

熔铝炉冶炼烟气脱硝技术研究

Research on Denitrification Technology of Smelting Flue Gas in Aluminum Smelting Furnace

徐雷

Lei Xu

国家电投集团铝电公司宁东铝业分公司 中国·宁夏 银川 750411

Ningdong Aluminum Industry Branch of State Power Investment Group Aluminum Corporation, Yinchuan, Ningxia, 750411, China

摘要: 中国铝制品需求量的增长,不断推动铝制品的生产。但是铝制品在生产的过程中产生大量的烟气,严重污染了空气,增加空气治理的难度。目前中国对熔铝炉冶炼烟气脱硝技术的研究存在许多不足,论文对常用熔铝炉冶炼烟气脱硝技术进行全面的介绍,将这些烟气脱硝技术的特点及优缺点展现出来,希望业内人士能够发扬其优点,改善其缺点,使其发挥更多重要的作用。

Abstract: The increasing demand for aluminum products in China continues to drive the production of aluminum products. However, aluminum products generate a large amount of smoke during the production process, which seriously pollutes the air and increases the difficulty of air treatment. At present, there are many shortcomings in China's research on flue gas denitrification technology for aluminum melting furnace smelting. The paper provides a comprehensive introduction to commonly used flue gas denitrification technologies for aluminum melting furnace smelting, showcasing the characteristics and advantages and disadvantages of these flue gas denitrification technologies. It is hoped that industry insiders can promote their advantages, improve their disadvantages, and make them play a more important role.

关键词: 熔铝炉; 冶炼; 烟气脱硝技术

Keywords: aluminum smelting furnace; smelting; flue gas denitrification technology

DOI: 10.12346/etr.v5i5.8075

1 引言

随着大气污染的日趋严重,对人们生活和健康的影响逐渐加大,全球范围内对环境污染的严重后果有了更加深刻的认识,污染的有效预防与治疗迫在眉睫。大气污染是其中最严重的污染之一,目前,世界各国均积极参与到大气污染防治工作中,通过一些防护措施来限制污染物的排放。铝及铝制品作为一种常用的金属,其冶炼和生产的会产生大量的污染物,对大气产生巨大的负面影响。为了防治铝工业的污染排放,中国不仅出台了《铝工业污染物排放标准》,同时增加了特别排放量值。而地方根据各地区的实际情况对有色金属行业的污染物排放量均有比较明确的规定,如二氧化硫(SO_2)的排放浓度不得超过 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$,氮氧化物(NO_x)的含量不能超过 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$,烟尘的排放量不

能高于 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 等,各地区的排放标准各有不同。而中国的熔铝炉虽然设置有排烟除尘装置,但是其污染物的排放量依然高于国家出台的行业标准,因此有必要对熔铝炉冶炼烟气脱硝技术进行研究。

2 熔铝炉生产工艺

熔铝炉生产过程中一般包括原料投入、溶化、搅拌、清渣、保温和清炉等工作^[1]。熔铝炉冶炼的过程中一般以煤气或天然气作为燃料,通过这些燃料燃烧产生的高温来熔化铝料。铝料的熔化速度直接由火热燃烧的温度来决定。研究表明,熔铝炉烟气中会形成热力型、燃烧型、快速型三种氮氧化物(NO_x)。热力型氮氧化物(NO_x)的产生主要是因为空气中氮气含量较高,在高温煅烧下与空气中的氧气相结合从而

【作者简介】徐雷(1995-),男,中国宁夏中卫人,本科,助理工程师,从事铝电解研究。

生成氮氧化物 (NO_x)，可见热力型氮氧化物 (NO_x) 的排放与冶炼的温度成正比，而熔铝炉是一种燃气炉，燃烧的中心温度可能达到 1500°C ，因此很容易产生热力型氮氧化物 (NO_x)。熔铝炉在生产各阶段的温度是不同的，但是均产生一定的烟气，这些烟气主要包括二氧化硫 (SO_2)、氧化物 (NO_x) 及粉尘^[2]。如果燃料为天然气时，产生的二氧化硫 (SO_2) 较少，或不产生二氧化硫 (SO_2)。但是燃料为煤气时，二氧化硫 (SO_2) 的浓度一般不高于国家的排放标准，不需要进一步处理。但是氮氧化物 (NO_x) 的含量较高，因此需要进一步处理，使其符合国家的相关排放标准。

3 目前常见的熔铝炉烟气脱硝技术

3.1 蓄热燃烧技术

目前，蓄热燃烧技术是最为常见的，大部分铝工业熔铝炉对采用此种技术。熔铝炉两侧各有一个烧嘴和蓄热室，在冶炼的过程中，利用鼓风机把空气从一侧的烧嘴经换向阀输送到炉膛内，使其充分燃烧，促进铝原料熔化和精炼。这期间这些常温的空气被加热并流入蓄热室，其温度比炉内温度 $50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 。同时冶炼产生的高温烟气从另一侧的烧嘴进入同一个蓄热室，这样就实现了烟气温度的降低。最后被降低温度后的烟气流经四通阀被排放到废弃气管道。两个蓄热室在不同的时间内交替使用，循环使用，有效降低了烟气中的氮氧化物 (NO_x) 含量，实现了节能环保的目的。

熔铝炉蓄热燃烧技术的应用使得低氧环境中高温煅烧得以实现，有效控制氮氧化物 (NO_x) 的含量。研究中发现，熔铝炉蓄热燃烧技术的应用，常温的空气通过换向阀和鼓风机进入到蓄热室中，并且在很短的时间内被加热到预定的温度，这个温度比炉膛温度低一些 (约 $50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$)，然后进入炉膛帮助燃烧，在高温作用下，带到周围的气流，形成一股含氧氧量较低的气流，同时作为燃料注入稀薄高温空气中，从而实现低氧环境的高温煅烧，这样高温燃烧产生的烟气中，氮氧化物 (NO_x) 和二氧化碳 (CO_2) 的含量大大降低了，不仅节约了资源，还实现了环境保护的目的。但是，氧气 (O_2) 含量较高或空气系数较大时，容易促进氮氧化物 (NO_x) 的生产。汪天友^[2]在研究熔铝炉蓄热燃烧技术的过程中，模拟蓄热式加热炉的工作过程，经过多次的数值模拟，得出氮氧化物 (NO_x) 的产生与火焰温度、空气系数有直接关系，当火焰温度低、空气系数小的时候产生的氮氧化物 (NO_x) 就相对少一些；当火焰温度高，空气系数大的时候产生的氮氧化物 (NO_x) 明显增多了。在实际冶炼过程中，部分蓄热熔铝炉产生的氧化物 (NO_x) 在 $450\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以上，主要原因在于于熔铝炉的氧气 (O_2) 含量较高的缘故， O_2 体积分数在 8% 与 15% 之间。蓄热式燃烧节能效果与传统空气燃烧相比，其效果更为显著，并且氮气也有所下降，虽然下降的幅度不超过 50%，但是产生的氮氧化物 (NO_x) 明显降低了。虽然蓄热燃烧技术具有一定的降低污染物排放

的效果，但是在熔铝炉实际生产过程中由于所采用的工艺具有一定的差异性和复杂性，从而导致熔铝炉烟气中氧化物 (NO_x) 含量依然较高，因此烟气脱硝技术的应用也是非常必要的，只有这样才能尽可能降低氧化物 (NO_x) 的排放，保证其符合国家或地区的相关标准。

3.2 纯氧燃烧技术

随着全球大气污染的日益严重以及温室效应的增多，世界范围内对绿色环境技术更加重视，熔铝炉纯氧燃烧技术是一种绿色环保技术，在铝工业生产中的应用，天然气的燃烧速度有了很大的提升，大约为普通空气的 10 倍以上，燃烧更加充分，温度更高，燃料的利用率有了质的提升，从而达到节能的目的。普通空气燃烧中含的氮气 (N_2) 与空气中的氧气 (O_2) 结合后会产生氮氧化物 (NO_x)，而纯氧条件下则可以有效解决此问题。纯氧燃烧环境中氧气 (O_2) 浓度极高，空气中的氮气 (N_2) 被阻隔在外，氧气 (O_2) 来源被切断后，氮气 (N_2) 和氧气 (O_2) 就不会发生化学作用，从源头上解决了氮氧化物 (NO_x) 的产生。另外纯氧燃烧技术的应用能够低碳排放，从而具有环保的作用。据了解，“天然气-空气”体系熔化铝每吨铝的熔炼过程中排放出 461kg 的二氧化碳 (CO_2)，而“天然气-空气”熔化铝每吨铝的熔炼过程中排放出的二氧化碳 (CO_2) 仅有 130kg ^[3]。由于可见纯氧燃烧技术节能减排率更高。目前国外采用熔铝炉纯氧燃烧设备和技术的企业较多，包括挪威诺斯克海德鲁铝业公司以及瑞典的帕萨铝业传输龙炉里，熔铝炉纯氧燃烧技术大大降了氮氧化物 (NO_x) 的排放，并且不会影响金属的性质，具有很高的经济效益。虽然纯氧燃烧技术具有节能减排的优势，但是也有一定的缺点。其中最为突出的就是缺点就是成本的投入高，这是因为需要制造大量的纯氧才能满足生产的需求。同时由于纯氧燃烧容易与空气中的粉尘结合而发生爆炸，运行风险系数高，安全性较低。此外，此种技术在现有的熔铝炉改造中适用性较低。还有理论上纯氧燃烧技术是在高温条件下是不会产生氮氧化物 (NO_x)，但是在实际应用中受多种因素的影响，如炉体漏风的情况下或入料时氮气 (N_2) 跟随物料仪器进入到熔铝炉中，这样达不到纯氧的条件，根本无法杜绝氮气 (N_2)，在高温冶炼过程中或多或少会产生一些氮氧化物 (NO_x)。纯氧燃烧技术工艺控制比较严苛，在新建熔铝炉上更加适用，有效降低氮氧化物 (NO_x) 的产生。

3.3 氧化-吸收脱硝技术

氧化-吸收脱硝技术属于湿法脱硝技术的范畴，加入氧化剂后，将高温燃烧产生的氮氧化物 (NO_x) 继续氧化为二氧化氮 (NO_2)，利用二氧化碳 (NO_2) 易溶于水这一特性来实现氮氧化物 (NO_x) 的净化。在实际操作中，氮氧化物 (NO_x) 的脱硝效果取决于氧化剂的性能。目前，市场上氧化剂的种类很多，有气相氧化剂和液相氧化剂，其中 NaClO_2 、 NaClO 、 H_2O_2 、 HNO_3 等是常用的液相氧化剂，常用的气相氧化剂有 ClO_2 、 ClO 、 O_3 等^[4]。目前常见的氧化-

吸收脱硝技术有 O_3 氧化-吸收,其工作原理为利用 O_3 的强氧化作用,将烟气中的一氧化氮(NO)转化成氮氧化物(NO_x),利用的高价态化合物容易溶于水的特性,通过湿法吸收装置实现净化。现如今, O_3 在脱硝技术中的应用主要采用 O_3 氧化联合碱液吸收工艺,这种工艺的应用,脱硝脱硫效果极好,并且工艺流程简便,脱除效果佳,成为湿法脱硝重要技术之一。

张明慧、JakubiakMP等^[5]采用NaOH溶液以及 O_3 氧化展开了联合试验,在研究中发现,如果 O_3/NO 的摩尔比得到有效的控制,则能够有效提高脱硝率。欧群林设计出了一种熔铝炉脱硝系统,该系统由 TiO_2 与双波段紫外灯管组成,是一种光触媒系统,对废气进行除尘处理后排放到该系统中,利用双波段紫外灯管发出的不同波段的紫外线来实现氧化,先形成 O_3 后形成羟基自由基,在紫外线灯作用下,羟基自由基对一氧化氮(NO)产生氧化作用后转化成立二氧化氮(NO_2),再利用水溶液和深度脱硝装置进一步处理二氧化氮(NO_2),使其逐步符合排放标准。

虽然在很多研究中均提示 O_3 具有很好的脱硝效果,但是这种脱硝技术需要投入的成本较高,再加上许多城市中空气中 O_3 的含量严重超出了正常的范围,因此这种技术的应用受到了很大的限制。部分地区明确规定锅炉企业中如果使用氧化法脱硝技术需要进一步改造,必须使用符合烟气排放的SNCR或SCR脱硝装置,禁止使用不满足要求的 O_3 氧化脱硝技术装置,因此如果铝生产企业在选择脱硝技术时应该充分考虑当地的环保政策。

3.4 SCR 脱硝技术

随着脱硝技术的发展,人们发现氨水在脱硝方面也有一定的效果,黄耀滨等对熔铝炉冶炼烟气脱硝技术展开了深入的研究,制造出一种新型的熔铝炉冶炼烟气脱硝设备,该设备所采用的催化剂为 $V_2O_5-WO_3-TiO_2$,利用高温条件下所产生的蒸汽,把蒸汽加热到 $300^\circ C$ 左右加入氨水,氮氧化物(NO_x)在氨水的还原作用下分离成了水(H_2O)和氮气(N_2)。一般情况下,溶铝炉排放烟气的温度不超过 $150^\circ C$ 。如果想要采用SCR脱硝技术则需要提高烟气的温度,使烟气的温度达到催化剂反应的要求,这种情况下,需要加大投资的成本与运行的成本。而低温SCR脱硝技术却不需要高温加热,低温条件下即可完成催化。这是由于低温SCR脱硝技术采用的是低温脱硝催化剂或还原剂,其反应的温度在

$150^\circ C \sim 280^\circ C$,不需要额外提高温度即可把烟气中的氮氧化物(NO_x)还原成水(H_2O)和氮气(N_2)。与常规SCR脱硝装置不同,SCR脱硝装置中应用低温脱硝技术可以设置在烟气处理系统末端的低温低尘段,这样的设置可以降低机械磨损,防止催化剂中毒。低氮燃烧+吸附法与低氮燃烧+SCR低温脱硝两种工艺均可有效降低烟气中氮氧化物(NO_x)的排放,可见低温SCR脱硝技术更加符合节能环保的要求。现如今,垃圾焚烧、烧结、水泥等行业中已经有部分环节中应用低温SCR脱硝技术,脱硝效果良好。有研究表明,在 $200^\circ C \sim 350^\circ C$,应用低温SCR脱硝催化剂的脱硝效率高达 $91.3\% \sim 63.5\%$,在 $150^\circ C$ 条件下,脱硝率也有 85% ,完全满足国家低碳排放的要求。

虽然SCR脱硝技术具有很好的脱硝效果,但是吕工业想要应用此种脱硝技术,还面临着许多困难:首先吕熔炉的烟气一般为 $150^\circ C$,需要加热才能维持SCR脱硝系统的稳定;其次,吕工业需要加装制氨站、还原剂储存站和脱硝反应器等,这样不但增加了运营和投入的成本,同时由于吕工业生产场地有效,很难实现生产运营的改造。另外,由于铝工业生产系统周期性、间歇性的运行模式,改造后脱硝设备的利用率较低。

4 结语

总而言之,铝作为第二大金属,在日常生产和生活中的应用非常广泛,但是由于生产过程中需要耗费资源颇多,并且排放的有害气体较多,限制了吕工业的发展,而熔铝炉脱硝技术的应用能够节省更多的资源,实现地碳排放,因此应该深入研究,提高其应用范围。

参考文献

- [1] 黄纪荣,仲超.燃煤锅炉烟气脱硝技术研究[J].清洗世界,2023,39(4):4-6.
- [2] 张腾飞,康泽双,李花霞,等.熔铝炉冶炼烟气脱硝技术现状与进展[J].中国冶金,2023,33(1):18-23.
- [3] 曾虎.熔铝炉烟气脱硝改造技术探讨[J].环境科学导刊,2021,40(5):83-87.
- [4] 刘美艺.臭氧辅助SCR低温烟气脱硝技术的研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [5] 鲁博颖,马航,马帅旗.SCR法烟气脱硝技术应用总结[J].化肥工业,2015,42(2):51-54.