

有色金属行业职业技能培训丛书

铝电解技术问答

杨昇 杨冠群 编著



冶金工业出版社

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

有色金属行业职业技能培训丛书

铝电解技术问答

杨 昇 杨冠群 编著

北 京

冶金工业出版社

2009

内 容 提 要

本书以问答的方式将最新的铝电解生产控制理念、方法和手段介绍给读者,所介绍的内容涉及铝电解生产过程的各主要环节。主要包括:铝电解基本原理,铝电解原材料及能源,现代预焙铝电解槽结构,大型预焙槽的阳极,预焙铝电解槽的预热焙烧与启动,铝电解槽的常规操作,铝电解槽非正常期生产管理,铝电解槽正常生产管理,预焙铝电解槽病槽及防治,铝电解槽阴极内衬破损及对策,铝电解生产中的常规测量,铝电解的计算机控制,铝电解的电流效率,铝电解的电能消耗和能量平衡,铝电解槽烟气净化及原料输送,铝及铝合金的熔炼和铸锭,铝电解产品质量及检测,铝电解厂的环境保护,铝电解生产指标、成本及发展方向。

本书可作为铝电解厂技工、技师及现场生产管理人员的技术培训教材及自学参考书,也可作为职专及高等院校相关专业师生下厂实习的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

铝电解技术问答/杨昇,杨冠群编著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 5

(有色金属行业职业技能培训丛书)

ISBN 978-7-5024-4919-3

I. 铝… II. ①杨… ②杨… III. 氧化铝电解—技术培训—问答 IV. TF821.032.7-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 061957 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 张熙莹 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 白 迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4919-3

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 5 月第 1 版, 2009 年 5 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 17.75 印张; 426 千字; 267 页; 1-3000 册

39.00 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)

前 言

我国电解铝产量从1997年的2180kt到2007年的12560kt, 10年增长了近4.8倍。我国铝电解用大型预焙槽, 从无到有, 到全行业淘汰自焙槽全部采用大型预焙槽, 只花了短短20年时间。我国电解铝生产规模的扩大, 技术和装备水平的提高, 其速度举世无双。随着电解铝工业的飞速发展, 在职工队伍中形成了一支庞大的新军, 这是一支最有生命力的队伍, 但他们也最需要学习铝电解基本知识, 掌握铝电解最新技术。这支队伍急需通过各种培训, 用现代科学知识武装自己, 不断提高技术水平, 适应新形势的要求。他们希望能获得更多合适的教材或参考资料。在这种形势下, 编者应冶金工业出版社之邀, 编写了本书。

本书所介绍的内容涉及铝电解生产过程的各主要环节, 介绍了最新的铝电解生产控制理念、方法和手段。

本书尽可能突出铝电解技术发展的前沿性, 反映铝电解生产的新理论、新工艺和新流程。内容力求系统全面, 但叙述尽可能深入浅出, 通俗易懂, 让具有初中以上文化基础的工人能够接受, 通过自学能够基本掌握。本书的编写方式采用问答形式, 目的是希望它既是一本参考书, 也是一本工具书, 便于自学者有的放矢地查阅所需要的相关知识。

本书主要作为铝电解厂技工、技师及现场生产管理人员的技术培训教材及自学参考书, 也可作为职专及高等院校相关专业师生下厂实习的参考资料。因此, 不同于偏重理论的高等院校本科生或研究生教材, 也有别于纯实践性的操作规程, 而是力图理论与实践的紧密结合。

由于编者水平有限, 书中不足之处敬请读者批评指正。

编 者

2009年2月28日

目 录

第一章 铝电解基本原理

1. 什么是铝？	1
2. 铝的冶炼技术经历了怎样的发展过程？	1
3. 什么是冰晶石？	3
4. 铝电解为什么用冰晶石和氟化物作电解质，电解质具备哪些基本性质？	3
5. 什么是电解质的酸碱度？	4
6. 怎样测定电解质的酸碱度？	5
7. 什么是电解质的初晶温度，它对铝电解过程有何重要意义？	6
8. 电解质初晶温度主要受哪些因素影响？	7
9. 怎样测定电解质初晶温度？	7
10. 什么是电解质的密度，它在铝电解生产中有何重要意义？	8
11. 影响电解质密度的主要因素有哪些？	8
12. 怎样测定电解质的密度？	9
13. 什么是电解质的电导率，它在铝电解生产中有何重要意义？	9
14. 影响电解质电导率有哪些主要因素？	10
15. 怎样测定电解质的电导率？	11
16. 什么是电解质的黏度，它在铝电解生产中有何重要意义？	11
17. 电解质的黏度主要受哪些因素影响？	11
18. 什么是电解质的表面性质，它在铝电解生产中有何重要意义？	12
19. 影响电解质表面性质的主要因素有哪些？	13
20. 什么是电解质的挥发性，它主要受哪些因素的影响？	13
21. 工业铝电解槽的电解质主要由哪些物质组成，各组成成分主要起什么作用？	14
22. 铝电解的基本过程是怎样的？	15
23. 阴极过程主要发生怎样的反应？	16
24. 阴极上还可能发生哪些副反应，它们有何危害？	16
25. 阳极过程主要发生怎样的反应？	18
26. 阳极上还可能发生哪些副反应？	18
27. 什么是阳极效应，它有什么宏观表现？	19
28. 阳极效应对铝电解生产过程有什么影响？	20
29. 阳极效应发生的机理怎样？	20
30. 怎样才能熄灭阳极效应？	22

第二章 铝电解原材料及能源

31. 现代铝电解生产工艺采用怎样的基本流程, 生产过程中需消耗哪些原材料?	23
32. 什么是氧化铝?	24
33. 氧化铝是怎样获得的?	24
34. 我国和世界生产的铝需消耗多少氧化铝?	25
35. 地球上的铝资源多吗, 能满足人类的需求吗?	25
36. 铝电解对氧化铝的化学纯度有什么要求, 为什么?	26
37. 铝电解对氧化铝的物理性能有什么要求?	27
38. 怎样测定氧化铝的安息角?	28
39. 怎样测定氧化铝的真密度?	29
40. 怎样测定氧化铝的松装密度?	29
41. 怎样做氧化铝的粒度筛分测定?	30
42. 怎样测定氧化铝的磨损指数?	31
43. 铝电解用冰晶石是怎样获得的, 对它有怎样的质量要求?	31
44. 铝电解用氟化铝是怎样获得的, 对它有什么质量要求?	32
45. 对铝电解所需的其他氟化物的质量有什么要求?	33
46. 铝电解对能源条件有什么要求?	34
47. 怎样获得电解槽上所用的低压直流电?	35

第三章 现代预焙铝电解槽结构

48. 预焙铝电解槽结构大体包括哪些部分?	37
49. 预焙铝电解槽的阴极结构由哪几部分组成?	37
50. 预焙铝电解槽槽壳的作用和结构怎样?	38
51. 预焙铝电解槽有怎样的底部内衬结构?	39
52. 预焙铝电解槽底部内衬所用各种材料有什么质量要求?	40
53. 预焙铝电解槽侧部内衬是什么样的结构, 各有何优缺点?	42
54. 预焙铝电解槽的阴极炭块组是什么样的结构?	42
55. 怎样选择预焙铝电解槽阴极炭块的材料?	43
56. 预焙槽用阴极扎糊有什么样的技术要求?	45
57. 预焙铝电解槽上部结构主要由哪些部分组成?	45
58. 铝电解过程中会产生多少烟气需要排烟装置处理?	47
59. 预焙阳极铝电解槽排烟装置的排烟量如何计算?	49
60. 预焙铝电解槽有什么样的母线结构?	49
61. 铝电解车间及预焙铝电解槽在哪些部位设置了电气绝缘, 绝缘要求怎样?	50

第四章 大型预焙槽的阳极

62. 预焙铝电解槽使用怎样的阳极?	52
63. 炭素材料基本的宏观结构性质有哪些, 它们如何测定?	53

64. 炭素材料的基本力学性质有哪些, 它们如何测定?	55
65. 炭素材料的基本热学性质有哪些, 它们如何测定?	56
66. 炭素材料基本电磁学性质有哪些, 它们如何测定?	57
67. 炭素材料的重要化学性质有哪些?	58
68. 生产预焙阳极时常用哪些原料作骨料和粉料, 对其有何质量要求?	58
69. 生产预焙阳极时所用黏结剂是什么, 对其有何质量要求?	60
70. 预焙阳极炭块经过怎样的生产流程, 各主要工序的作用和注意事项是什么?	61
71. 对预焙阳极炭块的理化指标有些什么要求?	64
72. 预焙阳极炭块怎样组装成阳极组?	66
73. 对预焙阳极炭块及阳极组的外观性质有什么要求?	67

第五章 预焙铝电解槽的预热焙烧与启动

74. 铝电解槽预热焙烧的目的和要求是什么?	69
75. 目前预焙铝电解槽的预热焙烧方法有哪几种?	69
76. 什么是铝液焙烧法, 它有何优缺点?	69
77. 什么是焦粒焙烧法, 它有何优缺点?	70
78. 什么是石墨粉焙烧法, 它有何优缺点?	71
79. 什么是燃料焙烧法, 它有何优缺点?	72
80. 新建系列电解槽预热焙烧前应具备哪些条件?	73
81. 电解槽的验收及生产交接应把握哪些环节?	73
82. 怎样进行短路试验?	74
83. 预焙槽焦粒焙烧启动的管理流程是怎样的?	75
84. 预焙槽焦粒焙烧通电前有哪些准备工作?	76
85. 预焙槽焦粒焙烧通电后有哪些操作程序?	77
86. 焦粒焙烧作业有些什么注意事项?	78
87. 怎样预防和处理焦粒焙烧中的异常情况?	79
88. 什么是预焙槽的干法启动?	80
89. 什么是预焙槽的湿法启动?	81
90. 预焙铝电解槽启动作业有哪些操作步骤及注意事项?	81
91. 什么是铝电解槽二次启动?	83
92. 新电解槽焙烧启动常会出现什么故障, 怎样处理?	83

第六章 铝电解槽的常规操作

93. 预焙铝电解槽常规操作主要包括哪些内容?	86
94. 怎样计算阳极更换周期?	86
95. 如何确定阳极更换顺序?	87
96. 更换阳极应遵守怎样的操作程序?	88
97. 高残极及脱落极如何处理?	90
98. 预焙铝电解槽出铝经过哪些作业步骤?	91

99. 预焙铝电解槽出铝有些什么注意事项?	91
100. 怎样识别阳极效应即将发生或正在发生?	92
101. 阳极效应对铝电解过程有何利弊?	92
102. 熄灭阳极效应应遵守怎样的操作程序?	93
103. 怎样调整异常电压?	94
104. 怎样计算抬母线周期?	95
105. 怎样进行抬母线操作?	96
106. 抬母线作业要注意哪些事项?	96
107. 什么是三点测量作业, 它有何优缺点?	97
108. 怎样进行预焙铝电解槽扎边部作业?	98
109. 预焙铝电解槽的炭渣是怎样形成的, 为什么要捞炭渣?	98
110. 怎样完成捞炭渣作业?	99
111. 预焙槽下料异常如何处理?	99
112. 短路口什么时候要进行断开或短路操作, 怎样进行?	100
113. 停槽作业须遵守怎样的操作规程?	101

第七章 铝电解槽非正常期生产管理

114. 什么是铝电解槽非正常期生产管理?	103
115. 铝电解槽启动初期的技术条件如何控制?	103
116. 铝电解槽启动初期的管理须注意哪些事项?	104
117. 铝电解槽启动后期管理的主要目的是什么?	105
118. 启动后期如何控制电解质高度?	105
119. 启动后期如何控制电解质成分?	106
120. 当需要时怎样用 NaF 或 Na_2CO_3 提高电解质摩尔比?	107
121. 启动后期如何控制铝液高度?	108
122. 启动后期如何进行电压管理?	109
123. 启动后期如何控制效应系数?	110
124. 启动后期为什么要建立槽膛, 要建立什么样的槽膛?	110
125. 铝电解槽的正常槽膛是怎样形成的, 建立槽膛过程应注意什么?	111
126. 以焦粒焙烧为例, 整个焙烧启动阶段全过程是怎样的?	112

第八章 铝电解槽正常生产管理

127. 预焙铝电解槽正常生产管理主要包括哪些内容?	114
128. 什么是铝电解槽的槽电压, 它受哪些因素影响?	114
129. 槽电压管理中通常有哪些表示电压的量, 它们各有什么不同的含义?	115
130. 怎样进行槽电压的管理?	116
131. 怎样计算铝电解槽 Al_2O_3 的加入量?	117
132. 怎样计算定容下料器的下料间隔?	118
133. 怎样进行加料管理?	118

134. 电解质水平如何控制和调整?	119
135. 生产过程中电解质成分经常会发生什么样的变化?	121
136. 当需要用 AlF_3 降低电解质的摩尔比时, 怎样计算 AlF_3 的加入量?	121
137. 如何进行电解质成分的管理?	122
138. 铝电解生产中铝液高度管理有何重要意义?	123
139. 铝水平如何控制和调整?	123
140. 出铝量管理应遵循哪些原则?	124
141. 确定出铝指示量有哪些方法?	125
142. 什么是平滑处理和铝液有效值法?	125
143. 传统方法与铝液有效值法各有什么优缺点?	126
144. 极上保温料的作用是什么, 怎样控制极上保温料的厚度?	127
145. 阳极效应对电解槽运行有什么影响, 怎样实行效应管理?	127
146. 铝电解槽正常生产时有哪些主要特征?	128
147. 预焙铝电解槽正常生产应保持什么样的技术条件?	128

第九章 预焙铝电解槽病槽及防治

148. 预焙铝电解槽生产过程为什么会出现病槽?	130
149. 电解槽为何发生针振, 针振有何危害, 如何处理?	130
150. 什么是电解槽的冷行程, 它有些什么样的表征?	132
151. 铝电解槽出现冷行程应该怎样处理?	133
152. 什么是电解槽的热行程, 它有些什么样的表征?	133
153. 铝电解槽出现热行程应该怎样处理?	134
154. 当电解槽氧化铝加料不足时会发生什么样的现象, 怎样处理?	135
155. 当向电解槽投入的氧化铝过剩时会有什么现象, 如何处理?	136
156. 电解质含炭如何处理?	136
157. 什么是阳极长包?	137
158. 什么情况下会发生阳极长包?	138
159. 发生了阳极长包怎么办?	138
160. 什么情况下会发生阳极多组脱落?	139
161. 发生阳极脱落时如何处理?	139
162. 什么是滚铝?	140
163. 什么情况下有可能发生滚铝?	140
164. 如何预防滚铝的发生, 一旦发生滚铝如何处理?	141
165. 什么情况下有可能发生漏炉事故, 如何处理?	142
166. 什么情况下有可能发生难灭效应等异常效应, 如何处理?	143
167. 停动力电、直流电及停风时如何处理?	144
168. 破损槽和老龄槽如何管理?	145
169. 怎样预防病槽的发生?	145
170. 预焙铝电解槽操作管理中有可能发生哪些事故, 如何处理?	146

171. 预焙铝电解槽较常见的设备事故有哪些, 如何预防?	147
-------------------------------------	-----

第十章 铝电解槽阴极内衬破损及对策

172. 延长铝电解槽使用寿命有何重要意义?	148
173. 铝电解槽常见的阴极内衬破损有哪几种类型?	148
174. 铝电解槽为什么会发生炉底隆起现象, 它有什么危害?	148
175. 阴极炭块断裂现象有何规律, 它会有什么严重后果?	149
176. 阴极炭块在什么情况下形成冲蚀坑或出现层状剥离现象?	149
177. 阴极扎糊常会出现怎样的破损现象, 它们是怎样引起的?	150
178. 侧部炭块破损现象是怎样发生的?	150
179. 阴极材料的热膨胀特性对阴极内衬破损有什么影响?	150
180. 钠对阴极材料有什么样的破坏作用?	151
181. 电解质及铝液的渗透对阴极内衬破损有什么影响?	151
182. 电化学腐蚀是怎样加剧阴极内衬破损的?	152
183. 空气氧化对阴极内衬破损有什么影响?	152
184. 内衬材料质量与阴极内衬破损有什么关系?	153
185. 阴极内衬砌筑质量与破损有什么关系?	153
186. 铝电解槽的预热焙烧启动及操作管理与阴极内衬破损有什么关系?	153
187. 有哪些措施能延长铝电解槽阴极内衬使用寿命?	154
188. 如何识别和确认电解槽阴极内衬是否破损?	156
189. 怎样进行破损部位的修补?	157
190. 阴极内衬已破损的电解槽如何维护?	157
191. 什么是铝电解槽的就地大修技术?	157
192. 什么是铝电解槽的易地大修技术?	158

第十一章 铝电解生产中的常规测量

193. 铝电解生产过程中的常规测量有些什么项目?	160
194. 怎样测量预焙槽阳极电流分布?	160
195. 怎样测量铝液和电解质高度?	161
196. 怎样测量阴极电流分布?	162
197. 怎样测量电解质温度?	162
198. 怎样测量阴极钢棒、炉底钢板、侧部槽壳的温度?	163
199. 怎样测量极距?	164
200. 怎样测量极上保温料厚度?	164
201. 怎样探测铝电解槽的炉底隆起状况?	165
202. 怎样探测铝电解槽的炉膛形状?	166
203. 怎样测量铝电解槽的槽底电压降?	167
204. 怎样测量槽壳变形情况?	168
205. 怎样测量压接部位电压降?	168

206. 怎样测量残阳极形状?	169
207. 怎样进行电解槽磁场测量?	169

第十二章 铝电解的计算机控制

208. 计算机控制在现代铝电解生产中有何重要意义?	171
209. 铝电解厂一般采用怎样的计算机控制系统配置?	171
210. 铝电解的槽控箱由哪几部分组成?	172
211. 在铝电解厂, 电解槽的计算机控制主要包括哪些内容?	172
212. 槽控箱的现场操作有哪些内容?	173
213. 怎样实现槽电压的计算机控制?	174
214. 怎样实施计算机对铝电解槽的加料控制?	175
215. 铝电解槽的传统加料模式有什么缺陷?	176
216. 铝电解槽加料量自适应控制的基本原理是什么?	176
217. 怎样实现计算机对铝电解槽加料量自适应控制?	177
218. 怎样实施出铝时的计算机控制?	178
219. 怎样实施阳极交换和扎边部时的计算机控制?	178
220. 怎样实施抬阳极母线时的计算机控制?	178
221. 怎样实现现场操作与计算机的联系?	179
222. 能从计算机获得哪些信息报表?	179
223. 怎样分析和利用计算机提供的信息?	180

第十三章 铝电解的电流效率

224. 什么是法拉第电解定律?	181
225. 什么是电化当量, 它通常有哪些表示方法?	181
226. 怎样计算理论上的产铝量?	182
227. 什么叫铝电解的电流效率?	182
228. 怎样用简单盘存法测定电流效率?	183
229. 怎样用稀释法测定电流效率?	184
230. 怎样用气体分析法测定电流效率?	185
231. 怎样用氧化铝的消耗近似估算电解槽的电流效率?	186
232. 电流效率对生产效益有何影响?	187
233. 伴随铝电解过程的哪些因素会引起电流效率的降低?	187
234. 铝的溶解是怎样降低电流效率的?	188
235. 高价离子不完全放电是怎样降低电流效率的?	189
236. 钠离子放电是怎样降低电流效率的, 怎样防止或减少钠离子放电?	190
237. 电磁现象对电流效率有怎样的影响?	190
238. 电解温度怎样影响电流效率?	191
239. 电解质成分怎样影响电流效率?	192
240. 阴、阳极电流密度对电流效率有何影响?	193

241. 铝水平和电解质水平对电流效率有何影响?	193
242. 极间距离对电流效率有何影响?	194
243. 为了提高电流效率, 除上述因素外, 还应注意哪些事项?	194

第十四章 铝电解的电能消耗和能量平衡

244. 什么是铝电解的电能效率?	196
245. 什么是铝电解的理论电耗率?	197
246. 怎样计算电解槽的实际电耗率?	198
247. 从降低能耗的角度, 怎样分析槽电压的组成?	198
248. 怎样测试铝电解槽的电压平衡?	199
249. 能量平衡对铝电解过程有何重要意义?	200
250. 怎样测试和计算铝电解槽的能量平衡?	200
251. 如何计算将反应物加热至电解温度理论上所需能量?	202
252. 如何计算电解反应理论上所需的能量?	203
253. 怎样建立铝电解槽能量平衡方程?	204
254. 铝电解槽通过哪些途径发生热量损失?	205
255. 通过哪些途径可以降低铝电解的电能消耗?	205

第十五章 铝电解槽烟气净化及原料输送

256. 铝电解槽烟气主要含有哪些有害物质?	208
257. 铝电解槽烟气中的有害物质是怎样产生的?	208
258. 什么是铝电解烟气的湿法净化, 它有何优缺点?	209
259. 什么是铝电解烟气的干法净化, 它有何优缺点?	209
260. Al_2O_3 对 HF 的吸附原理怎样, 如何提高吸附效率?	210
261. 烟气干法净化工艺设备配置主要包括哪些部分?	211
262. 烟气干法净化如何保证烟气捕集率?	211
263. 烟气干法净化如何提高烟气净化率?	212
264. 先进的原料输送技术对现代铝电解厂有何重要意义?	212
265. 原料输送方法如何分类, 它们各有何特点?	212
266. 稀相输送的原理和特点怎样?	213
267. 浓相输送的原理和特点怎样?	213
268. 浓相输送的工艺装备如何配置?	214
269. 超浓相输送的原理和特点怎样?	215
270. 超浓相输送的工艺装备如何配置?	215

第十六章 铝及铝合金的熔炼和铸造

271. 铝及铝合金主要有哪些物理化学性质及用途?	216
272. 铝及铝合金怎样分类?	217
273. 铝及铝合金经历怎样的生产工艺流程?	218

274. 铝及铝合金为什么需要经过熔炼?	219
275. 铝熔体主要含有哪些杂质, 这些杂质来源怎样?	219
276. 铝及铝合金熔炼常用的铸造炉有哪几种?	220
277. 熔剂在铝及铝合金熔炼中起何作用, 如何分类?	222
278. 铝熔体经过怎样的熔炼过程?	222
279. 怎样进行熔体成分的调整?	223
280. 合金熔炼时, 怎样进行易烧损合金元素的添加?	223
281. 怎样配制含高熔点或高密度成分的铝合金?	224
282. 怎样测量熔体的含氢量?	225
283. 怎样进行熔体的净化, 常用的净化方法有哪些?	226
284. 为什么要细化铸造产品的晶粒, 怎样实现晶粒细化?	227
285. 铝及铝合金常用的铸造方法有哪些?	228
286. 怎样进行重熔用铝锭铸造?	228
287. 怎样进行垂直铸造?	230
288. 怎样进行水平铸造?	231
289. 怎样进行连铸连轧?	232
290. 铸造产品常见的表面质量缺陷有哪些, 如何处理?	233
291. 铸造产品常见的内部质量缺陷有哪些, 如何防止?	234

第十七章 铝电解产品质量及检测

292. 什么是质量?	236
293. 什么是质量管理和全面质量管理?	236
294. 什么是现场质量管理的概念?	236
295. 什么是标准化, 它与质量有什么关系?	237
296. 质量管理要遵循哪些原则?	237
297. 怎样进行质量认证?	238
298. 什么是质量检验?	239
299. 对铝电解产品有什么质量要求?	239
300. 原铝中主要杂质及杂质来源怎样?	240
301. 怎样保证原铝质量?	241
302. 怎样在预焙槽上生产高级原铝?	242
303. 怎样测定原铝中的硅?	243
304. 怎样测定原铝中的铁?	244
305. 怎样测定原铝中的铜?	244
306. 怎样测定原铝中的钛?	244
307. 怎样测定原铝中的镁?	245
308. 怎样测定原铝中的锌?	245
309. 怎样测定原铝中的锰?	245

第十八章 铝电解厂的环境保护

310. 铝电解行业强调环境保护有何重要意义?	246
311. 我国近年来有哪些关于电解铝节能减排、加强环境保护的法令、法规?	246
312. 我国对电解铝污染物排放标准有何规定?	248
313. 我国铝电解排放标准与国际先进水平相比有何差别?	250
314. 铝电解厂生产过程中大气污染物主要来自哪里?	250
315. 铝电解厂大气污染物主要有哪些成分, 大致含量怎样?	251
316. 铝电解厂大气污染如何防治?	251
317. 铝电解厂物料储运及其他工序粉尘污染如何防治?	252
318. 铝电解槽大修废渣对环境有何危害?	253
319. 铝电解槽大修废渣怎样治理和综合利用?	254
320. 铝电解厂废水有些什么污染源, 如何控制?	254
321. 电解铝厂要有怎样的消防措施?	255
322. 铝电解厂存在哪些不安全因素, 如何防范?	256
323. 铝电解厂对噪声、粉尘、余热、有害气体等应有哪些卫生措施?	257

第十九章 铝电解生产指标、成本及发展方向

324. 我国电解铝厂建设投资水平大致如何?	259
325. 我国电解铝厂建设投资与国外比较有何差别?	260
326. 我国电解铝生产成本构成和分配情况怎样?	260
327. 与国外重要铝企业相比, 国内外技术经济指标有何差别?	262
328. 国内外铝电解技术的最新发展方向如何?	264
参考文献	267

第一章 铝电解基本原理

1. 什么是铝?

目前,世界上已被发现的元素有 107 种,根据其导电性等一系列物理和化学性能,被分为金属和非金属。铝 (Al) 属于金属元素。

金属元素根据其自然光泽可分为黑色金属和有色金属,铝是一种具有银白色光泽的有色金属。

有色金属可按其密度分为重金属和轻金属,密度大于 5.0g/cm^3 的称为重金属,密度小于 5.0g/cm^3 的称为轻金属。铝在 20°C 时的密度为 2.69g/cm^3 ,属于轻金属。除铝以外,还有锂 (Li)、钠 (Na)、钾 (K)、铷 (Rb)、铯 (Cs)、铍 (Be)、镁 (Mg)、钙 (Ca)、锶 (Sr)、钡 (Ba)、钛 (Ti) 等十几种金属属于轻金属。硅 (Si) 是一种半导体,或称半金属,就其密度而言 (室温下为 2.34g/cm^3),也属于轻金属的范畴。

铝在门捷列夫元素周期表中的原子序数为 13,处于第 3 周期第 3 主族。铝原子核内有 13 个质子和 14 个中子,相对原子质量为 26.98154;原子核外有 13 个电子,分 3 层排列,第一层 2 个电子;第二层共 8 个电子,分两个亚层,第一亚层 2 个电子,第二亚层 6 个电子;第三层共 3 个电子,也分两个亚层,第一亚层 2 个电子,第二亚层 1 个电子。铝原子的电子层结构可以表示为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ 。铝原子容易失去最外层的 3 个电子而成为正 3 价的离子,有时也能失去 $3p$ 上的 1 个电子而形成正 1 价的离子。

铝的氧化物具有酸、碱两性,它与强碱反应生成铝酸盐而呈酸性,与强酸反应生成铝盐而呈碱性。

2. 铝的冶炼技术经历了怎样的发展过程?

1746 年波特 (Pott) 从明矾中制取了纯的氧化铝。1807 年,英国的达维 (H. Davy) 试图用电解法从氧化铝中分离出金属铝,未获成功。1825 年,丹麦的奥尔斯特德 (H. C. Oersted) 用化学法制取金属铝,他将 AlCl_3 与钾汞齐反应,获得了铝汞齐,铝汞齐在真空条件下蒸馏分离,制得了金属铝。1827 年,德国的韦勒 (Wohler) 通过加热钾和无水氯化铝的混合物得到少量的灰色金属铝粉末;1845 年,他把氯化铝气体通过熔融的金属钾表面,得到金属铝珠,并初步测定了铝的一些物理和化学性能。

1854 年,法国人戴维尔 (Deville) 采用钠代替比钠更为昂贵的钾作为还原剂,还原 AlCl_3 ,并于 1855 年实现商业化。戴维尔在改进该方法的过程中,在 NaAlCl_4 熔剂里加入了氟化钙 (CaF_2) 和冰晶石 (Na_3AlF_6),首次发现冰晶石能溶解金属铝表面的氧化膜。这一偶然的重大发现催生了后来的冰晶石-氧化铝熔盐电解生产铝的方法。美国的卡斯特纳 (Castner) 改进了金属钠和 NaAlCl_4 的生产方法,使化学法生产成本有所降低。到 1889 年,在英国伯明翰附近的一家化学法生产金属铝的工厂里,产量规模达到了每天 500lb

(约 226.8 kg)。

以上这段时期为炼铝史的第一个阶段,即化学炼铝阶段。化学炼铝阶段共为人类贡献了约 200t 铝。

最早开始采用电解法炼铝的是德国人本生(Bunsen)和法国人戴维尔,他们分别在 1854 年中通过电解四氯铝钠熔盐(NaAlCl_4)得到金属铝。但由于当时采用的蓄电池直流电源价格昂贵且无法获得大电流,而不能进行工业性电解实验。直到 1867 年,初始的工业铝电解法才得以实现,但成本仍很昂贵。

1878 年,大型直流发电机的发明为铝电解带来了新的曙光。

现代铝电解法的创立者,法国的埃鲁(L. T. Héroult)和美国的霍尔(C. M. Hall)于 1886 年各自独立申请并注册了在冰晶石熔体中电解氧化铝炼铝的专利,从此迎来了大规模的电解法——霍尔-埃鲁法(H-H 电解法)炼铝的新阶段。

拜耳(Bayer)法生产氧化铝方法的诞生以及水力发电技术的发展,为铝电解生产提供了较廉价的丰富的原料和能源,因而霍尔-埃鲁法如虎添翼。从此,拜耳法生产氧化铝和霍尔-埃鲁法生产铝雄霸世界铝工业 120 年,至今没有任何可以取代它们的新工艺诞生。

120 年来,霍尔-埃鲁法经历了不同发展阶段,主要体现在铝电解槽的不断改进和发展。

初期,采用小型预焙阳极电解槽,电流小、产量低、能耗高。

20 世纪 20 年代,受铁合金电炉上电极形式的启发,在铝电解槽上装备了连续自焙阳极,采取侧插棒导电方式。侧插自焙阳极电解槽很快在世界范围内推广应用。20 世纪 40 年代,为了简化阳极操作和提高机械化程度,又发展了上插棒式自焙阳极电解槽。

与早期的小型预焙阳极电解槽相比,自焙阳极电解槽扩大了槽型规模,大大增加了单台设备产能,提高了电流效率,降低了能耗。但自焙槽仍有其固有弱点,首先是阳极自焙过程散发出的有害烟气严重恶化劳动条件,污染环境;其次是阳极结构形成较高的阳极电压降,并限制了电解槽继续扩大产能。

50 年代中期,成功制造出高质量的大型预焙炭块,使早期的小型预焙槽得以大型化和现代化,铝电解从自焙槽又转向预焙槽,开启了预焙槽的新阶段。

(自焙槽容量一般都在 100kA 以下,本书将继自焙槽之后发展起来的容量在 100kA 以上的预焙槽称作大型预焙槽,以区别于自焙槽以前的小型预焙槽以及在自焙槽基础上改造的容量小于 100kA 的预焙槽。)

近二十多年来,创建了大容量中间点式下料预焙阳极电解槽,计算机技术在电解槽的电、热、磁、物流和应力等物理场模拟、设计和控制上的成功运用,熔盐物理化学及电化学理论的深入研究,多种新材料在电解槽上的成功采用,使铝电解在提高产能和劳动生产率、降低原材料消耗、改善产品质量以及减少能耗、保护环境等诸多方面得到了飞速发展,迎来了现代大型预焙槽的新纪元。

人类的技术进步永不会停歇,目前,世界上正进行的连续预焙阳极电解槽、双极性多室电解槽、惰性阳极电解槽以及可湿润阴极泄流电解槽等的研究探索,燃起了人们对铝电解发展的新希望。

3. 什么是冰晶石?

世界上存在天然冰晶石。天然冰晶石是一种无色或白色晶体，它是一种复盐，分子式可写成 Na_3AlF_6 （或 $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ ）。有人测得纯天然冰晶石的熔点为 1009.2°C ，其密度为 $2.95\text{g}/\text{cm}^3$ ，硬度为 2.5。天然冰晶石是一种稀有矿物，目前只在乌拉尔、尼日利亚、格陵兰及巴西的彼丁坦发现有天然冰晶石存在，且数量非常有限。因此，工业应用大都为人造冰晶石。用湿法生产的人造冰晶石实际上是 NaF 和 AlF_3 的混合物，只有经过高温后，它们才形成化合物。 NaF 和 AlF_3 的二元系相图如图 1-1 所示。

NaF 和 AlF_3 的混合物经高温熔融再冷却下来，有可能生成两种化合物。组成（质量分数）为 NaF 60%， AlF_3 40%，其摩尔比（ NaF/AlF_3 ）为 3 的化合物，就是冰晶石，或称正冰晶石，它是一种稳定化合物，可用分子式 Na_3AlF_6 （或 $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ ）表示。正冰晶石熔点为 1010°C ，也有人测定为 1008.5°C 。

另一个是不稳定化合物，称作亚冰晶石，可用分子式 $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ （或 $5\text{NaF} \cdot 3\text{AlF}_3$ ）表示。亚冰晶石组成（质量分数）为： NaF 45.5%， AlF_3 54.5%，其摩尔比（ NaF/AlF_3 ）为 1.67。其异分熔点为 734°C 。当加热该化合物至 734°C 时，它会发生热分解，生成正冰晶石和相应组成的溶液。而相应组成的高温熔体冷却至 734°C 时，则事先析出的正冰晶石将与溶液发生包晶反应生成亚冰晶石：



在 $\text{NaF}-\text{AlF}_3$ 二元系状态图中摩尔比大于 3 的一侧，是 NaF 和 Na_3AlF_6 的简单二元共晶体系，其最低共熔温度为 888°C 。摩尔比小于 1.67 的一侧，在 695°C 以下是 $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ 和 AlF_3 的共晶体系，在此温度以上，根据体系组成的不同，有可能成为液相，也可能是 $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$ 和相应溶液（或 Na_3AlF_6 与相应的溶液， AlF_3 与相应溶液）的共存体系。

4. 铝电解为什么用冰晶石和氟化物作电解质，电解质具备哪些基本性质？

由于铝对氧有很强的亲和力，至今还没有找到一种经济的方法能和某些金属那样通过直接还原获得铝。铝比氢活泼，因此，也不能在水溶液中电解而获得铝。直至今日，铝只能在非水溶媒中电解获得。通过电解法炼铝，氧化铝是最好的原料。要将氧化铝电解成铝，必须使氧化铝成为熔融状态，能够电离，离子能在阴、阳极电场作用下发生迁移。但是，氧化铝的熔点高达 2050°C ，欲采用直接熔化进行电解，在目前工业条件下是不可能

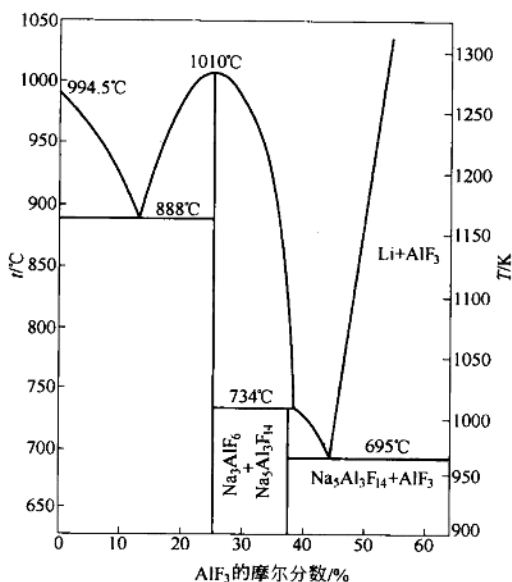


图 1-1 $\text{NaF}-\text{AlF}_3$ 二元系状态图