doi：10. 14186/j. cnki. 1671-6620. 2025. 149

铝电解系列槽间排烟管道中烟气偏流现象的数值模拟

姬凤武[1]，康聪波[1]，王富强[2]，李学文[1]，张大信[3]，易吉龙[3]，赵德忠[3]
（1. 曲靖云铝淯鑫铝业有限公司，云南 曲靖 655000；2. 武汉科技大学 冶金与能源学院，武汉 430081；
3. 云南云铝绿源慧邦工程技术有限公司，昆明 654300）

摘　要：槽间排烟均匀性是影响电解车间环境质量的关键因素. 350 kA 电解系列的槽间排烟现场测量数据表明,净化汇总管偏向侧的电解槽支烟管全压整体高于另一侧.本文中搭建了支烟管系统—净化汇总管道内部的烟气流场模型,计算结果表明:当净化汇总管偏向侧的支烟管烟气流通面积较另一侧偏低 11.4%时,能有效均衡槽间排烟,且净化管道运行阻力较对称配置状态下要偏高 13.6%.净化汇总管偏向会反向影响槽间排烟的发现,有助于提高铝电解行业内对均衡槽间排烟的认知水平,可为改善电解车间环境和槽间热平衡提供理论依据.

关键词：铝电解槽；支烟管；净化汇总管；槽间排烟；烟气偏流
中图分类号：TF 821　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-6620(2026)05-0525-06

Numerical simulation on gas flow bias phenomenon in gas exhaust duct among cells of potline

Ji Fengwu[1], Kang Congbo[1], Wang Fuqiang[2], Li Xuewen[1], Zhang Daxin[3], Yi Jilong[3], Zhao Dezhong[3]
(1. Qujing Yunlv Yuxin Aluminum Co., Ltd., Qujing 655000, China; 2. School of Metallurgy and Energy, Wuhan University of Science Technology, Wuhan 430081, China; 3. Yunnan Yunlv Lvyuan Huibang Engineering Technology Co., Ltd., Kunming 654300, China)

Abstract: The uniformity of gas exhaust among cells is a key factor affecting the environmental quality in the potroom. Measurement data from the 350 kA potline show that the total pressure drop in the branch pipes on the side toward which the main collection duct is biased toward generally higher than that on the opposite side. This study establishes a gas flow field model for the branch pipe system and the main collection duct. The computational results indicate that only when the flow area of the branch pipes on the biased side is 11.4% smaller than that on the opposite side can gas exhaust among cells be effectively balanced. This configuration increases the pressure drop of the main collection duct by 13.6% compared to a symmetrically arranged system. The discovery that the bias of the main collection duct inversely affects gas exhaust among cells enhances the aluminum industry's understanding of balanced gas exhaust and provides a theoretical basis for improving potroom environmental quality and thermal balance among cells.

Key words: aluminum reduction cell; branch pipe; main collection duct; gas exhaust among cells; gas flow bias

在铝电解工艺中,电解车间环境质量主要取决于 4 个因素[1],即槽内集气均匀性[2-5]、槽间排烟均匀性[6-8]、电解槽密封状态[9-11]和排烟量大小[12-13].其中,槽间排烟均匀性主要评价电解车间内所有电解槽之间的排烟量分布是否均衡，它能够决定车间环境质量，其排烟带走的热量约占电解槽总散热量的 1/3[14],还会直接影响到电解槽能否建立良好的热平衡.目前,国内铝厂大多采用定期测量支烟管内烟气静压的方式,判定各台电解槽排烟量的大小，通过调节各台槽支烟管上蝶

收稿日期：2025-07-03.
基金项目：云南省重大科技专项计划项目（202302AF080013）.
作者简介：姬凤武（1974—），男，高级工程师，E-mail：13698787471@163. com.
通讯作者：康聪波（1986—），男，高级工程师，E-mail：zhufeng102936@126. com.

引文格式：姬凤武，康聪波，王富强，等. 铝电解系列槽间排烟管道中烟气偏流现象的数值模拟［J］. 材料与冶金学报，2026，25（5）：525-530. （Ji Fengwu，Kang Congbo，Wang Fuqiang，et al. Numerical simulation on gas flow bias phenomenon in gas exhaust duct among cells of potline［J］. Journal of Materials and Metallurgy，2026，25（5）：525-530.）

阀打开幅度的大小(开度),以实现槽间排烟的均匀控制[8].但由于支烟管段长度较短,管内烟气流动受管道转弯和蝶阀叶片的干扰,在湍流状态下还存在较明显的偏流现象;再加上电解系列槽数众多,且蝶阀又处于强磁场、多粉尘和高温环境中,频繁的人为调节和年久失修导致阀门损坏或调节失灵的情况较为普遍,这使得槽间排烟分布差异性较大,排烟量偏小的电解槽必然出现冒烟情况,进而影响电解车间的环境质量[7].因此,通过测量支烟管内烟气静压的方式判断槽间排烟均匀性的方法并不准确.李刚等[6]采用在支烟管和烟道端槽罩板上分别开洞测量风速的方式,综合评估槽间排烟均匀性,发现其偏差介于-23%~30%,远远超出±10%的目标控制范围;他们提出了通过测量支烟管内烟气温度来判断槽间排烟均匀性的方法,发现电解槽排烟温度并不受支烟管内烟气流动紊乱的影响,该方法较测量烟气静压的方法更为可靠.

为了实现电解系列的槽间排烟均匀性,专业设计院和铝厂技术工作者多年前就开始研究支烟管孔板[6,11]或变径管[15]的均衡作用,并在实践中将电解槽支烟管蝶阀改造成孔板或变径管,以克服蝶阀调节槽间排烟的不足.但上述研究和改造一般都基于净化汇总管两端电解槽数量对称或一侧槽数偏多的非对称状态的前提条件,而忽略了净化汇总管内烟气流动状态可能存在对槽间排烟的逆向反制影响,这使得电解系列在实际生产中槽间排烟的真实分布往往与理想状态出现一定偏差.本文针对某公司350 kA电解系列存在的小号槽与大号槽排烟量不一致的情况,基于槽间排烟测试和数值模拟计算,从实践和理论两个方面深入分析槽间排烟管道内的烟气偏流现象,以期从中找到解决问题的有效方法.

1 电解系列当前存在的问题

某公司350 kA电解系列始建于2007年,全系列共有240台350 kA电解槽,均分为6个自然工区,设置3套电解烟气净化系统(未设脱硫).其中,净化系统的支烟管与净化1/4汇总管有两种不同配置,如图1所示.

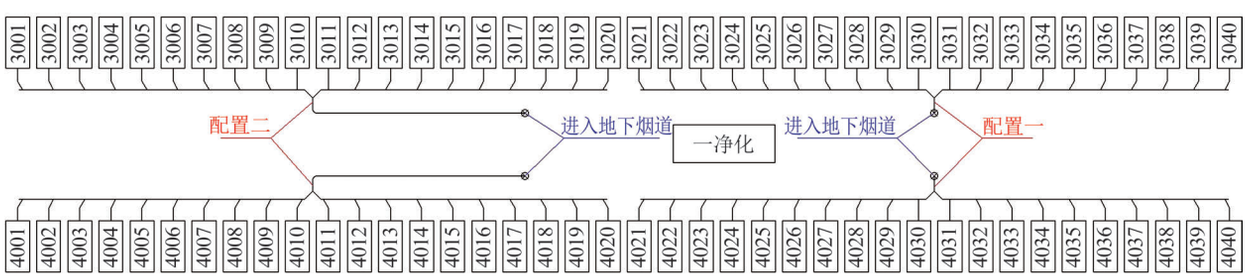


图1 一净化汇总管的两种配置方式

Fig. 1 Two configurations of collection pipe in GTC 1#

在配置一中,21#~30#(10台槽)、31#~40#(10台槽)对称汇总进入1/4净化管后,即竖直90°转弯向下进入地下烟道;在配置二中,1#~10#(10台槽)、11#~20#(10台槽)对称汇总进入1/4净化管后,即水平90°转弯,经过40 m长的水平直管后,再竖直90°转弯向下进入地下烟道.由此可见,即使4根1/4汇总管所辖电解槽数量分布对称,但因1/4净化汇总管的走向不同,也会造成支烟管系统配置的差异性.

在实际生产中发现,配置一所辖电解槽的槽间排烟均匀性较易调节,两侧电解槽支烟管蝶阀开度基本对称;而配置二中的后10台槽(11#~20#)支烟管蝶阀开度整体较前10台槽(1#~10#)偏小.小号槽(1#~20#)较大号槽(21#~40#)整体风量偏小,电解槽更容易冒烟.

2 烟气偏流现象的测试

电解系列在生产中出现的上述现象说明1/4净化汇总管中可能存在明显的两侧烟气偏流.下面通过测量支烟管烟气温度的槽间排烟测试方法来验证.

选取3001#~3020#共20台电解槽进行支烟管蝶阀调节和支烟管烟气温度测量,统计20台槽烟气温度测量值的平均值,再对比每台槽与平均值之间的百分比偏差即为槽间排烟偏差E_i,其表达式如式(1)所示.

$$E_i=\left(\frac{T_i}{\overline{T}}-1\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中:T_i为第i槽烟气温度测量值;$\overline{T}$为各槽烟气温度测量平均值.

3001#~3020#电解槽的槽间排烟偏差测量值

分布见图 2,统计各支烟管蝶阀开度见表 1.

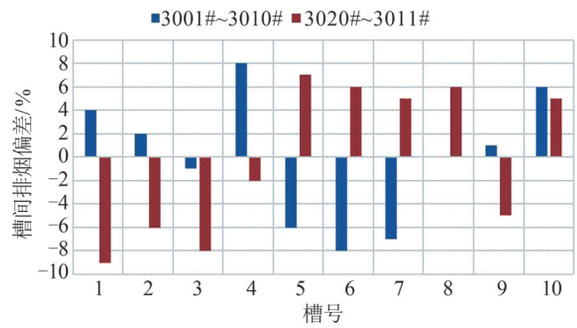


图 2　槽间排烟偏差的测量值

Fig. 2　Measurement value deviation of gas exhaust among cells

测量数据显示,20 台槽的平均标况排烟量为 7 700 m^3/h,支烟管烟气温度平均值为 142 ℃.经支烟管蝶阀调节后的槽间排烟偏差均低于±10%,达到了均衡的目的.在统计支烟管蝶阀开度时发现,小号槽(3001#~3010#)的阀门开度整体高于大号槽(3020#~3011#),大号槽需要用更小的阀门开度(流通面积减少 14.0%),才能有效抑制风量与小号槽保持相当.上述结果验证,该管道布置形式下净化汇总管内烟气偏流现象客观存在.这种偏流对槽间排烟产生反向作用:偏置一侧的支烟管必须采用更小的阀门开度,才能使汇总管两侧电解槽的排烟风量达到均衡.

表 1　支烟管阀门开度

Table 1　Opening degree of branch pipe valve　　%

槽号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
3001#~3010#	100	85	78	76	73	70	68	65	62	61
3020#~3011#	85	80	75	73	70	66	63	60	58	56

注:3001#、3020#为尾端槽.

3　支烟管—1/4 净化汇总管内烟气流场的数值模拟

借助设计施工图和电解排烟测试数据搭建支烟管—1/4 净化汇总管内的烟气流场模型,从理论上深入解析槽间排烟管道内的烟气偏流现象.

3.1　数学模型

支烟管—1/4 净化汇总管内烟气流场模型应涉及以下数学控制方程.

3.1.1　质量守恒方程

质量守恒方程又称为连续性方程,即对于任意控制体系,体系内质量的增加率等于从外界进入体系的净质量流率.其表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau}+\nabla(\rho\vec{u})=0 \tag{2}$$

3.1.2　动量守恒方程

动量守恒方程可阐述为:单位体积流体某方向动量的增加率等于该方向流体动量的净流入率与作用于它在该方向上的外力之和.其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\vec{u})+\nabla(\rho\vec{u}\vec{u})=$$
$$-\nabla P+\nabla[\mu(\nabla\vec{u}+\nabla\vec{u}^{T})]+\rho g+\vec{f} \tag{3}$$

式中:μ 为黏度;g 为重力加速度;$\vec{f}$ 为力的源项.

3.1.3　湍流模型

估算电解槽支烟管处的雷诺数 Re 约为 4×10^5,属于湍流,故选择较常用的标准 k-ε 模型模拟烟气流动.其控制方程为:

$$\rho\left(\frac{\partial k}{\partial \tau}+\vec{u}\nabla k\right)=\nabla\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right]+G_k-\rho\varepsilon+S_k \tag{4}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}+\vec{u}\nabla \varepsilon\right)=\nabla\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{5}$$

式中:k 为湍动能;ε 为湍流耗散率;μ_t 为有效湍流黏度;G_k 为平均速度梯度引起的湍动能;S_k 和 S_ε 分别为湍动能和湍动能耗散率的源项;σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能和湍流耗散率的普朗特数 Pr;$C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 均为常数,分别取 1.44 和 1.92.

3.2　物理模型

建立支烟管—1/4 净化汇总管内烟气流场物理模型,包括支烟管与 1/4 净化汇总管.净化系统中存在两种配置方案,必须分别建模予以研究,如图 3 所示.

电解槽间距为 6.4 m,支烟管直径均为 0.760 m.电解槽排烟量均依靠支烟管手动蝶阀控制,在物理模型中直接将支烟管蝶阀对等简化成孔板,通过孔板孔径调节槽间排烟.

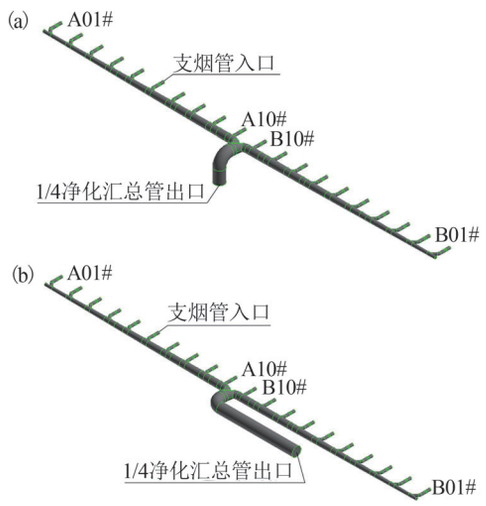


图3 支烟管—1/4净化汇总管两种配置的物理模型

Fig. 3 Two configurations of physical model for branch pipe — 1/4 GTC collection pipe

(a)—配置一:对称汇总;(b)—配置二:偏向汇总.

3.3 边界条件

测量支烟管处的烟气温度平均值为156 ℃,在1/4净化汇总管进入地下烟道之前的烟气温度为129 ℃.为了简化计算,本模型不考虑温度场.因此,取烟气温度140 ℃时对应的烟气密度0.854 kg/m^3、黏度2.37×10^{-5} kg/(m·s)进行管道阻力损失计算.支烟管入口取零压入口边界,1/4净化汇总管出口取20台槽排烟量的质量流量45.9 kg/s.

3.4 配置一的模拟结果

在配置一中,管道内的烟气流场和槽间排烟偏差分别如图4和5所示,各支烟管孔板孔径如表2所列.

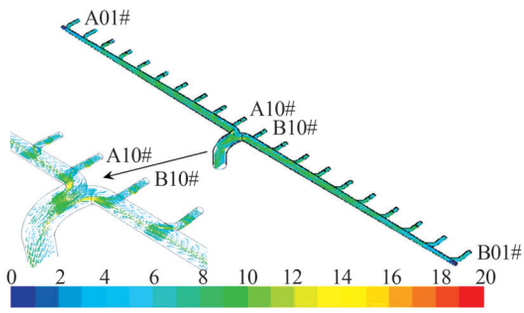


图4 配置一管道内的烟气流速分布图(m/s)

Fig. 4 Gas velocity distribution in pipe of configuration 1(m/s)

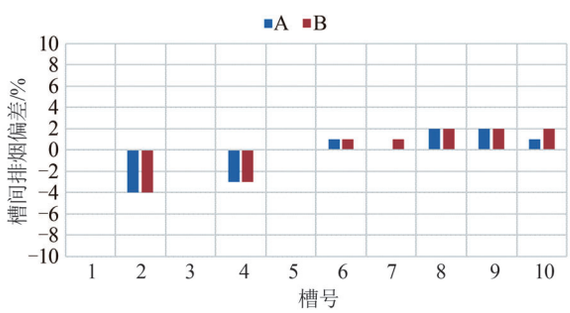


图5 配置一的槽间排烟偏差分布

Fig. 5 Deviation distribution of gas exhaust among cells in configuration 1

表2 配置一的孔板孔径分布

Table 2 Distribution of perforated plate diameters in configuration 1 m

槽号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
A	0.760	0.760	0.580	0.520	0.500	0.480	0.465	0.455	0.445	0.435
B	0.760	0.760	0.580	0.520	0.500	0.480	0.465	0.455	0.445	0.435

在表2中,端头槽1#、2#的孔板孔径均为0.760 m,表示此处阀门应处于全开状态.配置一的支烟管系统为对称结构,1/4汇总管两侧各10台电解槽,且汇总管90°转弯垂直向下,A、B两侧烟气气流在汇总管内无任何水平偏向.在该结构下,A、B两侧的各支烟管孔板调节尺寸的分布必然按远近位置呈镜像对称.计算结果表明:自支烟管入口到1/4汇总管出口的管道阻力损失为59 Pa;在配置一中,20台电解槽的槽间排烟偏差均控制在±5%以内,且A、B两侧的排烟量偏差分布几乎完全重合,这有效验证了配置一的对称性.

3.5 配置二的模拟结果

3.5.1 偏流现象的理论验证

配置二与配置一的不同之处在于,1/4汇总管在短距离内即拐向B侧.若将配置二也按配置一支烟管孔板孔径设置,就可从理论上验证管道内是否存在烟气偏流现象.图6和7分别示出了该工况下管道内烟气流场和槽间排烟偏差.

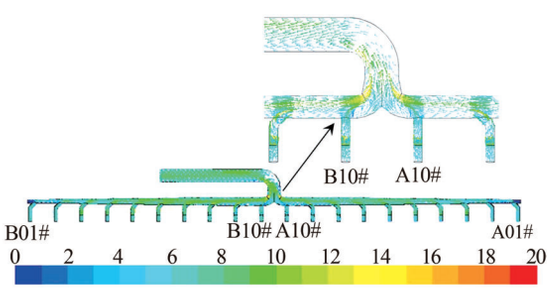


图6 验证工况下配置二管道内的烟气流速分布图(m/s)

Fig. 6 Gas velocity distribution in pipe of configuration 2 under verification condition(m/s)

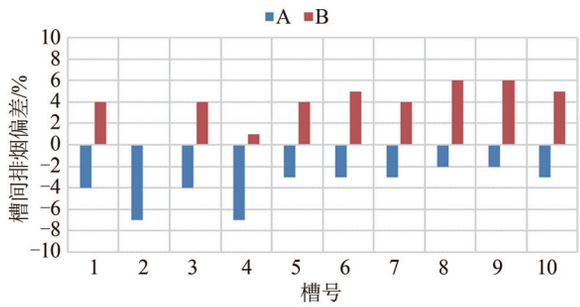


图 7　验证工况下配置二的槽间排烟偏差分布

Fig. 7　Deviation distribution of gas exhaust among cells in configuration 2 under verification condition

按照配置一中 A、B 两侧对称的孔板孔径，计算配置二管道内的烟气流场，自支烟管入口到1/4汇总管出口的管道阻力损失为 62 Pa.虽然 A、B 两侧各自 10 台槽的槽间排烟偏差均控制在±5%以内，但 B 侧总流量整体比 A 侧偏大 7.9%，这说明配置二中的 1/4 汇总管偏向 B 侧确实对管道内的烟气流动产生了影响.

在配置二中，1/4 汇总管 90°转弯偏向 B 侧，气流汇总位置距离 90°弯管仅 0.9 m(汇总管直径 3 m)，无足够长的直管段消除弯头产生的烟气扰动.同时，气流流经 90°弯头时，受惯性作用，弯头外侧流量偏大，造成 B 侧支烟管负压整体高于 A 侧，最终形成烟气偏流现象.

3.5.2　槽间排烟均衡状态下的模拟结果

基于配置二净化管道中烟气偏流现象的真实存在，在实际生产中应对偏流侧的支烟管阀门增大调节力度，以保证槽间排烟整体的均匀性.因此，保留配置二中 A 侧孔板分布与配置一相同，改变 B 侧孔板孔径分布，定量对比两边不平衡的程度.在该工况下 A、B 两侧的孔板孔径分布见表 3，槽间排烟偏差分别如图 8 所示.

表 3　配置二的孔板孔径分布

Table 3　Distribution of perforated plate diameters in configuration 2　　**m**

槽号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
A	0.760	0.760	0.580	0.520	0.500	0.480	0.465	0.455	0.445	0.435
B	0.550	0.550	0.520	0.480	0.465	0.455	0.445	0.435	0.425	0.410

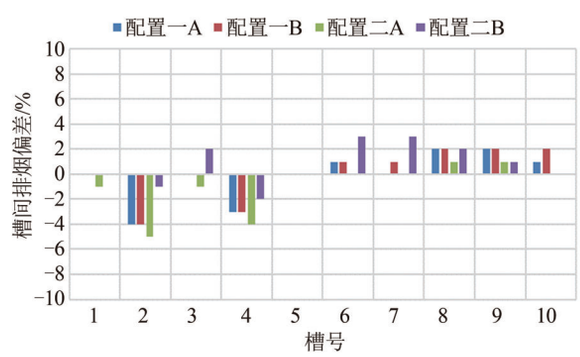


图 8　配置一、二的槽间排烟偏差分布

Fig. 8　Deviation distribution of gas exhaust among cells in configuration 1 & 2

计算结果显示：在配置二中，20 台电解槽的槽间排烟偏差均控制在±5%以内；B 侧孔板孔径整体低于 A 侧，其通风面积减小了 11.4%；自支烟管入口到 1/4 汇总管出口的管道阻力损失为 67 Pa，较配置一偏高 13.6%.

由此可知，当 1/4 汇总管拐向一侧时，必然造成该侧净化管道内的偏流现象.若在设计、改造和生产实践中忽略这一变化，仍采取两侧对称的蝶阀、孔板或变径管配置结构，必将导致拐向侧的电解槽排烟量偏大，进而恶化电解车间环境和槽间的热平衡均匀分布，给电解系列的平稳高效运行造成一定干扰.因此，只有充分认识到净化管道内烟气偏流现象的存在，才能解释同一电解工区内小号槽与大号槽之间的排烟差异；对净化汇总管偏向侧的电解槽，适当调低支烟管蝶阀开度或减小孔板通风面积，即可有效均衡槽间排烟分布，为改善车间环境、维持电解槽热平衡创造有利条件.

4　结论

(1)通过生产实测与数值模拟计算发现，电解系列非对称布置的净化管道内存在烟气偏流现象；若要有效均衡槽间排烟分布，净化汇总管偏向侧支烟管的烟气流通面积需较另一侧减小 14.0%.

(2)非对称净化管道配置在国内应用较为普遍，但国内设计院与铝厂在开展槽间排烟均匀性设计及改造工作时，并未充分关注烟气偏流现象及其带来的不利影响，即便针对非对称净化管道，依旧沿用对称的支烟管控制方案.因此建议铝厂在实际生产中，对净化汇总管两侧的支烟管采取差异化调控手段(蝶阀、孔板或支烟管调节)，削弱烟气偏流对电解车间作业环境以及电解槽热平衡带来的不利干扰.

5 参考文献

[1] 王麒瑜,王泽江. 铝电解车间环境的综合治理方法[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(2): 53-62.
(Wang Qiyu, Wang Zejiang. Environmental treatment methods for aluminum electrolysis workshops[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025,41(2): 53-62.)

[2] 李雪娇,杨洪英,赵鹤飞,等. 铝电解槽集气结构的数值模拟研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7): 966-971,995.
(Li Xuejiao, Yang Hongying, Zhao Hefei, et al. Numerical simulation study on gas gathering structure of aluminum reduction cell[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(7): 966-971, 995.)

[3] 耿培久. 基于数值仿真开发的电解槽集气系统[J]. 有色冶金节能, 2022, (1): 36-38.
(Gen Peijiu. Electolytic cell off-gas collection system based of numerical simulation[J].
Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2022, (1): 36-38.)

[4] 李刚,谢青松,何飞,等.350 kA 电解槽烟道改造实践[J].资源信息与工程, 2021, 36(4):120-122.
(Li Gang, Xie Qinsong, HE Fei, et al. The duct reforming practice of 350 kA aluminum reduction cells[J]. Resource Information and Engineering, 2021, 36(4): 120-122.)

[5] Hongliang Zhang, Kena Sun, Jie Li, et al. Numerical simulation study on gas collecting system of 400 kA grade aluminum electrolytic cell[C], TMS, 2018, 573-586.

[6] 李刚,何飞,王怀江,等.350 kA 电解系列槽间排烟均匀性研究及实践[J].资源信息与工程, 2021,36(3):149-151.
(Li Gang, He Fei, Wang Huaijiang, et al. The research and practice of ventilation uniformity of cells in 350 kA potline[J]. Resource Information and Engineering, 2021, 36(3): 149-151.)

[7] Fuqiang Wang, Qinsong Zhang, Wei Liu, Zhaowen Wang. Development and application of a new combination of models to improve the uniformity of ventilation and exhaust in a 500 kA potline[J]. JOM, 2020, 72(5), 1961-1970.

[8] 胡红胜,周东方,宋海琛. 电解槽烟气流量平衡数值模拟与应用[J]. 轻金属, 2015,(5):23-26.
(Hu Hongsheng, Zhou Dongfang, Song Haichen. Numerical simulation and application of pot fume flow balance among pots[J]. Light Metals, 2015,(5):23-26.)

[9] 李雪娇,赵鹤飞,张国权.铝电解烟气净化系统减污降碳技术措施[J].轻金属,2024,(9):27-31.
(Li Xuejiao, Zhao Fefei, Zhang Guoquan. Technical measures for pollution reduction and carbon reduction of aluminum electrolysis flue gas purification system[J]. Light Metals, 2024, (9):27-31.)

[10] 黄卫平. 铝电解槽上部集气结构的密封保温改进措施[J]. 轻金属, 2014, (9): 47-52.
(Huang Weiping. Improvement measures for sealed heat insulation of pot upper gas collecting structure[J]. Light Metals, 2014,(9):47-52.)

[11] 陈丽新. 电解铝烟气净化系统节电技术分析[J]. 轻金属, 2022, (11): 25-29.
(CHen Lixin. Analysis on power saving technology of aluminum fume scrubbing process[J]. Light Metals, 2022, (11): 25-29.)

[12] 何智军, 陈金辉, 陆国磊. 铝电解生产中均衡调节电解槽负压的探索[J]. 有色冶金节能, 2019, (1): 29-33.
(He Zhijun, Chen Jinhui, Lu Guolei. Exploration on balance adjustment of negative pressure of electrolytic cell in aluminum electrolysis production[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2019, (1): 29-33.)

[13] 王尚元, 班允刚, 杨青辰, 等. NEUI 600 kA 级铝电解槽烟气流场测试与研究[J].有色冶金节能, 2021, (5): 13-17.
(Wang Shangyuan, Ban Yungang, Yang Qingchen, et al. Testing and research of off-gas flow field of NEUI 600 kA level aluminum electrolytic cell[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021, (5): 13-17.)

[14] 周锋,王怀江,李刚,等. 铝电解槽热平衡均匀性优化实践[J].有色冶金节能,2022, (4):33-36.
(Zhou Feng, Wang Huaijiang, Li Gang, et al. Optimization of the heat balance uniformity of aluminum electrolytic cells[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2022, (4): 33-36.)

[15] 杨光, 孙美佳, 李宝宽. 铝电解槽排烟管道风量调节数值模拟[J]. 轻金属, 2022, (6): 57-62.
(Yang Guang, Sun Meijia, Li Baokuan. Numerical simulation of air volume regulation in exhaust pipe of aluminum reduction cells[J]. Light Metals, 2022, (6): 57-62.)