DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.018

再生铝合金熔体净化技术的发展现状

张　辉[1,2],孙彦华[1,2],岳有成[1,2],谭国寅[1,2],李　恒[1,2],陈　越[1,2]

(1. 昆明冶金研究院有限公司,云南 昆明 650031;2. 共伴生有色金属资源加压湿法冶金技术国家重点实验室,云南 昆明 650031)

摘　要:开发适合再生铝的熔体净化技术,对提升铝熔体品质是一项极具意义的工作。该技术有助于实现废铝的高效再生与利用,生产高性能的再生铝产品。本文综述了再生铝合金熔体净化技术的发展现状;指出我国铝材料研究的整体水平与国外相比还存在差距,需要进一步加大研发力度以实现超越。

关键词:再生铝;熔体净化;熔炼与加工

中图分类号:TG146.2; TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0573-03

Development Status of Purification Technology of Regenerated Aluminum Alloy Melt

ZHANG Hui[1,2], SUN Yanhua[1,2], YUE Youcheng[1,2], TAN Guoyin[1,2], LI Heng[1,2], CHEN Yue[1,2]

(1. Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming 650031, China; 2. State key Laboratory of Pressure Hydrometallurgical Technology of Associated Nonferrous Metal Resources, Kunming 650031, China)

Abstract: The development of melt purification technology suitable for regenerated aluminum is a significant work for improving the quality of aluminum melt. The technology is helpful to realize efficient recycling and utilization of waste aluminum and to produce high performance recycled aluminum products. The development of purification technology for regenerated aluminum alloy melt was reviewed. It is pointed out that there is still a gap between the research level of aluminum materials in China and that of other countries. Need to further intensify research and development in order to realize the transcendence.

Key words: regenerated aluminum; melt purification; smelting and processing

熔体净化是铝合金熔炼过程中的重要环节,铝合金产品最终质量的优劣很大程度上是由铝熔体品质决定的。对铝合金熔体进行净化,目的是为了去除铝熔体中的气体以及非金属夹杂。随着我国高端铝产品的不断涌现,对铝熔体的品质要求也越来越高。一般铝材料制品的含气量低于 0.15 mL/100 g Al 即符合生产要求;而对于特殊的航空材料,要求则更加严苛,其中含气量不得超过 0.10 mL/100 g Al。对熔体中的碱金属含量也要求在 5×10^{-6} 以下,非金属夹杂物含量越低越好[1,2]。为了满足上述要求,需采用各种先进的净化处理技术来对铝合金熔体进行处理,纯净的铝合金是生产高端铝材的前提和基础。

收稿日期:2020-03-30

基金项目:云南省重大科技专项计划(2018ZE005);云南省应用基础研究青年项目(2018FD135)

作者简介:张　辉(1971-),云南个旧人,学士,高级工程师.主要从事金属材料加工方面的工作.
电话:0871-65919682,E-mail:1014175042@qq.com

1　国内外铝熔炼原料发展趋势

在铝合金生产历史中,起初使用的原材料为重熔用铝锭。使用重熔用铝锭生产扁锭产品质量好、成材率高,产品合格率平均在 97%左右,但是生产过程中能耗较大[3]。铝生产企业为减少铝锭二次重熔造成的能耗及能源浪费和降低生产成本,纷纷在电解铝厂附近建立铸造车间,直接购买原铝液进行生产。电解铝液所含杂质成分复杂、含气量较高,同时还有较多的非金属夹杂,如氧化铝、冰晶石等。如不进行彻底的熔体净化,会导致成品中产生气孔和夹渣等缺陷。这类缺陷在后续的加工过程中无法消弭,会严重影响最终的产品质量。

随着全球资源日益匮乏和能源短缺,节能环保已成为全球铝企业共同孜孜以求的目标。自 2001 年中国原铝产量超过美国之后,就一直保持世界第一铝生产国和消费国的头衔[4]。随着铝资源的不断开采,我国剩余的铝资源已显得不够富余。随着生产量和消费量的激增,我国可供使用的废铝资源也逐渐增加,废铝的应用潜力不断显现。从铝冶炼角度看,

生产一吨电解铝需要耗电 12 000～13 000 kW/h；而应用废铝进行再生铝合金生产，只需要进行重熔，避免了冶炼过程的高能源消耗，生产耗能仅为电解阶段的 10%，同时排放的污染物更少[5]。因此，在铝合金生产过程中采用部分废铝替代重熔用铝锭，甚至全部用废铝重熔进行再生铝生产，可以大幅度降低企业的生产成本，使用废铝进行再生铝合金生产已经成为了龙头铝企业的新趋势。目前，我国的再生铝行业经过十几年的发展已经取得了一定的成绩，在产业规模、环保装备等方面已经得到了很大的提升。中国再生铝行业已经领先于全球再生铝行业。使用再生铝进行铝合金生产的典型工艺流程图如图 1 所示。

2 国内外铝合金熔体净化技术研究现状

铝合金熔体净化技术有多种分类方法，其中主要按以下 3 种方法进行分类：①按处理状态：分为在线式和间歇式两大类；②按净化部位：分为炉内净化和炉外净化两大类；③按净化原理：分为吸附净化和非吸附净化（过滤）两大类[6]。下面主要从净化原理方面来介绍国内外铝合金熔体净化技术所取得的研究成果。

2.1 熔剂吸附净化

目前国内外企业、高校均已在熔剂吸附净化领域开展了大量的研究工作。王翠芳等[7]开展了熔体吸附净化法在电解铝液直接铸轧中的应用研究，采用 CCl_4 和惰性气体在保温炉内对铝熔体进行复合精炼，采用 SNIF 法除气净化装置对铝合金熔体进行在线精炼净化处理。采用在线精炼技术处理铝熔体后，取得了非常明显的净化效果；通过显微观察表明铸轧板的显微组织符合国标要求，可以使用电解铝液直接铸轧生产双零铝箔坯料，生产的成品铝箔针孔度降低，塑性和抗拉强度均能满足客户对铸轧坯料的要求。宋莉莉等[8]设计并制备了 3 种排杂熔剂，通过调整排杂熔剂的组分，探讨组分改变对 A356 铝合金熔体的净化效果。采用排杂熔剂处理铝熔体后，铝合金组织及力学性能得到了改善；发现含有冰晶石组分的排杂熔剂具有最好的效果，其原因在于冰晶石与氧化铝具有最强的亲和力，具有更强的破坏氧化膜、促进铝液聚合的效果，因此含有冰晶石的排杂熔剂处理铝熔体的效果最佳。

2.2 气体吸附净化

气泡浮游法是 20 世纪七八十年代发展起来的铝熔体净化工艺，主要用于除氢。经过多年发展，已经演变出了多种气泡导入方式，从最开始单管改进成多管，从静态喷吹变成了动态旋转喷吹，精炼效果越来越好。目前主要以 SNIF (Spinning Nozzle Inert Floatation) 法、Alpur (Aluminum Purifier) 法、RDU (Rapip Degassing Unit)法、MINT(Melt In Line Treatment) 法、Heproject (Heproject Mobile Rotary Flux Feeder)法和 LARS™ 技术为代表[9]。

随着现代计算机技术的快速发展，采用计算机模拟来优化喷吹精炼工艺取得了丰硕的研究成果。计算机模拟与实验验证相比具有周期短、速度快、成本低廉、模拟条件范围不受限等优点。为了不断改进提高精炼效率，通过进行水模拟和计算机模拟熔体内部流场、气泡运动和除气过程等，对转子结构和工艺参数优化具有一定的参考意义。西北工业大学的李杰华等[10]研制出铝材料熔体旋转喷吹除气净化设备，同时通过采用数值模拟的方法对喷吹组件进行了优化设计。优化后的喷头能够降低喷粉温度，有效防止熔剂在高温作用下熔化而导致的喷头堵塞；对

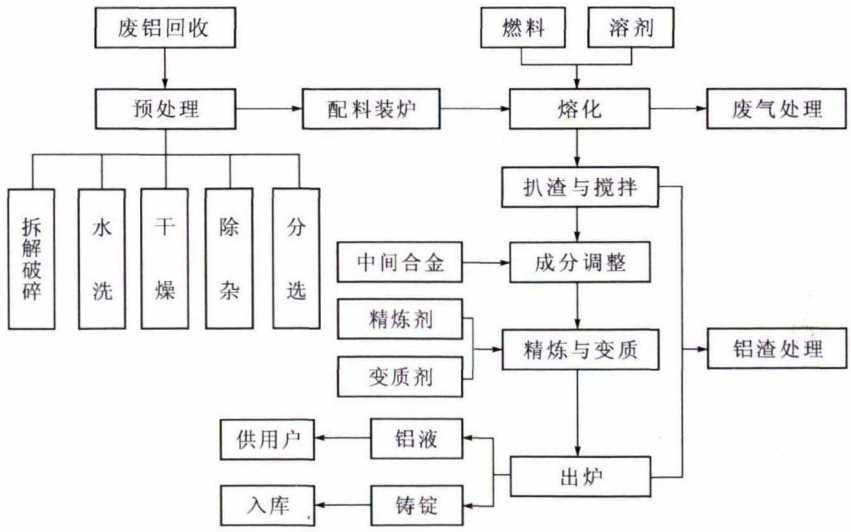

图 1 再生铝生产铝合金工艺流程图

Fig.1 Process flow chart of aluminum alloy production using recycled aluminum

于气流分布方面，优化了进气孔分布和大小，利用数字组合阀原理进行间断性改变进气流量，可在一定旋转速度下增加进气流量而不引起铝材料熔体翻腾。同时他们还采用数值模拟方法对喷吹精炼过程的温度场以及流场进行了模拟，研究表明旋转速度和进气流量对净化效果具有重要影响；旋转速度和进气流量必须互相匹配才能取得最佳的净化效果。苏志付等[11]对喷头转子进行了改造，研制出了上下双层喷头转子。杨大春[12]探索了铝合金超声波-氩气搅拌复合精炼技术，通过超声换能器产生超频振动，并借助于变幅杆把振幅放大到振动棒（搅拌棒）上。铝合金熔体在超频振动的作用下产生连续的正负冲击波，在冲击波的作用下在熔体内部产生"空化"作用从而引起"空穴"现象；这些"空穴"破坏了铝熔体的连续性，同时"空穴"对于铝熔体中所含的气体而言都是负压状态，溶解在铝熔体中的气体便进入了这些空穴。随着这些空穴的不断长大与合并，最终成长为大气泡逸出铝液从而实现连续精炼的目的[13]。在超声波和氩气的共同作用下，氩气能够在铝熔体中均匀的分布，提高了捕捉氢气的能力，精炼效果较单一惰性气体除气效果更佳。

2.3　过滤净化

过滤法是让铝合金熔体通过过滤板或者过滤箱，借以分离悬浮在熔体中的固态夹杂物的净化方法，主要过滤介质包括玻璃丝布、刚玉微孔陶瓷管、泡沫陶瓷等。

近年来也出现了用电磁净化技术来进行铝渣分离，国内外对此进行了广泛的基础研究，并提出了多种不同的电磁净化技术方案[14]。吴加雄等[15]进行了工频交流电分离铝合金熔体中夹杂物的实验，通过改变电流密度、通电时间、分离器管型等实验条件，探讨了工频交流电对夹杂颗粒迁移行为的影响。结果表明：电流密度越大、通电时间越长，铝渣分离效果越理想；单电流电磁净化铝液是可行的。钟云波等[16]进行了行波磁场连续净化铝合金液实验，结果表明行波磁场能够对铝合金熔体进行连续净化；在电磁力大小和作用距离与铝液流速相互匹配时，铝液能获得较为满意的净化效率。当铝液流经行波磁场作用部位时，由于夹杂物和铝液对磁场的敏感程度不同，形成电磁过滤现象，电磁力分离阻隔了铝液中所含的夹杂物，使金属液得到了净化。

3　结语

国际上铝加工先进国家已经开发出了大量先进的铝合金净化处理技术。以美国铝业公司、力拓集团加拿大铝业公司、俄罗斯联合铝业公司、挪威海德鲁铝业公司为代表的国际铝业巨头在铝加工技术和市场上处于绝对的领导地位。与国外相比，我国铝材料研究起步晚，差距大，研究的整体水平还比较落后。不论是基础理论研究，还是整体装备水平与国外相比差距较大。

目前，铝合金研究的重点之一是开发各种先进的熔体净化技术，通过降低铝液中的含气量和夹杂物，不断提升铝液的纯净度，从而改善铝合金的综合性能。这也是实施可持续发展战略中提高再生铝利用比例亟待解决的技术难题。为了实现废铝的高效再生与利用，获得高性能的再生铝产品，开发适合再生铝使用的熔体净化技术，对提升铝熔体品质是一项极具意义的工作，仍需要我国广大科研工作者的继续努力。

参考文献：

[1] 谭群燕，王燕红. 铝合金熔体处理技术[J]. 热加工工艺，2007，36(17)：65-67.

[2] 张新明，邓运来，张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报，2015，51(3)：257-271.

[3] 李启林. 浅谈提高重熔用铝锭外观质量的生产措施 [J]. 铸造技术，2008，29(3)：347-348.

[4] 王祝堂. 中国原钻深加工现状与发展趋势[J]. 轻金属，2012(3)：5-8.

[5] 丁宁，高峰，王志宏，等. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. 中国有色金属学报，2012，22(10)：2908-2915.

[6] 廖萍，倪红军，周一丹，等. 铝及铝合金熔体复合净化新方法及其装置[J]. 轻合金加工技术，2005，33(9)：25-27.

[7] 王翠芳，李蒙，孙备. 熔体吸附净化法在电解铝液直接铸轧中的应用研究[J]. 绿色科技，2018(18)：75.

[8] 宋莉莉，傅高升，陈鸿玲，等. NaCl-KCl 基排杂熔剂对 A356 铝合金熔体的净化及净化后的组织和性能 [J]. 机械工程材料，2019，43(12)：24-28.

[9] 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(4A)：45-48.

[10] 李杰华. 铝合金熔体旋转喷吹除气净化技术的研究[D]. 西安：西北工业大学，2006.

[11] 苏志付. 铝合金熔体双喷头旋转精炼技术模拟研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.

[12] 杨大春. 铝合金超声波-氩气搅拌复合精炼技术的探索[J]. 热加工工艺，2006，35(13)：7-9.

[13] 解夫春. 铝合金熔体超声净化技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

[14] 马军，潘健，张娟芳，等. 电工用铝合金熔体净化技术研究现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金，2017，37(12)：10.

[15] 吴加雄，任忠鸣，张邦文，等. 交流电净化铝合金熔体[J]. 中国有色金属学报，2004，14(3)：354-358.

[16] 钟云波，任忠鸣，邓康，等. 行波磁场连续净化铝合金液实验[J]. 中国有色金属学报，2001，11(2)：167-171.