环节显得愈发重要<sup>[1]</sup>。众所周知, 铝合金熔体中夹杂物的存在不仅使铝合金基体不连续, 在夹杂相的尖角处产生应力集中, 降低材料的强度, 尤其是疲劳强度<sup>[2]</sup>, 还会因此增加铝合金熔体的含氢量, 从而大幅度降低铸件的力学性能和抗腐蚀性能。在轧制板材、带材时夹杂物还会影响铸件表面质量<sup>[3]</sup>, 机械加工时损伤刀具, 挤压板材和铝型材时损伤挤压磨具等等。铝合金熔体中的夹杂物的引入源于生产过程中的多个环节, 一般为熔体在空气中生成的氧化物和尖晶石夹杂, 另外在净化过程和细化环节也会随油污炉料、操作工具等带入氟化物夹杂、氯化物夹杂、氮化物夹杂、碳化物夹杂、含Ti夹杂以及耐火材料夹杂等<sup>[4-7]</sup>。

炉前快速判断铝合金熔体夹杂含量, 采取行之有效的去杂措施, 对于确保铸件质量至关重要。为了实现铝合金熔体夹杂快速在线检测, 国内外研究者提出了多种方法, 如PoDFA法、LiMCA法、在线超声检测法、洛伦兹力检测法<sup>[8-11]</sup>。其中应用较为广泛的PoDFA法是基于过滤原理, 已经被改进发展为多种检测方法<sup>[12]</sup>。由于检测设备成本和后期维护费用较高, 使其在铸造领域应用受到限制。此外, PoDFA法在炉前快速检测方面也有进一步改进的空间。本研究以过滤法为基础, 研究了铝合金熔体夹杂含量定值负压抽滤定时测压检测法。与PoDFA检测法相比, 因将探头直接浸入被测熔体, 操作更为简便, 检测速度更快。

## 1 测试原理

### 1.1 熔体过滤阻力分析

当铝合金熔体通过过滤片时, 过滤总阻力包括纯过滤片栅栏作用造成的滤材阻力 $R_m$ 和过滤片表面夹杂物堆积造成的滤饼层阻力 $R_c$ 。Cao等人提出过滤速度与过滤压力差成正比, 与铝熔体粘度和过滤过程中的总阻力成反比<sup>[13-15]</sup>。过滤熔体速度与阻力和熔体粘度的关系如公式(1)所示:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A\Delta P}{\mu(R_c + R_m)} \quad (1)$$

式中:  $V$ 为 $t$ 时刻过滤熔体的体积;  $t$ 为过滤时间;  $A$ 为滤片面积;  $\Delta P$ 为滤片两侧压力差;  $\mu$ 为被测熔体粘度;  $R_c$ 为滤饼层阻力;  $R_m$ 为滤材阻力。

作者简介:

韩朝伟(1991-), 男, 硕士生, 研究方向为铝合金熔体质量快速评价。E-mail: 673019528@qq.com

通讯作者:

李大勇, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: dyli@hrbust.edu.cn

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)05-0483-05

基金项目:

国家自然科学基金(51174067)。

收稿日期:

2018-11-12 收到初稿,

2019-03-09 收到修订稿。

随着过滤过程中夹杂不断被捕获,导致滤片孔径逐渐被堵塞且滤片表面夹杂物堆积。滤饼层阻力与夹杂含量的关系如公式(2)所示:

$$R_c = \alpha \sigma \frac{V}{A} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为滤饼比阻;  $\sigma$  为单位体积熔体的夹杂量。

对不同夹杂含量的熔体进行抽滤检测时,夹杂量  $\sigma$  越高,过滤片捕获夹杂物所造成的阻力  $R_c$  越大,另一方面夹杂物含量高的熔体粘度  $\mu$  也相对较大。随着抽滤过程的进行,抽滤压力差  $\Delta P$  的减小和滤饼层阻力  $R_c$  的增大都会进一步影响抽滤曲线斜率。在相同初始真空度条件下,夹杂物含量越高,抽滤速度越慢,整体抽滤曲线越接近  $X$  轴。

## 1.2 定值负压抽滤定时测压方法工作原理

本试验采用定值负压抽滤定时测压方法检测铝合金熔体夹杂物含量。即采用具有固定初始压力的负压系统对被测熔体实施抽滤取样。熔体被不断过滤并进入取样室,与其连通的负压系统的压力逐渐上升,其上升速率与熔体抽滤速率有关。对于同一合金在相同温度下,负压回升越快,表明熔体过滤越快,进而表明熔体夹杂含量越低,反之负压回升越慢,表明熔体夹杂含量越高。因此,在限定相同抽滤时间的前提下,可用取样室内某一时刻的压力值表征被测熔体夹杂含量。在实验室条件下,获得某种铝合金熔体不同夹杂含量的负压抽滤曲线,经过生产条件下适当修正可作为现场检测比对用标准曲线。对于定时测压值偏离标准曲线的情况,可利用其相邻两条标准曲线该时刻压力值进行插值计算确定熔体夹杂含量。

## 2 检测装置硬件构成

### 2.1 定值负压抽滤单元

定值负压抽滤单元是熔体夹杂测定装置的重要组成部分,其构成如图1所示。探头由三段圆柱钢管焊接而成,探头中部为内径  $\Phi 50$  mm、高100 mm的圆柱体,上端管内径  $\Phi 6$  mm,下端管内径  $\Phi 12$  mm。抽滤探头采用不锈钢材料制成,一端接真空管,另一端镶嵌过滤网。探头放入铝合金熔体后,负压系统形成密闭状态。真空管通过电磁阀与负压室连接,真空泵和气压经电磁阀与负压室连接。真空泵用于调节抽滤单元负压。气压用于检测结束后吹出探头内熔体,以保证更换滤片后探头本体可重复利用。为了监测被测熔体温度、负压回路气体温度和负压室内压力变化,抽滤单元中设置了在抽滤全程实时监测熔体温度的热电偶1和监测负压回路气体温度的热电偶2,以及监测负压室压力变化的精密气压传感器。为了降低熔体温度

对负压室内气体压力的影响,连接探头和负压室的真空管需外加冷却装置,负压回路气体温度超标时,需启动温度补偿计算程序。此外,为了减少探头外熔体静压头对抽滤速率的影响,探头浸入深度需要精确控制,本研究采用位移传感器配合直线电机驱动,在计算机控制下完成。为防止铝液氧化膜影响检测结果,测试时需氧化膜拨开后立即插入探头。

## 2.2 控制单元和数据采集单元

定值负压抽滤定时测压检测装置的控制单元和数据采集单元构成如图2所示。由计算机通过研华ADAM-4520和ADAM-4050输出数字量信号,控制真空泵、气泵、直线电机和电磁阀1、2、3执行相应动作。位移传感器、气压传感器、热电偶1、2和报警系统通过研华ADAM-4118和ADAM-4520向计算机输入深度、压力、温度和液位信号,数据采集模块ADAM-4118内部集成有AD590冷端温度补偿电路<sup>[16]</sup>。计算机软件界面能够实时显示检测过程中的气压变化曲线、定时检测的气压值以及计算所得的熔体夹杂含量。

## 3 试验过程与结果

### 3.1 铝合金熔体夹杂模拟检测

根据高洪吾的研究,在铝液中加入2%~7%的

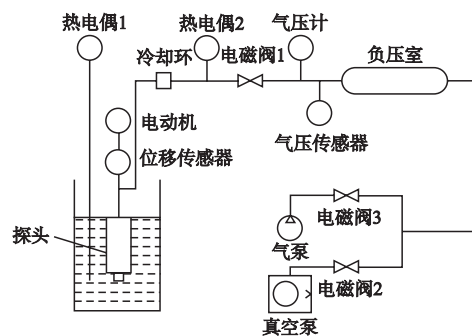


图1 负压抽滤单元结构简图

Fig. 1 Schematic structure of negative pressure suction filter unit

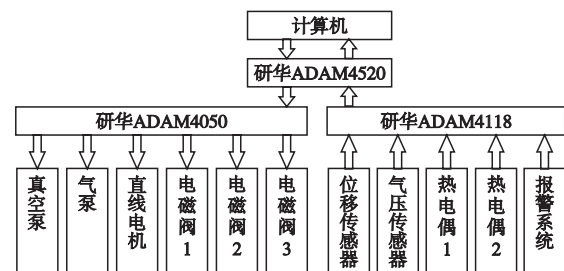


图2 控制单元和采集单元构成图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanism controlling unit and data collecting unit

AlTi<sub>3</sub>B合金, 可以形成0.05%~0.2%的TiB<sub>2</sub>夹杂物<sup>[17]</sup>。由于试验不可避免引入夹杂, 本研究用金相试样夹杂所占面积比表示夹杂总含量, 采用抽滤检测表征的也是熔体中的夹杂总量。在熔体实验室条件下, 选用直径12 mm、目数60的不锈钢金属网过滤片过滤熔体, 通过向铝熔体加入不同数量的AlTi<sub>3</sub>B合金, 进行熔体夹杂物含量检测模拟试验。

首先进行纯铝抽滤试验, 通过设定不同初始负压值实施抽滤。发现当初始负压为94.24 kPa时, 经200 s可使铝液充满探头。为了最大限度利用抽滤探头有效容积并保证熔体不被吸入抽滤单元管路和真空室, 将初始负压设定为94.24 kPa。

对不同夹杂含量的铝合金熔体进行抽滤检测时, 试验用电阻炉控制炉温为780 ℃。先关闭电磁阀1、3, 打开真空泵和电磁阀2使负压单元达到预设初始真空度; 关闭电磁阀2, 启动驱动电机, 将探头置于熔体液面上方5 cm处, 预热1 min后驱动探头浸入熔体, 打开电磁阀1开始检测; 检测完成后, 关闭电磁阀1、2, 打开电磁3, 当负压室中气压超过大气压时打开电磁阀1, 探头内熔体被吹出。

图3为试验获得的不同夹杂含量熔体的抽滤曲线, 与图3曲线对应的熔体试样金相照片如图4所示。使用画网格的方法对金相照片进行夹杂含量测量, 测量的夹杂所占面积百分比分别为0.096%、0.207%、0.511%和1.053%。如图3所示, 随着夹杂含量增加, 曲线斜率降低。选择合适的定时测压时间, 可以实现铝合金熔体夹杂含量的炉前快速定量分析。考虑到检测分辨率

的因素, 试验以200 s时刻作为检测时间点, 对不同夹杂含量的熔体分别进行3次抽滤, 抽滤曲线在200 s时刻的气压值如表1所示。对未知夹杂含量的熔体, 利用200 s时刻测得的气压值和该时刻相邻两标准曲线气压值及其对应的夹杂含量进行插值计算, 可得出被测熔体夹杂含量。

### 3.2 铝合金熔体夹杂炉前检测实测

试验随机选用不同夹杂含量的熔体A、B试样进行现场测试, 同样采用60目滤片和94.24 kPa的初始负压进行抽滤检测, 测试结果如图5所示, 与图5曲线对应的熔体试样金相照片如图6所示。将检测曲线和相应的试样金相进行对比, 随着夹杂含量增多, 检测曲线愈

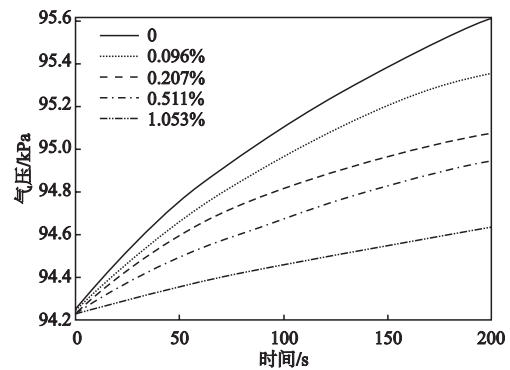
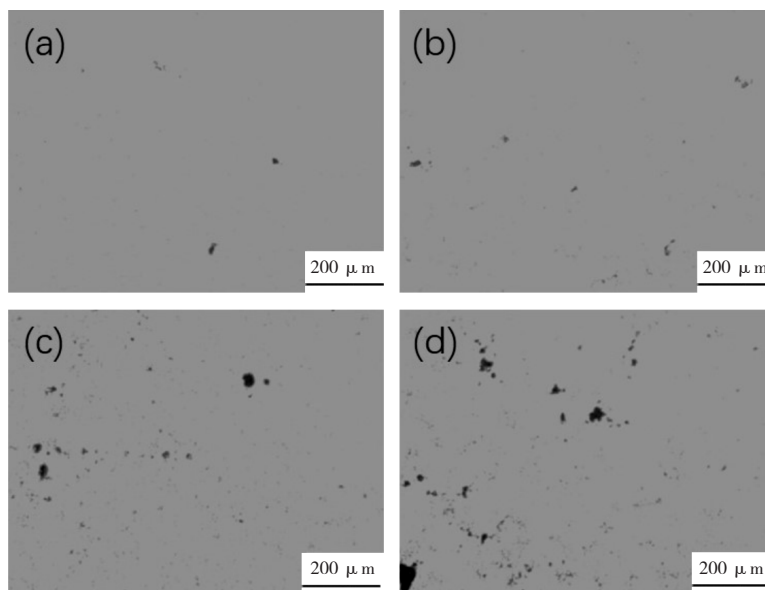


图3 不同夹杂物含量熔体的抽滤曲线  
Fig. 3 Suction filtration curves of melt samples with different proportions of inclusions



(a) 夹杂含量0.096%; (b) 夹杂含量0.207%; (c) 夹杂含量0.511%; (d) 夹杂含量1.053%

图4 不同夹杂物含量试样金相照片

Fig. 4 Metallographs of samples with different proportions of inclusions

表1 不同夹杂含量熔体抽滤曲线200 s时刻气压值  
Table 1 Pressure value at 200 s in suction filtration curves of melt samples with different proportions of inclusions

| 夹杂含量/% | 气压值/kPa  |          |          |          |
|--------|----------|----------|----------|----------|
|        | 1组       | 2组       | 3组       | 平均值      |
| 0      | 95.618 2 | 95.610 9 | 95.604 1 | 95.611 1 |
| 0.096  | 95.358 9 | 95.365 2 | 95.347 9 | 95.357 3 |
| 0.207  | 95.075 3 | 95.081 9 | 95.081 3 | 95.079 5 |
| 0.511  | 94.946 9 | 94.956 6 | 94.944 7 | 94.949 4 |
| 1.053  | 94.634 5 | 94.647 3 | 94.630 0 | 94.637 3 |

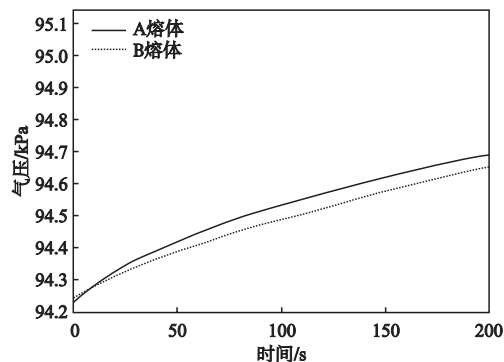
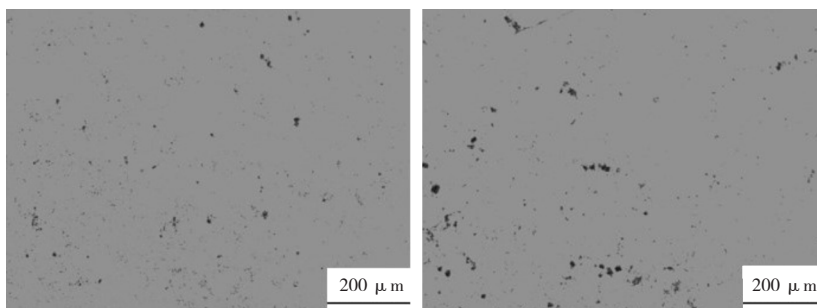


图5 A、B熔体实测曲线

Fig. 5 Measured curves of melt samples A and B



(a) A熔体

(b) B熔体

图6 A、B熔体金相照片

Fig. 6 Metallographs of melt A and B

表2 实测曲线200 s时刻气压值与夹杂含量  
Table 2 Pressure value at 200 s in measured curves and corresponding inclusions content

| 熔体 | 气压值/kPa  |          |          |          | 计算夹杂量/% |
|----|----------|----------|----------|----------|---------|
|    | 1组       | 2组       | 3组       | 平均值      |         |
| A  | 94.687 5 | 94.698 4 | 94.680 9 | 94.688 9 | 0.963   |
| B  | 94.655 6 | 94.664 4 | 94.651 1 | 94.657 0 | 1.019   |

接近X轴,与模拟检测结果基本一致。分别对熔体A、B进行3次抽滤试验,得到3次检测曲线在200 s时刻的平均气压值(见表2)。利用模拟试验建立的夹杂含量和200 s时刻气压值的对应关系,通过插值计算得出相应的夹杂含量(见表2)。以熔体A为例,3次抽滤检测200 s时刻气压平均值为94.688 9 kPa,介于图3中的标准曲线4和5之间。标准曲线4和5在200 s时刻的气压平均值为94.949 4 kPa和94.637 3 kPa,标准曲线4和5的夹杂含量为0.511%和1.053%,通过线性插值法计算夹杂含量 $\sigma$ 如式(3)所示。计算结果与金相图片显示基本符合。

$$\sigma = \frac{(1.053 - 0.511) \times (94.9494 - 94.6889)}{94.9494 - 94.6373} + 0.511 \quad (3)$$

## 4 结论

(1) 采用具有固定初始负压的负压单元对铝合金熔体实施抽滤,在预定时刻测定负压单元压力的方法,利用所测压力值、相邻两标准曲线对应压力值及夹杂含量等数据进行插值计算,可以实现铝合金熔体夹杂含量快速定量检测。

(2) 实现定值负压抽滤定时测压方法的装置由负压抽滤单元和数据采集构成,抽滤探头尺寸和滤片孔径影响初始负压选定和预定测压时刻确定,进而对检测速度和精度有直接影响,为了满足不同检测要求,设计中需将几者优化组合。

(3) 实际生产中需根据现场条件制作相应的标准曲线,经不断修正以实现铝合金熔体夹杂含量的定量快速测量。

**参考文献:**

- [1] 李龙, 夏承东, 宋友宝, 等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望 [J]. 轻合金加工技术, 2017, 45 (9): 18-25.
- [2] 毕娟娟, 廖恒成, 潘治, 等. 铸造铝合金中氧化夹杂物的研究进展 [J]. 铸造, 2009, 58 (12): 1224-1228.
- [3] JARADEH M M, CARLBERG T. Analysis of distribution of nonmetallic inclusions in aluminum DC-cast billets and slabs [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2012, 43 (1): 82-91.
- [4] LIU L, SAMUEL F H. Assessment of melt cleanliness in A356.2 aluminium casting alloy using the porous disc filtration apparatus technique: Part I Inclusion measurements [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32 (22): 5901-5925.
- [5] MURTY B S, KORI S A, CHAKRABORTY M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. Metallurgical Reviews, 2002, 47 (1): 3-29.
- [6] JARADEH M M, CARLBERG T. Method developed for quantitative analysis of inclusions in solidified aluminum ingots [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2011, 42 (1): 121-132.
- [7] 罗筱雄, 崔建忠, 长海博文, 等. 铝合金熔体中夹杂物及其在线检测技术研究进展 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 138-144.
- [8] WANNASIN J, SCHWAM D, WALLACE J F. Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191 (1): 242-246.
- [9] FERGUS J W. Sensors for monitoring the quality of molten aluminum during casting [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2005, 14 (2): 267-275.
- [10] ONO Y, MOISAN J F, JEN C K, et al. An on-line ultrasonic cleanliness analyzer for molten light metals [J]. JOM, 2004, 56 (2): 59-64.
- [11] WANG X, THESS A, MOREAU R, et al. Lorentz force particle analyzer [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120 (1): 188-189.
- [12] 张廷丽, 时利. 影响LiMCA CM测渣系统的因素及其对铸造工艺的改进 [J]. 轻合金加工技术, 2013, 41 (5): 33-36.
- [13] CAO X, JAHAZI M. Estimation of resistance of filter media used for Prefil Footprinter tests of liquid aluminium alloys [J]. Metal Science Journal, 2013, 21 (10): 1192-1198.
- [14] CAO X. Filtration resistance during pressure filtration tests of liquid aluminium alloys [J]. International Journal of Materials Research, 2013, 97 (8): 1163-1171.
- [15] CAO X. A new indirect method of measuring the contents of solid inclusions in liquid aluminium alloys [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41 (13): 4285-4292.
- [16] 李大勇, 范聪泽, 肖鹏, 等. 一种基于惰性气体循环法的新型测氢装置研制 [J]. 铸造, 2014, 63 (7): 665-668.
- [17] 高洪吾, 秦颖, 杨长贺, 等. 铝液氧化夹杂物DMIRF-II检测方法的试验研究 [J]. 轻金属, 1993 (3): 49-53.

---

## A Rapid Method for Detecting Content of Inclusions in Aluminum Alloy Melt

HAN Chao-wei, LI Da-yong, CHEN Hao

(School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:**

To detect inclusion content of aluminum alloy melt rapidly, a novel method based on the theory of filtration was proposed by measuring the pressure at a certain time in the constant initial pressure. The computer and ADAM modules were employed to develop an apparatus for detecting the content rapidly. Simulation and on-site experiments were carried out by adding AlTi<sub>5</sub>B alloy into aluminum melt to detect the content of inclusions in the aluminum melt. Results showed that this method and the developed device are convenient and useful to rapidly on-site test the content of inclusions in aluminum alloy melt and guiding the purification treatment of melt.

**Key words:**

aluminum alloy melt; inclusions; method of suction filtration