

北京工业大学

硕士学位论文

氯化钾对烧结机头电除尘器的影响及对策探讨

姓名：陈义

申请学位级别：硕士

专业：环境工程

指导教师：李坚;魏星智

20060501

摘 要

本文主要论述影响冶金烧结机头电除尘器的主要物质，并探讨研究其对策。通过对烧结原料，机头电除尘器灰等进行化学成份、物理性能、物相等进行逐一分析，测试烧结工艺参数及电除尘器运行参数。采用理论分析与试验，测尘等相结合的方法，研究首钢烧结机头电除尘器积灰及除尘效率下降问题的原因。国内目前为止，一直认为碱金属如氧化钾等是造成粉尘比电阻高，影响冶金烧结机头电除尘器的主要因素。通过物相分析，化学成分分析等，影响首钢机头电除尘器主要物质是氯化钾，而并非碱金属的氧化钾等。针对此电除尘器积灰及除尘效率下降的问题，提出对策，如声波清灰、结构改进、烟气调质等，通过上述或某一项技术改进，改善阴、阳极积灰、增加电场强度、改善荷电性能及烟气特性等，进一步改善提高电除尘器的运行效率，确保排放达标。对地处首都的首钢目前的环保要求、烧结生产及首钢在唐山建大型钢铁厂都具有重要意义。针对有的钢铁企业，如上海宝钢烧结机头电除尘器第三电场除尘灰做废弃处理，不利于含铁资源的综合利用。研究首钢烧结机头电除尘器，为除尘灰的处理和综合利用提供更好的科学依据。因此，无论是从环境保护、资源综合利用，还是从首钢长远的发展，都有必要对这一问题进行研究，并提出建议。

关键词 电除尘；影响；对策；氯化钾

Abstract

This text discusses the main substances having influence on metallurgy sintering nose of electrostatic precipitator and studies the countermeasures. After analyzing the chemical components、 physical features and phase etc of the dust of electrostatic precipitator as well as the material of sintering , the sintering technical parameters and operational parameters of electrostatic precipitator were tested. The reasons for the dust accumulation in Capital Iron and Steel Co. and efficiency drop were examined through theoretical analysis and experimental research. In home, until now alkali metal such as oxidize potassium is considered to be the main reason for high resistance of dust and the key factor in influence on sintering nose of electrostatic precipitator. Through physical phase and chemical components analysis, potassium chlorine was found to be the main substance influencing the sintering edge of electrostatic precipitator in Capital Iron and Steel Co, not the alkali metals. Concerning dust accumulation and efficiency drop issues, some countermeasures was brought forward, like using sound wave to clear dust, improving structure, adjusting the quality of the exhausted gas etc. Use one or several of those measures、 improve the dust accumulation in the negative and positive pole the positive poles、 increase the intensity of electric field、 reform the electricity charge ability and the features of the exhausted gas etc to further enhance the efficiency of electrostatic precipitator and ensure the discharge up to standard Which is of much importance to the environments requirements of the Beijing premises of Capital Iron and Steel Co as well as the target Tangshan premises. Some iron and steel enterprises, such as the Baogang iron and steel plant in Shanghai, the discard of dust in sintering nose of electrostatic precipitator is unfavorable to the comprehensive utilization of resource including iron. The study on sintering nose of electrostatic precipitator of Capital Iron and Steel Co provided scientific basis for better utilization and disposal of dust. Therefore, no matter from

environmental protection or comprehensive resource utilization, or from the long-term development of Capital Iron and Steel Co., it is necessary to carry on research to this problem and put forward some suggestions.

Keyword : Electrostatic precipitator; Influence; Countermeasure; Chlorine potassium

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名： 彭文 日期： 2006.5.13

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名： 彭文 导师签名： 李望 日期： 2006.5.13

第1章 绪论

1.1 课题背景

2001年5月28日,首钢一烧机头1#、2#由原640多管旋风除尘器改成160m²三电场电除尘器并投产,运行正常。三个月后,发现除尘器电场电压下降约3~6kV,第二、三电场反电晕现象明显,出口粉尘浓度严重超标(设计标准为30mg/m³)达到50~87mg/m³,峰值达200mg/m³。

2001年6月进行单机检修时,初步对电除尘器内的除尘灰进行了成分分析,发现第二、三电场除尘灰中钾离子的含量非常高。同时发现第二、三电场,尤其是第三电场空间内弥漫着类似柳絮的絮状物,并且极板等处也附积有这种物质,厚的地方有10~20mm。在采取了断电振打、改变烟气温度等一系列措施后,均无改观。

为进一步分析、研究此问题,并找出解决的办法或思路,自己决定以此为课题。

1.2 电除尘器的发展状况

电除尘技术的发展有深厚的潜力,市场前景看好。但电除尘器本体结构多少年来并没有根本性的突破。正因为这样,电除尘结构还有改进的余地。要考虑各种不同的工况条件,有针对性地采取不同的措施和对策。近年来,电除尘器行业从进一步提高效率,节能降耗着手,把握形势,与时俱进,不断开拓,不断地完善电除尘器的优化设计。在电除尘本体企业中以技术创新为主线,不断进行创新,开发新型高效的电除尘器。^[1-5]

在人们为了追求增大驱进速度而增大极间距的同时,窄间距电除尘器的出现又有新的思路。

我国首创的透镜式电除尘器,对粉尘的适应性强,和常规电除尘器相比,体积按重量比可节省40%,既高效,又节能,实现设备大器相比,体积按重量比可节省40%,既高效,又节能,实现设备大

型化的工作正在行动之中。

业内一些企业,正在开发的电一袋一体化除尘器,已引起关注。电除尘和布袋除尘组合的除尘器,充分发挥电除尘器和袋式除尘器的各自优势,合理有机地组合成新型的除尘器,已在实践中证明具有明显的优越性,特别是老除尘器的改造中,效果更为明显。

开发和引进的湿膜电除尘技术,克服电除尘对粉尘比电阻的敏感性,对捕集微细粉尘,更大有作为。不需振打,设备梁、柱等都大大减轻,重量比原来电除尘器减轻近 1/3,可望近期争取投入使用。

利用电磁场对带电粒子的运动轨迹运行有效控制的原理,开发的磁控电除尘器,也将是电除尘技术的新的突破,期望效率更高,体积更小。

湿法电除尘器的开发也出现新的势头,在一些特殊场合和微细粉尘的捕集,使用证明十分有利。

合理的气流分布和振打清灰是提高电除尘器效率的两个重要组成部分,改善气流分布和振打条件的新型开发工作,也取得了可喜的进步,极大地改善了电除尘器的捕集效果。采用斜气流以及电除尘器出口中心线略高于进口的方法,证明防止二次飞扬有利。特别是对高浓度粉尘的捕集已见成效。国内在振打清灰的研究和探索是成功的,但在选配采用上要过细地做工作。在声波辅助清灰的研究实践也获得可喜进展。采用钢刷清灰的电除尘器在我国已有成功的使用经验。国外利用移动式电极捕集 1000mw 燃煤烟尘及燃结机 48000m³/h 的烟尘,出口排放浓度小于 10mg/m³,具有效率高收尘面积比常规电除尘器要少 30%左右,目前已有数十台设备在实践中应用。国内已有人试图开发。^[6-8]

实现对特殊粉尘条件下的板一线配置的研究,形式多样,效果喜人。主要配套的零部件如高绝缘的绝缘子,小型减速机等等,也在不断更新换代之中。

我国电除尘全面计算机管理功能的现代化智能控制系统的开

发研制,是电除尘技术和产业达到世界先进水平的主要标志,随着电子原器件的进步,常规高压电源通过高压调节器的升级改造,为了适用高度自动化要求,用以太网,总线控制极大提高了控制速度和效果,又最大限度地节省成本,提高效能。扩展 IPC 系统的功能,利用以太网或总线控制,与企业的其他系统有机连接一起,组成完善的网络系统,实现现场信息上传、指令下达的交互功能,组成比较完善的层次分明的网络系统,充分实现的信息交流,资源共享,管控一体的要求。采用新型液晶显示的电除尘器运行曲线,可根据实际要求进行调整的高压微机控制电源,运行证明,除尘、节能效果均佳。低压液晶显示的控制系统也已完成。上位机配套技术的多样化,相关的在线监测仪器的商品化,使得电除尘器电源高智能专家控制系统和新一代 IPC 智能控制系统及远程式控制系统的不断完善创造条件。^[9-16]

技术上更先进,大幅度提高除尘效率,且同时节能的大功率高效开关电源的开发,已进入样机调试阶段,小型开关电源已经投入生产。国外使用经验证明,许多电除尘器原来排放在 $70-80\text{mg}/\text{m}^3$,换上开关电源,排放浓度可以大幅降低,达到 $20-30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。极大地提出高电除尘器的除尘效率。

电除尘器供电电源企业,在石油脱水、油烟净化电源的开发中加大了力度

为了确保烟尘排放,实行有效监督,促进管理的进步和规范化,烟尘排放在线监测仪器正不断涌现,并已逐步,装备在除尘系统现场。

等离子体技术是具有开发意义的广义的电除尘技术,^[16-20]能同时除尘、脱硫、硫硝,又能净化其他有害气体,经过 10 多年的开发、探索,终于取得了令人瞩目的突破。形成产业化也将是指日可待。

应该指示,目前国内电除尘技术的开发研究工作不只限于上述所列。不容置疑,所有除尘技术的进步。但是时至今日,为了实施

可持发展战略的需要，排放标准将会不断提高，比如要和发达国家接轨，其出口排放浓度 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下或更低，将是对电除尘技术更严峻、更现实的挑战。

总之，正如怀特所说的：“电除法技术还远远没有被充分认识，还有许多现象不可理解、不可预见，实践还只能依靠经验。”随着科学技术的不断提高，在全体同仁的共同努力下，电除尘技术还会迎来更加灿烂的明天。

1.3 相关工作

1.3.1 尘粒的凝并：主要介绍电凝并和声场凝并^[1, 3]

电凝并：在很多情况下，气流中的粉尘由于其形成的方式和化学成分不同，可能带有正电荷或负电荷。在工业烟尘气体中，自然荷电时，其正电尘粒和负电尘粒的数目接近相等，例如对化学成分相同的非常细小的尘粒就是如此。但也可以人为地使尘粒荷电，例如电晕放电（电除尘器），使尘粒通过荷电体等等。在这种情况下，尘粒多数呈单一极性。

对于单分散性尘粒，荷电量为 q_1 及 q_2 （同极性或异极性）的尘粒的电力凝并，可以看成为对热扩散凝并的附加作用。根据所荷的电性不同，或者使凝并加强，或者使其减弱。于是可用对热扩散凝并的修正来表示电凝并。

声场凝并：在声场和超声场中，细小尘粒凝并成大颗尘是一种较为有效的方法。凝并的机理有不同的解释。其中一种认为由于声波引起的振动，使不同大小（或不同密度）的尘粒间被带动的程度不同而产生不同的移动速度。小尘粒由于质量小将参与到大振幅的声波振动，并与难以振动的大尘粒相碰撞而产生凝并。然而这种理论并不完善，有些现象不能得到解释。例如，频率很高时，几乎所有的尘粒都静止不动，但仍有凝并现象。通常认为超声凝并的机理是因下列三方面因素而造成的：

在声场中不同大小尘粒振动的振幅不同而导致尘粒间的碰撞（同向凝并）；

由于气流和尘粒间的相对速度在尘粒之间造成的流体吸引力；

由于声辐射压的作用，使尘粒沉积到声驻波的波腹上。

1.3.2 如何开展工作

电除尘器技术是一个各种学科合成的学科，每一方面的深入、细致的研究成果，都会对该技术的进步起到实质性的作用，为保证科研的正常进行和产生成果，还需以下工作做保证，才能实现科研既定的目标。

电除尘器技术的研究离不开大量的工业试验，因此科研经费和人力资源的大量投入是必不可少的。因此，对于生产厂家来说，决策层需在拿出魄力和勇气，加大投入，正确处理资源配置的合理性。

电除尘器技术的科研必须走联合之路。任何一方承担某项科研任务，会受各种因素的制约（如：时间、地点、专业技术、用户等），而不能有效的开展。因此，各种联合方式的形式是需要研究解决的。

自主开发和引进技术相结合，是科研开发的重要形式，引进技术可以使我们能以最简捷的途径跟上世界先进水平，使我们能站在前人的肩膀上攀登高峰。

大胆的创新，与时俱进，是所有科研人员所必备的素质的科研的保证。

1.4 本文主要研究内容

首钢烧结机头电除尘器自2001年4月投产后，不到3个月的时间，运行参数变化，除尘效率明显降低，目测烟囱有明显冒烟现象，浓度达 $200\text{mg}/\text{m}^3$ ，个别情况还要高。但此时电场的二次电流值并不低，特别是第三电场二次电流达1500mA。针对此问题，大部分人员感觉奇怪，不明白是何原因。通过自己的观察和分析，说明电场内有反电晕现象。

到底是何原因影响此电除尘器的？如何解决排放高的问题？自己与设计部门、电除尘器制造单位、北工大、首钢环保处及首钢技术研究院等多家单位进行了大量的实验及系统的调研。于 2001 至 2004 年 3 年的时间进行了大量的分析及实验，其中包括烧结原料的分析，电场除尘灰的分析，电场除尘灰比电阻的测试等。通过分析，尤其是 X—光衍射分析、水溶实验等得出首钢烧结机头电除尘器灰的成分除铁的氧化物外，主要是氯化钾，并非人们以前一直认为的碱金属的氧化钾，且电场里有钾离子、氯离子、钠离子等的富集现象。

结合机头电除尘器比电阻高，粉尘较难荷电，而荷电后又不易释放电荷，造成反电晕，影响效率，国内同行业中具有普遍现象的问题。自己翻阅大量资料，并与北工大李坚导师、首钢环保处魏星智老师及国内的专家的学习、帮助、探讨，对烟气的调质、电除尘器的结构改进、供电系统的调试、声波清灰及首钢炼铁厂原料系统电改袋的实例等进行了反复的研究，提出解决烧结机头电除尘器因高比电阻粉尘而排放高的问题的建议。

第2章 影响机头电除尘器的原因

2.1 引言

影响电除尘器工作的因素很多，其中以粉尘的比电阻最为突出。一般认为最适宜于电除尘器工作的比电阻范围为 $10^4 \sim 5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。当粉尘比电阻太低（例如碳黑粉尘），粉尘到达收尘极后，很快释放出其上的电荷，成为中性，因而易于从收尘极上脱落，重新进入气流，产生二次飞扬，降低除尘效率。当粉尘比电阻太高时，粉尘到达收尘表面后，粉尘的电荷不易释放，逐步积存于收尘表面上的粉尘可能产生两种影响：一是由于粉尘的电性仍保持为负极性，它排斥随后的粉尘粘附于其上，二是在粉尘层达到一定的厚度后，在尘层内部形成一定的电场，粉尘层表面为负极，收尘极为正极。粉尘层增厚，电场强度增加，以致达到尘层内的空气击穿，从而产生反向放电（称为反电晕），即从收尘极向收尘空间放出大量正离子，使粉尘荷正电进入收尘空间，破坏了正常的收尘工作。在目前工业中所遇到的粉尘，许多是处于高比电阻的范围，例如干法生产的水泥窑、有色冶金中的氧化铅尘等。钢铁烧结厂的烧结尘的比电阻，比电阻较高，在采用电除尘器时应采取相应的措施。

由于烧结烟气中含有水份，易堵塞滤袋，维护困难。湿式电收尘器，由于需要使用耐酸材料等。而干式电收尘器比较理想。但是，烧结主排气中不仅尘粒细而且电阻高达 $10^{11} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ，对于干式 EP，易产生所谓反电晕现象，降低收尘效率。

烧结主排气中粉尘比电阻所以高，主要是排气中含有 Na、K、 SO_2 、 H_2O 、 Cl_2 等成分产生各种盐类。以生成硫酸盐为例：

$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$; $\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2 \uparrow$ 生成的 K_2SO_4 或 Na_2SO_4 等盐类，属高比电阻烟尘（图 2—1）。

首钢烧结机头二、三电场灰中 KCl 含量达到 20~30% 以上（经分析而得，后面有分析论述），而且烟气的温度范围在 100℃ 左右，

此时 KCl 的比电阻可以达到 $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上，使电场灰总体比电阻高于临界值 ($10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$)。当粉尘比电阻太高时，从而产生反电晕，即从收尘极向收尘空间放出大量正离子，使粉尘荷正电进入收尘空间，破坏了正常的收尘工作。使电除尘器效率降低。[12]

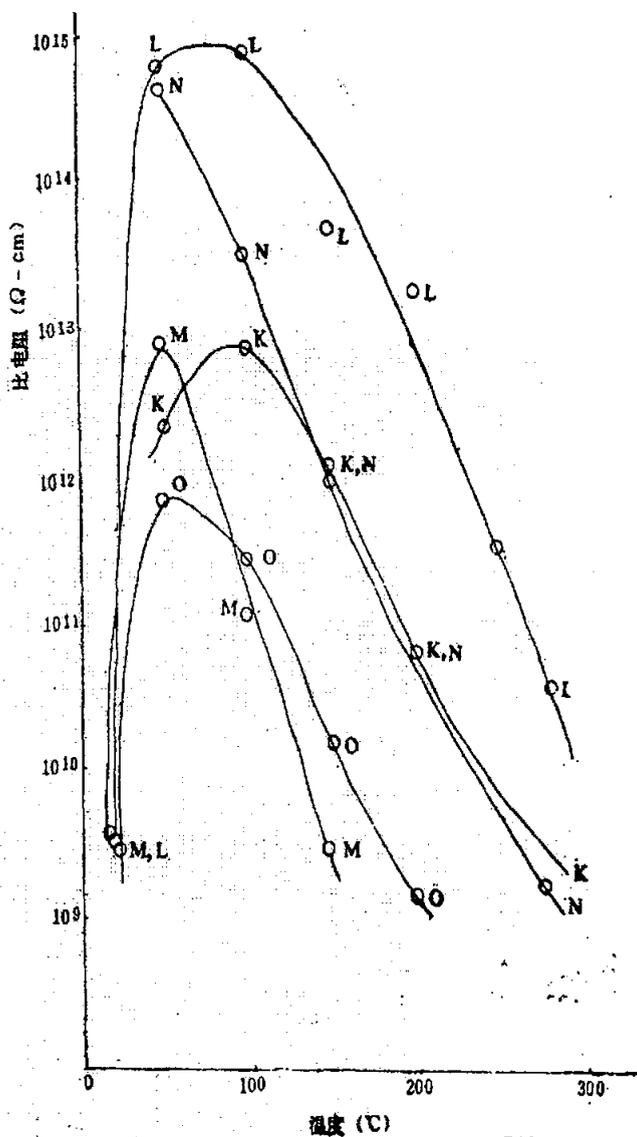


图 2-1 温度与比电阻的关系

Figure 2-1 Relationship between T & R

K—K₂SO₄; L—KCl; M—K₂MnO₄; N—NaCl; O—Na₂SO₄

2.2 影响机头电除尘器的主要原因

2.2.1 电场灰的比电阻及其它

2001 年 7 月 27 日分别取 5 个样委托北京市劳保所, 测试比电阻、真密度、堆积密度、分散度。

5 个样中: 2—0、2—1、2—2、2—3、2—4, 分别代表电除尘器入口、一电场、二电场、三电场、出口的灰样。

2.2.1.1 电场灰的比电阻

表 2-1 比电阻 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

Table2-1 resistivity

样品号	2—0	2—1	2—2	2—3	2—4
室温 ($^{\circ}\text{C}$)	4.5×10^8	2.5×10^9	5.0×10^{10}	6.5×10^{12}	5.0×10^9
50 ($^{\circ}\text{C}$)	4.5×10^9	3.8×10^{11}	4.0×10^{12}	3.0×10^{13}	6.5×10^{11}
75 ($^{\circ}\text{C}$)	1.1×10^{10}	4.0×10^{12}	2.5×10^{13}	4.0×10^{13}	6.0×10^{12}
100 ($^{\circ}\text{C}$)	1.2×10^{10}	5.0×10^{12}	2.0×10^{13}	1.3×10^{13}	5.0×10^{12}
125 ($^{\circ}\text{C}$)	1.0×10^{10}	2.4×10^{12}	5.5×10^{12}	3.6×10^{12}	2.8×10^{12}
150 ($^{\circ}\text{C}$)	5.5×10^9	8.0×10^{11}	1.0×10^{12}	1.0×10^{12}	9.0×10^{11}
175 ($^{\circ}\text{C}$)	1.5×10^9	2.1×10^{11}	2.1×10^{11}	1.9×10^{11}	2.0×10^{11}
200 ($^{\circ}\text{C}$)	5.0×10^8	5.0×10^{10}	5.5×10^{10}	3.6×10^{10}	5.0×10^{10}

备注: 实验室室温 30°C ; 湿度 56%

2.2.1.2 真密度

表 2-2 真密度 (g/cm^3)

Table2-2 actual density (g/cm^3)

样品号	2—0	2—1	2—2	2—3	2—4
真密度	4.51	4.04	3.70	3.28	3.36

2.2.1.3 堆积密度

表 2-3 堆积密度 (g/cm^3)

Table2-3 piled density (g/cm^3)

样品号	2—0	2—1	2—2	2—3	2—4
堆积密度	1.66	1.14	0.61	0.33	0.40

2.2.1.4 分散度

以声波筛筛分粉样：一组标准筛筛号分别为：80目、120目、150目、200目、240目、300目；对应的筛尺寸为：200 μm 、125 μm 、100 μm 、77 μm 、63 μm 、50 μm 。

表2-4 样品号：2-0
Table2-4 sample no.:2-0

粒级 (mm)	产率		
	质量 (g)	占全样 (%)	筛下累 (%)
0.125-0.200	5.7745	18.02	100.00
0.100-0.125	2.7985	8.74	81.98
0.077-0.100	9.0176	28.15	73.24
0.063-0.077	2.6574	8.30	45.09
0.050-0.063	3.8492	12.02	36.79
<0.050	7.9351	24.77	24.77
合计	32.0323	-----	-----

中位粒径 (μm): 77.7

表2-5 样品号2-1
Table2-5 sample no.:2-1

粒级 (mm)	产率		
	质量 (g)	占全样 (%)	筛下累 (%)
>0.200	-----	-----	-----
0.125-0.200	1.8001	10.96	100.00
0.00-0.125	1.5530	9.45	89.04
0.077-0.100	4.6700	28.42	79.59
0.063-0.077	1.2686	7.72	51.17
0.050-0.063	1.8168	11.06	43.45
<0.050	5.3216	32.39	32.39
合计	16.4301	-----	-----

>中位粒径 (μm): 69.3

表2-6 样品号2-2
Table2-6 sample no.:2-2

粒级 (mm)	产率		
	质量 (g)	占全样 (%)	筛下累 (%)
>0.200	-----	-----	-----
0.125-0.200	0.5472	6.60	100.00
0.100-0.125	0.2719	3.28	93.40
0.077-0.100	0.7497	9.04	90.12
0.063-0.077	0.5787	6.98	81.08
0.050-0.063	0.6386	7.70	74.1
<0.050	5.5057	66.40	66.40
合计	8.2918	-----	-----

中位粒径 (μm): 32.2

表 2—7 样品号 2—3
Table2-7 sample no.2—3

粒级 (mm)	产率		
	质量 (g)	占全样 (%)	筛下累 (%)
>0.200	-----	-----	-----
0.125-0.200	0.6191	7.21	100.00
0.100-0.125	0.3557	4.14	92.79
0.077-0.100	0.7619	8.87	88.65
0.063-0.077	0.4771	5.55	79.78
0.050-0.063	0.5361	6.24	74.23
<0.050	5.8421	67.99	67.99
合 计	8.5920	-----	-----

中位粒径 (μm): 28.6

表 2—8 样品号 2—4
Table2-8 sample no.2—4

粒级 (mm)	产率		
	质量 (g)	占全样 (%)	筛下累 (%)
>0.200	-----	-----	-----
0.125-0.200	0.5581	5.59	100.00
0.100-0.125	0.3613	3.62	94.41
0.077-0.100	1.2484	12.51	90.79
0.063-0.077	0.9090	9.11	78.28
0.050-0.063	1.0435	10.46	69.17
<0.050	5.8597	58.71	58.71
合 计	9.9800	-----	-----

中位粒径 (μm): 41.9

2.2.2 烧结原料成分分析

表 2-9 给出了首钢主要烧结原料的化学成分。由表 2-9 可以看出，在首钢使用的主要烧结原料中粉尘及尘泥的 K_2O 都比较高：转炉尘泥（OG 泥）的 K_2O 含量最高为 0.53%，烧结矿粉末的 K_2O 含量仅次于 OG 泥为 0.48%，瓦斯灰为 0.15%，高炉除尘灰为 0.12%；而澳矿粉、巴西矿粉等原料中的 K_2O 含量都较低。因此，可以认为，首钢烧结电除尘器中的 K_2O 主要来自烧结使用的含铁粉尘（泥）。在烧结原料不配加 OG 泥的情况下，第三电场灰的 K_2O 含量可以达到 20% 以上。所以，应当重视烧结矿粉末等含铁粉尘中的 K_2O 含量的影响。

表 2-9 主要烧结原料的化学成分 (%)

Table 2-9 the main chemical components of sintering material (%)

项目	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	TFe	FeO	K_2O	Na_2O	ZnO	烧损	C
巴西粉	1.25	0.18	0.063	0.006	0.08	0.043	69.17	0.22	0.072	0.012	0.0026	0.44	0.08
OG 泥	6.35	0.72	37.34	3.20	0.29	0.11	30.99	29.45	0.53	0.30	0.012	11.10	2.97
瓦斯灰	6.22	2.60	5.00	1.36	0.19	0.11	40.00	6.82	0.15	0.085	0.056	28.25	25.8
结末	5.72	0.89	9.24	1.92	0.14	0.059	57.52	7.26	0.48	0.021	0.0062	-0.08	0.29
澳粉	3.88	1.72	0.22	0.11	0.18	0.16	63.24	0.72	0.012	0.014	0.0051	3.37	0.18
除尘灰	4.75	1.07	17.81	4.83	0.44	0.057	37.62	5.10	0.20	0.054	0.041	18.21	7.56

2.2.3 电场灰的分析

2.2.3.1 2001年7月电场灰的化学成分

表 2-10 给出了 2001 年一烧电除尘电场灰的化学成分, 同样存在碱金属的富集现象, 由第一向第三电场 K_2O 及 Na_2O 含量逐渐升高, 其中钾的富集尤为突出。

表 2-10 2001 年 7 月电场灰的化学成分 (%)

Table 2-10 the chemical components of the dust in electrostatic precipitator in July of 2001 (%)

项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TFe	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	ZnO	烧损	C
1 电 场 灰	5.22	1.30	7.94	1.84	0.15	0.068	51.72	9.63	1.90	0.19	0.046	8.61	3.06
2 电 场 灰	4.56	1.23	6.58	1.50	0.11	0.065	47.96	10.52	5.30	0.44	0.078	14.28	3.32
3 电 场 灰	4.29	1.09	5.34	1.39	0.11	0.059	47.88	10.63	6.40	0.58	0.058	13.85	3.51

X-衍射分析结果说明: 电场灰的铁矿物物相以磁铁矿和赤铁矿为主, K 元素为氯化钾形式存在, 少量的矿物是方解石、白云石及辉石类矿物。

2.2.3.2 2003年9月电场灰的化学成分

2003 年 9 月 26 日, 利用检修时机, 对一烧电除尘器各电场除尘灰进行取样, 作了化学成分及物相分析, 见表 2-11 图 2-2。

表 2-11 电除尘器各电场除尘灰的化学成分 (%)

Table 2-11 the chemical components of dust in different parts of electrostatic precipitator (%)

成分	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C	TFe	FeO
1	3.38	6.65	1.37	4.22	0.30	3.06	46.84	6.72
2	3.82	6.45	1.28	11.99	1.03	3.23	33.50	4.85
3	2.00	4.60	0.84	20.32	1.68	4.34	21.22	3.23

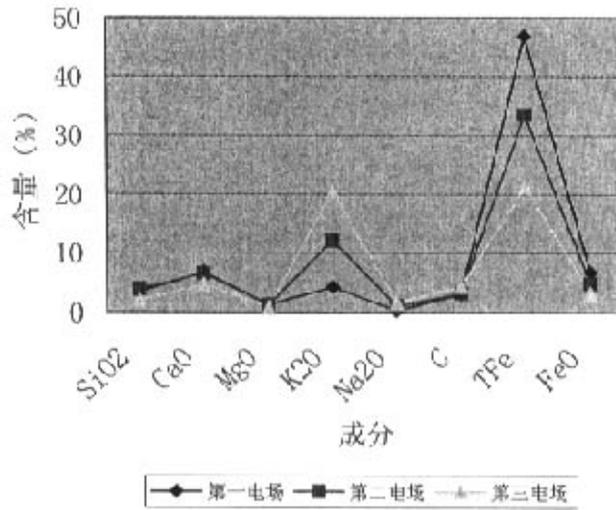


图 2-2 各电场灰的化学成分变化图

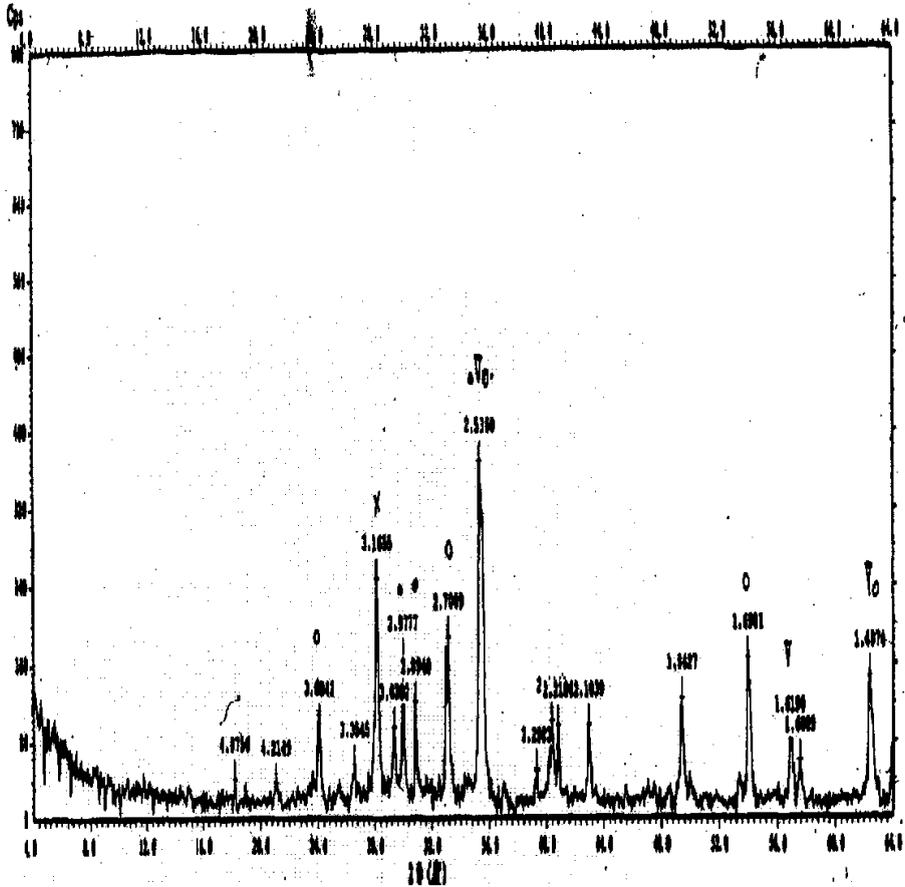
Figure 2-2 the change of the dust chemical components in different parts of electrostatic precipitator

2.2.3.3 烧结电除尘器各电场除尘灰的物相组成

对烧结电除尘器各电场除尘灰进行了 X-衍射分析 (见图 2-3、2-4、2-5)。分析结果说明: 第一电场灰的物相以磁铁矿和赤铁矿为主, 其次为氯化钾, 并含有少量的方解石、白云石及辉石类矿物; 第二电场灰的物相以磁铁矿和赤铁矿为主, 其次为氯化钾, 并含有少量的辉石类矿物; 第三电场灰的物相以磁铁矿和赤铁矿为主, 其次为氯化钾, 并含有少量的方解石、白云石及辉石类矿物。

由第一电场向第三电场, 磁铁矿及赤铁矿的衍射峰强度 (峰高) 逐渐降低, 说明其含量逐渐减少; 而氯化钾的衍射峰高逐渐升高,

说明其含量逐渐增加。

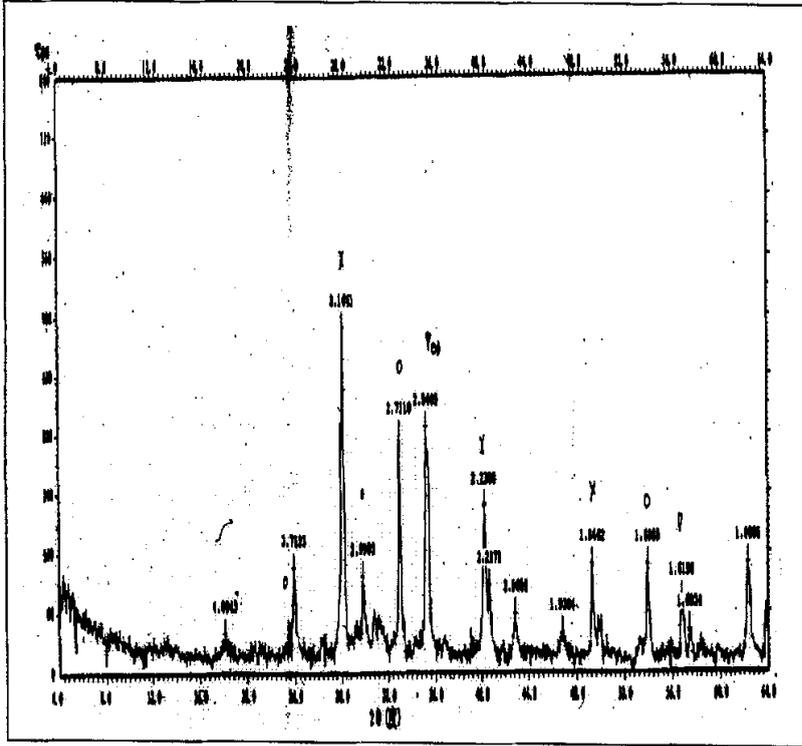


No.	2θ (度)	d	h/k/l	I, cps	FWHM	No.	2θ (度)	d	h/k/l	I, cps	FWHM
1	14.183	4.8756	4, 7	16		16	53.951	1.6981	42, 2	184	0.15
2	21.068	4.2148	5, 6	19		17	56.828	1.6188	14, 8	57	
3	24.878	3.6842	26, 3	98	0.13	18	57.520	1.6069	11, 5	39	
4	26.558	3.5845	10, 3	55		19	62.380	1.4874	57, 5	118	0.15
5	28.167	3.4655	61, 4	289	0.18						
6	29.364	3.3882	15, 3	52	0.11						
7	29.884	3.3777	38, 1	150	0.15						
8	30.872	3.2948	26, 5	91	0.13						
9	33.241	3.1889	49, 6	169	0.14						
10	35.365	3.1061	100	341							
11	39.378	2.9213	8, 6	29							
12	40.338	2.8848	15, 0	78	0.18						
13	40.785	2.8786	28, 3	71	0.15						
14	41.352	2.8639	32, 1	75	0.13						
15	49.488	2.6427	32, 4	111							

× KCL
 ▽ 磁铁矿
 ○ α-赤铁矿
 • 辉石

峰 总 数: 19 峰 的 总 强 度: 221965
 波 长 为: 341 背 景 强 度: 73985
 基 冲 强 度 / 基 冲 强 度: 0.333

图 2-3 电除尘器 1#电场除尘灰的 X-光衍射图
 Figure 2-3 the x-ray diffraction chart for the dust of 1# electric field

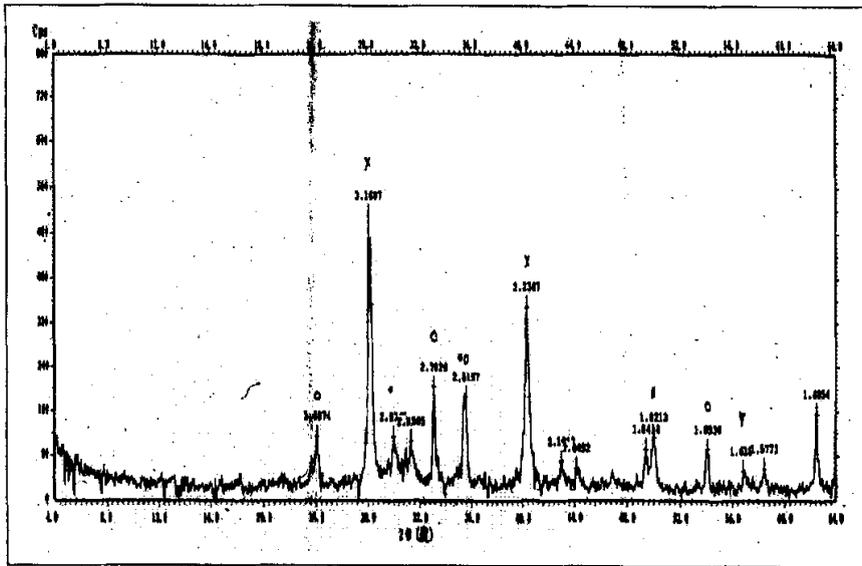


No.	2θ (度)	d	I/I ₀	h, k, l	FWHM
1	18.119	4.8943	8.2	26	
2	23.951	3.7123	27.0	113	0.11
3	28.180	3.1641	100	418	0.13
4	29.355	2.9903	17.0	71	
5	33.814	2.7110	66.6	276	0.20
6	35.304	2.5405	67.9	284	
7	40.264	2.2380	48.9	196	0.17
8	40.640	2.2171	19.1	80	
9	42.910	2.1059	11.5	48	
10	46.830	1.9384	7.7	32	
11	49.318	1.8462	28.2	110	0.15
12	53.939	1.6983	28.9	121	0.17
13	56.789	1.6188	17.1	72	0.10
14	57.423	1.6034	8.1	34	
15	62.329	1.4885	28.2	118	0.18

× KCL
 ∇ 磁铁矿
 ○ α-赤铁矿
 • 辉石

谱点号: 15 原始数据号: 267709
 数据时区: 418 滤波强度: 94020

图 2-4 电除尘器 2# 电场除尘灰的 X—光衍射图
 Figure 2-4 the x-ray diffraction chart for the dust of 2# electric field



No.	2θ (度)	d	I/I ₀	I, cps	FWHM
1	24.115	3.6874	18.4	86	
2	28.138	3.1687	100	464	
3	30.080	2.9761	12.8	59	
4	31.355	2.8505	11.9	55	
5	33.127	2.7820	37.7	175	0.14
6	35.681	2.5197	35.2	154	0.11
7	40.481	2.2587	66.8	310	0.18
8	43.010	2.1612	8.2	38	
9	44.160	2.0492	4.6	21	
10	49.455	1.8414	12.6	58	
11	50.040	1.8213	17.1	80	
12	54.100	1.6938	15.4	71	
13	58.840	1.6185	5.0	23	
14	58.465	1.5773	6.5	30	
15	62.473	1.4854	27.1	126	0.14

峰总数: 15
最强峰高: 464

总积分强度: 282641
总峰面积: 81133

- × KCL
- ▽ 磁铁矿
- α-赤铁矿
- 辉石

图 2-5 电除尘器 3# 电场除尘灰的 X—光衍射图

Figure 2-5 the x-ray diffraction chart for the dust of 1# electric field

2.2.4 试样与分析

2004 年 4 月 8 日和 4 月 15 日两次对机头电除尘器进口管道、三个电场的极板及灰斗、出口管道的粉尘进行取样，委托首钢技术研究院中心实验室，使用 ARL 9800XP X 射线荧光光谱仪及相关仪器进行了化学成分分析。

分析结果见附表、附图。

2.2.4.1 主要元素的分布情况

ARL 9800XP X 射线荧光光谱仪可以测定试样中所含除氧、碳等元素以外的大部分元素含量，本次一烧机头电除尘器进口管道、三个电场的极板及灰斗、出口管道的粉尘测定结果见表 2-12、表 2-13、图 2-6~图 2-9。由这些图表可以看出：

烧结电除尘器进口管道、三个电场的极板及灰斗、出口管道的粉尘的主要元素以 Fe 为主，但人孔门内侧絮状物质的化学成分以 Cl 为主，其 K 及 Cl 的含量之和达到了 30% 以上。

所分析的元素中 Si、Al、Ca、Mg、Mn、P、Fe 等成分的含量，由管道进口向一、二、三电场（含极板灰及灰斗灰）逐渐降低。而 Zn、K、Na、Cl、Pb 等元素含量以及 R（碱度）、烧损则逐渐增加。

2.2.4.2 电场灰有 K、Na、Cl、Pb、Zn、及 F 的富集现象

电除尘器进口灰的化学成分，2004.04.08 试样与烧结矿相近，在 2004.04.15 试样中有 Cl 及 K 元素的富集现象，其含量分别为 2.8% 和 2.03%。

从一电场开始极板灰及灰斗灰中的 Cl 及 K 元素含量明显增加，重量百分比可以超过 Ca 元素，排位达到第二、第三，在二 三电场中，这种趋向继续加强，2004.04.15 极板灰及灰斗灰中 K 元素与 Cl 元素重量之和达到了 35%。

还可以看到，在电场中存在有 Pb、Zn、及 F 的富集现象。

2.2.4.3 KCl 与 NaCl 是电场灰中仅次于铁矿物的重要物相

电除尘灰的物相分析证明，其中含有 KCl。若除灰尘中的 K、Na 与 Cl 形成 KCl 及 NaCl。K、Na、Cl 的原子量分别为 23.0、39.1 和 35.5，K 与 Na 原子量之和为 62.1，与 Cl 原子量之比为

$$62.1 / (2 \times 35.5) = 0.87$$

表 3 和表 4 列出了各试样 Cl、K、Na、K+Na 含量及 K/Cl、(K+Na)/Cl 的数值，其 (K+Na)/Cl 都大于 0.87。

为验证电场灰中 KCl、NaCl 等氯化物的存在，进行了电场灰

水溶试验, 取 2004.04.15 的三电场灰斗灰 20.04g, 放在 100℃ 的 200g 水中, 进行搅拌、静止、过滤、烘干, 得到不溶物重量为 15.24g, 有 5.80g 电场灰溶解于水中, 即可溶物占原电场灰总重的 28.94%, 小于表 4 中 $K+Na+Cl$ 之和 37.81%。此结果说明, 电场除尘灰中 K、Na 元素可以大部分与 Cl 形成 KCl 和 NaCl, 并可能有部分未予 Cl 结合的 K 及 Na 进入硅酸盐相或其它物相。

$K+Na+Cl$ 之和在电场灰, 特别是二、三电场灰中的总量较高, 能达到 30%以上, 所以 KCl 与 NaCl 已成为电场灰中仅次于铁矿物的重要物相。要研究电除尘器效率提高的措施, 则不能忽视灰尘中 KCl 与 NaCl 性能的研究。

2.2.4.4 电场灰的碱度 (R)

由进口管道向一、二、三电场及出口管道方向 $R(CaO/SiO_2)$ 、烧损则逐渐增加。其原因是灰尘中 CaO 含量的降低将慢, SiO_2 含量降低较快。电场灰中有可能含有 CaO, 在研究电除尘效率, 采用气体调质时, 应当给以考虑。

2.2.4.5 电除尘灰的含碳量及烧损

由图 9、图 10 及图 10、图 12 可以看出由入口向出口方向, 电场灰的烧损逐渐增加, 其原因一是灰尘的 Cl 含量逐渐增加, 二是灰尘的含碳量逐渐增加所致。

电场灰中含有固定碳 3%以上, 其存在形式为碳酸盐, 还是游离碳需要进一步研究, 不同的存在形式将对电除尘器的除尘效果产生不同影响。

2004.04.15 试样与此相似不再赘述。

2.2.4.6 电除尘灰中的硫 两次试样的进口管道 S 含量分别为 0.57%和 0.30%。总体来说, 有一、二、三电场向出口管道方向, 灰中硫含量有升高趋势, 但含量全部小于 1%(最高为 0.98%)且极板灰中的硫含量大都高于灰斗灰。

电场灰中的硫含量远低于 Cl 含量, 所以资料中所谈到的氯酸盐向硫酸盐转化的可能性较小。但极板灰中的硫含量较高, 说明电

场极板有较多的硫化物粘结。在研究提高除尘效率时应给以关注。

2.2.5 结论

烧结电除尘器进口管道、三个电场的极板及灰斗、出口管道的粉尘的主要元素以 Fe 为主，但人孔门内侧絮状物质的化学成分以 Cl 为主。

电场灰有 K、Na、Cl、Pb、Zn、及 F 的富集现象。

在电除尘器二、三电场的灰尘中，KCl 与 NaCl 是电场灰中仅次于铁矿物的重要物相，其含量可以达到 30%以上。

这些灰尘在灰斗中遇到局部过热（为防止灰斗结灰，需要在局部进行电加热）区域，因 KCl 与 NaCl 熔点较低（分别为 770℃ 及 801℃）可能熔融，造成灰斗中灰尘结块，排灰不畅。

这些灰尘返回烧结使用会引起 K、Na 含量升高，如在烧结过程不能脱出，则会对高炉冶炼产生不利影响，建议将这部分 K、Na 含量较高的灰尘另做它用。

要研究电除尘器效率提高的措施，则不能忽视灰尘中 KCl 与 NaCl 性能的研究。

在研究电场除尘效果时，应适当关注 CaO 及固定碳的影响。

电场灰中的硫含量远低于 Cl 含量，所以氯酸盐向硫酸盐转化的可能性较小。极板灰中的硫含量较高，说明硫化物在电场极板粘结。在研究提高除尘效率时应给以关注。

表 2-12 电场灰的元素含量 (2004.04.08)

Table2-12 the elements contents of the dust (2004.04.08)

元素 %	管道		极板灰			灰斗灰		
	进口灰	出口灰	一电场	二电场	三电场	一电场	二电场	三电场
Fe	49.20	36.90	49.40	42.90	41.51	43.94	35.83	35.52
Ca	6.89	5.73	7.08	6.27	6.20	8.48	5.67	5.53
Si	3.60	2.51	3.47	3.25	3.07	3.59	2.32	2.27
Al	1.77	1.49	1.42	1.71	1.70	2.01	1.42	1.44
Cl		11.51		6.45	7.48	3.66	12.72	12.93
Mg	1.91	1.46	1.81	1.78	1.83	2.15	1.31	1.38
K		8.69	1.42	4.53	5.30	2.70	9.34	9.62
Na		1.53	0.365	1.06	1.20	0.613	1.73	1.74
Mn	0.145	0.103	0.177	0.126	0.109	0.153	0.0933	0.0962
Zn	0.0306	0.197		0.136	0.171	0.0963	0.224	0.218
F		0.186						
Pb				0.824				1.55
Px		0.0242	0.0268	0.0338	0.0326	0.0359	0.0247	0.0230
P	0.0125	0.0109	0.0122	0.0153	0.0134	0.0145	0.0100	0.0112

表 2-13 电场灰的元素含量 (2004.04.15)

(%)

Table2-13 the elements contents of the dust (2004.04.15)

元 素	管道		极板灰			灰斗灰			人孔 内侧	
	进口	出口	一电场	二电场	三电场	一电场	二电场	三电场		
Fe	48.45	30.24	33.08	28.98	26.53	37.53	30.53	25.44	38.05	13.55
Ca	6.45	4.61	6.44	5.04	4.70	7.00	5.76	4.99	5.70	2.95
Si	3.38	1.54	2.29	1.68	1.50	2.82	1.92	1.56	3.05	0.713
Al	1.56	0.957	1.54	1.11	1.02	1.69	1.32	1.12	2.01	0.595
Cl	2.81	16.93	13.14	16.96	18.98	9.55	16.07	19.85	1.94	33.99
Mg	1.89	0.944	1.62	0.949	0.868	1.88	1.24	0.928	1.44	0.307
K	2.03	13.95	10.14	14.38	16.02	7.12	12.41	15.99	0.988	22.33
Na	0.523	2.35	1.53	2.26	2.23	1.17	1.65	1.97	0.281	1.62
Mn	0.138	0.0870	0.0984	0.0884		0.105	0.0844	0.0740	0.0952	0.0419
Zn	0.0542	0.119	0.228	0.177	0.229	0.163	0.266	0.322	0.518	0.480
Pb			2.08	1.97	2.43	1.37	2.57	3.41	4.70	6.03
Px	0.0335	0.0168	0.0250	0.0192	0.0179	0.0264	0.0221	0.0177	0.0340	0.0099
P	0.0144	0.0074	0.0120	0.0078	0.0073	0.0119	0.0077	0.0080	0.0140	0.0037
Sx					0.949				0.208	0.351
Ti									0.115	
Cu									0.112	
V									0.0140	

表 2-14 0408 试样 K、Na、Cl 的关系

Table2-14 the relationship between K、Na and Cl in sample 0408

元素 %	管道		极板灰			灰斗灰		
	进口灰	出口灰	一电场	二电场	三电场	一电场	二电场	三电场
Cl		11.51		6.45	7.48	3.66	12.72	12.93
K		8.69	1.42	4.53	5.3	2.7	9.34	9.62
Na		1.53	0.365	1.06	1.2	0.613	1.73	1.74
(K+Na)		10.22	1.785	5.59	6.5	3.313	11.07	11.36
K/Cl		0.75		0.70	0.71	0.74	0.73	0.74
(K+Na) /Cl		0.89		0.87	0.87	0.91	0.87	0.88
K+Na+Cl		21.73	1.785	12.04	13.98	6.973	23.79	24.29

表 2-15 0415 试样 K、Na、Cl 的关系

Table2-14 the relationship between K、Na and Cl in sample 0415

元素 %	管道		极板灰			灰斗灰		
	进口灰	出口灰	一电场	二电场	三电场	一电场	二电场	三电场
Cl	2.81	16.93	13.14	16.96	18.98	9.55	16.07	19.85
K	2.03	13.95	10.14	14.38	16.02	7.12	12.41	15.99
Na	0.523	2.35	1.53	2.26	2.23	1.17	1.65	1.97
K+Na	2.553	16.3	11.67	16.64	18.25	8.29	14.06	17.64
K/Cl	0.72	0.82	0.77	0.85	0.84	0.75	0.77	0.81
(K+Na) /Cl	0.91	0.96	0.89	0.98	0.96	0.87	0.87	0.89
K+Na+Cl	5.363	33.23	24.81	33.6	37.23	17.84	30.13	37.81

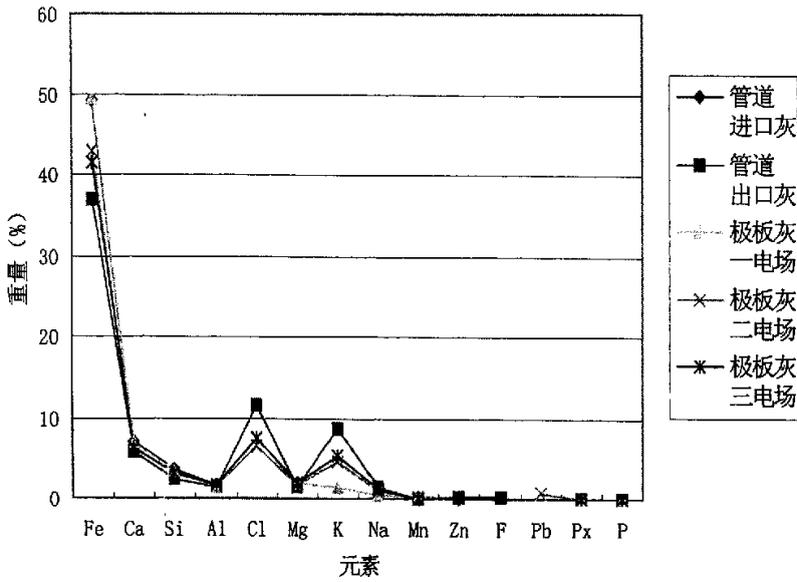


图 2-6 电场极板灰元素含量分布图 (2004.04.08)

Figure 2-6 the distribution of elements of dust on electrode panel (2004.04.08)

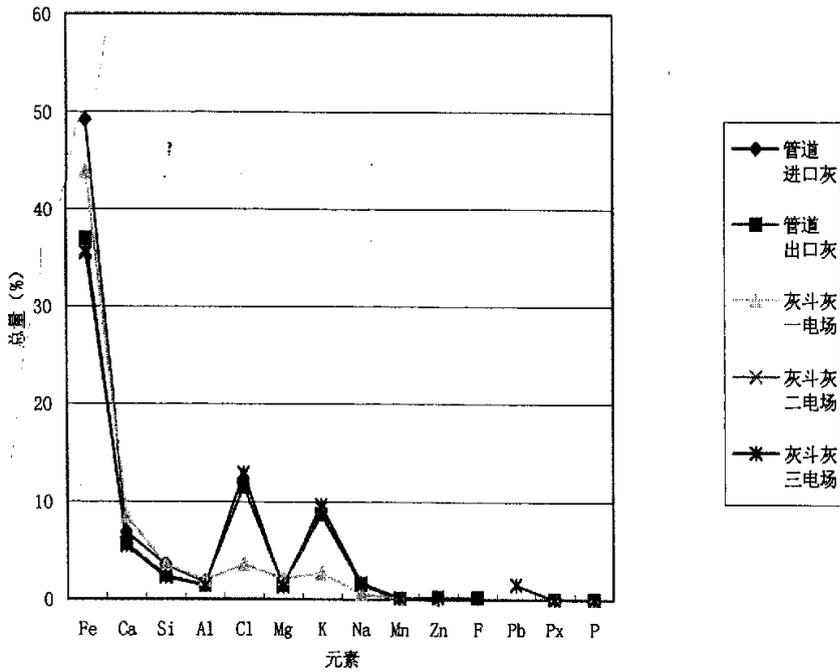


图 2-7 电场灰斗灰元素含量分布图 (2004.04.08)

Figure 2-7 the distribution of elements of dust on ash bucket (2004.04.08)

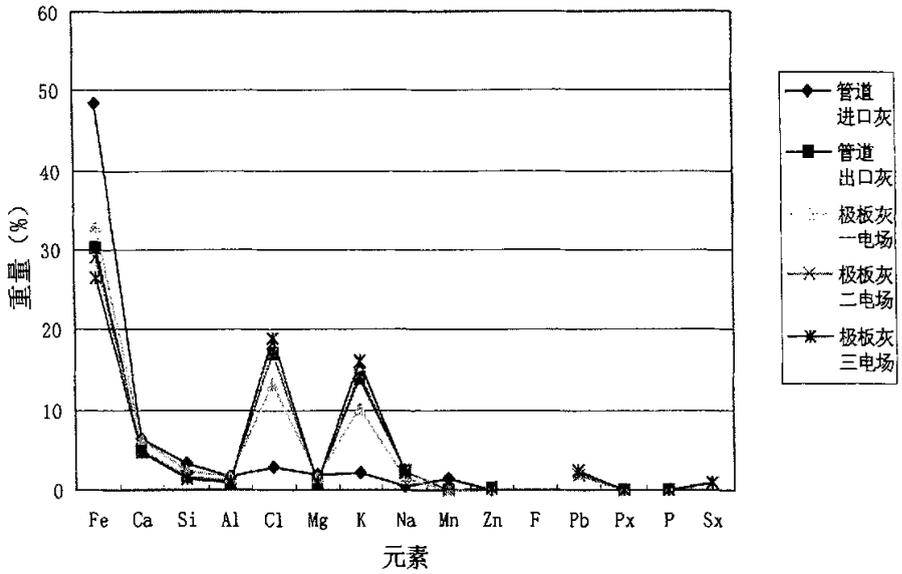


图 2-8 电场极板灰元素含量分布图 (2004.04.15)

Figure 2-8 the distribution of elements of dust on electrode panel ()

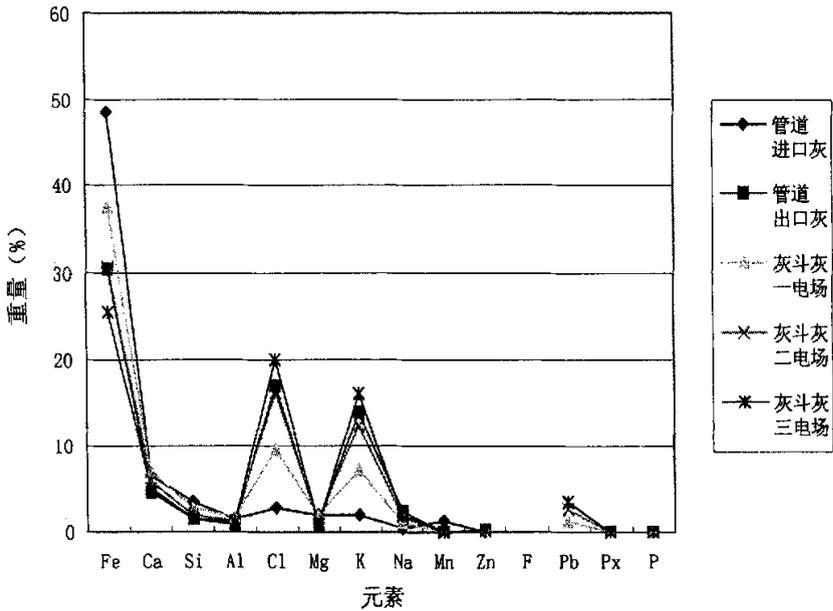


图 2-9 电场灰斗灰元素含量分布图(2004.04.15)

Figure 2-9 the distribution of elements of dust on ash bucket (2004.04.15)

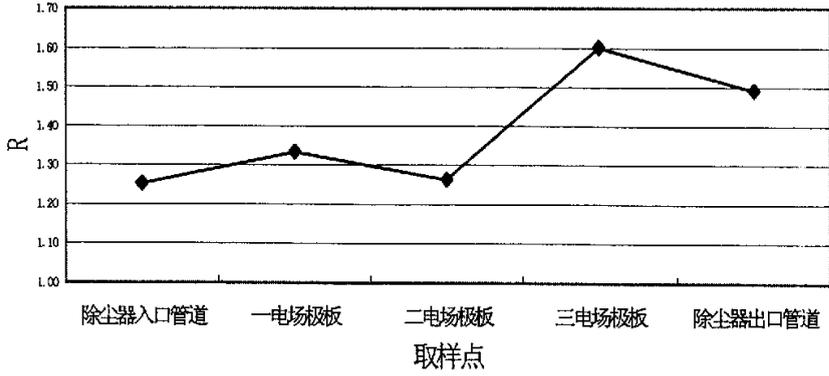


图 2-10 电场极板灰碱度分布图(2004.04.08)

Figure 2-10 the distribution of alkalinity of dust on electrode panel (2004.04.08)

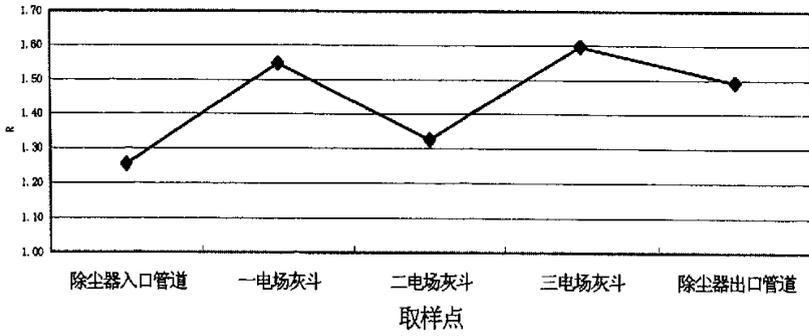


图 2-11 电场极板灰碱度分布图(2004.04.08)

Figure 2-11 the distribution of alkalinity of the dust on ash bucket (2004.04.08)

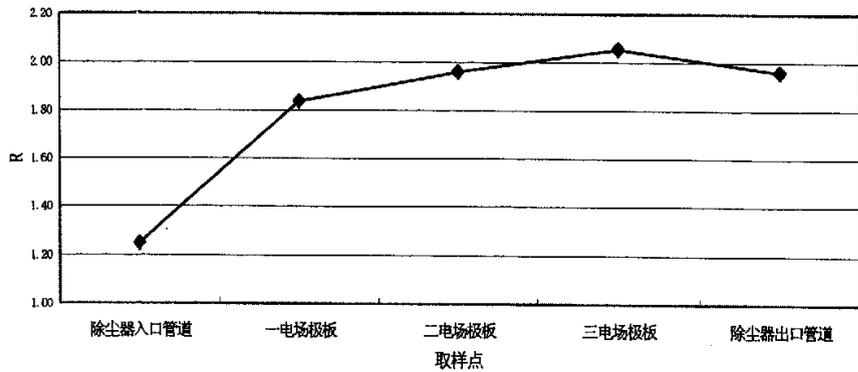


图 2-12 电场极板灰碱度分布图(2004.04.15)

Figure 2-12 the distribution of alkalinity of the dust on ash bucket (2004.04.15)

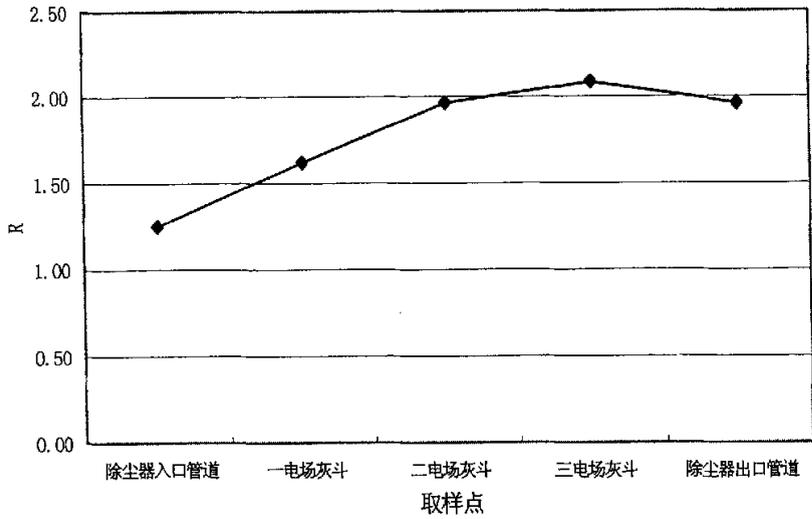


图 2-13 电场灰斗灰的碱度分布(2004.04.15)

Figure 2-13 the distribution of alkalinity on ash bucket (2004.04.15)

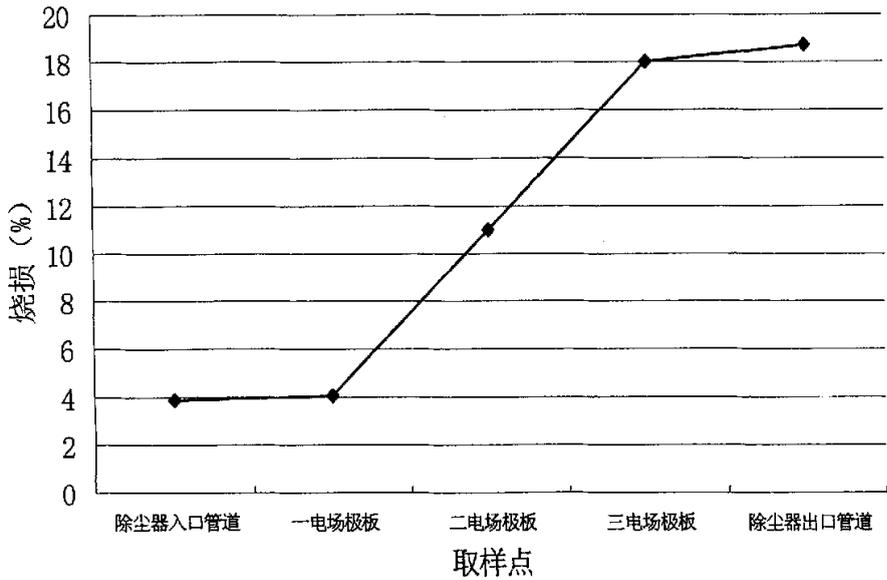


图 2-14 电场极板灰烧损变化图(2004.04.08)

Figure 2-14 the change of the burn wastage of dust on electrode panel (2004.04.08)

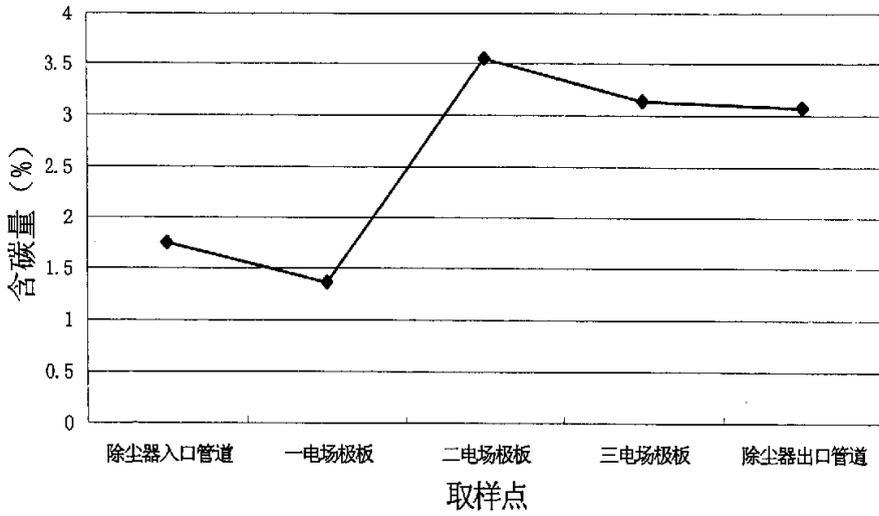


图 2-15 电场极板灰的固定碳含量 (2004.04.08)

Figure 2-15 the fixed carbon content of dust on electrode panel (2004.04.08)

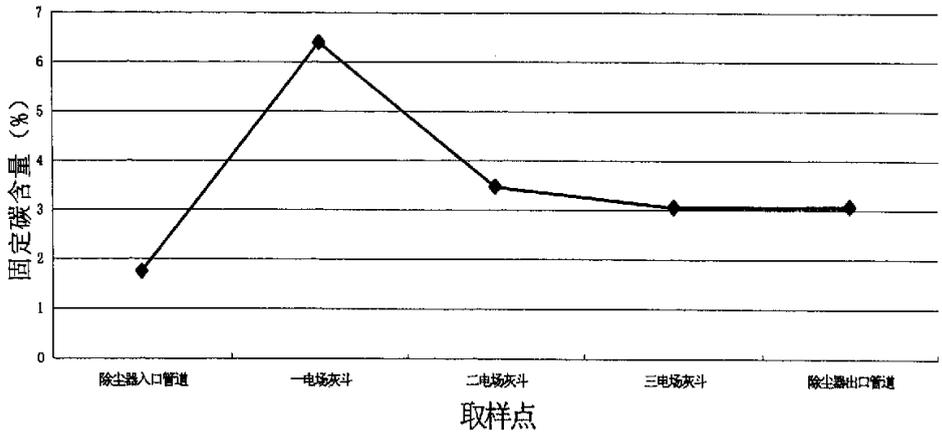


图 2-16 电场灰斗灰的固定碳含量(2004.04.08)

Figure 2-16 the fixed carbon content of dust on ash bucket (2004.04.08)

2.3 本章小结

通过数据的分析和实验结果,影响首钢烧结机头电除尘器的主要物质并非人们以前一直认为的碱金属的氧化钾,而是氯化钾,特别是在第二、第三电

场中其含量可高达 30%，且电场里有钾离子、氯离子、钠离子等的富集现象。结合盐类物质中氯化钾的比电阻最高，可以说，氯化钾是造成机头电除尘器比电阻高的主要原因。在研究提高电除尘器效率的对策中，不能忽视灰尘中的氯化钾。

第3章 对策探讨

3.1 烟气的调质

针对高比电阻的粉尘，首先应考虑烟气的调质。根据国内外经验，解决高比电阻粉尘有三种解决办法：一是对电除尘本体进行改造，二是将电除尘改为布袋除尘，三是采用具有价格竞争的烟气调质技术。前两种电除尘改造方式一次性投资大，而采用烟气调质技术对那些因场地现在限制或资金有限的企业比较合适。国外已有SO₃烟气调质系统产品问世，并已在外国得到了实际应用。

3.1.1 SO₃调质技术原理^[6]

目前，国外应用最广泛的烟气调质技术是SO₃调质技术，其调质技术原理是将少量可控制的SO₃喷射到烟气中，SO₃酸雾吸附在粉尘上，在粉尘的表面建立了一个吸附层，通过表面导电降低了粉尘比电阻，使粉尘更易收集，从而提高了电除尘效率。

在影响电除尘器性能因素中，粉尘比电阻对电除尘器影响最为突出。粉尘比电阻是衡量粉尘导电性能的指标，其对电除尘器的影响主要有两方面：

一是在通用的电除尘器中，电晕电流必须通过极板上的粉尘层传导到接地的收尘板上。若粉尘的比电阻超过临界值 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 时，则电晕电流通过粉尘层就会受到限制，这将影响到粉尘粒子的荷电量、荷电率和电场强度等，最终将导致除尘效率大幅度下降。

二是粉尘的比电阻对粉尘的粘附力有较大的影响，以至清除电极板上的粉尘层要增大振打强度，这将导致比正常情况下的二次飞扬大，使除尘效率下降。

降低粉尘比电阻所需的SO₃喷射量取决于粉尘的成分、烟气温度、烟气中SO₃的浓度、湿度、喷射点的气流分布等多种因素。

3.1.2 SO₃烟气调质的基本要求

SO₃烟气调质是将SO₃气体均匀喷入电除尘器入口前的烟道内,在稳定运行工况下调整不同SO₃喷射量,监测电除尘器二次电压电流值的变化情况,同时进行烟气量、烟尘浓度及除尘效率等指标的热态性能测试,目的在于确定调质技术工艺参数,考察对电除尘器进行SO₃烟气调质的实际效果。

3.1.3 结果及分析

通过国内上海石洞口电厂2[#]炉电除尘器进行的SO₃烟气调质的实验结果得知,SO₃调质技术能提高电除尘器的除尘效率,但对除尘效率较高的电除尘器作用有限。而国内冶金烧结机头电除尘器除尘效率基本在95%以下,首钢烧结机头电除尘器除尘效率在90%以下,如果进行烟气的SO₃调质技术,一定能提高其电除尘器的除尘效率。

3.1.4 进行烟气调质需注意的问题

调质技术应加入尽量少的SO₃而达到较好的除尘效果,一般控制SO₃喷射量应在5—10ppm,以减少腐蚀现象的发生。

3.2 本体结构上的改进探讨^[21-27]

3.2.1 薄膜静电收尘技术的研究和应用

湿式除尘器在除尘方面有独特的效果,尤其对高比电阻、超细粉尘很有效,但是湿式除尘器运行在潮湿的环境下,对金属极板腐蚀很大,因此通常采用昂贵的不锈钢材料,但这对收尘又有影响;水冲刷也对极板除尘产生影响。另外,干法电除尘器极板均采用刚性结构收尘,变化不大。许多生产厂家和科研机构都在进行替代品

的研究。以下介绍一种替代品。

美国俄亥俄州立大学发明一种薄膜静电收尘技术,主要是用纤维薄膜代替了金属收尘极的技术,运用此新型材料,可以通过毛细管的运动来喷洒液体,毛细管的运动可以在垂直的、水平的方向上理想配备水流,一旦薄膜被完全浸透,水流就会顺着薄膜表面向下流,冲洗集尘极表面,而这一过程保证了被收集的微粒粉尘连续不断的被冲走,解决了湿式除尘器极板上清除不干净的问题。

其优势有:

薄膜主要由玻璃纤维塑料等抗腐蚀绝缘材料制成,加添加剂后可以成功替代不锈钢和其他的昂贵的材料;

成本低。除材料本身比不锈钢材便宜外,重量比钢材减低 95% 左右,安装和运输费用也相应降低很多。

靠冲洗薄膜保持清洁并且使用不锈钢极板的 1/60 左右,运行成本大大降低。

除可以捕捉超细粉尘外,还可以收集空气中有害气体。

薄膜技术的使用,除在湿式电除尘器中应用外,也能在干法电除尘器中使用,它能替代刚性极板,也可以将极板制作成滚动型,更有利于收尘。另外一个有利之处是,它可以用于混合除尘器设计,从而解决了二次飞扬问题及干法电除尘器对飞灰比电阻敏感性问题。

此项技术已开始工业上应用。

3.2.2 复合式的电除尘器

复合式的电除尘器是将不同的除尘机理与静电除尘机理相结合,使它们共同作用,以进一步提高除尘效率。复合式的电除尘器的形式较多,这里主要介绍电一袋复合除尘器。

自上世纪中叶开始,人们就考虑用两者的优点,开发一种更加高效的新型除尘器。这种除尘器特别适用于已投产不达标,场地受到限制的电除尘器的改造。

电除尘器改为电—袋复合式的除尘器在节约资金的条件下,应保持原壳体不变的情况下进行改造,包括保留第一或第二电场和进、出气喇叭口、气流分布板、下灰斗、排灰拉链机等。

烟气从除尘器进口喇叭引入,经气流分布板进入电场,烟气中约有80—90%被电场收集下来,烟气由水平流动折向电场下部,然后从下向上运动,通过布袋收尘室。含尘烟气通过滤袋外表面,粉尘被阻拦在滤袋的外部,纯净气体从滤袋的内腔流出,进入上部的净化室,并分别进入上部的气阀,然后汇入排风管,从烟囱排出。

布袋可以采用在线清灰,也可以采用离线清灰。当采用离线清灰时,先关闭清灰室的主气阀,然后电控装置有顺序的启动清灰室上每个脉冲阀的电磁阀,使压缩空气沿喷吹管喷入滤袋,进行清灰。应在每个除尘室的花板上、下侧都安装压差计,可以随时了解该室滤袋的积灰情况以及每个室的气流均布情况。

电除尘器改为电—袋复合式的除尘器,关键是风机的设计。由于布袋阻力较电除尘器阻力高,所以原有风机的风压需提高。

风机改造有两种方式:一是更换风机;另一是合理提高转速,以满足新的风压、风量的要求。

经过国内外的实践证明,电除尘器改为电—袋复合式的除尘器后排放浓度可以稳定保持在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,可以满足地处首都的首钢的要求。由于前端电场收集了80—90%的粉尘,后端布袋负荷降低,故布袋的寿命可大于4年,可降低成本。

3.2.3 湿式电除尘器

湿式电除尘器是通过水冲洗电极使粉尘剥离。与干式电除尘器相比,湿式电除尘器有以下优点:

对粉尘比电阻不敏感;

由于冲洗不产生粉尘的二次飞扬,可以获得很低的排放浓度;

湿式电除尘器无运动部件故障率低;

对于冶金烧结机头还有部分脱硫效果并能收集亚微米颗粒。

需注意的问题：

烟气中二氧化硫或其他腐蚀性气体的含量，能否造成设备腐蚀；

喷淋系统要避免堵塞，保持畅通；

防止电极结垢，电极越长问题越突出。

3.3 电控方面的改进探讨^[18]

3.3.1 高比电阻粉尘控制方式的探讨

近几年来，由于各种原因，国内一些电除尘器的性能不太理想。高比电阻粉尘造成电除尘器的反电晕的现象比较普遍。电气特征主要表现为电除尘器的高压电源的二次电流比较大，二次电压不高，当二次电流达到一定值后，二次电压有下降的趋势。

(1) 反电晕的形成及处理方法 反电晕就是沉积在收尘极表面上的粉尘层所产生的局部放电现象。若沉积在收尘层的粉尘比电阻不太高，则在收尘极上的粉尘层上形成的电压降对两极间的空间电压的影响可以不考虑，将不会影响正常的电晕放电。但是，若粉尘的比电阻比较高，则电荷不容易释放，随着沉积在收尘极上的粉尘层的增厚，粉尘层表面电荷逐渐增多。当粉尘间形成较大的电位差，其电位差大于其击穿电压时，粉尘层就会产生局部击穿从而产生反电晕现象。电离的正离子在电场力的作用下向阴极运动，通过空间粉尘层时，当吸附到携带电子的粉尘时对原粉尘受到的电场力起到削弱的作用，影响除尘效果。在正常工况条件下，二次电流越大，携带粉尘的电子或离子越多，收尘效果越好。但是，在高比电阻粉尘的条件下，荷电粉尘在收尘极上不易释放的越多，反电晕越强，对除尘影响越大。

为了避免反电晕的产生，减少反电晕对电除尘器的影响，应尽量减少粉尘层的电压降，降低粉尘层积蓄的电荷。

在这种特殊条件下，常规的火花控制方式，由于电场很少出现

火花，其控制特性使电除尘器的工作电流比较大，达不到控制反电晕的目的。采用间歇供电工作方式能有效地解决这一问题，这种供电方式相对缩短了二次电流的供电时间，延长了收尘极上粉尘的放电时间，减少了在粉尘收尘极上积蓄的电荷，达到了减少反电晕的目的，但是，间隙供电的不供电时间也造成电场电压的降低，对提高电除尘器效率带来影响。因此，要寻找一种方法，使电场电压足够高，又使在收尘极上粉尘不易释放电荷，尽量少来减少反电晕。

经过现场实验及国内电除尘器供电厂家技术人员的指导、配合，摸索出一种满足上述要求的控制方式。这种控制方式能有效地减少二次电流，并使二次电压稳定地工作在电场能够接受的最高电压点附近，且大大减少了反电晕的产生。

(2)现场试验数据 这种控制方式已在多个电场进行了实验，为使实验数据具有可比性，减少人为因素的影响，实验时保持了工况条件的相对稳定，并在测试点安装了实时在线浊度仪。数据请见表 2—16。

实验时，一电场工作方式未改变，二、三电场的控制方式进行了改变，其间歇控制方式的间歇比为 2:4；显示的排放浓度为测试点的排放浓度，未折算。根据表中数据，当二、三电场采用这种控制方式时，与常规控制方式相比，二次电压可提高 2 至 3 千伏，二次电流减少 70%，排放浓度相对降低了 20%。

表 3-1 2001 年 11 月在首钢烧结机头电除尘器的实验数据

Table3-1 the experimental data of sintering nose of electrostatic precipitator in Capital Iron and Steel Co.

电场	工作方式	二次电 流 mA	二 次 电 压 kv	排 放 浓 度 mg/m ³
一电场	常规控制方式	1400	48	35
二电场	常规控制方式	1400	45	
三电场	常规控制方式	1400	43	
一电场	常规控制方式	1400	48	35
二电场	间歇控制方式	680	43	
三电场	间歇控制方式	650	40	
一电场	常规控制方式	1400	48	27
二电场	新控制方式	400	47	
三电场	新控制方式	350	46	

(3) 小结 从上述实验数据表明,在这种特殊工况条件下,过大的二次电流对提高除尘效率没有益处,而通过改变控制方式来降低二次电流并努力提高二次电压,能有效地提高除尘效率。采用新的控制方式与常规的火花控制方式相比,在二次电流减少的同时二次电压反而有所提高,并且有节能效果;与间歇控制方式相比,在提供相同的二次电流的情况下,二次电压更高,除尘效率更好。

3.3.2 高比电阻粉尘控制中应注意的问题

对于高比电阻粉尘尘粒,因它荷电需要的电场强度在烟气混合气体导电电场强度以上,故在运行中随着电场强度的增强,混合气体将先导电或击穿,变成一屏蔽网,致使施加在极间的电场被屏蔽,使电场不能有效的作用于粉尘尘粒间,除尘效果将很差,且其电场

力屏蔽的程度与两者的差值成正比，差值越大，屏蔽作用越提前，屏蔽作用也将越强，除尘效果也就越差。所以，在很多这类工程的改造工作中，想以提高工作电压来增大电场强度（包括加宽极距）以提高高比电阻粉尘的除尘效率，一般作用不会明显。因为此时烟气已击穿，所以无论施加多少电压，其电场的电力线犹如滚滚东逝水，漂流到大海。而体现在电源电路里，外电路的电阻（电场电阻）已很小（负荷大）。当外阻小于电源的内阻时（气体击穿时），电流将会很大，端电压减少。这种现象在一些难收粉尘运行的电除尘器中经常出现，这一特征可从他们的热态伏安特性曲线中看出。这些曲线到达某点后反而往回回转，业内有些人士认为这是一种典型的反电晕现象，但是，反电晕的存在是以一定的极板粉尘厚度为前提的，而实际上并非如此，即使极板上不积灰也会出现这样的情况。实际上，电除尘器电场伏安特性曲线所呈现是电场中不同烟气比电阻时所反映出的一条电源功率特性曲线，当电源外阻小于电源内阻时一定会回转。

综上所述可知，电除尘器电场的总电阻实际上是个变量，可变的根本原因是在不同的电场强度下烟气导电性的变化，他随电场强度的增大而减小，直至击穿，此时呈现的是低电压大电流状态。

对于高比电阻粉尘除尘效率问题的处理，难度确实比较大，费用也很高，靠简单的处理效果不一定明显。因为若是为了避开混合气体的导电区而向中的中低比电阻粉尘一样去降低运行电压以减少电场强度，但由于这种高比电阻粉尘的荷电其本身就需要较强大的电场强度，故会因总体电场强度过低而使粉尘尘粒更不能荷电，同样达不到高效收尘的目的。自己认为应从以下三方面考虑。

精细进行电场参数调试或选用合适的电源，减少导电气体的影响。

进行烟气的调质处理，以提高混合气体导电的阈值和降低粉尘比电阻。

合理的电场的极距，降低运行电压，以使混合气体不被击穿

的情况下获得较强的电场力，提高尘粒荷电量和驱进力，进一步提高除尘效率。

总之，要使电除尘器运行在高效率状态，其运行电压避开烟气中混合气体的导电区，更应该远离击穿区。实际调试中，结合烟囱排烟情况仔细地进行电除尘器的热态调试，就有望取得比较满意的效果。这样不但可有效的提高除尘效率，还可降低电除尘器自身功耗。

3.4 声波清灰的探讨^[8]

3.4.1 声波清灰的分析

电除尘器的工作原理和现场运行参数及实测性能都表明：荷电、收尘、清灰既是电除尘器工作的三个主要过程，又是影响其除尘效率的关键因素。声波清灰对除尘效率的影响实际上取决于声波清灰对荷电、收尘、清灰的影响。

(1) 声波清灰有利于粉尘的充分荷电 粉尘荷电后其凝聚性、附着性及在介质中的稳定性都将发生变化。尘粒荷电越充分，收尘效率越高。影响粉尘的荷电量主要有两方面，一是粉尘的荷电性能，取决于粉尘的化学成分、比表面大小以及介质的温度和湿度等。二是供电系统能否提供足够的荷电量，这取决于电场的极配形式及电晕极和收尘极的清洁程度等。同一台设备在运行工况可比的情况下，对比其初投运时，运行一年后，极板、极线严重积灰等三种条件下的二次电流和二次电压值，可以发现其二次电流值有明显差别。当电晕极处于干净时，二次电流值最大。

阳极振打装置装在阳极排底部，极排受振时振打力自下而上逐渐衰减，其顶部的振动加速度最小，是积灰的严重区，声波装在顶部，使振打加速度较小的区域积灰状态得到改善，二次电流值提高，增加了粉尘的荷电机会及荷电量。

(2) 声波清灰使电场区的有效工作电压提高 阴极线与阳极排之间分为两个区域, 阳极排表面有粉尘层, 阴极线与粉尘层表面之间是使粉尘荷电且向阳极板驱进的电场区。施加在电场阴阳极之间的总电压(即二次电压)为 V , V 由两部分组成, 一部分是阴极到粉尘层表面的工作电压 V_1 , 另一部分是粉尘层的电压降 V_2 , 则有: $V=V_1+V_2$ 。如果以 R_1 表示电场区的等效电阻, A_1 表示电场区的空间电流, R_2 表示粉尘层的电阻, A_2 表示通过粉尘层的电流, 则有: $V=R_1A_1+R_2A_2$ 。由于 $A_1=A_2$ 所以 $V=(R_1+R_2)A$ 。 R_2 与粉尘层的厚度成正比, 粉尘层越厚, R_2 越大, V_2 越大; 当二次电压不变时, V_1 下降, 影响粉尘驱进速度的电场强度降低, 导致收尘效率降低。声波系统工作后, 阳极板上的积尘层减少, V_2 降低, 有效工作电压 V_2 接近于 V , 使电场强度提高, 驱进速度增加, 除尘效率提高。

其次, 声波作用, 使电场区介质动荡加剧, 改变了原系统的流动状态, 增加了粉尘颗粒间碰撞、凝聚的机会, 对收尘效果也有一定的作用, 过去对这方面的研究及测试分析较少。

(3) 声波清灰有助于振打清灰 声波器工作的直接作用是减少极排积灰。同时它又有助于振打清灰。对于不同工况的粉尘从极排上将其清除掉所需的振动力是不同的, 在振打系统的设计中, 都是按照极排表面清洁的状态进行试验来确定振打参数。实际上, 极排积灰后, 重量加大, 振打力在整个排面上的衰减加速, 振打清灰的作用打了“折扣”。声波清灰工作改善了整个析排的积灰状态, 整个极排的重量接近于初始状态, 因此有助于振打清灰。

(4) 声波清灰难以淘汰振打清灰 声波清灰的技术特点促使人们期待其替代机械振打。从现有的声波清灰技术分析, 要替代机械振打清灰, 笔者认为还有相当大的差距。因为声波清灰和机械振打都属于有源振动, 声波清灰的振动源为声波发生装置, 机械振打的振动源为锤击点。这两种装置在整个电场区产生的清灰程度都随空间位置的不同而变。离振动源距离越近, 清灰力越大, 在一定的空间内, 振动源设的越多, 清灰效果越好。相反, 离振动源距离远,

振打装置少，清灰效果就差。对于大型设备和粘附性粉尘最好是同时采用机械振打和声波清灰使两者优势互补，更为有利。

(5) 声波清灰工作时瞬时排放浓度会提高 从已有的工程实例看，设计一种声清灰系统，既能将板线上的积尘清掉，同时又抑制瞬时排放过高是较困难的。虽然许多声波清灰技术的研制单位，开发了多种规格的声波发生器，以满足不同的工况。如果按照声波清灰装置的有效作用半径为 4 米计，其空间与一个电场相当，当半个电场的阴极振打同时清灰作业，其瞬时扬尘量已很大，如一个电场的阴阳极清灰同时进行，其含尘浓度峰值肯定会更大。将来，环境污染物的排放都要采用计算机监控，瞬时的超标排放在环境管理中是不允许的，因此在声波清灰装置的后部采取强化收尘手段是声波清灰技术乃至电除尘技术发展的新的课题。

总之，不同的烟尘工况特性使用声波清灰的效果存在很大差别。烟气湿度、吸湿性化学成分含量、声波器波源特性、布置及数量等是影响清灰效果的关键因素。当含尘介质湿度小、吸湿性粉尘成分含量低、流动性好时，采用声波清灰技术，电除尘器内部构件积灰及除尘效果改善明显。在烟气湿度较大、吸湿性粉尘成分含量较高、粘附性较强的使用条件下，采用声波清灰技术（声波发生器按常规设置，数量较少时），电除尘器内部构件积灰及除尘效果差别很大。若以声波清灰取代机械振打是难以实现的。

3.4.2 应用效果

首钢烧结机头电除尘器声波清灰器正常运行 60 天后，有关部门通知生产厂家共同进入电场内部，仔细察看极板、极线的积灰情况，发现极板表面灰层厚度不大于 3mm，而且有明显的积灰片状脱落留下的痕迹，极板表面出现灰尘成片或成团脱落的雪花状斑点，局部明显可见极板本色。

在与未装声波的电场作了比较后，大家一致认为，极板、极线挂灰明显减少，在两个电场内同样用手指刮极板表面，刮痕深度

有明显区别。

声波清灰装置投产一个月后，运行参数提高。二次电流平均值由 441mA 提高到 463mA，提高了 22mA。二次电压平均值由 44KV 提高到 46KV，提高了 2KV。外排平均值由 $57\text{mg}/\text{m}^3$ 降至 $51\text{mg}/\text{m}^3$ ，提高了 10、5%。且电场灰斗的堵塞问题也不存在了。

可见，声波清灰器在电除尘器中的应用，能够有效改善电除尘器极板、极线的清灰效果，使极板、极线表面保持相对清洁，以便保证电场对粉尘的捕集，从而提高电除尘器的除尘效率。

总之，通过声波清灰器在电除尘器中的实际应用证明，声波清灰的清灰效果明显优于顶部振打，在特定的条件下，在电除尘器箱体中声波清灰器安装分合理，可取代机械振打器或与原振打装置配合使用，解决极板、极线清灰问题，同时还可用来解决灰仓出口架桥、膨灰、易堵、下灰不畅的难题。

3.5 本章小结

结合高比电阻这一问题，本章论述了相关的对策。其中包括：烟气的调质，降低比电阻；电除尘器结构上的改进，克服高比电阻的影响；二、三电场除尘灰另做处理，减少钾离子、氯离子、钠离子等的富集；控制方式的调整，抑制反电晕；加设声波清灰装置，解决或降低板、线挂灰、灰斗堵塞问题等，最终抑制或消除高比电阻粉尘对烧结机头电除尘器的影响，提高除尘效率，达到环保标准。

结 论

国内同行业,一直认为烧结机头粉尘里的主要物质(除铁的氧化物)是碱金属氧化钾等.通过三年来对首钢烧结机头电除尘器的相关数据的试验及分析,得出了不同的结论,影响烧结机头电除尘器的物质应是氯化钾等盐类物质,且具有富集现象.

同时,结合本人的实际工作经历,对烧结机头电除尘器进行了“声波清灰”电气“控制方式”的调整等,以及一些相关的方法,并进行了简单的论述.通过实际的做和理论上的分析,提出了针对性的建议.

分析出烧结机头烟气中粉尘除铁的氧化物外,主要物质是氯化钾等盐类物质,且是影响其粉尘比电阻高的主要因素,对下一步工作更有针对性,对提高烧结机头电除尘器的运行效率的研究具有理论价值,使环保排放达标,具有重要的社会意义.另外,通过研究,二、三电场的灰可不进入灰循环系统再烧结,可以改造输灰系统(投资不高),对二、三电场灰进一步的研究,把氯化钾等盐类物质分离出来,加工为化工产品等,使资源得到更好的利用,具有经济价值,并解决氯化钾等盐类物质在电场里的富集问题,控制电场里粉尘性质的进一步的恶化,对电除尘器的运行及后道工序炼铁高炉的运行更加有利.

但是,要想很好地解决烧结机头电除尘器粉尘比电阻高,除尘效率低的问题.首先应进行烟气的调质,如可结合烧结机头脱硫,喷射脱硫物质的同时,降低粉尘的比电阻,一举两得.这样,可从质上解决烧结机头粉尘高比电阻的问题,提高烧结机头电除尘器的除尘效率,并达到脱硫的目的.其次,改进烧结机头电除尘器的结构形式及板线匹配、间距等问题,以适应或抑制这种高比电阻的粉尘,使除尘效率提高.最后从电控方面进行改进或试验,不断取得进展,达到提高除尘效率和节能的目的.从宏观上,离不开大量的工业试验.因

此，对于生产厂家来说，决策层需在拿出魄力和勇气，加大投入，正确处理资源配置的合理性。电除尘器技术的科研还应该走联合之路。任何一方承担某项科研任务，会受各种因素的制约（如：时间、地点、专业技术、用户等），而不能有效的开展。因此，各种联合方式的形式是需要研究解决的。也应该走自主开发和引进技术相结合的路子，是科研开发的重要形式，引进技术可以使我们能以最简捷的途径跟上世界先进水平，使我们能站在前人的肩膀上攀登高峰。

总之，坚持科学发展观，与时俱进，更好地适应当今环境保护的要求，加大技术创新力度，完全可以相信，新型高效的电除尘器将会出现，冶金烧结机头高比电阻的粉尘将会得到更好的解决。

参考文献

- 1 黎在时.静电除尘器.冶金工业出版社,1993:12
- 2 胡满银等.减弱电除尘器及电晕的极线匹配.河北电力技术.1991:4
- 3 刘后启,林宏.电收尘器.中国建筑工业出版社,1987:12
- 4 高香林等.电除尘器电晕电场空间的比电阻与反电晕的研究.第二届国际静电技术交流会论文集.1993:11
- 5 (美)H, J 怀特著,王成汉译.工业电收尘.冶金工业出版社,1984
- 6 陈康元.振打技术在除尘设备中的应用与发展.振动、测试与诊断.1997,17(2):113-118
- 7 王为学.提高在役电除尘器效率的依据与措施.第十届全国电除尘学术会议论文集.2003:11
- 8 韩克等.声波清灰理论的探讨.第十届全国电除尘学术会议论文集.2003:11
- 9 郝吉明,马广大等.大气污染控制工程.北京高等教育出版社.1994:4
- 10 和礼堂,齐凤鸣.烧结机头电除尘器的特点与应用.第十届全国电除尘学术会议论文集.2003:11
- 11 谭天佑、梁凤珍.工业通风除尘技术.中国建筑工业出版社.1994:5
- 12 宝钢环保技术,第三册烧结环保技术,冶金部宝钢环保技术编委会.1987:10
- 13 S.小奥格尔斯比, G.B.科尔斯著,谭天佑译,王励前校.电除尘器.水力电力出版社.1983:8
- 14 解广润,陈慈意著.高压电除尘器.水力电力出版社.1990:1
- 15 张小朝,牛海生,王静.电除尘技术研究和方向的探讨.第十届全国电除尘学术会议论文集.2003:11
- 16 (美)P.N.切雷米西洛夫编,胡文龙译,莱伯仁校.大气污染控

- 制设计手册.化学工业出版社.1984:5
- 17 太野长太郎著,单文昌译.除尘收尘理论与实践.科学技术文献出版社.1982:7
- 18 杜淑梅、张平、金鑫著.针对高比电阻粉尘的一种新的控制方式.第十届全国电除尘学术会议论文集.
- 19 LS midth Electrostatic Precipitator.
- 20 Merging Technologies—New Design Wet Membrane Electrostatic Precipieator.
- 21 Xu Dexuan, Zhao jianwei, Ding Yunzheng, Ge Weiei. Removal of adhesive dusts from feue gasusing crona discharge with spraying water. J.of Enviroment Science, 2003,15 (4) :87—94
- 22 M.Boyd, The Evaluation of skewed Gas Flew Technology, Proceedings 8th International Conference on Electrostatic Precipitation, May, 2001
- 23 Yan, Keping“Corona Plasma Generation”11, 2001
- 24 C.David Cooper, F.C. Alley. Air Pollution Control(Third Edition), Waveland Press, 2002: 147~176
- 25 Noel De Nevers. Air Pollution Control Engineering(Second Edition), 清华大学出版社, 2000: 160~208
- 26 William Licht. Air Pollution Control Engineering-Basic Calculations for Particulate Collection(Second Edition), Marcel Dekker, 1988: 331~370
- 27 S.小奥格尔斯比, G.B.尼科尔斯. 电除尘器, 水利水电出版社, 1983

攻读学位期间发表的学术论文

- 1 陈义. 烧结原料系统粉尘的集中治理. 冶金环境保护. 2001, 1
(3): 7-10

致 谢

本论文在李坚老师的悉心指导下完成，从论文选题开始，研究工作开展，直至论文定稿，无不凝聚着导师大量的心血。导师渊博的知识，严谨的治学态度，对科研敏锐的洞察力、孜孜以求的敬业态度、忘我的工作精神是本人受益匪浅。同时，也特别感谢李老师几年来在生活上对我的关心和帮助。

感谢金毓峯教授、李依丽老师在攻读硕士学位期间的学习生活和论文研究工作给予我的支持和帮助。

论文工作还得到了教研室梁文俊老师多方面支持和帮助。他们的帮助对于我的论文不可或缺的。

同时，对首钢的魏星智老师，许桦老师为我课题进展提供的帮助表示深深的感谢。在此，我深深感谢我的父母，是他们的爱支持我一路走来。还有，要感谢我朋友、亲人及在我求学、成长过程中给予我帮助的老师、同学。