

锰硅合金矿热炉烟气余热回收发展现状研究

曾锦波

(中铝环保节能科技(湖南)有限公司, 湖南 长沙 410019)

摘要:为促进企业高质量发展,高耗能行业需从全生命周期进行分析,节能降碳,提高资源的综合利用率。矿热炉属于高耗能行业,采用矿热炉冶炼,能耗高、热损失相比较较大,同时烟尘成分复杂、回收难度大。基于此,本文介绍了锰硅合金矿热炉外排烟气余热资源情况:热量大、宜回收利用,但烟尘细、烟尘含量高,尤其烟尘中含有较多二氧化硅,易致余热锅炉积灰、不易清灰,影响余热锅炉的连续生产和换热效果。本文通过梳理锰硅合金市场的发展情况、生产流程中能源消耗占比、现有余热资源回收利用技术的现状、存在问题和发生的机理,探讨了优化余热回收的方法,为相关锰硅合金矿热炉烟气余热回收提供了借鉴。

关键词:矿热炉;锰硅合金;余热资源;余热回收

中图分类号: X753; TF642.3.3

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2022.20.036

锰硅合金是由锰、硅、铁及少量碳和其他元素组成的合金,是一种用途较广、产量较大的铁合金。锰硅合金是钢铁产品生产过程中的重要原材料,在工艺生产中用作脱氧剂来降低钢水中的氧含量,同时作为钢材的合金元素,提高和改善钢材性能^[1]。

1 锰硅合金市场情况

锰矿合金是冶炼锰硅合金的主要原料,锰矿的化学成分和物理性能决定了整个冶炼过程的经济指标。锰硅合金主要用于钢铁行业。根据 Mysteel 统计口径,2019 年全国锰硅合金产量为 1041.3 万吨,同比上年增长 19.3%。2015 ~ 2019 年锰硅合金产量如下图 1 所示。

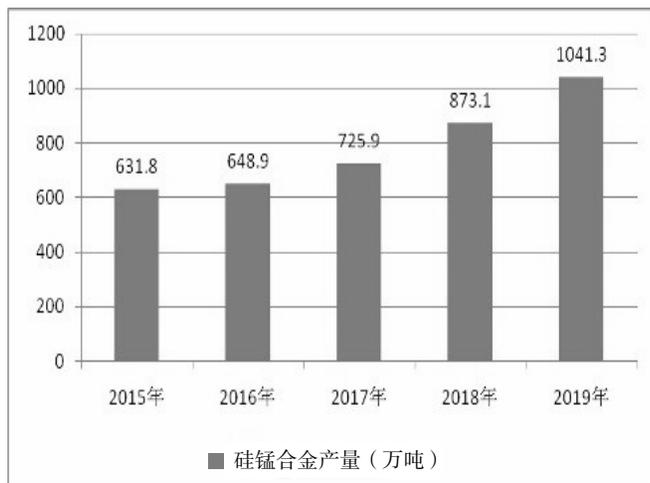


图 1 2015 ~ 2019 年锰硅合金产量图

由 Mysteel 统计产量与利润来看,2020 年锰硅累计产量 1021 万吨,较之去年同比减少 2.2%,近三年锰硅合金产量如下图 2 所示。

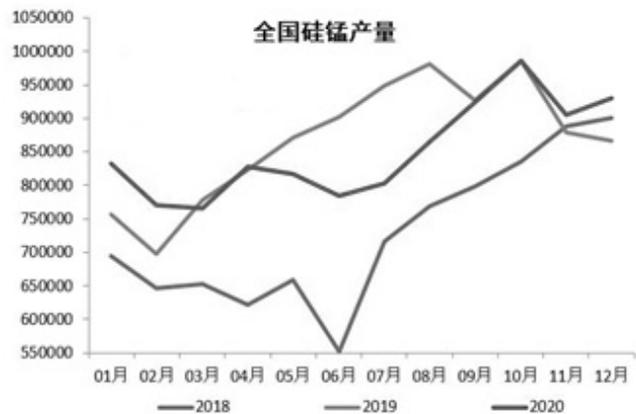


图 2 近三年锰硅合金产量图

2 余热资源情况

我国铁合金产量目前已经达到 3600 万吨,其中约 90% 的锰硅合金均采用矿热电炉生产。根据相关政策规定,铁合金冶炼行业属于耗能大户,据国家统计局数据显示,铁合金冶炼用电量占全国总发电量的 2% 以上^[2]。国内铁合金矿热炉主要采用敞口式矿热炉、半封闭式矿热炉和全封闭式矿热炉三种炉型。其中,敞口式矿热炉通常采用高烟罩集气,环保水平和节能技术落后,不能满足环保节能要求,已基本淘汰。现在矿热炉基本采用矮烟罩半封闭或全封闭式^[3]。

铁合金矿热炉冶炼过程中,电能消耗约占整个能量的 70%。而所有的能源流向中,矿热炉排出的烟气显热占比在 60% 以上,铁合金显热占比 30%,矿热炉出渣带走的显热和设备冷却水带走的显热等占比 10%。据分析,铁合金生产过程中约 70% 的能量被放散到环境中,没有进行回收利用。采用节能降耗,预计可有效减少外排热量或回收 30% ~ 40% 的能量,

相当于每吨铁合金产品能源节约 300kg 标煤。

3 余热回收利用技术

矿热炉冶炼工序中炉气、炉渣和冷却水等带走的热量，主要通过生产热水、生产蒸汽、热电联供、有机工质朗肯循环发电等几种途径回收。

炉渣余热资源具有周期性、波动性、腐蚀性等特征，一般采用低温回收的方式，用于加热工艺热水或生产生活热水。冷却水余热资源温度偏低，一般作为生活热水供取暖用。炉渣余热和冷却水余热适用于严寒地区，经济价值与用能单位用能情况关联，目前北方应用较多，南方偏少。有机工质朗肯循环发电要求热水温度至少在 90℃ 以上，实际更多回收的是低温烟气余热。

矿热炉烟气温度高、烟气流量大、烟尘含量高，容易堵塞流通管道，影响生产运行和换热效率。硅铁矿热炉烟尘积灰技术近十年发展稳定，通过采用钢珠清灰或钢刷清灰的方式较好地控制了通流部分灰尘的积累，且多采用余热锅炉生产蒸汽发电运行。而锰硅矿热炉烟气余热因灰尘易粘结堵塞通流部分，且目前更多采用密闭式矿热炉，烟气含一氧化碳占比约 70% 以上，荒煤气可回收，烟气显热更多直接或间接耗散到环境中，回收技术还有待进一步提升。

4 余热回收利用存在的问题

矿热炉清灰问题一直是困扰余热锅炉利用效率的一个难题。十年前，某企业将锰硅电炉烟气（400 ~ 800℃）先用冷却器降温后，再经布袋除尘，后进入锅炉燃烧室燃烧，经余热锅炉生产中温中压蒸汽发电，锅炉尾气再经除尘器除尘后排入大气，该方案燃烧了电炉烟气中易燃易爆并有剧毒的 CO，又可去除烟气中高浓度（120g/Nm³）、特细的（d<10μm 占 95 ~ 98%）的烟尘，使得烟气达标排放。但实际运行时，冷却器运行不到 48h 就会积灰堵塞，余热回收不理想，积灰照片如下图 3 所示。

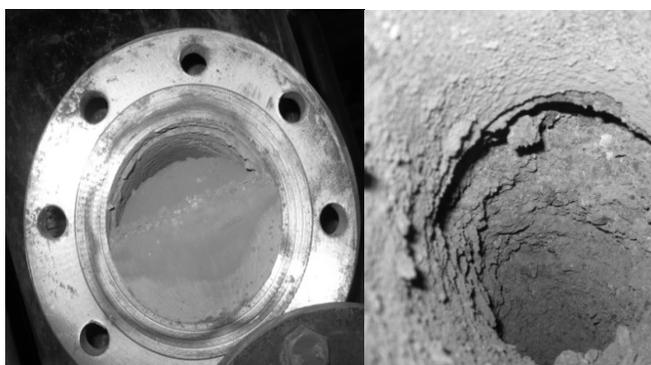


图 3 热炉积灰图

虽然经过了近十年的发展，但锰硅合金烟气回收利用积灰问题依然缺乏有效解决方法，而硅铁合金矿热炉余热回收的积灰问题得到了一定的改善，尤其对清灰方式进行了相关改造，这些年已有企业采用余热锅炉和风冷器并联运行，在余热锅炉故障时切换至风冷器运行，不影响矿热炉正常生产，同时输灰改用螺旋输送机，炉内采用移动式框架结构带动钢刷对锅炉管束进行清扫，或利用特殊输送钢珠装置，采用钢珠清灰，避免炉内积灰。

5 能耗现状

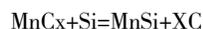
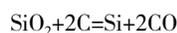
锰硅合金属于铁合金行业，是高耗能产业，铁合金消耗的主要能源为电力、焦炭，行业总体能耗量大、企业间能效水平有差距，同时面临国家能源双控、“3060 目标”的要求，使锰硅合金行业有节能技改的需求和压力。

根据《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版）》，硅铁铁合金的单位产品能效标杆水平为 1770kgce/t、硅铁铁合金的单位产品能效基准水平为 1900kgce/t；锰硅铁合金的单位产品能效标杆水平为 860kgce/t、锰硅铁合金的单位产品能效基准水平为 950kgce/t。截至 2020 年底，我国铁合金能效低于基准水平的产能约占比 30%。

综合以上数据可知，锰硅行业节能任务重，尤其是低于基准水平的企业，需按指南推荐的节能技术或其他节能技术，加强节能技术设施的升级改造。

6 存在问题的机理

锰硅合金矿热炉烟尘容易积灰，需要了解矿热炉冶炼的机理。锰硅合金是在埋弧还原电炉内，用碳还原锰矿和硅石炼成的，在不同反应区按照顺序进行化学反应，锰硅合金生产过程还原反应表达式如下：



上述可知，锰矿和硅石还原，在高温下生成更稳定的硅化锰，锰硅合金中溶解的碳随高温镇静时间的延长而减少，密闭矿热炉排出的烟气中有 70% 的一氧化碳。其中，碳还原二氧化硅的整个生产过程有着复杂的反应机理。在整个还原过程中，先产生中间产物碳化硅和一氧化硅，中间产物的生产与分解影响二氧化硅的整个还原过程。

锰硅合金冶炼硅铁时，首先在矿热电炉内进行挥发，同时在挥发的过程中会产生很多气体，如硅气和二氧化硅等气体，气体一旦挥发必定与空气接触，很容易出现氧化冷凝现象，

挥发气体在接触到空气时，可在一定程度上转变为微硅粉粉体状态，随着后续工艺不断施加影响，最终在除尘设备的帮助下就可形成一种超细的粉体，并且还无定形^[4]。通过对比电炉正常运行烟气中烟尘成分和电炉烟道发生堵塞时检测到的粉尘成分，发现高锰硅电炉生产时，硅的挥发是堵塞烟道的主要因素^[5]。

实践经验表明^[6]，当壁面温度超过某一临界值时可能出现凝结性积灰，一般壁温大于等于 500℃ 才能促进粘结性积灰的形成。余热回收采用中温中压参数，易形成粘结性积灰环境。

7 余热回收利用的进一步探讨

(1) 控制余热回收介质参数

根据高温烟气成分，分析烟气烟尘的形成机理和烟气成分，理清烟尘粘结积灰的物理和化学过程，选择合适的余热回收蒸汽温度，避开粘结性积灰敏感的壁面温度。

(2) 减少漏风

烟气烟尘含有部分挥发性气体，接触到空气易产生氧化冷凝现象，余热回收设施需保证一定的密封效果，建议采用密闭式压力容器回收，控制烟尘在余热回收设施中的二次氧化。

(3) 深度回收烟气余热

目前矿热炉出口采用水冷夹套降低排烟口烟气温度，冷却水经冷却塔外排散热，建议从排烟口取消冷却水系统，兼顾工艺直接将排烟口高温烟气综合回收利用，合理组织余热回收换热设施的布置，提高余热回收效率。

高温高尘烟气进入密闭式压力容器，利用本体结构降尘，控制漏风量，避免烟尘二次挥发产生粘结，将高温烟气通过水、气等进行换热，回收用于生产。降尘减温后的烟气进入尾部烟气净化设施处理后外排。

8 结语

综上所述，尽管冶金和钢铁行业的余热锅炉应用十分广泛、技术相当成熟，但锰硅合金电炉余热回收存在难点，采用密闭压力容器式余热回收装置、选择合适的参数是锰硅合金余热回收的一种方式。

每吨锰硅合金矿热炉回收 300kg 标煤，减排二氧化碳约 750kg。硅锰合金电炉的余热回收不仅可产生一定的经济效益，还可产生社会环保效益。随着“碳达峰”和“碳中和”的推动实施、能源双控指标的压紧，锰硅矿热炉余热回收利用所带来的节能环保效益和经济效益将得到更多领域的关注和认可，各种余热资源回收研究工作也将更加深入，直至有效推广应用，实现节能环保和经济效益的双赢。

参考文献：

- [1] 何赛, 王雪明, 侯中晓, 等. 锰硅合金矿热炉烟气余热回收工程实践 [J]. 铁合金, 2021, 52 (04): 35-38.
- [2] 魏俊英. 铁合金矿热电炉生产的节能思路 [J]. 中国金属通报, 2017, (03): 60-61.
- [3] 谢奕敏, 宋纪元, 侯宾才, 等. 铁合金矿热炉烟气余热回收及发电工艺系统 [J]. 铁合金, 2012, 43 (01): 41-44, 48.
- [4] 杨馥瑄. 矿热炉冶炼铁合金回收微硅粉粉体应用研究与发展现状分析 [J]. 化工管理, 2019 (11): 59-60.
- [5] 曾朝泽, 谢志华. 高硅锰硅密闭电炉运行及干法煤气净化回收工艺探讨 [J]. 铁合金, 2017, 48 (10): 1-5.
- [6] 北京有色冶金设计研究总院. 余热锅炉设计与运行 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.

作者简介：曾锦波（1972-），女，湖南长沙人，高级工程师，硕士研究生，主要从事余热利用、新能源研究。