

高等學校教學用書

鋁 冶 電

上 冊

А. И. БЕЛЯЕВ, М. Б. РАПОПОРТ, Л. А. ФИРСАНОВА 著

沈 時 英 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



電

冶

鋁

上 冊

A. И. 別略耶夫
M. Б. 拉勃爾特 著
Л. А. 費爾散諾娃
沈 時 英 譯

高等教育出版社

本書係根據蘇聯國立黑色與有色冶金科技書籍出版社 (Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии) 1953 年出版的 А. И. 別略耶夫 (Беляев), М. Б. 拉勃勃爾特 (Рапопорт) 及 Л. А. 費爾散諾娃 (Фирсанова) 所著“電冶鋁” (Электрометаллургия алюминия) 一書譯出的。書中共分三部分: 第一部分為冰晶石氧化鋁熔體的電解, 第二部分為鋁的電解精煉, 第三部分為鋁及其合金的電熱熔煉。

除基本內容外, 書中還敘述了鋁電解槽的計算及熔煉鋁鈦合金電爐的計算, 並扼要地闡明了鋁電解廠的設計基礎。

本書係供煉鋁工業的工程技術人員及科學研究人員應用, 也可作為高等技術學校高年級學生修習電冶鋁的教學參考之用。

譯本分上下兩冊出版。上冊為沈時英所譯, 下冊為王延明等所譯。

電 冶 鋁

上 冊

書號160(譯154)

別 略 耶 夫 著

沈 時 英 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 琉 璃 廠 一 七 〇 號

[北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號]

新 華 書 店 總 經 售

文 明 書 局 印 刷 所 印

上 海 西 康 路 三 三 七 弄 九 〇 號

開本787×1092 1/25 印張17 10.5/12.5 字數 342,000

一九五四年十二月上海第一版

印數 1-2,000

一九五四年十二月上海第一次印刷

定價 洋 24,000

譯 序

A. И. 別略耶夫等所著“電冶鋁”一書，取材異常豐富；這本書廣泛地涉獵了有關電冶鋁各方面的內容，並集大成地進行了成功的總結。

由於譯者能力所限，雖自審譯述態度尚夠認真，但亦必不能充分表達原意，而錯誤等情則更所難免。因此，熱誠希望所有閱讀本書同志能提出批評，加以指正。

在翻譯過程中，譯者曾發現原書有若干輕微錯誤（多屬排版之誤），這些錯誤，在請教 A. B. 萬紐科夫 (Ванюков) 專家後進行了改正，但為防止由於譯者個人偏見所造成的誤解，特製作“刊正表”附後，以資對照，此項改正如有錯誤，統由譯者負責。

書中所有專業名詞，概與鋁廠現用者相同，但亦未盡一致；這一問題應該在將來逐步加以解決。

最後，要向審閱本書譯稿的鋁廠同志們及其他同志們表示謝意，由於他們，使本書減少了很多翻譯上的錯誤。

譯者 一九五四年五月二十五日於東北工學院

序

黨的第十九次代表大會關於蘇聯在 1951—1955 年發展的第五個五年計劃中指令規定，除了解決其他重要國民經濟任務之外，並應進一步擴大金屬鋁的生產。根據這一指令的規定，就應該增加專門人材的造就，應當改善這一工業部門內科學幹部及科學教育工作者的培養。對在生產機關工作的工程師提高業務水平，是具有重大意義的。

因此，當作者寫此書時，擺在自己面前的一個任務，就是要就其主要部分（冰晶石氧化鋁熔體的電解，鋁的電解精煉及鋁合金的電熱熔煉）來敘述現代電冶鋁技術的一些主要問題。除了研究電冶鋁的理論與操作技術外。書中還敘述了在鋁生產中所應用的某些設備（鋁電解槽，電爐）的計算原則，敘述了鋁電解廠的設計基礎。

書中第一部分為 A. И. 別略耶夫所寫，第二部分及 § 103 為 Л. А. 費爾散諾娃所寫，第三部分為 M. B. 拉勃勃爾特所寫。

著者對於教授 B. A. 巴足申博士，教授 E. И. 茹柯夫斯基，工程師 A. И. 蘇士克夫，工程師 Г. И. 加爾巴廚克，工程師 B. И. 伊測克遜及工程師 И. К. 科夫什克夫表示深厚的謝意，由於他們在本書的草稿審閱上作了許多寶貴的指示。

上 冊 目 錄

譯序

序

緒論1

第一部分 冰晶石氧化鋁熔體的電解

第一章 鋁的性質7

§ 1. 鋁的原子結構及晶格結構7

§ 2. 鋁的物理-化學性質10

§ 3. 鋁的熱化學性質21

第二章 氧化鋁的性質24

§ 4. 氧化鋁的晶格結構24

§ 5. 氧化鋁的物理-化學性質25

§ 6. 氧化鋁的熱化學性質32

第三章 炭的性質35

§ 7. 炭的晶格結構35

§ 8. 炭的物理-化學性質37

§ 9. 炭的氧化43

第四章 氟化鋁及其他金屬氟化物的性質45

§ 10. 氟化物的結構45

§ 11. 氟化物的物理-化學性質51

§ 12. 氟化物的熱化學性質53

第五章 氟化鋁與其他金屬氟化物構成系的性質56

§ 13. 氟化鋁-鹼金屬氟化物系56

§ 14. 冰晶石-鹼金屬氟化物系66

§ 15. 冰晶石-兩價金屬氟化物系67

第六章 氟化物與氧化物構成系的性質75

§ 16. 冰晶石-氧化鋁系75

§ 17. 冰晶石-氧化物系83

§ 18. 氟化物與氧化物所構成的三元系與交互作用系	86
第七章 冰晶石氧化鋁熔體電解的理論	101
§ 19. 氧化鋁及電解液各成分的分解電壓	101
§ 20. 冰晶石氧化鋁熔體的結構	118
§ 21. 鋁電解槽內電流轉移的機構	121
第八章 鋁電解槽兩極上的反應	129
§ 22. 陰極上的反應	129
§ 23. 陽極上的反應	143
第九章 冰晶石氧化鋁熔體電解時的電流效率與電能效率	164
§ 24. 基本概念與數學關係式	164
§ 25. 各種因素的影響	172
第十章 鋁電解槽的構造	179
§ 26. 鋁電解槽構造的發展	179
§ 27. 近代鋁電解槽	183
第十一章 鋁電解槽的計算	190
§ 28. 鋁電解槽的結構計算	190
§ 29. 鋁電解槽的電的計算	200
§ 30. 鋁電解槽的熱量計算	208
§ 31. 鋁電解槽的材料計算	213
§ 32. 鋁電解槽的計算範例	213
第十二章 鋁電解槽的安裝	231
§ 33. 電解槽安裝所用的材料	231
§ 34. 實現安裝操作的步驟	238
第十三章 鋁電解槽的開動	243
§ 35. 新的連續陽極電解槽的開動	243
§ 36. 大修理後電解槽的開動	249
§ 37. 多陽極電解槽的開動	252
§ 38. 電解槽操作的開動後期	252
第十四章 鋁電解槽的操作	258
§ 39. 向鋁電解槽中所加之料	258
§ 40. 看管電解槽的主要操作	259

§ 41. 電解工隊內的勞動組織	289
§ 42. 電解車間內的生產監督	292
第十五章 鋁電解槽的使用期限與拆卸	294
§ 43. 各種因素對鋁電解槽使用期限的影響	294
§ 44. 電解槽拆卸時的操作步驟	303
第十六章 鋁電解槽電解質的再生	307
§ 45. 炭渣的浮選	307
§ 46. 氣體吸收與冰晶石再生	310
第十七章 鋁的氯化,再熔與鑄造	316
§ 47. 一次鋁的質量	316
§ 48. 以氯化法及再熔法清除鋁中雜質	318
§ 49. 鋁條錠的鑄造	323
第十八章 鋁電解廠的設計基礎	327
§ 50. 廠址選擇	327
§ 51. 工廠能力(生產力)的選擇	328
§ 52. 直流電源的選擇	329
§ 53. 鋁電解槽系列中電力制度的選擇	333
§ 54. 系列中鋁電解槽的配置及電解車間基本尺寸的確定	340
§ 55. 運輸工具的選擇	347
§ 56. 通風設備的選擇	350
§ 57. 鋁精煉車間(精煉間)設備的選擇	354
§ 58. 機械工場	356
§ 59. 倉庫容積的決定	356
§ 60. 技術—經濟核算	357

第二部分 鋁的電解精煉

第十九章 高純度鋁的性質及其用途	363
§ 61. 高純度鋁的性質	364
§ 62. 高純度鋁的應用範圍	367
第二十章 鋁電解精煉法的發展	369
§ 63. 二層法的發展	369
§ 64. 三層法的發展	373

第二十一章 鋁電解精煉的理論	383
§ 65. 精煉鋁的電化學基礎	383
§ 66. 精煉鋁所用的電解液與陽極合金的物理-化學性質	384
§ 67. 精煉鋁電解槽的電壓	389
§ 68. 鋁電解精煉的電流轉移機構	395
§ 69. 鋁電解精煉的電流效率	397
第二十二章 鋁電解精煉工藝	399
§ 70. 精煉鋁電解槽的構造	399
§ 71. 原鹽與電解液的準備	402
§ 72. 陽極合金的製備	405
§ 73. 精煉鋁電解槽的操作	405
§ 74. 鋁電解精煉過程的控制	416
§ 75. 鋁電解精煉車間內的勞動組織	418
§ 76. 鋁電解精煉的技術-經濟指標	418
§ 77. 二次鋁的電解精煉	419
刊正表	438

電 · 冶 · 鋁

緒 · 論

煉鋁在我們國家內(指蘇聯——譯者註)在偉大十月社會主義革命之後才被建立起來的那些工業部門之一。在短短的時期內，蘇聯的冶金工作者們研究出來了自各種鋁礦中提取氧化鋁的獨創工藝；建立並經營了氧化鋁廠及裝備有巨大而高生產能力電解槽的鋁廠。

蘇聯的鋁工業很快就在生產範圍方面，在科學成就與生產技術方面，佔據了世界的首列。

爲了建立我們社會主義祖國的物質—技術基礎，鋁工業的價值十分重大。金屬鋁在國民經濟各個部門中的作用，由於解決我國自社會主義向共產主義逐步過渡的歷史任務，將更形加強。

對我們國民經濟以及鋁工業將來總的發展的宏大規模來說，1946年2月9日斯大林同志在莫斯科斯大林選區選民選舉前大會上的演說中指出：“至於較長時期的計劃—斯大林同志說—那麼黨是立意要造成國民經濟強大的新高漲，使我們能夠提高我們的工業水準，譬如說，比戰前提高兩倍……這大概需要三個新五年計劃的時間，也許還要多些，才能達到這點。但這是可以辦到的，並且我們應該辦到它”^①。

在伏爾加及德聶泊建築大型水電站的斯大林計劃的實現，對於國民經濟的所有部門，其中也包括對於鋁工業的進一步高漲，都是提供了一個新的動力基地。

① И. Сталин. Речь на предвыборном собрании избирателей Сталинского избирательного округа г. Москвы 9 февраля 1946 г., Профиздат М., 1946, стр. 22—23.

在“黨第十九次代表大會關於蘇聯在 1951—1955 年發展的第五個五年計劃指令”中指示，要在這個五年計劃中增加鋁的產量不少於 2.6 倍，“要開始研究利用恩格拉（Ангара）河的動力資源，在便宜電能及原料當地出產的基礎上來發展鋁工業……及其他工業”^①。

* * *

約有 70 年歷史的電解製鋁是近代電冶鋁的基礎。

近來，電冶鋁的範圍已大大擴展。除了生產一次鋁之外，鋁的電解



巴維爾 巴甫洛維赤 費道切夫
(1864—1934)
(1901 年照)

① Директивы XIX съезда партии по пятому пятилетнему плану развития СССР на 1951—1955 гг., Госполитиздат, 1952, стр. 6.

精煉(製高純度鋁), 鋁矽合金的電熱熔煉及自其中提取矽鋁盟(Силумин)與純鋁也成為了電冶鋁的對象。

俄國實用電化學及有色金屬電冶的奠基人 П. П. 費道切夫的科學著作與活動, 在電冶鋁的發展歷史上, 具有卓越的作用。1910—1912 年在彼德堡工學院, 在他的領導下, 進行了關於電冶鋁的實驗研究, 第一次在世界科學上十分完備地闡明了電解冰晶石氧化鋁熔體生產鋁的近代方法的理論^①。

從此法在 1886 年發現始, 電解熔融冰晶石中氧化鋁來製取鋁已發展成為電冶的巨大規模。但這種發展幾乎僅僅是建築在經驗的與實際試驗的基礎上。在 П. П. 費道切夫研究之前, 鋁電解過程的理論完全沒有建立起來。

П. П. 費道切夫和 В. П. 依林斯基第一次地研究了對近代電冶鋁有着最重要價值的 $\text{NaF}-\text{AlF}_3$ 系及 $\text{Na}_3\text{AlF}_6-\text{Al}_2\text{O}_3$ 系, 研究了許多與電解過程伴行的現象: 陽極效應, 鋁在電解液中的溶解, 炭化鋁的生成等。

幾乎與 П. П. 費道切夫同時, Н. А. 蒲申及 А. В. 別斯克夫在彼德堡電氣工程學院也在電冶鋁範圍內進行了一些試驗研究^②。在 $\text{NaF}-\text{AlF}_3$ 系的研究上, 他們的研究結果和 П. П. 費道切夫及 В. П. 依林斯基的材料, 非常接近。Н. А. 蒲申對電解冰晶石氧化鋁熔體製取鋁問題的研究是從 1901 年始, 他研究的目的是要指明自國產原料中提煉此種金屬的可能性。

1914 年發表了 Н. 蒲申, Э. 吉士列爾及 М. 馬克斯綿克的文章,

① П. П. Федотьев и В. П. Ильинский. Известия Спб. Политехнического института, вып. XVIII, 1912 г.; Н. Н. Бекетов, Н. А. Пушкин, П. П. Федотьев. Научные труды по металлургии алюминия, М., 1950; А. И. Бежьев. Очерки по истории металлургии легких металлов, Металлургиздат, 1950.

② Н. А. Пушкин и А. В. Басков. ЖРФХО, 1913, часть химическая, т. 45, вып. 1, стр. 82—101.

文章中敘述了使用自烏拉爾的 Соймонит 礦物中所提出的氧化鋁進行電解製鋁的實驗研究^①。由於這些試驗而煉出了 400 公斤的“俄國產鋁”。

1928 年末, Е. И. 茹克夫斯基在莫斯科礦業研究所大規模地進行了鋁的電解試驗^②。

1929 年在列寧格拉“紅維堡人”工廠, 在 П. П. 費道切夫的領導下第一次地在我國內使用 2000 安培電解槽進行了製取金屬鋁的半工廠試驗^③。此試驗中所使用的氧化鋁與冰晶石, 得於莫斯科與列寧格拉的試驗廠, 而炭極得於庫金(Кудин)工廠。這些試驗的結果成為了後來在列寧格拉建立試驗鋁廠的基礎(此廠於 1930 年開工)。此工廠對於掌握工業條件下電解鋁的技術操作, 對於為第一批蘇聯鋁廠培養熟練幹部, 起了重大的作用。

經過兩年, П. П. 費道切夫發表了他的冰晶石氧化鋁熔體電解時電流轉移機構的理論^④, 這個理論在通過他在“紅維堡人”工廠所作的擴大試驗當時所進行的觀察後得到了最終的確定。這個理論的建立, 使了解鋁電解槽所進行的過程跨進了最大的一步。

1932 年富爾加鋁廠開工, 1933 年德聶泊鋁廠開工, 而以後幾年又有許多新的鋁廠開工。

經過有歷史意義的短短時期, 蘇聯的鋁工業已經在世界上居於首列。

由於科學機構及鋁廠工作人員的共同努力, 電冶鋁在我國已達到

① Н. Пушкин, Э. Диншлер, М. Максименко. Известия Петроградского политехнического института, 1914, вып. 1.

② Сборник “Московская горная академия”, 10 лет. М., 1929.

③ П. П. Федотьев. Металлург, 1933, стр. 63.

④ П. П. Федотьев. Сборник исследовательских работ, ОНТИ, Химтеорет, Л., 1936. стр. 226.

了高度的科學水平與技術水平^①。

在電冶鋁（也像在其他金屬電冶中一樣）的科學理論基礎的創建上，許多都是蘇聯的學者與研究家們所作。除了 П. П. 費道切夫的著作之外，在二十世紀三十年代及四十年代間，在輕金屬電化學及電冶學各個部門的擴展與加深上，П. Ф. 安蒂平（熔融鹽電化學），Е. И. 茹克夫斯基（電冶鋁），В. П. 馬紹維茨（電冶鋁），Ю. В. 巴衣馬克夫（電冶鋁），Г. А. 阿布拉莫夫（電冶鋁），В. М. 古席克夫（鋁的電解精煉），В. Н. 維利金（鋁的電熱熔煉），А. Ф. 阿拉拜舍夫（熔融鹽電解）及其他研究工作者們都作了巨大的研究。

遠在 1893 年，Н. 茹可夫出版了“鋁及其冶煉”一書，此書係第一個以俄文出版闡述此種金屬的專門著作，該著作根據當時的定期文獻及專利文獻所刊載的材料，對鋁的生產方法及其性質作了系統的敘述。

蘇聯的學者與工程師們，在電冶鋁的理論與實際方面寫出了許多著作，這些著作，不管在內容上與科學水平上都遠遠超過了外國在這方面所著述的。

其中首先應該指出 1934 年 П. П. 費道切夫的卓越古典著作“冶金中的電解”，在此著作中總結了著者在電冶鋁及其他輕金屬電冶範圍內的科學研究工作，實際技術工作及教學工作。

1938 年，В. П. 馬紹維茨的“電冶鋁”一書問世，此書對電解製鋁的理論作了系統性的敘述。在此著作中，В. П. 馬紹維茨發展了 П. П. 費道切夫對於鋁電解槽內電解機構的觀點。

同年（1938 年）發表的 П. Ф. 安蒂平和他的學生們的出色的集體著作“熔融鹽的電化學”是熔融鹽電解液電解上一個理論著作的總結。

В. М. 古席克夫 1945 年出版的“鋁的電解精煉”一書具有科學與

① Ю. В. Баймаков. Советский алюминий. Из истории отечественной техники. Под ред. В. В. Даниловского. Ленгиз, 1950, стр. 76—100; Е. Н. Падалка. Цветные металлы, 1947, № 5.

實用的價值。

Ю. Б. 巴衣馬克夫在 1944 及 1946 年發表了“冶金中的電解”(第二部分,第三部分)一書,此書在編製電冶鋁及其他輕金屬電冶教程上,發展了 И. И. 費道切夫的科學理論與教學經驗。

1950 年出版了 А. М. 埃蒲時琴的“鋁廠電解工”一書,而於 1951 年又出版了 В. И. 馬紹維茨及 Г. В. 富斯布羅的“電解製鋁”一書,在這兩本書中,我們鋁廠的先進電解工人們的經驗得到了反映。

本書的目的是要對電冶鋁的基本問題加以闡釋。

在敘述電冶鋁的理論基礎及解釋冶金過程的機構時,著者儘量利用結晶化學的資料,利用化學鍵的學說以及表面現象的物理化學與低價化合物的物理化學。

而在說明電冶鋁中的實際問題時,著者是以我們鋁工業的成就作為基礎。

第一部分 冰晶石氧化鋁熔體的電解

第一章 鋁的性質

§ 1. 鋁的原子結構及晶格結構

鋁——Д. И. 門捷列夫元素週期系中的第三族元素：鋁的原子序數—13；原子半徑— $1.43\text{\AA}$ 及離子半徑— $0.86\text{\AA}$ ；鋁的原子量—26.97。

鋁的中性原子的電子結構(表 1)以在 $1s$ 軌道上 ($1s^2$) 由兩個電子添滿的內 K 層, 在 $2s$ 軌道上由兩個電子添滿的 L 層與以六個電子在 $2p$ 軌道上 ($2s^2 2p^6$) 為其特點。鋁原子的外 M 層上有三個電子：兩個在 $3s$ 軌道上 ($3s^2$)，一個在 $3p$ 軌道上。

這樣一來, 鋁的中性原子的外層電子(價電子)配列形式是 $3s^2 3p$ 。

表 1. 鋁原子的電子結構

原 子 序 數	K	L		M		
	$1s$	$2s$	$2p$	$3s$	$3p$	$3d$
13	2	2	6	2	1	—

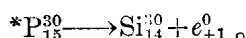
鋁正常為三價 (Al^{3+})。但近來發現了許多鋁的低價化合物(亞化合物), 其中有兩價與一價者, 如 Al_2S , Al_2O , AlO , AlF , AlCl 等。最後兩個化合物已無可質疑, 並且以分光顯微鏡檢查得到了證實, 例如, 在 AlF 及 AlCl 情況下, 鋁的原子在一定條件下祇失掉一個 $3p$ 價電子變成一價離子 (Al^+), 此一價離子可生成與之相應的各種化合物 (AlF , AlCl 等)。

離子化能(即電子由原子中掙脫出來所消耗的能)可以作為測量原子內電子能鍵 (Энергическая связь) 的尺度。拘束電子的力量越弱, 則

其離子化能越小。鋁原子的第一個 $3p$ 價電子的離子化能為 137.3, 而第二個與第三個 $3s$ 電子的離子化能, 則分別為 430.6 及 652.1 千卡/克分子。因此, 在鋁的原子中, $3p$ 電子被拘束的力量, 比 $3s$ 電子中每一個電子被拘束的力量要小得多。

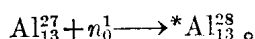
低價鋁化合物不僅提供理論上的興趣, 並且, 如下所見, 還要考慮到它們在冰晶石氧化鋁熔體電解時生成的可能性。除此之外, 它們對於以熱法製取金屬鋁, 也有實用上的價值 (§ 103)。

以 α -質點來衝擊鋁, 第一次發現了人工放射性元素 (同位元素) 放射性磷 ($^{30}\text{P}_{15}$) 存在的可能性, 此元素分解成為矽並析出正子 (e^0_{+1}):



後來, 發現了 200 來種新的人工放射性同位元素, 在現在, 這些同位元素都在化學上及醫學上有了實際的應用。對鋁來說已確定有三個人工放射性同位元素, 它們的原子量為 26, 28 及 29, 半減期相當為 7 秒, 2.3 分及 6.7 分。

可以人工辦法取得鋁的人工放射性同位元素, 特別是通過原子核直接奪取中子的方式:



鋁的安定同位元素是沒有的。

現在人們都認為, 金屬的結晶是由許多荷正電的離子所組成, 其間以分佈非常均勻的價電子而結合成為一個整體。在鋁結晶時, 鋁離子佔據着立方體面的角與中心。因此鋁的單位格子乃是面心立方 (圖 1), 此晶格的鄰位數 (Координационное число) 等於 12, 因為每一個鋁的離子同 12 相接近的離子“毗鄰” (圖 2)。

純度 99.97% 的鋁, 其單位立方晶格之邊長 a 為 $4.046 \pm 0.004 \text{ \AA}$, 而純度 99.996% 者已決定出為 $4.0413 \pm 0.001 \text{ \AA}$; 此值採取整數等於 $4.04 \text{ \AA}$ 。單位格子內最相近的鋁離子間的距離為 $2.86 \text{ \AA}$ 。