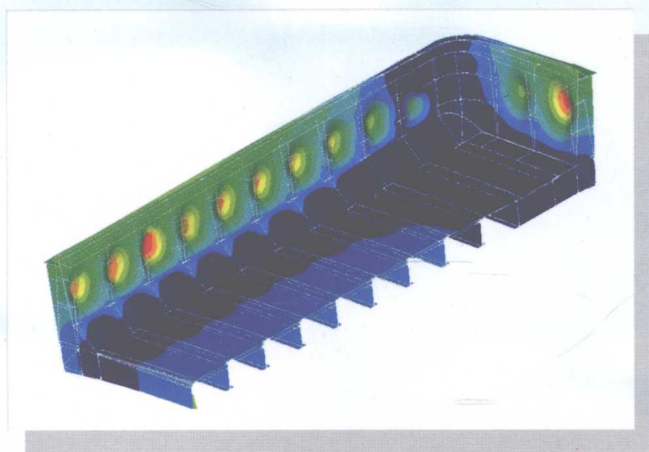


300kA 预焙阳极电解槽 槽寿命及其影响因素

任必军 戴松灵 著
陈世昌 石忠宁



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

300kA 预焙阳极电解槽 槽寿命及其影响因素

任必军 戴松灵 著
陈世昌 石忠宁

北 京

冶金工业出版社

2008

内 容 简 介

为了延长 300kA 大型槽的使用寿命和完善综合控制技术, 本书介绍和阐述了在伊川铝厂新建和电解槽大修及生产过程中研究开发的系列新技术。内容包括: 电解槽焙烧启动综合技术开发; 电解槽过热度控制技术; 侧部不停槽修复炉帮技术; 不同比例高石墨质阴极、全石墨化浸渍阴极硼化钛涂层等技术; 以过热度与氧化铝浓度控制为中心, 以零效应为目标的电解槽综合控制技术等。

本书可供铝电解生产管理人员、技术人员阅读, 也适合从事铝电解工业研究的工作人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

300kA 预焙阳极电解槽槽寿命及其影响因素/任必军等著.

—北京: 冶金工业出版社, 2008. 5

ISBN 978-7-5024-4497-6

I. 3… II. 任… III. 预焙阳极—预焙电解槽—寿命—研究 IV. TF821. 327

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 053996 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李培禄 王 楠 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4497-6

北京铁成印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 5 月第 1 版, 2008 年 5 月第 1 次印刷

148mm × 210mm; 7 印张; 204 千字; 210 页; 1-2500 册

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序 言

铝电解工业经过 100 多年的发展，技术创新不断进步，但是其基本原理仍然没有改变，电解质仍是 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 体系，阳极和阴极材料仍为炭素材料。现代大型铝电解槽电流强度越来越大，电解槽的各项生产指标均有很大的提高。

近几年来，我国电解铝工业发展迅猛，产能由 2001 年的 394.6 万 t 增加到 2006 年的 1200 万 t，产量则由 337.14 万 t 增加到 936 万 t，如此快速的发展得益于采用先进的铝电解装备和技术，同时大型预焙阳极电解槽及高效的计算机控制技术、新材料的使用满足了我国电解铝工业发展的需求，为我国铝工业的国际化奠定了坚实的基础。

近年来，世界铝电解技术围绕节能降耗、延长槽寿命等方面进行研究，在环境友好型、可持续性发展方面做文章。也正是在这样大好的环境下，伊川电力集团的电解铝产业得到快速的发展。伊川铝厂是我国第一个采用单系列 20 万 t 的 300kA 电解槽系列。目前，伊川铝厂已形成 60 万 t 的生产能力，积累了丰富的实践经验，开发了一系列铝电解新技术，取得了一定进展和成就。

任必军同志作为伊川电力集团总工程师，见证了伊川铝厂的成长过程，伊川铝厂做大做强凝聚了他的汗水和心血。他多年从事电解铝技术工作，并师从我国铝电解先驱、著名冶金学家、教

育家、中国工程院院士邱竹贤教授，攻读博士学位，本书既是他多年来从事铝电解的工作经历与经验总结，也是他攻读博士学位科研工作的应用成果。希望本书的出版能够促进我国铝工业技术进步与发展。



2007 年 12 月 6 日于伊川

目 录

1 绪论	1
1.1 铝电解工业大型槽现状	1
1.2 中国铝电解的特点及 300kA 电解槽与国外差距	3
1.3 SY300kA 电解槽的特点与应用	5
1.3.1 技术背景	5
1.3.2 成功应用企业介绍	6
1.3.3 SY300kA 电解槽设计特点	7
1.3.4 SY300kA 电解槽实际参数	9
1.4 伊川第二电解铝厂电解槽的改进	12
1.4.1 槽壳设计	12
1.4.2 电解厂房的通风模式	14
1.4.3 其他技术改动	19
1.5 未来 300kA 电解槽技术开发思路	19
1.5.1 电解槽电极新材料改进	19
1.5.2 综合控制技术	20
1.5.3 生产管理目标	20
1.5.4 技术开发措施	20
1.6 本书拟研究的内容	21
2 电解槽炉帮形成与碳化硅侧块破损	23
2.1 300kA 电解槽侧部炉帮形成仿真	23
2.2 碳化硅使用状况与优化	28
2.2.1 侵蚀状况	28
2.2.2 材料的优化	34
2.3 碳化硅侧块破损机理	34

2.3.1	电解质液-气界面氧化破损	34
2.3.2	电解质和铝液界面破损	35
2.4	工艺改进	37
2.4.1	过热度控制	37
2.4.2	解决阳极炭块掉渣问题和电解质中炭粒分离技术	37
2.4.3	电解槽内衬材料导热性能的检测	37
2.4.4	开发开槽阳极	38
2.4.5	优化焙烧启动技术与工艺	38
2.4.6	生产管理工艺	38
2.4.7	碳化硅侧块破损的标志	39
2.5	工业生产的对策与措施	39
2.5.1	操作工艺	39
2.5.2	300kA 电解槽侧部破损的维护	39
2.5.3	补救措施	40
2.6	炉帮形成的成功经验	40
2.7	本章小结	44
3	阴极破损机理与阴极新材料应用	45
3.1	电解槽早期破损分析	46
3.2	工业剖炉实验与破损机理分析	47
3.2.1	阴极炭块表面和横断面破损情形	47
3.2.2	破损阴极炭块局部分析	50
3.2.3	破损机理	52
3.3	阴极新材料的应用试验研究	56
3.3.1	不同类型的炭阴极材料的应用	57
3.3.2	不同类型硼化钛阴极涂层的试验	59
3.3.3	结果与讨论	61
3.4	阴极炭块的特性与国内外差距	67
3.5	技术经济分析	72
3.5.1	新大修槽阴极压降比较	72
3.5.2	建厂时原电解槽阴极压降	73

3.5.3 大修槽比较	74
3.6 延长槽寿命的措施	76
3.7 本章小结	78
4 铝用炭阳极新技术应用与降低炭耗	79
4.1 铝用阳极新技术	79
4.1.1 惰性阳极	79
4.1.2 阳极保温料	79
4.1.3 阳极开槽	81
4.2 阳极开槽试验	85
4.3 电解槽炭渣减少技术	89
4.3.1 技术措施	91
4.3.2 管理措施	91
4.3.3 具体操作措施	91
4.3.4 技术应用后的效果与分析	92
4.4 提高阳极周期生产实践	95
4.4.1 阳极消耗	95
4.4.2 阳极质量的提高	96
4.4.3 阳极炭块理化指标	100
4.5 本章小结	102
5 氧化铝含量控制理论	103
5.1 问题的提出	103
5.2 氧化铝的溶解过程	105
5.2.1 氧化铝的溶解速度	106
5.2.2 温度对氧化铝溶解速度的影响	107
5.2.3 试验室氧化铝的溶解过程	107
5.2.4 工业电解槽中氧化铝的溶解	109
5.3 氧化铝含量控制	111
5.3.1 槽温对氧化铝含量的影响	111
5.3.2 氧化铝含量的计算机控制	115

5.4	阳极效应与零效应控制	124
5.5	本章小结	128
6	氧化铝含量模糊控制技术	129
6.1	氧化铝含量控制技术	129
6.1.1	氧化铝含量控制模型	129
6.1.2	氧化铝含量控制策略	133
6.1.3	氧化铝含量控制实例	135
6.1.4	阳极效应控制	135
6.2	温度控制与分子比调整	137
6.3	槽噪声、针振、波动槽控制	137
6.3.1	电压针振自动识别原理	138
6.3.2	电解槽槽压波动自动处理	138
6.4	本章小结	140
7	300kA 电解槽过热度控制	141
7.1	过热度控制理论	141
7.1.1	过热度的意义	141
7.1.2	过热度控制方案	143
7.2	过热度控制数学模型	145
7.2.1	初晶温度的计算	145
7.2.2	过热度控制模型	146
7.3	过热度与炉帮的关系	149
7.3.1	电解槽能量的变化	149
7.3.2	过热度及炉帮的变化关系	151
7.4	国内外过热度控制应用实例及存在问题	154
7.5	过热度控制实践	157
7.5.1	阶段响应试验方法	159
7.5.2	模型优化及控制试验	163
7.5.3	试验结果	165
7.6	过热度寻优	168

7.7 本章小结	175
8 专家诊断与综合控制试验	176
8.1 电解生产数据的多维分析系统	176
8.1.1 在线分析处理	176
8.1.2 铝电解槽生产辅助分析系统	177
8.1.3 智能向导	177
8.1.4 维的设计	178
8.1.5 铝电解槽生产辅助分析	178
8.2 自适应模糊专家系统	183
8.2.1 模糊专家系统软件的开发	186
8.2.2 数据预处理模块开发	186
8.2.3 模糊专家系统 Feside 的特点	188
8.3 铝电解槽生产模糊专家规则库的自适应	189
8.4 综合控制技术试验情况	189
8.4.1 上海贺利氏电测骑士有限公司九区控制试验	190
8.4.2 北方工业大学专家诊断系统试验	192
8.4.3 沈阳院氧化铝浓度模糊控制	194
8.4.4 综合控制技术整合试验	196
8.5 本章小结	199
参考文献	200

1 绪 论

1.1 铝电解工业大型槽现状

铝电解工业经过 100 多年的发展,采用的电解质体系仍然没有改变,即 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 体系,阳极是炭素阳极,阴极几经改进,现在朝着全石墨化方向发展。现代大型铝电解槽电流越来越大,电解槽的各项指标均有很大的提高。世界铝电解技术近年发展方向和最新研究课题主要包括大电流、强化电流、增产节能、开槽阳极、惰性阳极、可湿润阴极、槽寿命、计算机控制、环境保护、综合利用、降低成本等。

2002 年全球生产原铝 2612 万 t, 160 ~ 300kA 容量的电解槽为主力槽型,其中中国生产原铝 433 万 t, 占全球原铝产量的 16.6%, 原铝产量继续位居世界第一位。中国 2002 年有 133 家电解铝厂, 规模在 100kt/a 以上的企业只有 10 家, 占总产量的 36.8%; 规模在 200kt/a 以上的铝厂只有青海铝厂、贵州铝厂和青铜峡铝厂; 平均规模在 31.8kt/a 以上的企业有 35 家, 平均规模在 30kt/a 以下的企业有 98 家。

西方发达国家的原铝生产主要集中于加拿大铝业公司、美国铝业公司、俄罗斯铝业公司、法国铝业公司、挪威海德鲁铝业公司等大型企业集团, 主要槽型为 AP18、AP21、AP30、Hydro23 和 CD200 等, 单系列产量为 100 ~ 250kt/a。中国加入 WTO 后, 电解铝工业进一步发展, 面临着做大做强机遇。为了增加企业的竞争能力, 需要建设一批技术起点高、装备先进、规模大的铝电解系列; 需要采用大型预焙阳极电解槽技术, 以满足中国电解铝工业全球发展战略的需求, 为中国铝工业的国际化奠定了坚实的基础。

20 世纪 90 年代, 建成的电解铝系列 (除中国外) 80% 采用了法国 Pechiney 公司的 AP30 技术, 特别是 300kA 预焙阳极电解槽几乎全部采用 AP30 技术, 电解铝单系列产能达到 250kt/a。Kvande^[1] 曾对 25

年来电解铝工业进行了总结与回顾。Alcoa P-225 电解槽到 1980 年已运行 10 年, 法国 Pechiney 280kA 电解槽于 1986 年启动, 1998 年 AP30 电解槽在加拿大运行的电流为 325kA。中国为 320kA, 俄罗斯为 255kA 和 300kA, 挪威 Hydro350kA 电解槽均是自己开发的电解铝技术。尽管 Alcoa 成功地试验 450kA 电解槽, 但尚未使用; 法国 Pechiney 400kA 电解槽于 1989~1993 年启动直至 1995 年, 2000 年电流达到 500kA^[2~12]。AP30 和 AP35 采用了开槽阳极、全石墨化阴极和新型过程控制系统^[13,14], 早在 20 多年前, 日本已将预焙槽每千克铝直流电耗降至 $12.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ^[15]。电流效率由 1980 年 93%~94% 提高至现在的 95%~96%, 槽寿命由 1500d 上升至 2000~2800d。惰性阳极、硼化钛涂层和低电压高寿命的阴极炭块将逐渐开始使用^[16,17]。过量 10%~12% 的氟化铝电解质仍将继续使用。

2001~2006 年, 中国电解铝工业发展迅猛, 产能由 2001 年 394.6 万 t 增加到 2006 年的 1200 万 t, 产量则由 337.14 万 t 增加到 936 万 t。由于国家宏观调控, 电解铝工业技术结构与企业结构进一步改善, 自焙槽全部关停, 新建电解铝均为大型预焙槽。2004 年底 10 万 t 产能以上的电解铝企业有 37 家, 产能合计 669 万 t/a, 20 万 t 产能以上有 11 家, 产能合计为 318 万 t^[18]。300kA 级电解槽目前已在中国铝电解工业占有主导地位, 自 1995~1996 年国家大型铝电解工业试验基地 280kA 电解槽试验成功以后, 相继在焦作 280kA 示范电解槽系列实际运用之后, 该技术得到进一步改进和完善。伊川铝厂是中国第一个采用单系列 20 万 t 300kA 电解槽系列的厂家。目前国内已有 280、300、320、350kA 电解系列数十家, 这些企业为提升中国铝电解技术水平做出了杰出贡献。1980~2000 年及 2020 年预测电解槽的技术参数详见表 1-1。

表 1-1 1980~2000 年及 2020 年霍尔-埃鲁法铝电解技术参数预测^[19]

Table 1-1 State-of-the-art of Hall-Heroult technology parameters from 1980 to 2000, and an attempted forecast for the 2020^[19]

电解槽参数	1980 年	2000 年	2020 年
系列电流/kA	225	325	500~600
槽电压/V	4.1	4.1	3.9~4.0

续表 1-1

电解槽参数	1980 年	2000 年	2020 年
电流效率/%	94.0	96.0	96.5 ~ 97.0
每千克铝能量消耗/kW · h	13.0	12.8	12.0 ~ 12.5
槽寿命/d	1500	2000 ~ 2800	3000
阳极电流密度/A · cm ⁻²	0.80	0.85	0.95

1.2 中国铝电解的特点及 300kA 电解槽与国外差距

中国大型预焙槽的设计由于使用物理仿真技术作为辅助设计工具,三场设计合理,电解槽运行平稳,但突出表现在阳极、氧化铝等原材料供应渠道多,质量不稳定。尽管砂状氧化铝质量好、溶解性能好、生产指标好,但电解铝厂对氧化铝原料的选择范围小,要稳定一个厂家氧化铝原料很难,国产氧化铝大都是中间状、粉状,被迫掺起来使用,因此不可能搅拌均匀,对电解槽的影响巨大。国内新上氧化铝厂,氧化铝中含 Na_2O 等杂质多或灼碱高,对电解槽影响很大。正因为如此,从某种意义上来说,中国的电解槽抗干扰能力强,对原料要求不苛刻。

另外,槽寿命低和阳极效应系数偏高是中国铝电解槽的最大缺点。目前世界上三类代表性电解技术的主要性能特征参数如表 1-2 所示。可以看出,国内大多数厂家达不到 94% ~ 96% 的电流效率,特别是原料、计算机控制、过热度控制等方面和国外还有较大差距,加之槽内衬如高石墨质或全石墨化阴极等新材料还没有普及,电流效率短时间(如几个月)达到 94% ~ 96% 是可能的,但要长期稳定在这个水平还需要做很多工作。实际上,中国电解槽电流效率一般为 92% ~ 94%。

表 1-2 世界上三类代表性电解技术的主要特征参数对比^[20~22]

Table 1-2 Three typical technologies of aluminum electrolysis

主要参数	北美技术	西欧和北欧技术	中国技术
电流效率/%	94	94 ~ 96	93 ~ 95
每千克铝直流电耗/kW · h	13.8 ~ 14.5	13.0 ~ 13.2	13.3 ~ 13.6

续表 1-2

主要参数	北美技术	西欧和北欧技术	中国技术
槽工作电压/V	4.3 ~ 4.4	4.05 ~ 4.15	4.12 ~ 4.18
阳极电流密度/ $A \cdot cm^{-2}$	0.8 ~ 0.9	0.76 ~ 0.82	0.70 ~ 0.73
每千克铝阳极净耗/kg	0.400 ~ 0.410	0.395 ~ 0.405	0.420 ~ 0.430
氟化铝过剩量/%	12 ~ 13	13	9 ~ 10
效应系数/次 $\cdot$ (槽 $\cdot$ 日) $^{-1}$	0.02 ~ 0.05	0.03	0.1 ~ 0.3
阴极炭块类别	无烟煤半石墨质 (10% ~ 30% 石墨)	石墨质或石墨化 (50% ~ 100% 石墨)	无烟煤半石墨质 (10% ~ 30% 石墨)
平均槽寿命/d	2000 ~ 2500	2000 ~ 2500	1500 ~ 1800
成本中的劳动费用	高 (占成本 18% ~ 20%)	中	低 (占成本 3% ~ 4%)
吨铝投资/美元	4000 ~ 5000	3500 ~ 4500	1500 ~ 1800

文献 [23] 对国内外 300kA 电解槽主要生产技术指标进行对比, 可以看出我国 300kA 电解槽和国外还有不少差距。表 1-3 列出了世界各铝业公司 300kA 电解槽的有关数据。姚世焕^[24]通过能量平衡分析, 对我国大型槽侧部结不成壳及 AP30、AP35、AP50 炉帮形状进行分析, 认为新的槽内衬设计和采取厂房强力通风措施是形成炉帮的关键。我国第一家使用 300kA 电解槽的伊川铝厂的综合控制技术代表我国 300kA 电解槽技术。2000 ~ 2005 年伊川铝厂在生产实践中总结出不少经验, 当电解质温度保持在 950℃ 左右, 分子比在 2.2 ~ 2.25 运行, 电流效率的确很高, 可稳定在 94% 以上, 但炉帮形成不好。当槽温稳定在 955 ~ 965℃, 分子比保持在 2.25 ~ 2.3, 过热度为 6 ~ 10℃, 电解槽炉帮形成较好, 电流效率可达 92% ~ 94%, 从而可实现电解槽长周期运行。但和国外相比, 主要在原料氧化铝、炭块质量方面还有不少差距, 在计算机控制、过热度控制以及槽内衬新材料使用等方面还要进一步加大研发力度, 以期真正达到国际先进水平。

表 1-3 世界各铝业公司 300kA 电解槽的有关数据^[24]

Table 1-3 Parameter of some reduction cells in different aluminum companies

企 业	生产电流 /kA	产量(系列) /kt	电流效率 /%	吨铝直流电耗 /kW·h	吨铝净炭耗 /kg	槽寿命 /月
加 铝	300	240	93	14.2	425	
美 铝	300	180	93.5~95	13.7~14.1	415~425	60~72
法国 Pechiney	300	240	94~95	13.3~13.5	410~420	72~96
伊川铝厂	300	200	92~93.5	13.5~13.7	410~420	60~70

1.3 SY300kA 电解槽的特点与应用

1.3.1 技术背景

我国在 20 世纪 70 年代末, 开创了大型预焙阳极电解槽生产的历史; 在 90 年代, 应用先进的数学模型和设计软件, 成功地解决了电解槽生产过程中的磁流体稳定性问题、热平衡问题和槽壳受力变形问题, 开发出 SY 系列大型预焙阳极电解槽, 即 SY160/170、SY190/200、SY230/240。经过生产实践证明, SY 系列电解槽具有合理的母线配置、较好的磁流体稳定性、良好的热平稳、合理的槽壳结构、结构简单的传动系统和智能多模式槽控系统等特点。

2000 年, 为了满足中国铝工业快速发展的需要, 沈阳铝镁设计研究院在总结 SY 系列电解槽成功经验的基础上, 应用先进成熟的数学模型和工程软件, 开发了 300kA (SY300) 级预焙阳极电解槽技术, 可满足规模为 200~250kt/a 电解系列建设的需要。

从 2001 年起, 一批采用 SY300kA 预焙阳极电解槽技术的电解系列陆续开工建设。2002 年 6 月 16 日, 河南豫港龙泉铝业有限公司的电解系列 (200kt/a) 率先投入生产, 11 月 21 日, 256 台 SY300kA 预焙阳极电解槽全部投入生产, 这是我国第一个投入商业运行的 300kA 级电解系列, 也是目前我国已投产的产能最大的电解系列之一。经过 4 年多的运行, 实践证明, SY300kA 预焙阳极电解槽运行平稳, 侧部炉帮稳固而坚实, 整个阴极底部平整, 主要技术经济指标达到设计值, 达到世界先进水平^[24,25]。

1.3.2 成功应用企业介绍

伊川铝厂是第一家使用 300kA 电解槽的国内铝厂, 该厂自 2002 年 6 月 16 日投产以来, 已完好运行 5 年, 伊川第二铝厂 300kA 电解槽也于 2006 年 2 月 24 日全部投产。伊川第一铝厂 2001 年 6 月开工建设, 2002 年 6 月 16 日投产, 创造了一年基建安装完成 20 万 t 铝厂的奇迹。伊川第一铝厂创造了一个系列 20 万 t 256 台 SY300kA 电解槽 (2002 年 6 月 16 日 ~ 11 月 21 日) 159 天全部投产的奇迹。伊川第二铝厂于 2003 年 11 月底至 2004 年 8 月共 9 个月时间完成基建安装等工作, 具备投产条件。2004 年 10 月至 2005 年 6 月顺利完成 14 万 t 启动工作, 2006 年 2 月 24 日形成 40 万 t 电解生产能力, 2007 年 5 月启动第三铝厂, 已完成 60 万 t 的生产能力。伊川铝厂从零开始, 不到 5 年时间, 打造了一个由 2 个系列 514 台 300kA 电解槽组成的年产达到 40 万 t 并具有国际先进水平的电解铝厂, 不仅在中国、亚洲, 而且在世界, 均创造了铝电解工业的奇迹。

图 1-1 所示为豫港龙泉铝业公司的部分厂貌。图 1-2、图 1-3 分别所示为伊川铝厂第一个和第二个 SY300kA 电解槽生产现场。目前, 伊川铝厂已形成年产 60 万 t 的生产能力, 积累了丰富的实践经验, 开发了一系列铝电解新技术, 为中国铝电解工业做出了一定的贡献。因此, 伊川 300kA 电解槽技术在某种意义上代表了中国 300kA 电解槽技术, 主要表现在该类电解槽适合各种氧化铝原料, 实际电流效率 92% ~ 93%, 和国外相差 2% ~ 3%; 槽寿命预计可达到 2000d 以上,



图 1-1 龙泉铝业公司

Fig. 1-1 Developing state of Longquan Aluminum Company

和国外的 2500 ~ 3000d 还有相当大的差距。

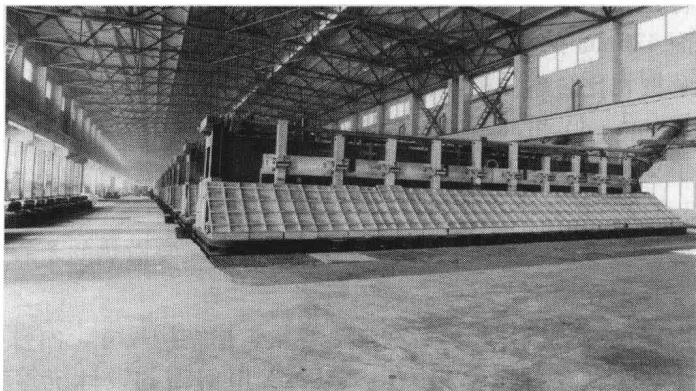


图 1-2 第一个 SY300kA 电解槽在伊川铝厂正常生产运行
Fig. 1-2 Reduction cells of SY300kA in Yichuan the first smelter

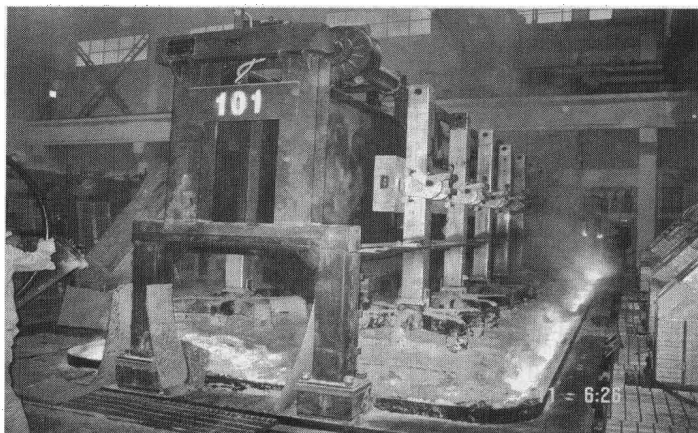


图 1-3 伊川第二个 SY300kA 电解槽系列启动现场
Fig. 1-3 Startup of the SY300kA reduction cell in Yichuan the second smelter

1.3.3 SY300kA 电解槽设计特点

1.3.3.1 窄加工面技术

采用窄加工面是现代大型中间下料预焙槽的一个显著特点，其优