

电解铝节能降耗生产工艺分析探讨

苏旭东 李振军

国家电投青铜峡铝业分公司 宁夏 青铜峡 751603

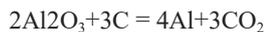
摘要: 随着电解铝工业的快速发展,其生产工艺的优化与创新将成为了降低能耗的关键。本文分析探讨了铝电解生产工艺与节能降耗的问题,并提出了优化电解槽设计、优化电解工艺、创新铝电解节能技术等措施。通过这些工艺优化措施,旨在提高电解铝工艺的节能降耗效率和可持续性发展,为行业的绿色、节能发展贡献力量。

关键词: 电解铝;节能降耗;生产工艺

引言:随着电解铝工业的快速发展,电解铝工艺优化及新技术应用已成为行业关注焦点。当前,传统电解铝工艺面临能耗高等挑战,亟需进行技术革新以提升生产效率、降低能耗。本文从影响能耗主要因素等方面分析探讨如何通过优化电解槽设计、优化电解工艺、创新铝电解节能技术等措施,来降低电解铝能耗,为电解铝工业的绿色、节能、可持续发展提供有力支持。

1 电解铝的基本原理

现代电解铝工业生产采用冰晶石-氧化铝融盐电解法。熔融冰晶石是溶剂,氧化铝作为溶质,以采用炭素材料作为阳极和阴极材料,直流电通过温度高达900度以上的冰晶石-氧化铝熔盐,在电解槽内的两极上进行电化学反应生产出原铝。即电解反应方程式为:^[1]



2 铝电解行业的现状

全球铝电解行业铝存量产能,2023年产量6976万吨,电解铝产能增量主要在亚洲。亚洲、欧洲、美洲、澳洲、非洲电解铝产量占比分别约为74.6%、10.2%、7.3%、2.7%、2.4%。增量产能方面,根据阿拉丁数据,当前全球电解铝产能建设规划合计1692.9万吨,其中亚洲1578.7万吨,欧洲57.9万吨,美洲56.7万吨,分别占比93.24%、3.42%、3.35%。其中美洲多数产能为远期规划,亚洲、欧洲或为未来全球电解铝主要增量。

截至2023年12月,中国电解铝建成产能4724.9万吨,运行产能4201万吨,预计2024年净增产能232万吨。2020年我国原铝产量为3708.04万吨,2021年我国原铝产量为3850.32万吨,2022年我国原铝产量为4024.4万吨,2023年我国原铝产量为4159.4万吨。根据《2019-2025年中国原铝(电解铝)行业市场调查及发展趋势研究报告》数据显示:我国电解铝生产地区分布较广,除西藏、北京、上海、天津、广东、海南等个别地区没有电解铝生产企业,我国大部分省都有电解铝企业。

3 如何降低能耗

高耗能是电解铝工业的基本特性,降低能耗和减少碳排放,关乎全球人类未来。从电解铝工艺技术角度分析节能降耗的手段有两种,一种是提高电流效率,另一种就是降低槽电压。然而随着现代铝电解技术的发展,铝电解工艺技术的研究越来越趋于成熟,现有大型预焙铝电解槽电流效率最高已经达到95%以上,再通过各种手段提高电流效率以减少能耗,收效不会太大。以下重点从如何降低平均电压达到降低能耗方面进行分析探讨。

3.1 平均电压构成

电解槽平均电压是指每个槽昼夜的工作电压及分摊电压的平均值,它由工作电压(极化电压降、阳极电压降、阴极电压降、电解质电压降、母线电压降)、连接母线分摊电压和效应分摊电压组成。它是反映电能利用率的主要参数,它的高低与吨铝直流电耗有直接的关系。

3.2 如何降低平均电压

铝电解槽的极化电压是克服电解产物所形成的原电池电动势,使氧化铝得以分解的外加电压。极化电压主要是指氧化铝的理论分解电压;阳极电压降同样由三部分组成:阳极炭块自身的电阻引起的电压降、阳极钢爪金属导体的电阻引起的电压降、钢爪与阳极炭块之间的接触电阻产生的电压降;阴极电压降不仅与设计时所选用的阴极内衬材料有关,而且也与炭块与钢棒的浇铸质量、筑炉质量、焙烧、启动和电解槽的操作管理有关系,更重要的是电解槽的阴极电压降会随槽龄的变化而改变,铝电解槽的阴极电压降是由炭块自身电压降、钢棒自身电压降和炭块与钢棒接触电压降三部分组成的;电解质电压降由电解质成分、电解质温度、阳极电流密度和极距共同决定,其他条件一样的情况下,电解质温度越高,阳极电流密度越小,极距越小,电解质电压降越小;母线电压降包括电解槽自身母线电压降、联络母线电压降和各段母线的接触电压降组成,其中,接触电压降主要是指电解槽

短路口等压接处的压降,母线材料自身的压降随温度升高而升高,随电流密度增大而增大。在平均电压的组成部分中,极化电压和电解质压降是最主要的两部分。

可采取以下措施降低平均电压:(1)降低极化电压。铝液在电磁力的作用下发生运动并导致铝液与电解质界面的变形,并且铝液高度越低,铝液运动越强烈,这就是现行铝电解生产中强调的一定要根据电解槽磁场设计保持匹配适宜的铝液高度的原因。为了防止铝液的运动和界面形变影响电流效率,电解槽不得不保持较高的极距(如4cm以上),这又是现行铝电解槽必须保持较高槽电压(因而能耗高)的重要原因。据测算统计,铝电解槽两极间的电压降在1.3~2.0V左右,相比炭阳极铝电解电化学理论分解电压1.2V可以看出,现行铝电解工艺很大一部分能量消耗在两极之间,如果能够适当地减小极距,可以大幅度的节约吨铝能耗,降低原铝生产成本。(2)降低电解质电压降。在保证电解生产能够正常进行的前提下,适当缩短极距,减小电流密度,增大电解质导电性,提高电解质水平,净化电解质都有助于减小电解质压降。(3)降低阳极电压降。换极时阳极定位准确,防止出现阳极底掌高低不平现象;压紧卡具,减少卡具压降;按要求高质量浇注磷生铁,改善铁-碳电压降;维护好爆炸焊与有色焊;加强阳极保温料和壳面保温料工作,减少阳极氧化,降低碳阳极电压降。(4)降低炉底压降。减少或除去槽底沉淀,规整炉膛。改进电解槽结构,使槽底对于铝液与电解质高度的稳定性、耐腐蚀性能良好,使得阴极导热率高和导电率低(与炭块比)。在阴极结构方面,适当加宽底边,采用双阴极棒,以增加接触面积,适当增加阴极棒高度,减小电流程。底块之间改扎缝为粘缝,以减小槽底薄弱环节,减缓槽底的破损。使用半石墨或高石墨阴极碳块等,实践证明石墨化阴极电解槽较半石墨质阴极电解槽启动后阴极压降低约100mV以上。(5)降低效应分摊电压。强化操作质量管理,降低阳极效应系数,缩短效应时间,控制效应电压。(6)优化电解质成分,降低电解质电阻。电解质是电解过程中的导电介质,其电阻大小直接影响到槽电压的高低和能耗的大小,电解质中的杂质、温度、浓度等因素都会影响其导电性。因此,通过优化电解质的成分,减少其中的杂质含量,控制合适的温度和浓度,可以有效提高电解质的导电性,从而降低其电阻,减少电能消耗^[2]。(7)加强生产过程管控,保持规整炉膛,确保稳定生产,减小波动,及时消除电压波动,降低平均电压。(8)降低母线压降。及时清理母线上的物料并加强母线散热,提高各焊接点质量,紧固好

各压接点。尽可能多开槽,降低联接母线电压分摊。

4 电解铝生产工艺技术创新

现在正进行的创新是铝冶炼技术在本世纪经历的最为重要的革命性创新发展。一些发展为原铝冶炼行业提供了低碳或无碳生产的可能。下面就对这些有代表性的铝电解新工艺技术作以分析和探讨。

4.1 优化电解槽设计

在现代电解铝工业中,大型预焙槽电解技术已成为主导。大型预焙槽电解技术主要体现在超高电流强度铝电解槽技术,目前运行在550kA到660kA之间,这些技术包括联合俄铝的RA-550(俄罗斯铝业)、力拓铝制材料AP-60、NEUI-600和SAMISY-660电解槽技术。这种技术的核心在于提升单位产能和低的能耗,为电解铝工业的可持续发展奠定了基础。

电解槽设计的合理性直接关系到整个生产过程的效率和能耗。因此,优化电解槽设计是提高电解铝工艺水平的关键之一。(1)增加电解槽有效面积和深度。传统的电解槽设计往往受到技术和材料的限制,其有效面积和深度有限。随着科技的发展,特别是耐高温材料和加工技术的进步,为电解槽的大型化提供了可能。增加电解槽的有效面积和深度,意味着在同一时间内可以处理更多的氧化铝,直接提高了铝的产量。然而,面积的扩大需要考虑电流的分散问题,电流分散会导致槽电压升高,进而增加能耗,因此,在扩大面积的同时,必须确保电解槽内部的结构设计合理,确保电流能够均匀分布,降低槽电压的升高幅度。(2)调整阳极和阴极的数量与间距。阳极和阴极是电解槽中最重要的电极组件,它们的数量和间距直接影响到电解过程的稳定性和效率。增加阳极的数量或减小阳极与阴极的间距,可以使电流更加集中,从而提高电流密度,加快铝的析出速度。然而,这种调整并不是无限制的。过高的电流密度会导致槽内热量急剧增加,使得槽温迅速上升,严重时甚至会导致槽子烧毁。因此,在调整阳极和阴极的数量与间距时,必须进行精确的磁场、热场和流场的严格计算和测试,以确保在提高生产效率的同时,不会引发不稳定性等问题^[1]。

4.2 应用非平面阴极技术

在电解铝生产过程中,阴极的设计对于铝液的稳定性和电解效率具有重要影响。传统的平面阴极由于其结构简单,被广泛应用;然而,随着电解铝工艺的不断进步,其局限性也日益显现,铝液在平面阴极上的波动大、流速快,导致槽电压上升,降低了电解效率,电耗上升。因此,应用非平面阴极技术成为当前电解铝工艺

优化的重要方向。非平面阴极的种类与特点：非平面阴极技术主要包括异型阴极、曲面阴极和导流阴极等；这些非平面阴极的设计特点在于能够改变铝液在阴极上的流动状态，使其更加平稳，这种平稳的铝液流动状态有利于铝的析出和收集，提高电解效率，同时降低槽平均电压，降低能耗^[4]。

4.3 铝电解一体化铜炭复合阴极（RuC）技术

铝电解一体化铜炭复合阴极（RuC）技术开发及应用项目技术创新程度高，首创采用全铜导电棒和冷态精密装配方式，开发了防渗碳和抗腐蚀一体化铜炭复合阴极，降低了导电棒和铝液之间的电阻差，均化了铝液电流分布，降低了水平电流，提高了磁流体稳定性，实现了大容量铝电解槽在更低电压下稳定运行；针对一体化铜炭复合阴极，建立了对内衬保温材料升级及热平衡匹配优化设计方法，实现了“低热损、慢衰减”和良好的热平衡状态；以及一系列节电、降碳的设计方法和辅助技术，具备大幅降低阴压降实现降耗及延长电解槽寿命的条件。

4.4 惰性阳极技术

惰性阳极：是指在应用过程中不消耗或消耗相当缓慢的阳极。当使用惰性阳极时，阳极析出氧气，铝电解过程的反应方程式变为：



惰性阳极铝电解槽，其使用的电解质体系为KF-NaF-AlF₃，电解工作温度为700-850℃。电解槽由槽壳、隔热耐火内衬、炉膛、隔热罩、惰性阳极、电极杆、阳极母线、阴极母线、阳极分支母线、隔热板、阳极与阴极之间的隔板和进料装置组成。

与炭素阳极相比，惰性阳极材料应用的主要优点体现在环保、节能、简化操作及降低成本等方面，特别是减少污染和降低原铝生产成本。当与惰性可湿润性阴极结合使用，并采用新型结构铝电解槽时，可以减少能耗20%~30%。阳极不再需要更换或更换周期延长，生产控

制过程变得更为简单，劳动强度减小，电解槽热平衡不会受到干扰，生产运行更加稳定。惰性阳极的应用将减少炭阳极生产时CO₂和碳氟化合物CF₄、C₂F₆的排放，取之为环境友好的O₂，环境问题大为改观。

4.5 余热回收技术

在电解铝生产过程中，由于高能耗和高温度的工作环境，会产生大量的余热。这些热量若不进行有效利用，不仅代表着能源的浪费，还可能对生产环境造成不利影响。因此，利用余热回收技术将这些热量转化为有用的能源，成为了提高电解铝工艺效率和可持续性的重要手段。在电解铝过程中，余热回收技术可以通过多种方式应用。例如，可以利用热交换器将电解槽产生的余热用于预热进入电解槽的原料，从而减少原料的加热时间和能耗。此外，还可以利用余热产生蒸汽，这些蒸汽可以用于发电或提供生产所需的热能。

结束语

通过对电解铝生产工艺的深入分析和优化措施的探讨，本文旨在为电解铝工业的可持续发展提供有益参考。在面临全球能源短缺和环境保护压力的背景下，优化电解铝工艺显得尤为重要。未来，随着科技进步和环保要求的提高，电解铝工业将继续朝着高效、绿色、低碳的方向发展。我们期待通过不断的技术创新和工艺优化，推动电解铝工业实现更加清洁、高效的生产，为全球铝产业的绿色发展贡献力量。

参考文献

- [1]耿玉伟,刘方波.电解铝清洁生产工艺分析与评价指标体系[J].轻金属,2019,(08):21-25.
- [2]刘大钧,汪家权.我国电解铝行业现状分析及环保优化发展的对策建议[J].轻金属,2020,(09):9-13.
- [3]毕熔铖,贾令吉.电解铝行业清洁生产工艺分析[J].黑龙江科技信息,2020,(03):13-14.
- [4]孙宏,周蕾,张立民,叶青.电解铝行业清洁生产工艺分析[J].环境保护与循环经济,2021,31(04):37-38.