

# 精炼工艺对 A356 铝合金熔体渣含量及性能的影响

李雪科<sup>1</sup>, 刘雨泽<sup>2</sup>, 霍臣明<sup>1</sup>, 葛素静<sup>1</sup>, 田战峰<sup>1</sup>, 张祎程<sup>1</sup>, 苑高利<sup>1</sup>

(1. 河北新立中有色金属集团有限公司, 河北省轻金属合金材料技术创新中心, 河北省轻金属合金材料产业技术研究院, 河北保定 071100; 2. 保定市立中车轮制造有限公司, 河北保定 071100)

**摘要:** 采用Prefil-Footprinter铝渣检测仪、室温拉伸机、金相显微镜等多种检测分析手段, 研究了精炼工艺对A356合金熔体渣含量及力学性能的影响。研究结果显示, 加入精炼剂量为铝液总量的0.15%, 以20 L/min流量通入高纯度氩气15 min, 静置20 min后进行检测, 此时A356合金熔体中渣含量最低, 且力学性能最高。因此该精炼工艺将对现场A356铝合金锭熔炼和生产具有一定的指导意义。

**关键词:** A356合金; 精炼; 铝熔体; 渣含量; 力学性能

目前市场上汽车铸造铝合金轮毂大量选用A356合金, A356合金不仅具有较好的流动性、抗热裂性等铸造性能, 可铸造复杂形状的铸件, 通过热处理提高强度, 并且还具有良好的塑性和冲击韧性, 是一个具有优秀的综合性能的铸造铝合金<sup>[1]</sup>。铝合金熔体中的夹杂物是影响铝合金材料性能的重要因素, 通常夹杂物以块状、长针状、片状、弥散颗粒状等多种形态存在<sup>[2]</sup>。由于多数夹杂物与铝基体在弹性模量、膨胀系数上存在差异, 在变形过程中夹杂物周围会产生应力集中成为裂纹的先发区, 其会严重破坏铝合金车轮等铸件的性能<sup>[3]</sup>。有研究表明, 10~20  $\mu\text{m}$ 的夹杂物会对铸件质量带来灾难性的影响, 而今随着铸件薄壁化、轻量化的要求以及技术的不断发展, 对夹杂物的尺寸限制也越来越严格<sup>[4]</sup>。因此通过研究熔炼工艺降低铝合金熔体中渣含量是生产高性能A356铝合金产品的关键。

随着社会的发展进步, 航空航天、轨道交通等领域对铝合金材料提出了新要求, 其中铝熔体净化作为铝合金生产的上游环节更是面临着新的挑战<sup>[5]</sup>。铝熔体净化方法种类繁多, 国外铝熔体净化技术较早从单一精炼向联合精炼发展, 开发出成熟的精炼方法和系统, 如SNIF法、FILD法、MINT法、LARS系统等, 国内在引进后通过改良或技术研发, 开发了DFU法、FARP净化技术等<sup>[6-7]</sup>。目前国内企业常用夹杂检测方法为K模检测法, 但此法只能简单判断无法定量检测, 而PoDFA法检测铝液渣含量, 可获取过滤时间-重量曲线, 并对夹杂物含量进行定性定量分析<sup>[8]</sup>。越来越多客户将铝渣含量作为重要指标, 国内铝材企业引进ABB公司铝渣检测仪用于铝合金生产质量控制。目前PoDFA法检测铝液渣含量检测行业标准还未正式实施, 各大企业检测水平参差不齐, 并且铸造铝合金采用该方法报道较少。因此, 本文通过控制精炼和通入惰性气体的复合工艺结合Prefil-Footprinter铝渣检测仪等设备, 开展熔炼净化工艺对A356铝合金熔体渣含量及性能影响的研究, 为A356铸造铝合金锭生产现场进行工艺指导, 提高生产水平, 同时为铸造铝合金铝渣检测给予一定的参考。

## 作者简介:

李雪科(1994-), 男, 工程师, 研究生, 研究方向为铝合金新材料制备及工艺。电话: 18104993365, E-mail: 359320616@qq.com

## 通讯作者:

刘雨泽, 男, 助理工程师, 本科。电话: 15732261808, E-mail: liuyuze@lzwheel.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

06-0774-05

## 收稿日期:

2024-02-01 收到初稿,

2024-03-30 收到修订稿。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验设计了二因素三水平正交试验, 每组合金成分目标值进行配料, 检测结果

如表1所示。试验采用工业铝锭 (Al 99.85%)，3303工业硅，金属镁，Al-10Ti中间合金，Al-10Sr丝材、Al-5Ti-B丝材。将预先准备的工业铝锭和工业硅置于30 kg电阻炉中，由室温升至750 ℃，待铝锭和工业硅完全熔化后，将Al-10Ti中间合金和金属镁加入铝液并充分搅拌后，加入四通新材生产的STJ-A1精炼剂进行搅拌并扒去表面浮渣，静置5 min后，控制石墨棒通入高纯氩

气 (控制流量20 L/min)，在除气过程中将Al-10Sr丝材和Al-5Ti-B丝材投入铝液中进行变质和细化处理，之后静置20 min，采用OBLF QSG750- II型铝镁基直读光谱仪检测合金成分。控制精炼剂加入量，加入量分别占铝液总重的0.05%、0.15%、0.3%，惰性气体通入时间分别为5 min、15 min、30 min。具体方案如表2所示。

表1 A356铝合金化学成分  
Table 1 The chemical components of the A356 casting alloy

项目	Si	Fe	Mg	Ti	Mn	Cu	Zn	Sr	Al
范围	6.7~7.3	0.10~0.14	0.26~0.30	0.09~0.12	≤0.10	≤0.20	≤0.05	0.015~0.025	余量
目标值	7.0	0.12	0.28	0.10	0.05	0.05	0.03	0.020	余量
A1	7.02	0.12	0.28	0.11	0.06	0.03	0.02	0.018	余量
A2	7.05	0.11	0.29	0.12	0.03	0.05	0.03	0.020	余量
A3	6.92	0.13	0.27	0.10	0.04	0.03	0.03	0.019	余量
B1	6.98	0.12	0.27	0.11	0.06	0.04	0.03	0.021	余量
B2	7.01	0.13	0.26	0.11	0.05	0.05	0.04	0.019	余量
B3	7.05	0.12	0.29	0.12	0.03	0.05	0.03	0.020	余量
C1	7.09	0.11	0.28	0.10	0.04	0.04	0.03	0.018	余量
C2	6.93	0.11	0.27	0.11	0.03	0.06	0.02	0.018	余量
C3	6.95	0.11	0.29	0.11	0.03	0.06	0.02	0.019	余量

表2 试验方案  
Table 2 Experimental scheme

组别	精炼剂占铝液总量/%	通入惰性气体时间/min
A1	0.05	5
A2	0.05	15
A3	0.05	30
B1	0.15	5
B2	0.15	15
B3	0.15	30
C1	0.3	5
C2	0.3	15
C3	0.3	30

## 1.2 试验方法

图1所示为铝渣检测仪实物图。使用液勺盛取2 kg成分合格铝液倒入Prefil-Footer铝渣检测仪坩埚中，坩埚提前作预热处理并安装过滤片，同时密封坩埚，铝液达到700 ℃时，在上方通入干燥压缩空气施加0.08 MPa压力，使铝液经过滤片流至设备电子秤上方器皿中，称取过滤重量。当过滤时间达到150 s或电子秤上方器皿重量达到1.4 kg时，设备自动停止过滤，设备计算机自动检测过滤时间-重量曲线。

取出过滤片进行剖切，将剖切样品打磨抛光后采



图1 Prefil-Footer铝渣检测仪  
Fig. 1 Prefil-Footer aluminum slag detector

用Axio Imager M2m型蔡司金相显微镜进行夹杂物检测计算，观测范围为过滤片与铝合金交接面上下5 mm以内。每组剩余铝液浇注3根 $\phi 10$  mm力学性能拉伸试棒，试棒浇注冷却条件与铝合金车轮辐板部位保持一致，试棒冷却完毕后按540 ℃ × 5 h + 130 ℃ × 3 h进行热处理，力学性能测试由CMT5105微控电子万能试验机完成。

## 2 试验结果

### 2.1 过滤时间 - 重量曲线对比

图2为不同组别熔体的过滤时间-重量曲线。图2中

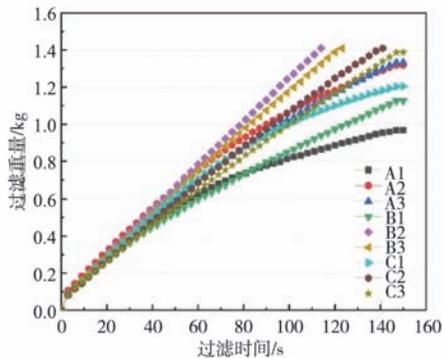


图2 不同试验组别的铝液过滤曲线

Fig. 2 Filtration curves of the aluminum liquid for different experimental groups

曲线斜率越大,单位时间内过滤的重量越多,铝熔体纯净度越高。由图2可知,B2组、B3组和C2组过滤重量均接近1.4 kg,B2组过滤时间最少,为110 s;A1、A2、A3、C1、C2和B1组均未达到最大过滤重量,A1组过滤重量最少,为0.8 kg,由图2过滤时间-重量曲线判断铝液纯净度次序为: B2 > B3 > C2 > C3 > A3 > A2 > C1 > B1 > A1。不同组别对比表明,B2组过滤效果最

好,即此时精炼剂使用量为铝液总重的0.15%,惰性气体通入时间为15 min。过滤曲线表现最好,不能证明铝液中过滤的夹渣最少,还需采用PoDFA金相分析法作进一步验证。

## 2.2 渣含量及典型夹杂对比

表3为不同组别A356铝液夹渣含量测试结果。将不同组别过滤样品剖切制样,对过滤口从左向右依次进行夹渣分析,通过软件计算每个视野夹渣面积,再加权求和得到切面夹渣总面积,计算得到总含渣量。表3所示试样夹渣成分主要为氧化铝、氧化镁、尖晶石、盐类等。从渣含量看,铝液过滤重量增加,渣含量明显减少。氧化膜夹渣与铝熔体表面氧化膜反复破坏有关,通入惰性气体时间越长,铝液搅动时间越长,铝液中细小氧化膜数量含量越高,呈正相关变化规律。B2组渣含量最低,B3组氧化膜数量最少,综合来看,B2、B3和C2组渣含量基本相同,铝液纯净度相当,考虑到生产成本和工作效率,B2组精炼剂使用量为铝液总重的0.15%,惰性气体通入时间为15 min,本组精炼净化方案最优。

表3 不同组别A356铝液夹渣含量结果

Table 3 Results of the slag inclusion content in A356 aluminum liquid for different groups

组别	过滤重量/kg	夹渣的面积重量比/(mm <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )					总含渣量	氧化膜/条	
		氧化铝	氧化镁	尖晶石	盐类	其他		长度 > 200 μm	长度 ≤ 200 μm
A1	0.968 3	0.068 5	0.014 0	0.081 0	-	0.000 2	0.163 7	2	21
A2	1.317 5	0.033 5	0.008 2	0.046 5	-	-	0.088 2	3	15
A3	1.333 1	0.030 9	0.015 7	0.022 8	-	0.000 4	0.069 8	0	25
B1	1.125 9	0.048 7	0.019 3	0.049 7	0.001 2	-	0.118 9	1	17
B2	1.409 9	0.007 2	0.002 4	0.010 5	-	0.000 1	0.020 2	0	11
B3	1.408 9	0.007 9	0.008 7	0.015 9	0.000 5	0.000 3	0.033 3	1	9
C1	1.204 1	0.032 6	0.012 0	0.025 3	0.001 3	-	0.071 2	2	13
C2	1.409 5	0.009 8	0.009 6	0.011 5	0.000 8	-	0.031 7	3	10
C3	1.387 8	0.018 2	0.007 9	0.013 8	0.000 6	0.000 3	0.040 8	1	18

根据不同夹渣含量结果,选取其中典型夹渣物金相进行观察分析,结果如图3所示。其中图3a为A1组,总含渣量最多,且夹杂物较大,包含细长条状氧化膜夹渣,浅灰色不规则颗粒状氧化镁夹渣,黑色絮状氧化铝夹渣,深灰或黑色不规则形尖晶石等<sup>[8]</sup>;图3b为B2组,含渣量最少,氧化铝夹渣、氧化镁夹渣和尖晶石形貌较为细小;图3c为C1组,除含有氧化镁夹渣、氧化膜夹渣外,还可观察到大尺寸尖晶石与氧化铝复合夹渣物,分析认为可能是精炼剂加入较多,且夹渣相互吸附,未能及时清除造成;图3d为C2组,可观察到尖晶石、环形氧化镁夹渣,其中深灰色环形线为尖晶石,浅灰色颗粒聚集带为氧化镁夹渣,由熔体氧化膜

结合氧化镁后形成<sup>[8]</sup>。

## 2.3 力学性能对比

图4为不同组别拉伸试棒力学性能测试结果。由图4可知,抗拉强度呈现阶梯性变化规律,A1、A2、A3和B1组强度相当,B2、B3与C1、C2、C3组强度相当,在B2组达到峰值,为263 MPa,结合过滤时间-重量曲线可知,过滤时间越短、过滤重量越大,试棒的抗拉强度也越高。拉伸试棒的屈服强度范围为188~208 MPa,在B2组达到最大值,为208 MPa,屈服强度与过滤时间-重量曲线呈现出相似的变化规律。伸长率整体变化不明显,数值范围在3.8%~4.7%,多数测

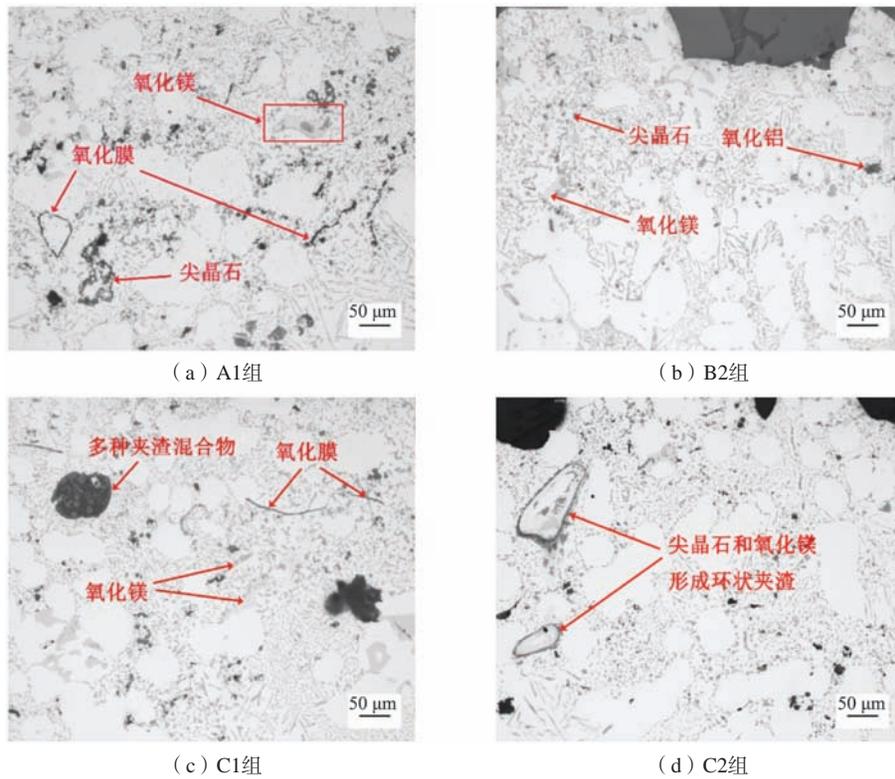


图3 典型过滤夹渣的金相组织对比

Fig. 3 Comparison of the metallographic microstructures of typical filter slag inclusions

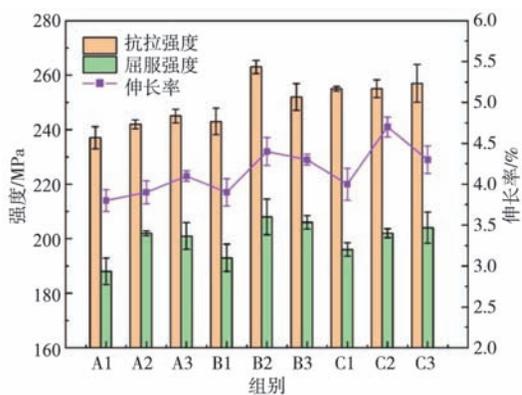


图4 不同组别模拟轮辐取样的A356合金热处理后力学性能对比

Fig. 4 Comparison of the mechanical properties of A356 alloys after heat treatment with simulated spoke sampling from different groups

试值高于4%。综上对比不同组别拉伸试棒力学性能可知，B2组强度较高，伸长率也较高，综合性能最优。

### 3 分析与讨论

随着精炼剂用量增加和惰性气体通入时间延长，认为双重铝液净化手段下，铝液夹渣处理应该更充分，熔体纯净度应呈现上升趋势，但从过滤时间-重量曲线和夹渣含量测试结果来看，随着精炼剂用量增加，惰性气体通入时间增长，A356熔体纯净度不断降低，夹渣含量持续上升。分析认为精炼剂成分主要

为氟盐和氟盐，氟盐和氟盐不与铝反应，且表面张力小，有较强润湿 $Al_2O_3$ 等夹渣的作用，氟盐可破除和去除熔剂/铝液界面的氧化膜，降低夹渣粘附，促使夹渣迁移至铝液界面<sup>[9-12]</sup>。随着精炼剂添加含量的增加，需要不断进行搅拌，搅拌过程易反复破坏熔体表面的氧化膜，同时熔体中的镁元素在搅拌过程易氧化生成细小的MgO颗粒，与铝液中卷入的氧化膜在高温条件下反应生成尖晶石( $MgAl_2O_4$ )。由夹渣含量测试结果可知，随着精炼剂添加含量的增加，氧化铝夹渣、氧化镁夹渣、尖晶石夹渣与氧化膜夹渣含量均有所上升，降低了合金熔体的纯净度，因此精炼剂的添加含量应控制为熔体总重的0.15%。

铝熔体中除非金属夹渣外，氢气含量也是形成气孔等缺陷的重要原因，在铝熔体中通入惰性气体不仅可以除渣，还可有效降低氢气含量。夹渣可作为氢气非均质形核的核心，最终趋于非均质形核形式长大并析出<sup>[13-14]</sup>；同时氧化铝夹渣还会破坏熔体中铝原子的排序，形成空位，氢原子在空位下不断聚集形成气泡上浮<sup>[15]</sup>。在熔体内部通入惰性气体会形成小气泡，根据分压差原理，气泡不断吸入氢气，上浮过程中还会吸附氧化夹渣，达到除气除渣的双重效果。通过不同试验组对比，惰性气体通入时间增加到15 min时，熔体纯净度最高，当通入时间继续延长时，熔体搅拌时形成的氧化膜易被卷入熔体，且镁元素氧化作用加剧，熔

体内细小氧化膜数量增加,氧化铝夹渣、尖晶石夹渣含量上升,惰性气体通入时间应控制为15 min。

## 4 结论

(1) 根据铝渣检测得到过滤时间-重量曲线,铝液纯净度次序为: B2 > B3 > C2 > C3 > A3 > A2 > C1 > B1 > A1; 结合PoDFA法检测每组过滤试样的铝渣含量,随着精炼剂添加量和惰性气体通入时间的增加,渣含量呈先降低后缓慢增加趋势,在B2组即精炼添加量为0.15%,惰性气体通入时间15 min时,铝液纯净度最

高,渣含量最小为0.020 2 mm<sup>2</sup>/kg,且氧化膜数量最少。

(2) 试样进行力学性能检测结果显示,抗拉强度和屈服强度呈现阶梯性变化规律,A1、A2、A3和B1组强度相当于较低梯队,B2、B3与C1、C2、C3组强度相当于较高梯队,在精炼添加量为0.15%,惰性气体通入时间15 min时,性能达到峰值,抗拉强度为263 MPa,屈服强度为208 MPa,伸长率为4.4%。

(3) 精炼剂添加量为0.15%且除气15 min的复合铝液净化工艺,既能提升铝液纯净度,还对提高力学性能有益,对铝锭生产现场工艺制定具有一定指导意义。

### 参考文献:

- [1] 何芳,庄林忠,何国元,等.汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展[J].铸造,2021,70(4):431-437.
- [2] 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.
- [3] 李鹏飞,杨弋涛.A356铸造铝合金中夹杂物研究的进展[J].铸造工程,2017(4):1-8.
- [4] 韩朝伟,李大勇,陈浩.铝合金熔体夹杂物含量快速检测方法[J].铸造,2019,68(5):483-487.
- [5] 石宝东,潘复生,陈先华,等.铝合金熔体净化工艺的研究进展[J].材料导报,2009,23(7):45-65.
- [6] 杨璐.铝熔体在线精炼净化设备现状及发展[J].铝加工,2022(4):3-9.
- [7] 裴尧衡,陈朝轶,李军旗,等.铝熔体净化研究现状与趋势[J].中国冶金,2023,33(4):9-16.
- [8] 钱伟涛,宗福春,葛素静,等.铸造铝合金中典型夹杂物微观特征和成分研究[J].铸造,2023,72(2):153-159.
- [9] 黄春发.铝熔体中净化剂的净化机理研究[D].北京:北京有色金属研究总院,2023.
- [10] 陈学文,邝治全,王顺成,等.再生铝合金熔体净化与细化变质技术研究[J].工程技术研究,2023,8(19):4-7.
- [11] 马涛.正交试验设计在铝合金用熔剂研制中的应用[J].科技视界,2014(6):31-32.
- [12] 秦颐鸣,徐光帅,李智,等.汽车用铝合金精炼技术研究及应用[J].大众科技,2023,25(8):58-61.
- [13] 程颖,洪涛,魏怀远,等.返回料及精炼工艺对A356铝合金净化效果的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(11):1325-1330.
- [14] 曹天焄,赵忠兴,张显飞,等.变质和除气精炼工艺对ZL101铝合金中夹杂物的影响[J].沈阳理工大学学报,2020,39(5):36-40.
- [15] 孙泽棠,傅高升,王火生,等.铝熔体中夹杂物与氢相互关系的分子动力学模拟探索[J].铸造,2018,67(6):497-501.

## The Influence of Refining Process on the Slag Content and Properties of A356 Aluminum Alloy Melt

LI Xue-ke<sup>1</sup>, LIU Yu-ze<sup>2</sup>, HUO Chen-ming<sup>1</sup>, GE Su-jing<sup>1</sup>, TIAN Zhan-feng<sup>1</sup>, ZHANG Yi-cheng<sup>1</sup>, YUAN Gao-li<sup>1</sup>  
(1. Hebei Xinlizhong Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Hebei Light Metal Alloy Material Technology Innovation Center, Hebei Light Metal Alloy Material Industry Technology Research Institute, Baoding 071100, Hebei, China; 2. Baoding Lizhong Wheel Manufacturing Co., Ltd., Baoding 071100, Hebei, China)

### Abstract:

This article used various detection and analysis methods such as PrefilFootprinter aluminum slag detector, room temperature stretching machine, metallographic microscope, etc. to study the effect of refining process on the slag content and mechanical properties of A356 alloy melt. The research results showed that adding a refining dose of 0.15% of the total amount of aluminum liquid, passing high-purity argon gas at a flow rate of 20 L/min for 15 minutes, and standing for 20 minutes for testing, the slag content in A356 alloy melt was the lowest, and the mechanical properties were the highest. Therefore, this refining process will have certain guiding significance for the on-site melting and production of the A356 aluminum alloy ingots.

### Key words:

A356 alloy; refine; aluminum melt; slag content; mechanical properties