

# 铝电解废气治理工程技术规范

(征求意见稿)

## 编制说明

《铝电解废气治理工程技术规范》编制组

二〇一〇年

# 目 次

1 任务来源.....	3
2 标准制订必要性.....	3
2.1 标准编制的必要性.....	3
2.2 标准编制的意义.....	4
3 主要工作过程.....	4
4 国内外相关标准研究.....	5
5 同类工程现状调研.....	7
5.1 传统干法净化工艺.....	8
5.2 两段干法净化工艺.....	9
5.3 新型两段逆流干法净化工艺.....	9
5.4 铝电解槽集气罩.....	10
5.5 排烟管网.....	11
5.6 除尘器.....	12
6 主要技术内容及说明.....	13
6.1 污染物和污染负荷的确定.....	13
6.2 工艺设计篇.....	15
7 标准实施的环境效益及经济技术分析.....	21
8 标准实施建议.....	21

# 铝电解废气治理工程技术规范 编制说明

## 1 任务来源

2008年,环境保护部下达了“关于开展2008年度国家环境保护标准制修订项目工作的通知”环办函[2008]44号文件,其中提出了制定《铝电解废气治理工程技术规范》(项目编号1453.2号)行业标准的任务。东北大学承担该标准的编制工作。参编单位有东北大学,东北大学设计研究院(有限公司)、河南中孚实业股份有限公司、山东南山铝业股份有限公司,中国有色金属工业协会。

## 2 标准编制的必要性及意义

### 2.1 标准编制的必要性

金属铝生产采用的是氟化盐—氧化铝熔盐电解法,该方法是目前工业生产金属铝的惟一方法。在950℃左右的高温生产条件下,铝电解生产过程产生大量CO<sub>2</sub>、CO、HF和少量SO<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>等有害气体。生产过程的原料准备、物料输送和设备维修产生大量粉尘。

按照中国现行国家标准《职业性接触毒物危害程度分级》中对毒物毒性分级的原则,氟化物为II级,属于高度危害物质。因此,降低并防治铝电解生产过程中产生的氟化氢气体和粉尘对人和自然的危害,实现经济和自然的和谐发展,成为铝电解工业废气治理需要解决的关键问题。

铝电解生产过程中,吨铝排氟约为15-40 kg/t-Al,另外还有30-70 kg/t-Al的粉尘。该污染负荷占整个电解铝生产系统的99%以上。我国铝电解烟气治理均采用氧化铝吸附干法净化技术和布袋除尘技术。目前,该方法的氟化物净化效率可达99.5%以上,粉尘的净化效率可达99.9%以上。设计电解槽上部集气罩的集气效率一般大于98%。以吨铝排氟较大值40kg/t-Al计算:

电解车间天窗的氟化物排放量为:  $40 \times (1-0.98) = 0.8 \text{ kg/t-Al}$

干法净化系统氟化物排放量为:  $40 \times 0.98 \times (1-0.995) = 0.196 \text{ kg/t-Al}$

吨铝总排氟为: 0.996 kg/t-Al

新的《铝工业污染物排放标准》对铝电解废气排放提出的要求见表1。

表1: 铝电解工业大气污染物排放限值

污染物		粉尘	氟化物	二氧化硫
排放限值	排放浓度	20mg/m <sup>3</sup>	3mg/m <sup>3</sup>	200mg/m <sup>3</sup>
	单位产品	2.2kg/t-AL	0.9 kg/t-AL	15 kg/t-AL

从以上计算数据可以看出:在铝电解槽集气效率98%,吨铝排氟40kg/t-Al的情况下,铝电解烟气总排氟超出了新排放标准0.9 Kg/t-Al的要求,且污染物的主要排放途径为车间天窗,说明电解槽集气罩的集气效率决定着氟化物的总排放量。实际生产中影响电解槽集气效率的因素有:电解槽的工艺操作控制、集气罩的结构设计、净化系统的工艺设计、净化系

统运行性能等等，即铝电解烟气净化系统的各个环节。因此，如果不能严格保证铝电解烟气净化系统各个环节的良好运行，就难以实现集气效率大于 98% 的高效稳定运行结果，氟化物的排放量就会严重超标。要降低单位产品的氟化物排放量，即实现环境保护总量控制目标，就必须严格控制并提高铝电解烟气治理工程从设计、设备材料选型、工程施工、验收调试到操作管理各个环节的整体水平，才能够满足新《铝工业大气污染物排放标准》的要求。

国内外污染治理经验表明，要保证污染物排放小于规定的限值，必须对相应工业污染物治理工程工艺设计、工程建设、过程控制等作出规范。为配合新的《铝工业大气污染物排放标准》的实施，也是为了加快铝电解工业的结构调整步伐、淘汰落后工艺设备、实现总量控制、加强技术创新、推进清洁生产，实现铝电解工业持续、稳定、健康发展，铝电解行业有必要建立《铝电解废气治理工程技术规范》。

## 2.2 标准编制的意义

环境保护标准化是我国环境保护的一项重要发展战略，建立与国际接轨的环境工程服务技术标准体系和环境技术评估体系，是当前加快环境保护标准化步伐的一项重要任务。对保证环境工程建设和运行管理质量，为环境管理提供技术支撑和保障具有重要意义。

本规范属于重点污染源治理工程技术规范，是国家环境标准体系之环境工程技术规范的一个组成部分。本规范的编写和颁布实施将有利于铝电解废气治理工程的标准化建设，将使从设计、建设到运行管理和维护的全过程能够有一个技术标准来进行控制，促使工程建设单位自觉遵守规范的技术要求，从而使铝电解废气治理设施建设与运行得到可靠的技术保障，也将使环境保护主管部门拥有监管铝电解废气治理工程质量和日常运行的技术依据，以保证工程的建设和运行质量，促进环境技术管理的深化。同时本标准的制定也是健全环境技术管理体系建设的重要组成部分。

## 3 主要工作过程

(1) 2008 年 3 月，国家环境保护总局科技标准司与东北大学签订了环境保护项目《铝电解废气治理工程技术规范》任务合同书。项目承担单位为东北大学，参加标准编制的单位有东北大学设计研究院（有限公司）、中国有色金属工业协会、河南中孚实业股份有限公司、山东南山铝业股份有限公司。2008 年 10 月，东北大学会同各项目参编单位成立了项目编制组。

(2) 项目编制组成立之后先后进行了如下几方面的工作：

- 了解国家有关环境管理的政策法规、管理目标、产业政策、技术政策、发展规划等。
- 查阅文献资料，进行工程实地调研，熟悉现有铝电解废气治理工程实例，熟悉工程的工艺特点、投资运行费用和处理效果等。
- 分析研究不同类型工艺及设计的设备，确定各类型工艺的设计参数，并从技术上和经济上进行评估。
- 咨询相关专家、设计施工单位等，进行讨论、分析研究。

经过上述工作研究之后，项目编制组建立了相对明确的工作思路，并着手编制项目开题

报告，项目开题报告于 2009 年 11 月编制完成。

(3) 2010 年 1 月 28 日由国家环境保护部科技标准司组织召开了《铝电解废气治理工程技术规范》开题论证会，与会专家提出了如下相关建议：

- 编制中要注重对推荐的技术进行案例总结和经济效益分析。
- 对铝电解烟气治理的全过程进行综合考虑，明确无组织排放的要求。明确厂房的换气次数。
- 依据调查研究的结果，对编制大纲进行相应的调整
- 应该在总结国内外相应的工程技术和设备标准的基础上，来制定我们自己的工程规范。总结国内现状，指导现存的项目设计工作。

#### 4 国内外相关标准研究

##### 2.1 国内相关标准

铝电解工业属于国内的支柱产业，中国属于全球最大的电解铝生产国，因此，我国一直非常重视铝电解工业的环境保护问题，先后发布了许多与铝电解工业建设、生产、运行有关的环境保护政策、法律法规、标准等。其中与铝电解废气排放有关的环境保护标准如下：

- 大气污染物综合排放标准

国家环境保护局 1996. 4. 12 批准，1997. 1. 1 实施的 GB16297《大气污染物综合排放标准》，与铝电解废气排放有关的内容规定了通过排气筒排放废气中的粉尘和氟化氢的最高允许排放浓度和按排气筒高度规定了最高允许排放速率。任何一个排气筒必须同时遵守上述两项指标，超过其中任何一项均为超标排放。排气筒高度除须遵守排放速率标准值外还应高出周围 200 米半径范围的建筑 5 米以上，不能达到该要求的排气筒应按其高度对应的排放速率标准值严格 50% 执行。

对于无组织方式排放的废气（厂房天窗排放），规定了监控点及相应的监控浓度限值指标。上述规定详见表 2

表 2 与铝电解废气排放有关的新污染源大气污染物排放限值

污染物	最高允许排放浓度(mg/m <sup>3</sup> )	最高允许排放速率(kg/h)			无组织排放监控浓度限值	
		排气筒(m)	二级	三级	监控点	浓度(mg/m <sup>3</sup> )
颗粒物	120 (其它)	15	3.5	5.0	周界外浓度最高点	1.0
		20	5.9	8.5		
		30	23	34		
		40	39	59		
		50	60	94		
		60	85	130		
氟化物	9.0 (其它)	30	0.59	0.88	周界外浓度最高点	20 ( μ g/m <sup>3</sup> )
		40	1.0	1.5		
		50	1.5	2.3		
		60	2.2	3.3		
		70	3.1	4.7		

		80	4.2	6.3		
--	--	----	-----	-----	--	--

- 铝工业污染物排放标准

由国家环境保护部和国家质量监督检验检疫总局于 2010 年 9 月 27 日联合公布，2010 年 10 月 1 日起实施的 GB25465-2010《铝工业污染物排放标准》中关于铝电解废气排放标准有如下规定：

表 3 现有企业（电解铝厂）大气污染物排放浓度限值 单位：mg/m<sup>3</sup>

生产系统及设备	限值				污染物排放 监控位置
	颗粒物	二氧化硫	氟化物 (以 F 计)	沥青烟	
电解烟气净化	30	200	4.0		污染物净化 设施排放口
氧化铝、氟化盐贮运	50				
电解质破碎	100				
其它	100	850			

表 4 新建企业（电解铝厂）大气污染物排放浓度限值 单位：mg/m<sup>3</sup>

生产系统及设备	限值				污染物排放 监控位置
	颗粒物	二氧化硫	氟化物 (以 F 计)	沥青烟	
电解烟气净化	20	200	3.0		污染物净化 设施排放口
氧化铝、氟化盐贮运	30				
电解质破碎	30				
其它	50	400			

- 铝电解生产防尘防毒技术规程

国家质量技术监督局 1998 年 6 月 4 日批准，1999 年 4 月 1 日实施的 GB/T17397《铝电解生产防尘防毒技术规程》中，从厂房的布置方式、原材料的贮存与运输、原材料的选择与要求、生产工艺与设备、生产操作、铸造、电解槽修理、通风净化系统设置、管理等方面规定了减少铝电解废气排放的有关措施和方法。

- 清洁生产标准

为贯彻实施《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国清洁生产促进法》，保护环境，为电解铝业开展清洁生产提供技术支持和导向，2006 年 7 月 3 日经国家环境保护总局批准，自 2006 年 10 月 1 日起实施的 HJ/T187《清洁生产标准 电解铝业》。规定了相关的生产工艺与装备要求、资源能源利用指标、产品指标、污染物产生指标（末端处理前）、废物回收利用指标和环境管理要求等。

- 铝工业发展循环经济环境保护导则

为了促进铝工业发展循环经济，实现资源能源利用效率最大化，预防和控制铝工业发展循环经济过程中的环境污染，2009 年 3 月 14 日由环境保护部批准，2009 年 7 月 1 日起实施的 HJ466《铝工业发展循环经济环境保护导则》要求在企业内部实施清洁生产，通过减少资

源和能源的消耗、循环利用废物、降低废物排放量。

● 建设项目竣工环境保护验收技术规范 电解铝

为贯彻落实《建设项目环境保护管理条例》(国务院令第 253 号)、《建设项目竣工环境保护验收管理规定》(国家环境保护总局令第 13 号), 确保电解铝工业建设项目竣工环境保护验收工作规范化, 2006 年 3 月 9 日经环保总局批准, 自 2006 年 5 月 1 日起实施 HJ/T254 《建设项目竣工环境保护验收技术规范 电解铝》。《建设项目竣工环境保护验收技术规范 电解铝》规定了电解铝工业建设项目竣工环境保护验收的范围确定、执行标准选择的原则; 工程及污染治理、排放分析要点; 验收监测布点、采样、分析方法、质量控制及质量保证、监测结果评价技术要求; 验收调查主要内容以及验收监测方案、报告编制的要求等等。

● 有色属工业环境保护设计技术规定

国家发展和改革委员会批准的, 自 2005 年 4 月 1 日起执行的行业标准《有色金属工  
业环境保护设计技术规范》(YS5017-2004)。是在 1992 年 12 月 31 日颁布实施的《有色属工业环  
境保护设计技术规定》基础上修订而成的。其对铝电解生产的有关要求如下:

清洁生产部分:

- (1) 新建电解铝项目应采用电流效率高、污染物产生量小的中间加料预焙阳极电解槽, 其容量应为 200kA 及以上, 不宜采用容量小于 160kA 的预焙槽; 严禁采用自焙槽。
- (2) 电解铝项目氧化铝输送应采用浓相或超浓相输送技术。
- (3) 新建大型预焙槽电解铝冶炼项目, 吨产品氟化物排放量应小于 1k g。

大气污染防治部分要求铝电解槽烟气应采用罩板密闭集气、氧化铝吸附干法净化处理, 氟化物净化效率应大于 99%。电解槽烟气净化系统应设置永久性采样孔。

## 4.2 国外相关标准

从有关资料查询可知, 国外一些发达国家的铝电解废气治理要求采用最有效技术 (BAT 技术), 但具体的有关 (BAT) 技术没能查询到。查询到的铝电解废气排放要求见表 5。从表 5 的有关数据可以看出: 发达国家排放标准对铝电解生产中污染物的要求明显高于国内的排放要求, 因此, 可以说明国内的铝电解废气治理情况还有待于进一步的提高。

表 5 国外铝工业大气污染物排放标准

国家或组织 控制项目		美国	德国(气氟)	欧盟	加拿大	世行
		氟化物	排放量 kg/t-Al	0.6	0.6	0.4~1.0
	排气筒浓度 mg/m <sup>3</sup>		1.0			2.0
粉尘	排气筒浓度 mg/m <sup>3</sup>		10	1~5		30

## 5 同类工程现状调研

铝电解生产企业生产过程中产生的主要污染物为气态氟化氢、固态氟化盐粉尘、氧化铝

粉尘和气态二氧化硫；阳极冷却过程中散发的气态氟化氢；氧化铝输送、氟化盐输送、阳极转运、阳极组装、电解槽大修、抬包清理过程产生的粉尘等。

其中，铝电解槽在生产过程中散发的含有气态氟化氢、固态氟化盐粉尘、氧化铝粉尘和气态二氧化硫的烟气，为铝电解生产的主要污染物，占总污染的 99% 以上，其它含有粉尘的废气采用的是简单的通风除尘工艺治理，在此不再赘述。占污染量 99% 以上的铝电解烟气则是铝电解废气治理的重点任务，也是本标准应该控制的重点。

铝电解槽烟气治理均采用干法净化技术，该方法是利用设置于电解槽上部的集气罩捕集烟气进入净化设施，在净化设施中利用电解原料氧化铝吸附烟气中的氟化氢，再通过布袋除尘器实现气固分离，达到净化烟气，同时去除气态氟和固态氟的目的，净化之后的干净烟气通过烟囱排入大气。吸附氟之后的氧化铝作为电解生产的原料返回电解槽使用，氧化铝吸附的氟回补了电解过程所需要的氟化盐电解质，无废弃物和二次污染产生，且实现了氟化物的有效回收利用。为提高氧化铝对氟化氢的吸附效率，载氟氧化铝进入生产原料输送系统之前有一部分返回净化系统重复使用。铝电解烟气治理技术的基本工艺流程图如图 1 所示。

目前，国内的铝电解企业采用的烟气干法净化技术的基本工艺流程是一致的，但由于建设时间和设计单位的不同，其采用的工艺细节及净化效果则有所不同，大致分为三种类型。除工艺流程的差异对烟气净化效果有影响之外，由于净化系统设施的差异对铝电解烟气的治理效果也有影响。现分述如下：

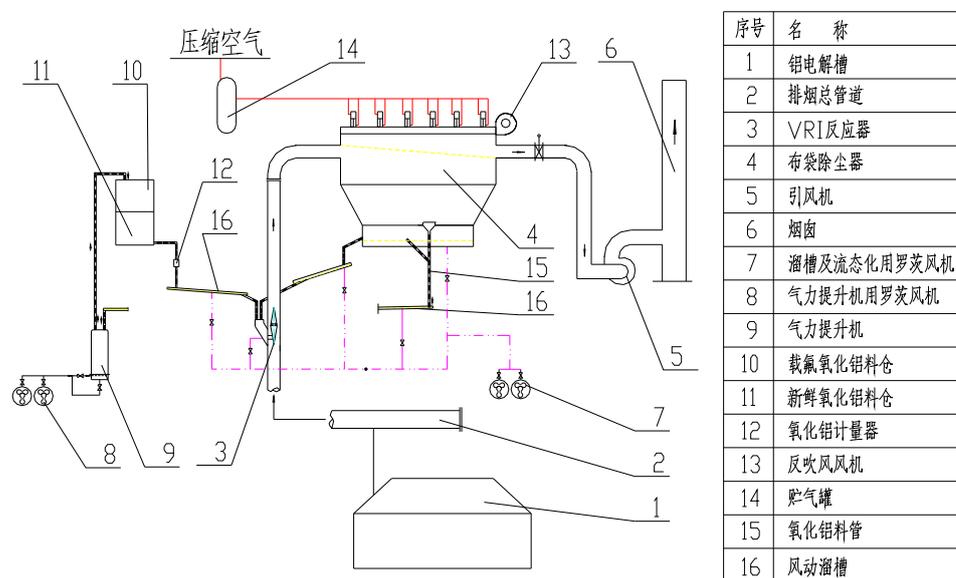


图 1 铝电解烟气干法净化工艺流程

## 5.1 传统干法净化工艺

该工艺流程为铝电解烟气干法净化工程最早使用的工艺流程，其特点为新鲜氧化铝与载氟氧化铝同时加入反应器内（文丘里、VRI、管道），反应后通过布袋进行气固分离。其典型的流程图同图 1。

该工艺的缺点为：

① 没有充分利用新鲜氧化铝和载氟氧化铝对氟化氢不同的吸附反应特性，致使全氟净化效率不够高；

② 由于采用新鲜氧化铝与载氟氧化铝同时进入除尘器的工艺流程，致使大量的载氟氧化铝在系统内进行无功死循环，粉化严重，加之氧化铝吸附氟化氢之后粘性增加，造成大量的粉化氧化铝粘附在布袋上，清灰困难，增大系统负荷，降低除尘器的净化效率。同时，由于清灰困难，也导致除尘器运行阻力不断增大，风机抽风能力降低，电解槽的集气效率降低，增加了天窗的无组织排放。

采用该工艺流程的净化系统出口：

总氟： 3~6mg/Nm<sup>3</sup>

总尘： 6~30mg/Nm<sup>3</sup>

## 5.2 两段干法净化工艺

该工艺流程与前述工艺流程的不同之处在于，在反应器上游约 20 米的烟气总管处加载氟氧化铝，吸附烟气中的高浓度氟化氢；在反应器内加新鲜氧化铝（传统两段反应工艺），吸附烟气中的低浓度氟化氢；反应后通过布袋进行气固分离。其流程图如图 2 所示。

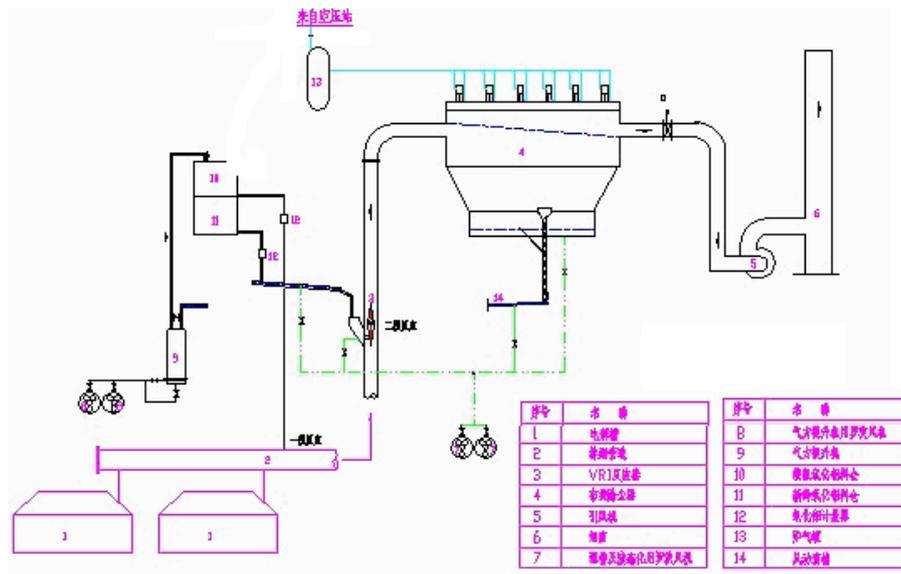


图 2 两段吸附干法净化工艺流程

与一段净化的不同在于，先在电解车间外的排烟总管处加入载氟氧化铝，在管道内经过充分反应后分别进入每台除尘器前的反应器。在反应器处，烟气与加入的新鲜氧化铝进行二次吸附反应，可以有效提高氟的净化效率。但该工艺与前述工艺存在相同的缺点。

采用该工艺流程的净化系统出口：

总氟： 2~6mg/Nm<sup>3</sup>

总尘： 6~20mg/Nm<sup>3</sup>

## 5.3 新型两段逆流干法净化工艺

新型逆流两段烟气干法净化工艺技术，充分利用了新鲜氧化铝和载氟氧化铝吸附氟化氢

的反应特性，克服了上述两种干法净化工艺存在的无法进一步提高全氟净化效率、载氟氧化铝存在死循环、影响布袋清灰效果的问题。

新型两段逆流干法净化工艺技术与原有两段净化工艺相比，其特点是两个反应阶段相互分离。即：除尘器分离出的一次载氟氧化铝与高浓度氟化氢烟气在反应器中进行反应，完成吸附反应的二次载氟氧化铝在进入袋滤器前通过动力分离器与烟气分离；与二次载氟氧化铝分离后的低 HF 含量的烟气，在除尘器内被新鲜氧化铝进行二次吸氟，完成烟气干法净化的所有吸氟过程。

动力分离器分离出的二次载氟氧化铝被收集在除尘器底部的灰斗中，作为电解原料返回电解槽使用。除尘器分离的主要为新鲜氧化铝吸氟后的一次载氟氧化铝，该载氟氧化铝进入氟化氢吸附反应器。

此干法净化的工艺流程主要优点体现在：提高全氟净化效率、降低除尘器运行阻力、延长布袋使用寿命。新型两段逆流干法净化工艺的特点主要体现在主体设备结构上，其设备流程结构示意图如图 3 所示。

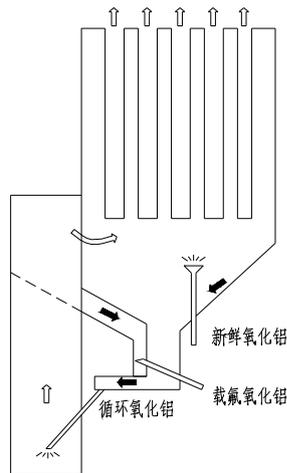


图 3：新型两段逆流干法净化工艺设备流程示意图

采用该工艺流程的某电解厂对净化系统所作的检测结果为：

净化系统出口：

总氟： 0.5mg/Nm<sup>3</sup>

总尘： 3mg/Nm<sup>3</sup>

#### 5.4 铝电解槽集气罩

2006 年之前，国内设计的中心点下料预焙电解槽的集气罩多采用水平罩板下的 V 型排烟道及单排烟管，该结构具有简单、电解槽上部有关生产设施容易安装设置的优点；但由于排烟道距离电解槽结壳表面的火眼较近，在集气罩负压不够大的情况下，烟气较难被高效捕集；随着铝电解槽容量的不断大型化，V 型烟道的长度也随之加长，更难实现集气罩内负压的相对均匀，降低了集气罩的集气效率。

鉴于上述问题的存在，2006 年之后新设计建设的铝电解槽的集气罩结构发生了两方面的变化：

一种为 V 型烟道的多排烟管分区集气，相对提高了集气罩内负压分布的均匀性，有利于提高集气效率；但集气罩离火眼口较近，集气需要系统有较大抽力的问题依然存在，在系统抽力因其它原因降低的情况下，依然会降低集气罩的集气效率。

第二种为改变电解槽密闭排烟罩结构，改水平罩板下的排烟道为水平罩板上的排烟道，且分为多区多烟道集气；使集气罩内负压分布均匀，合理利用罩内气体温度产生的压差，以提高烟气捕集效率。

目前运行的铝电解槽中，沈阳铝镁设计研究院设计的“河南万基铝业股份有限公司”的 400KA 系列铝电解槽采用的为多区集气方式；东北大学设计研究院（有限公司）设计的多家 400KA 系列、300KA 系列、330KA 系列采用的为多区上部集气方式；其它在生产的电解槽全部采用的是水平罩板下、V 型烟道、单烟管的集气方式。

国内铝电解槽的集气效率设计指标为 98%。然而，受诸多因素的影响，国内铝厂电解槽的集气效率一直未能达到设计指标，实际集气效率处于 85~92%之间。有比较多的烟气不能进入净化系统而进入车间无组织排放。

造成电解槽集气效率低的主要原因有：

① 电解槽集气罩结构设计不合理；

② 支烟管上的电动阀未能发挥调节作用。当电解槽进行出铝、更换阳极、熄灭阳极效应等工艺操作时，因槽罩板开启，应提高抽风量。但实际生产中未能有效提高排烟量，烟气仍大量排放到电解车间。

③ 罩板漏风

设计上的不合理加上管理上的粗放，国内很多电解铝厂的槽罩板漏风比较严重。

## 5.5 排烟管网

### 1) 排烟支路的平衡调节

铝电解烟气净化系统采用的管网为总烟管连接 10~20 个电解槽支烟管的均匀排烟管网结构，各支烟管间的距离为 6~8m。但该管网结构不能实现真正意义上的均匀排烟，各支烟管上需要加装阀门实现依赖调节的均匀排烟。

实际生产中，由于不同阀门调节对管网压力平衡影响的多变性，实现真正地平衡调节比较困难，致使各个电解槽排烟量有一定的差异，往往靠近排烟总管出口的电解槽排烟效果好，排烟管网远端的电解槽排烟效果不好，电解槽罩有明显的烟气外溢现象存在。因此，制定明确的电解槽支烟管阀门调节规范，对提高净化系统电解槽的集气效率，减少烟气的无组织排放，满足新环保标准的烟气排放要求是十分必要的。

### 2) 双排烟技术

电解车间无组织排放是吨铝污染物排放的关键因素，而电解槽操作时通过打开的槽罩处溢出到电解车间的污染物是无组织排放的主要部分。因此，提高电解槽集气效率，控制电解

槽操作时污染物的排放是降低吨铝污染物排放的主要措施。目前，国内外铝行业通用的做法是采用双烟管排烟技术，配置图如图 4。

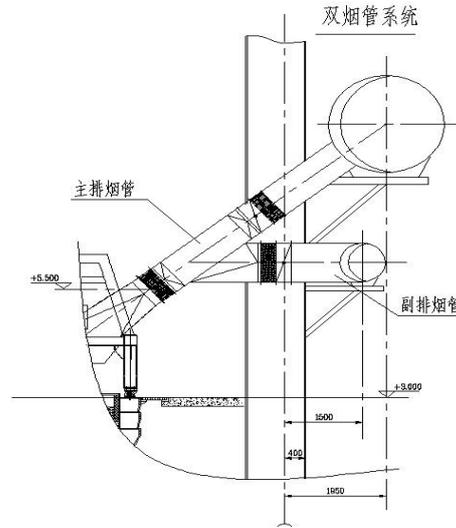


图 4、铝电解槽双排烟管网模式

正常生产时，烟气通过主排烟支管排到车间外的主排烟管，并通过控制设在主排烟支管上的气动调节蝶阀调节排烟量，实现槽罩内的负压控制目标。当对电解槽进行工艺操作时，需打开部分槽罩，控制系统自动关闭主排烟支管，并启动辅助排烟系统，此时每台电解槽的排烟量为正常操作时的 2 倍。采用电解槽双排烟技术可以稳定未打开槽罩部分电解槽的负压，并减少打开槽罩板时排入车间的烟气量，达到提高电解槽烟气捕集效率的目的。

## 5.6 除尘器

国内电解铝行业使用的布袋除尘器主要有两种：低压反吹风布袋除尘器和低压脉冲布袋除尘器，前者使用离心风机或主排烟风机形成的负压进行清灰，清灰压力低；后者使用 0.3-0.5MPa 的压缩空气进行清灰。无论采用那种净化工艺和布袋除尘器，国内电解铝行业净化系统烟气排放的普遍效果为：

氟化物：2-6mg/Nm<sup>3</sup>

粉尘：小于 15 mg/Nm<sup>3</sup>

但是，由于国内铝电解烟气净化工程基本上全部采用的是前述第一种和第二种工艺技术，新鲜氧化铝和载氟氧化铝完成吸附反应后一起进入布袋除尘器进行气固分离。其主要缺点是：

① 没有充分利用新鲜氧化铝和载氟氧化铝不同的吸附反应特性，致使全氟净化效率不够高。

② 由于采用新鲜氧化铝与载氟氧化铝同时进入除尘器的工艺流程，致使大量的载氟氧化铝在系统内进行无功死循环，粉化严重，加之氧化铝吸附氟化氢之后粘性增加，造成大量的粉化氧化铝粘附在布袋上，清灰困难，增大系统负荷，降低除尘器的净化效率。同时，由于清灰困难，也导致除尘器运行阻力不断增大，风机抽风能力降低，电解槽的集气效率降低。

业内技术人员曾考查国外两家电解铝厂的净化系统，根据系统显示的风量，其实际过滤风速已达到 1.6-1.8m/min，但是除尘器的差压仅需控制在 1300-1600Pa；而国内一些铝厂，布袋的过滤风速设计值为 0.8m/min，但除尘器的差压控制需达 2300-2600Pa。这充分说明系统阻力严重偏高，必将导致风机的排烟量下降。

解决这一问题的途径为：

一、采用动力预分离设施的新型除尘器（前述工艺流程三的净化工艺），消除载氟氧化铝在净化系统中的无功死循环和氧化铝的严重粉化；

二、规范选择合适的除尘器滤料，提高滤料的清灰效果。

### 5.7 控制系统

要实现净化系统高效、平稳地运行，就必须对系统主要的工艺参数进行监测、监视设备的运行状况、实现关键被控参数的自动控制。

目前，国内的大部分铝厂都采用 PLC 作为主控制器，上位计算机为管理机，通过人机界面实现对净化系统的监视、控制。监测的参数和控制的内容各厂家差别很大，其中监测的主要参数有：排烟的温度、排烟压力、布袋压差、主引风机的轴温、各供风风机出口压力等。控制参数不够全面，不能很好地实现联动控制，实现理想的系统净化效果。

## 6 主要技术内容及说明

### 6.1 污染物和污染负荷的确定

#### 6.1.1 污染物

《关于加快铝工业结构调整指导意见的通知》中要求提高产业集中度，鼓励综合利用和节约资源……严格执行环保标准，淘汰落后的电解铝生产能力。《关于制止电解铝行业违规建设盲目投资的若干意见》明确了淘汰所有自焙槽：“根据产业政策和环保标准，结合环境治理，限定在2004 年底前淘汰尚存的自焙槽生产能力。”即进入2005 年，中国不再允许采用自焙槽，《产业结构调整指导目录(2005 年本)》进一步明确了淘汰铝自焙电解槽的政策。因此，中国的铝工业已全部淘汰了自焙铝电解工艺。据统计，2009年底我国拥有电解铝企业 105家，电解铝生产的主体设备全部为中心点下料预焙电解槽，其主要槽型及产能见表6。

表 6 2009 年底全国电解铝槽型及产能一览表

	产能				
	200kA 以下预焙电 槽	200kA-300kA 之间预焙电 槽	300kA-400kA 之间预焙电 槽	400kA 预焙电 槽	总计
合 计	310.00	751.80	695.20	248.50	2005.5
比例%	15.46	37.49	34.66	12.39	100

从表中数据可以看出：现有铝电解生产企业采用的铝电解槽全部为中心点下料预焙电

槽，而且大型化趋势明显，总体产能中85%为200kA及以上级别的大型预焙电解槽。

在铝电解生产企业，预焙电解槽生产过程的主要污染物为电解槽产生的含有气态氟化氢、固态氟化盐粉尘、氧化铝粉尘和气态二氧化硫的电解烟气；其次为阳极冷却过程中散发的气态氟化氢；氧化铝输送、氟化盐输送、阳极转运、阳极组装、电解槽大修和抬包清理过程产生的粉尘等。依此确定4.1条电解铝企业污染物的种类。

### 6.1.2 污染物负荷

铝电解过程电解槽散发的有害物的量与电解温度、电解质成分、所采用原料氧化铝和氟化盐的成分等有关，原料氧化铝和氟化盐中水份含量的增加、电解温度的升高、电解质中过量氟化铝含量的增加都会使氟化氢气体的含量增加；粉尘散发量的多少与原料氧化铝的粒度分布有关，原料的粉化会增加电解烟气中粉尘的排放量；电解烟气中二氧化硫含量的多少与阳极中硫含量的多少有关。根据电解铝行业的统计及测量数据可知，铝电解生产每吨铝排氟约为15-40 kg/t-Al，粉尘30-70 kg/t-Al，二氧化硫4-16 kg/t-Al。

### 6.1.3 废气量：

从资料《铝电解槽顶部热损失及散热变化对电解槽通风的影响》light metal 2009 p551可知，电解槽的通风量与电解槽的上部热损失、电解槽生产过程中的烟气散失量呈正比，与电解槽罩的密闭率呈反比。铝电解生产过程中，由于所采用的工艺参数基本接近，生产过程中单位产品的烟气散失量基本一致；由于生产的能量利用率基本一致，单位产品电解槽壳面以上的热损失基本一致；因此，可以说电解槽的排烟量与电解槽的容量成正比。而随着电解槽容量的增加，相对电解槽的密闭率提高。

目前，在生产的铝电解槽槽型普遍为 160kA~400kA 的预焙电解槽，在电解槽的集气效率 $\geq 98.5\%$ 的情况下，根据生产实际可知，160kA 电解槽的烟气量为 5000Nm<sup>3</sup>/h，200kA 电解槽的烟气量为 6000Nm<sup>3</sup>/h，300kA 电解槽的烟气量为 7000Nm<sup>3</sup>/h，400kA 电解槽的烟气量为 8500 Nm<sup>3</sup>/h。

铝电解生产是在成系列安装的多台预焙铝电解槽上进行的，其总排烟量是按照每台电解槽的排烟量累积计算的，因此，对于不同产能的铝电解生产企业而言，可以按每十万吨产能累积计算。每 10 万吨产能的电解铝企业安装不同槽型的电解槽台数和总排烟量如下表所示：

表 7 电解铝企业每 10 万吨产能采用不同电解槽型时的总排烟量

	160kA 槽	200kA 槽	300kA 槽	400kA 槽
安装槽台数（台）	232	185	124	93

单槽排烟量 (Nm <sup>3</sup> /h)	5000	6000	7000	8500
总排烟量 (Nm <sup>3</sup> /h)	1160000	1110000	868000	790500
生产每吨铝排放的烟气 (Nm <sup>3</sup> /t-Al)	101200	97160	75600	68800
烟气中 F 含量 (mg/ Nm <sup>3</sup> )	148~395	154~412	198~529	218~581
烟气中粉尘含量 (mg/ Nm <sup>3</sup> )	296~690	309~720	396~926	436~1017
烟气中 SO <sub>2</sub> 含量 (mg/ Nm <sup>3</sup> )	40~158	41~164	53~212	58~232

由上表可以看出，每 10 万吨产能的铝电解企业，电解车间进入净化系统的总排烟量约为 800000~1200000 Nm<sup>3</sup>/h。生产采用的电解槽容量越大，单位产能净化系统需要处理的烟气体积量越少。

#### 6.1.4 废气污染物浓度

依据表3中的数据范围，确定铝电解烟气中氟化氢浓度为150~700 mg/m<sup>3</sup>，粉尘浓度为296~1200 mg/m<sup>3</sup>，SO<sub>2</sub>浓度为40~250 mg/m<sup>3</sup>。

## 6.2 工艺设计篇

### 6.2.1 工艺路线选择

#### 6.2.1.1 铝电解车间烟气治理

铝电解车间烟气治理采用以铝电解原料氧化铝为吸附剂的干法净化工艺。目前，国内外预焙铝电解槽生产金属铝的烟气净化全部采用此工艺，该工艺的主要工作过程为氧化铝吸附烟气中的有害气体氟化氢后，经除尘器与烟气分离返回电解槽使用。该工艺利用生产原料作为净化介质，净化后返回生产系统使用，具有氟化物回收利用、无额外消耗和二次污染的优点。

在氧化铝吸附干法净化工艺中建议优先选择两段干法净化工艺，该工艺的基本流程可描述为：布袋除尘器收集的载氟氧化铝就近加入除尘器入口前的垂直烟道与电解烟气混合吸附烟气中的氟化氢（一次反应），该部分吸附氟化氢后的氧化铝在进入除尘器之前通过离心分离装置与烟气（预分离）；进入除尘器的烟气与喷射进入除尘器底部的新鲜氧化铝混合进行二次吸附反应。该工艺与原有干法净化工艺相比有以下几个明显的优点：

(1)、氟化氢含量较高的烟气与载氟氧化铝进行一次反应，新鲜氧化铝与氟化氢浓度较低的烟气进行二次反应，可以有效利用载氟氧化铝和新鲜氧化铝吸附氟化氢的不同特性，有利于提高氟化氢的吸附净化效率；

(2)、载氟氧化铝在垂直管道中与烟气逆流接触,新鲜氧化铝在除尘器底部与烟气接触,烟气流速相对较低,可以延长氧化铝吸附氟化氢的时间,提高吸附氟化氢的效率,而且相对低速的烟气可以减少氧化铝的破损;

(3)、进入垂直烟道的载氟氧化铝完成吸附烟气中氟化氢气体的一次反应之后,在进入除尘器之前通过离心分离器与烟气分离,该部分分离的载氟氧化铝作为原料直接返回电解槽使用,也可以根据需要再次进入除尘器前的垂直烟道。这可以使净化系统中载氟氧化铝的循环次数可控,消除无功死循环,减少氧化铝的循环粉化。

(4)、氧化铝的预分离功能和循环破碎的减少,可以降低除尘器的除尘负荷,提高布袋的清灰效果,有利于降低除尘器的过滤阻力,降低净化系统的运行能耗。

#### 6.2.1.2 其它废气的治理

铝电解烟气中,除电解槽排出的烟气含有有害气体 HF 和 SO<sub>2</sub> 之外,其它全部为含尘废气,因此,其它废气的治理全部采用简单的一级通风除尘工艺。各工序可根据设备布置情况集中除尘或单独除尘,设备布置集中且基本同时开动的宜集中除尘,反之宜采用单独除尘。单独除尘宜采用单机袋式除尘器。

### 6.2.2 工艺设计

#### 6.2.2.1 集气罩设计

(1) 在集气罩的设计中,6.3.1.3 条要求铝电解槽集气罩的捕气率应不低于 98.5%,是由于集气效率小于 98.5%时,吨铝排氟就可能大于 0.9 kg/t-Al,无法满足 GB16297《大气污染物综合排放标准》的要求。

(2) 6.3.1.2 条规定铝电解槽集气罩的结构形式应首选上排烟方式。上排烟集气罩结构有利于降低集气罩的系统阻力,提高集气效率。

(3) 6.3.1.4 条规定 280kA 以下容量级别的电解槽的排烟道采用单段通长烟道,280kA 及以上容量级别的电解槽应采用两段或多段烟道分区集气。是因为铝电解槽在大型化过程中,电解槽及集气罩的长度增加,单烟道难以提高集气罩内负压分布的均匀性,无法实现铝电解槽的高效集气。

(4) 目前,铝电解行业在生产的电解槽普遍为 160kA~400kA 的预焙电解槽,在电解槽的集气效率≥98.5%的情况下,根据生产实际可知,160kA 电解槽的烟气量为 5000Nm<sup>3</sup>/h,200kA 电解槽的烟气量为 6000Nm<sup>3</sup>/h,300kA 电解槽的烟气量为 7000Nm<sup>3</sup>/h,400kA 电解槽的烟气量为 8500 Nm<sup>3</sup>/h。以上数字回归可以得到电解槽排烟量和槽容量之间的关系式如下:

$$Q=2000+18.95I-0.006I^2$$

Q —— 电解槽集气罩设计排烟量  $\text{Nm}^3/\text{h}$

I —— 电解槽容量 KA

依此确定了 6.3.1.7 条不同铝电解槽单槽排烟量的大小。可以方便设计人员进行净化系统设计时,根据所采用铝电解槽槽型的大小及安装电解槽的数量科学地确定系统处理烟气量的大小。

(5) 通过对不同槽型集气罩的 CFD 模拟计算可以得出,集气烟道为上位烟道的集气结构在支烟管出口负压大于-120Pa 后,集气罩内就不会有烟气外溢;集气烟道为低位烟道的集气结构在支烟管出口负压大于-260Pa 后,集气罩内才不会有烟气外溢;因此,为了设计时有一定的富余量,6.3.1.8 条款规定排烟道在水平罩板以上的集气罩结构,集气罩出口负压应大于-150pa;排烟道在水平罩板以下的集气罩结构,集气罩出口的负压应大于-300pa。

(5) 在进行电解槽集气罩模拟计算的过程中同样发现,在开罩进行工艺操作时,如果将集气罩的排烟量提高至两倍,可以有效消除开罩时的烟气外溢,因此,提出了 6.3.1.10 的条款内容。

#### 6.2.2.2 排烟管网

在排烟管网的设计要求中需要特别说明的是各管段直径的确定。铝电解槽烟气治理为多点集中处理方式,烟气处理系统排烟管网的结构方式如图 5 所示:

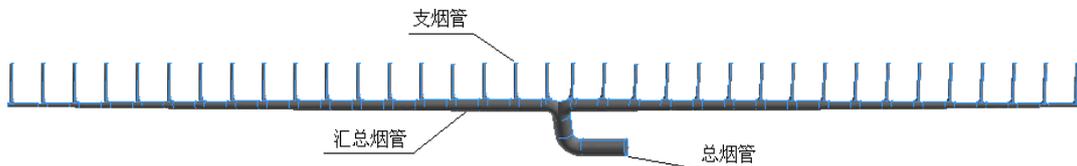


图 5、铝电解槽排烟管网的结构形式示意图

在烟气汇总过程中,只有最大限度地降低汇入烟气对管网烟气流动的冲击,才能有效降低管网的阻力损失,因此,6.3.2.12 条款规定在确定支烟管风速和汇总烟管风速后,以汇总烟管接入每个支烟管时风速等量递增(增加 $\Delta v$ )的原则确定汇总烟管各变径段的直径。

$$\Delta v = (v_{\text{汇}} - v_{\text{支}}) / n$$

式中:

$v_{\text{汇}}$  —— 汇总烟管最大流速 m/s

$v_{\text{支}}$  —— 支烟管流速 m/s

n —— 单侧汇总烟管的个数

#### 6.2.2.3 除尘器的选型及设计

(1) 图 6、图 7 为使用针刺毡滤料的脉冲袋式除尘器的现场测量结果。

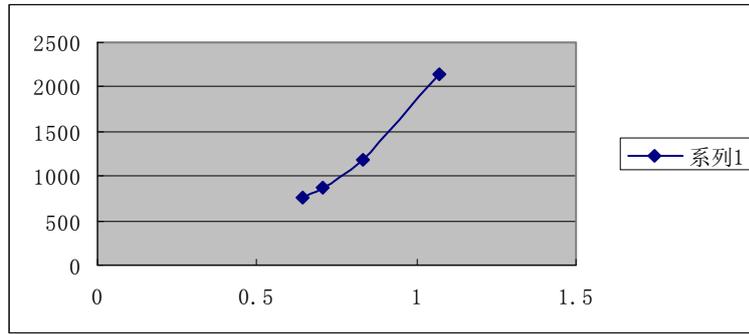


图6、布袋过滤风速与除尘器压差之间的关系

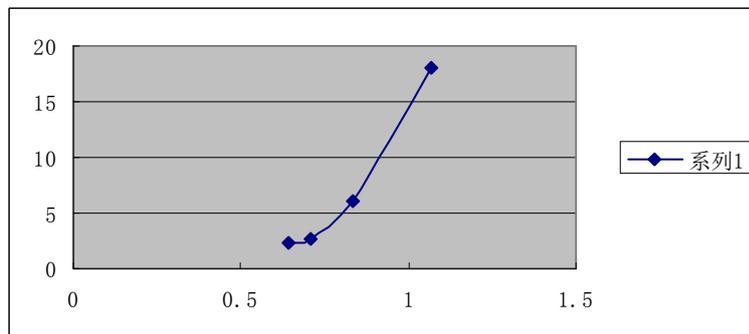


图7、布袋过滤风速与净化后烟气含尘浓度之间的关系

从图中数据可以看出，布袋除尘器过滤风速增加时，除尘器的压差和过滤后的烟气含尘浓度明显提高。给出上述两图的目的，是希望进行铝电解烟气干法净化设计时，能够充分考虑烟气排放要求和净化系统能耗对除尘器过滤风速选定的影响，以期实现优化环境保护效果的同时，又可以实现节能的目的，即环保与节能降耗兼并。

参考图 6、图 7 的关系曲线图，建议使用针刺毡滤料的除尘器过滤风速选择在 0.6 m/min—0.8m/min 的范围；选用覆膜滤料的除尘器过滤风速选用在 1.0 m/min—1.2 m/min 的范围。这不仅可以使烟囱的排尘浓度降低到  $5\text{mg}/\text{m}^3$  以下，而且可以提高布袋的使用寿命，降低净化系统的运行能耗，有良好的投资、运行经济性。

(2) 铝电解槽排出的烟气温度的高低与当地气温、电解槽容量的大小和集气罩结构等有关，正常生产时，铝电解槽排烟温度一般在  $80\sim 130^\circ\text{C}$  之间，从投资的角度考虑，铝电解烟气干法净化系统的布袋除尘器一般选择最高使用温度小于  $140^\circ\text{C}$  的普通滤料，其长期使用温度为  $125^\circ\text{C}$ 。因此，6.3.3.9 规定铝电解净化系统的烟气长期运行温度应保持在  $125^\circ\text{C}$  以下，若长期运行温度大于  $125^\circ\text{C}$  应设置余热利用—即烟气冷却设施，以提高布袋除尘器的使用寿命，防止出现高温糊袋现象，影响净化系统的正常运行。

#### 6.2.2.4 烟囱的设计

第6.3.5.1条款规定烟囱的高度设计应符合GB16279的规定。在GB16279《大气污染物综合排放标准》中关于氟化氢气体的排放与烟囱高度之间的关系有如表8的规定。

表 8 《大气污染物综合排放标准》中氟化氢排放的要求

最高允许排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	氟化氢最高允许排放速率(kg/h)		
	烟囱高度 (m)	二级	三级
9	30	0.59	0.88
	40	1.0	1.5
	50	1.5	2.3
	60	2.2	3.3
	70	3.1	4.7
	80	4.2	6.3

由表 8 可知：净化系统烟囱氟化氢的排放量与烟气排放量和烟气含氟浓度有关，根据 GB16279《大气污染物综合排放标准》的要求，对于不同排放烟气的含氟浓度、不同产能的电解铝厂，铝电解烟气净化系统烟囱的设计高度应参见表 9。

表9、烟囱氟化氢排放浓度、排放速率和烟囱设计高度之间的关系

最高允许排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	铝电解企业年产能 (万吨/a)											
	10			20			30			40		
	排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)	
		二级	三级		二级	三级		二级	三级		二级	三级
0.5	0.5	30	30	1	40	40	1.5	50	40	2	60	50
1	1	40	40	2	60	50	3	70	60	4	80	70
2	2	60	50	4	80	70	6		80			
3	3	70	60	6		80						
4	4	80	70									
5	5		80									
最高允许排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	铝电解企业年产能 (万吨/a)											
	50			60			70			80		
	排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速率 (kg/h)	烟囱高度 (m)	
		二级	三级		二级	三级		二级	三级		二级	三级
0.5	2.5	70	60	3	70	60	3.5	80	70	4	80	70
1	5		80	6		80	7			8		

最高允许 排放浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	铝电解企业年产能 (万吨/a)											
	90			100			110			120		
	排放速 率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速 率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速 率 (kg/h)	烟囱高度 (m)		排放速 率 (kg/h)	烟囱高 度 (m)	
		二 级	三 级		二 级	三 级		二 级	三 级		二 级	三 级
0.5	4.5		80	5		80	5.5		80	6		80
1	9			10			11			12		

除此之外，由于各地气候条件的不同，烟囱的具体设计高度和出口的烟气流速还应结合项目环境影响评价的模拟计算结果确定。

#### 6.2.2.5 监测和过程控制

(1) 设置净化系统的监测和过程控制系统，提高净化系统运行的可靠性和运行效率。控制系统的主要功能是检测来自电解车间烟气的工艺参数、净化后烟气的排放指标、净化系统设备的运行情况，使之构成一个闭环控制系统。

(2) 8.2.2条规定，净化系统的运行状态实现主控制机的动态画面显示功能，以便操作人员随时掌握净化系统的运行状态。

(3) 8.2.3条规定，控制系统监测排烟管网最远端铝电解槽支烟管的出口压力，并实行超低负压报警，以保证系统中所有铝电解槽的排风量及集气效率。

(4) 8.2.4条规定，监测除尘器入口烟气温度，根据除尘器滤料的使用特性要求实现超高温报警，木钉是为了防止烟气温度过高，初选高温烧袋和糊袋现象的发生，即降低烟气治理效果，还影响滤袋的使用寿命。

(5) 8.2.5规定监测每组除尘器的进出口压差，以方便根据压差的大小和变化调整每组除尘器的反吹风频率，保证除尘器的高效稳定运行。同时分析判断除尘器压差的异常变化，结合烟囱出口粉尘含量的监测数据，分析确定布袋是否破损及破损部位，实现布袋破损机组的及时停运、更换。

(6) 8.2.6规定布袋反吹风压力实行在线自动监测及故障报警功能，以保证布袋的清灰效果。

(7) 8.2.8条规定电解槽集气罩出口主、副烟支管上各设一台调节阀，每台阀门设二个工位，即：全关、正常工位。正常工况下，主排烟支管上的阀门处于工位，而副排烟支管上的阀门处于关闭状态；当电解槽操控系统发出工作信号（换极、出铝、阳极效应等）时，打开副排烟管上的阀门，关闭主排烟管上的阀门，使之构成一个闭环调节系统；当收到结束

信号（或当时间超过设定时间，设定时间在上位管理机可调）时，按逆向顺序回到原工作状态。以保证铝电解槽在进行工艺操作时无废气溢出。

(8) 8.2.9条规定监测烟囱排放口的F含量和粉尘含量，将有关监测数据反馈地方环保部门。该规定以保障随时监测净化系统的运行效果，保证保证烟气达标排放。

#### 6.2.2.6 建筑结构

##### (1) 电解车间屋顶通风器

电解厂房屋顶采用屋顶通风器，增加车间通风换气率，有利于车间有害气体和热量的快速排放，以优化车间的作业环境，同时使意外散溢到车间的有害气体的无组织排放成为有组织排放。

##### (2) 电解车间通风窗

电解车间厂房配合屋顶通风器配置适宜的底部通风窗，也是提高车间的通风换气率。

## 7 标准实施的环境效益及经济技术分析

(1) 该标准实施后，铝电解槽的集气效率可以提高到98.5%以上，烟囱排放烟气的粉尘浓度可以降低到 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，氟排放浓度可以控制在 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。可以实现吨铝粉尘排放小于 $1\text{kg}/\text{t-Al}$ ，氟排放小于 $0.5\text{kg}/\text{t-Al}$ 的目标。与《铝工业污染物排放标准》中要求的铝电解烟气单位产品污染物最高排放限值的粉尘 $2.2\text{kg}/\text{t-Al}$ 、氟 $0.9\text{kg}/\text{t-Al}$ 相比，粉尘排放可以减少 $1.2\text{kg}/\text{t-Al}$ ，氟排放可以减少 $0.4\text{kg}/\text{t-Al}$ 。以2009年国内原铝年产量1300万吨计算，国内年可减少粉尘排放（节约原料氧化铝）1.56万吨，减少氟排放5200吨。其环境效益和经济效益都十分明显。

(2) 如果按照该规范进行工程建设，一个年产10万吨的电解铝厂，铝电解废气治理设施投资约需人民币5000万元，运行费用耗能约需 $150\text{kwh}/\text{t-Al}$ 。较原有干法净化工艺节约 $100\text{kwh}/\text{t-Al}$ ，按2009年国内原铝年产量1300万吨计算，铝行业可总节能13亿度，折合年节约标煤15.98万吨，节能减排效果十分显著。

## 8 标准实施建议

本标准为首次制定，建议在实施过程中先试行一段时间，根据实际应用情况，进行进一步的修订完善。

为了进一步提高铝电解废气治理的水平，完善本标准的内容及实施效果，建议进行如下相关研究工作。

8.1.1 设置连续监测装置的目的是适时监测废气治理设施的运行参数，确保废气达标排放，向当地环保部门提供铝电解废气污染物排放数据。