

# 基于超重力过滤净化铝硅合金的实验研究

## Experimental Study on Purification of Al-Si Alloy Based on High Gravity Filtration

段宇恒<sup>1</sup> 董立花<sup>2</sup> 赵烁<sup>1</sup> 宋高阳<sup>1\*</sup> 郭同来<sup>1</sup>

Yuheng Duan<sup>1</sup> Lihua Dong<sup>2</sup> Shuo Zhao<sup>1</sup> Gaoyang Song<sup>1\*</sup> Tonglai Guo<sup>1</sup>

1. 河北工程大学材料科学与工程学院 中国·河北 邯郸 056000

2. 河北工程大学管理工程与商学院 中国·河北 邯郸 056000

1.School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056000, China

2.School of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056000, China

**摘要:** 将废弃铝硅合金中的初生硅相模拟为铝熔体中的固相夹杂物, 利用超重力技术对铝硅合金熔体进行过滤净化, 在超重力作用下, 铝熔体通过过滤石墨毡流到下部坩埚内, 初生硅相被截留在过滤石墨毡上部, 实现了铝熔体与初生硅相的彻底分离。通过过滤后, 获得过滤铝内部被有效净化。本研究可为再生铝的过滤净化以及金属熔体中硅的富集回收提供的科学依据。

**Abstract:** The primary silicon phase in the waste Al-Si alloy is simulated as the solid inclusion in the aluminum melt, and the Al-Si alloy melt is filtered and purified by the high gravity technology. Under the action of high gravity, the aluminum melt flows into the lower crucible through the filtered graphite felt, and the primary silicon phase is intercepted on the upper part of the filtered graphite felt, realizing the complete separation of the aluminum melt and the primary silicon phase. After filtration, the filtered aluminum is obtained and the interior is effectively purified. This study can provide a scientific basis for the filtration and purification of regenerated aluminum and the enrichment and recovery of silicon in metal melt.

**关键词:** 超重力技术; 铝硅合金; 过滤净化; 初生硅相; 分离

**Keywords:** high gravity technology; Al-Si alloy; filtration and purification; primary silicon phase; separation

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(项目编号: 51904086); 河北省自然科学基金资助项目(项目编号: E2018402098、E2019402086)。

**DOI:** 10.12346/etr.v4i3.5790

## 1 引言

铝合金因为有着密度小、强度高、耐腐蚀、加工性能好等一系列优点, 已经成为了工业应用第二大金属材料, 但由于原铝产量下降和现役铝合金材料使用年限逐渐到期, 因此具有节约矿产与能源、经济社会效益高、可持续发展等特点的再生铝产业开始受到人们关注。然而, 经过回收再生的铝合金由于成分混杂等原因, 再生铝的洁净度无法保证其使用性能的要求。传统的再生铝净化方法主要以普通重力沉降、过滤<sup>[1]</sup>、气泡上浮<sup>[2]</sup>为主, 这些方法对于去除尺寸较大夹杂有着良好的效果, 但对于去除微小颗粒效果不佳<sup>[3]</sup>, 因此

探索一种高效的再生铝净化的方法成为再生铝行业的重要研究方向。

超重力作为一种过程强化的新技术在 21 世纪得到冶金工作者的日益重视, 目前超重力技术主要运用于蒸馏、精馏、环保除尘和生物氧化反应过程强化等方面<sup>[4-5]</sup>。目前在冶金领域, 超重力技术的研究还处于基础阶段, 主要以冶金渣中有价元素的富集提取<sup>[6-8]</sup>、废弃光伏电路板中贵金属的富集回收<sup>[9]</sup>、金属熔体的净化提纯<sup>[10-12]</sup>以及金属凝固组织细化<sup>[13]</sup>等方面的研究。Wang Z<sup>[8]</sup>等利用超重力场对工业镀锌渣进行恒温过滤以富集回收金属锌, 在超重力  $G \geq 500$  的条件下, Zn 渣中

【作者简介】段宇恒(2001-), 男, 中国山西长治人, 在读本科生。

【通讯作者】宋高阳(1987-), 男, 讲师, 从事超重力冶金技术研究。

超过 79% 的 Zn 得到回收, 并且纯度达到 99% 左右, 其中杂质 Fe 的去除率达到 97%。Meng L<sup>[9]</sup> 等采用超重力三步过滤法对废弃电脑印刷电路板进行研究, 经过逐步选择性分离与富集, 有价金属元素 Pb、Sn、Zn 与 Cu 的回收率分别达到了 96.37%、92.32%、93.71% 和 97.90%, 而且贵金属 Au、Ag 与 Pd 在最终残渣中得到了有效富集。Yangy H<sup>[10]</sup> 等利用超重力场去除 Pb-3Cu 熔体中杂质 Cu 相, 经过超重力场  $G=700$  富集处理后, Pb 试样的净化率高达 96.27%, 金属回收率为 81.02%。Song G Y<sup>[11]</sup> 等研究了含有氧化夹杂的 Al 熔体经过不同超重力场处理后的净化效果, 发现密度较大的  $MgAl_2O_4$  氧化夹杂沿着超重力方向在试样底部区域进行聚集, 当超重力  $G \geq 20$ , 试样内部氧去除率均在 99.37% 以上。

本课题采用将废弃 A390 铝硅合金中的初生硅相模拟为铝熔体中的固相夹杂物, 铝硅合金作为材料, 将铝硅合金中的硅元素模拟为钢液中的非金属夹杂, 利用超重力技术和自行设计的过滤设备, 对 A390 铝硅合金进行净化过滤。观察不同重力场下铝合金的宏观过滤效果, 并分析超重力场下铝硅熔体的净化效果与净化铝的收得率, 为超重力净化过滤再生铝合金提供科学依据。

## 2 实验方法

### 2.1 实验准备

图 1 为超重力过滤示意图, 实验所用的过滤器为石墨坩埚和高纯度的石墨毡相结合装配而成, 过滤的介质是石墨毡。

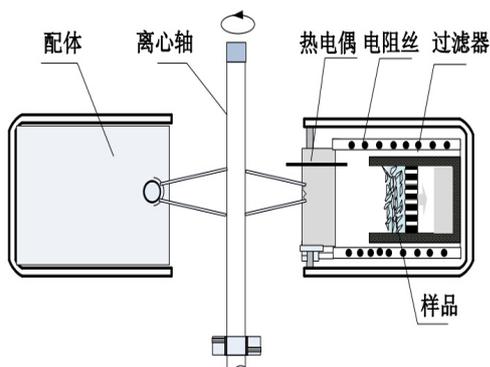


图 1 超重力过滤示意图

### 2.2 实验内容

实验开始将 15g A390 铝合金放入高纯石墨坩埚内, 升温至 700℃, 保温 10min, 使合金完全融化, 快速降温至 600℃, 保温 10min, 将离心机调至特定转速并开启进行超重力处理, 处理时间为 5min。处理结束后, 取出试样, 并喷水快速冷却。将金属试样切成两个半圆, 一部分经过镶样、粗磨用于宏观表征; 试样的另一部分经过抛光制成用于显微分析的试样, 利用 JSM 6480Lv 型扫描电镜和 Leica DMRX 型金相显微镜对试样内部特定区域进行显微观察, 观察初生硅颗粒在试样内部的分布规律。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 不同重力场下宏观的过滤效果

图 2 为不同重力场下获得的试样过滤效果的宏观图, 由图可以明显地看出, 在  $G=1$  时, 金属熔体依然被过滤毡截留在上部, 金属试样没有任何的过滤效果; 然而当  $G=150$  时, 经过超重力处理后, 金属熔体穿过滤毡流到下部坩埚内, 初生硅颗粒被截留在过滤毡上部, 从而实现了初生硅颗粒与铝熔体的彻底分离。

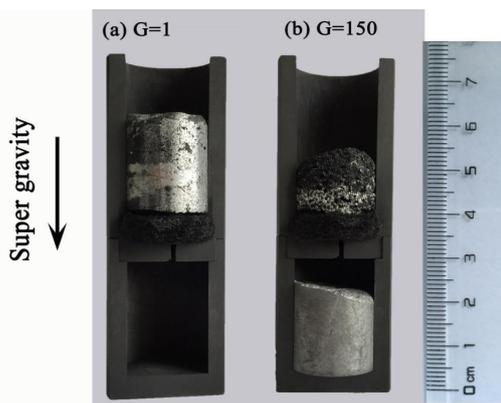


图 2 不同重力系数下的宏观过滤效果

### 3.2 显微组织下硅颗粒的分布

#### 3.2.1 过滤铝

图 3 为不同重力场处理后金属试样内部不同区域的硅颗粒分布情况。由图可以看出, 当在普通重力场下, 试样内部的初生硅颗粒弥散分布; 而当  $G=150$  时, 经过超重力处理后, 获得的过滤铝内部的初生硅颗粒明显减少, 试样中部已经很难看到初生硅颗粒, 只有在试样的上部和底部残留着少量的硅颗粒。

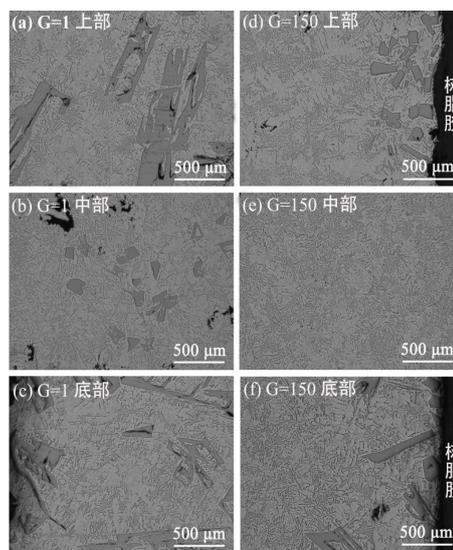


图 3 过滤铝内部显微组织结构图

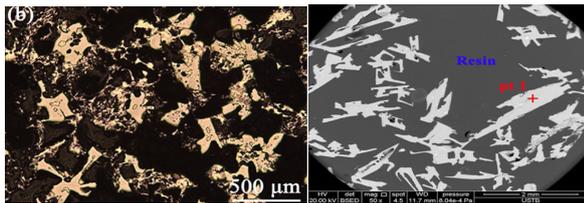
#### 3.2.2 上部过滤渣

图 4 为重力场  $G=150$  条件下过滤铝熔体得到的上部过滤渣宏观以及显微组织图。由图 4 (c) 可以看出, 上部过

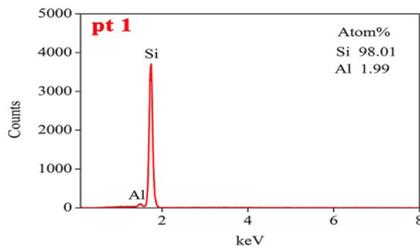
滤渣主要为初生硅相，过滤渣中的初生硅大多为大尺寸的针状或者块状。这说明经过超重力过滤后，铝熔体中的绝大部分的初生硅颗粒被过滤毡截留在了上部坩埚内，金属熔体得到了一定程度的净化。



(a) 图为过滤渣宏观实物图



(b) 图为过滤渣光镜下内部显微组织



(c) 图为电镜下显微形模能谱图

图 4 过滤渣

### 3.3 不同重力场对过滤铝收得率的影响

经过超重力过滤处理后金属熔体内部的硅颗粒可以与金属基体彻底分离，过滤得到的铝试样得到了很好的净化。为具体表征重力系数与过滤铝收得率的关系，利用式(1)分别计算不同重力场条件下过滤铝的收得率

$$\eta = \frac{w_f}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\eta$ ——过滤铝的收得率；

$w_f$ ——获得的过滤铝的质量；

$w_0$ ——过滤前合金的原始质量。

在普通重力场下，由于铝熔体的表面张力以及黏滞阻力，铝熔体不能穿过过滤毡，从而得不到净化的效果。当重力系数  $G \geq 50$  时，铝熔体能够穿过过滤毡流到下部容器内从而达到熔体净化的目的，这是由于较大的超重力能够克服过滤毡对铝熔体的阻力。而且随着重力系数的增大，过滤铝的收得率逐渐增加，如图 5 所示，当  $G=500$  时，过滤铝的收得率

达到了 90.4%。

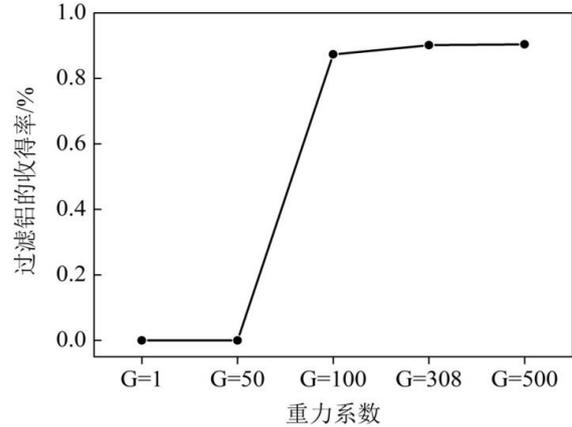


图 5 过滤铝的收得率

## 4 结论

结论利用超重力场对废弃铝硅合金熔体进行净化过滤，初生硅相与铝熔体基体能够彻底分离，铝硅合金能够得到有效净化。随着重力系数的增大，过滤铝的收得率逐渐增加，当  $G=500$  时，过滤铝的收得率达到 90.4%。

## 参考文献

- [1] Song G, Song B, Yang Z, et al. Removal of Inclusions from Molten Aluminum by Supergravity Filtration[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016,47(6):3435-3445.
- [2] Gaustad G, Olivetti E, Kirchain R. Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies[J]. Resources Conservation and Recycling, 2012,58(none):79-87.
- [3] Koichi Takahashi, Shoji Taniguchi. Electromagnetic Separation of Nonmetallic Inclusion from Liquid Metal by Imposition of High Frequency Magnetic Field[J]. ISIJ International, 2003,43(6):820-827.
- [4] 邹海魁,邵磊,陈建峰.超重力技术进展——从实验室到工业化[J].化工学报,2006(8):1810-1816.
- [5] Jian-Feng Chen School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China. High-gravity Process Intensification Technology and Application[A]. 亚太化学工程联盟、中国化工学会、中国大连市人民政府、中国化工企业管理协会.Book of Abstracts of the 12th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress(Vol 5-6 New Frontiers in Chemical Engineering and Education for Chemical Engineers)[C].亚太化学工程联盟、中国化工学会、中国大连市人民政府、中国化工企业管理协会:中国化工学会,2008:1.
- [6] Li, Guo, Gao. Isothermal enriching and separation of perovskite

- phase from CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO melt by centrifugal force[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014,41(10):776-783.
- [7] Gao J, Yu L I, Guoli X U, et al. Separation of Olivine Crystals and Borate Containing Slag from CaO-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System by Utilizing Super-Gravity[J]. Isij International, 2017,57(3):587-589.
- [8] Wang Z, Gao J, Shi A, et al. Recovery of zinc from galvanizing dross by a method of super-gravity separation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017:S0925838817341671.
- [9] Meng L, Wang Z, Zhong Y, et al. Supergravity Separation for Recovering Metals from Waste Printed Circuit Boards[J]. Chemical Engineering Journal, 2017:S1385894717307362.
- [10] Yang Y, Song B, Song G, et al. Enriching and Separating Primary Copper Impurity from Pb-3 Mass Pct Cu Melt by Super-Gravity Technology[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016,47(5):2714-2724.
- [11] Yang, Yuhou, Xin, et al. Separating Behavior of Nonmetallic Inclusions in Molten Aluminum Under Super-Gravity Field[J]. Metallurgical and Materials Transactions, B. Process metallurgy and materials processing science, 2015.
- [12] Song G, Song B, Yang Z, et al. Removal of Inclusions from Molten Aluminum by Supergravity Filtration[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(6):3435-3445.
- [13] 李勉,万超,华称文,等.超重力场对ZL205A合金凝固组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(10):1104-1107.