

铝冶金进展

——庆祝邱竹贤院士八十诞辰

主 编 赫冀成
副主编 左 良 刘春明 邱清亮
孙 挺 翟秀静 路贵民

东北大学出版社

铝冶金进展

——庆祝邱竹贤院士八十诞辰

主 编 赫冀成

副主编 左 良 刘春明 邱清亮

孙 挺 翟秀静 路贵民

东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

铝冶金进展:庆祝邱竹贤院士八十诞辰/赫冀成主编. —沈阳:东北大学出版社,2001.5
ISBN 7-81054-603-1

I. 铝… II. 赫… III. ①炼铝-文集 ②铝-金属材料-文集 IV. TF821-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 09441 号

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110004)

电话:(024)23890881

传真:(024)23892538

网址:<http://www.neupress.com> E-mail:neuph@neupress.com

沈阳市昌通彩色印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:926.6 千字

印张:37.125

2001 年 5 月第 1 版

2001 年 5 月第 1 次印刷

责任编辑:李毓兴 孟颖

责任校对:米戎

封面设计:唐敏智

责任出版:秦力

定价:100.00 元

目 录

我的炼铝生涯.....	1
历届研究生名录	10
公派出国留学研究生名录	13
著作与译作目录	14

铝电解部分

Interfacial phenomena in molten salt electrolysis K. Grjotheim, H. Kvande, Qiu Zhuxian, et al	15
Aluminium electrolysis at 800~900℃ —a new approach to energy savings Qiu Zhuxian, He Minghong, Li Qingfeng	25
因特网上交互式铝电解体系物理化学性质查询系统的设计与建设 包 宏 刘宝殿 何鸣鸿等	34
基于 WWW 的铝电解操作培训系统	包 宏 刘 静 何鸣鸿等 37
Phase equilibrium studies on the cryolite-aluminium fluoride system Qiu Zhuxian, Zhang Jinsheng, K. Grjotheim, et al	41
Dissociation equilibria of cryolite in NaF-AlF ₃	Q. Xu, Y.M. Ma, Z.X. Qiu 47
The dissociation degree of molten cryolite by Monte Carlo method Qiu Zhuxian, Xie Gang	53
铝电解中的电极过程——阳极过程	张明杰 邱竹贤 56
铝电解中的电极过程——阴极过程	张明杰 邱竹贤 62
NaF-AlF ₃ 熔体中铝在钨电极上的电化学沉积	铁 军 邱竹贤 路贵民 67
铝电解中的界面现象	邱竹贤 张明杰 姚广春等 71
冰晶石-氧化铝熔液对碳电极的湿润	邱竹贤 魏庆斌 76
Studies on wettability of carbon electrodes in aluminium electrolysis Qiu Zhuxian, Wei Qingbin, Yuo Kwantsung	79
论铝电解中阳极效应的机理	邱竹贤 91
铝电解中阳极效应的研究	邱竹贤 魏庆斌 张明杰 98
The three stages of the anode effect in aluminium electrolysis cells Qiu Zhuxian, Zhang Mingjie, Hang Fuye, et al	106

Formation of metal fog during molten salt electrolysis observed in a see-through cell	Qiu Zhuxian, Fan Liman, K. Grjotheim, et al	115
工业电解槽内铝损失的控制步骤.....	范立满 邱竹贤 沈泽方等	125
冰晶石熔液中金属雾的本性——兼论铝损失的律速步骤.....	邱竹贤 范立满	132
Metal solubility in low temperature electrolytes in aluminium electrolysis	Qiu Zhuxian, Tie Jun, Yu Yaxin, et al	137
金属铝在冰晶石-氧化铝熔液中的溶解度测定	杨振海 高炳亮 邱竹贤	145
铝电解中示踪金属浓度递减律.....	邱竹贤	148
气体分析法测定铝电解电流效率.....	邱竹贤	153
Current efficiency in aluminium electrolysis	Qiu Zhuxian, Feng Naixing	159
A new criterion for evaluating the heat losses of aluminium reduction cells	Qiu Zhuxian	168
低温铝电解的研究——节省电能的研究.....	邱竹贤 张明杰 何鸣鸿等	172
冰晶石-氧化铝-氯化钡融盐电解铝在 850℃ 下的电流效率 ...	高炳亮 杨宝刚 邱竹贤	176
Reduced dissolution of aluminium in cryolite-alumina melts by cathodic polarization	Qiu Zhuxian, Fan Liman, Feng Naixiang, et al	180
Laboratory-scale refining of aluminium by the three-layer process	Qiu Zhuxian, Zhang Zhonglin, K. Grjotheim, et al	189
Impurity distribution in bath and metal in aluminium electrolysis	Qiu Zhuxian, Yu Yaxin, He Minghong, et al	196
Vapour Losses of molten low temperature electrolytes in aluminium electrolysis	Qiu Zhuxian, He Minghong, Li Qingfeng, et al	202
Development of bath acidity in aluminium electrolysis	Qiu Zhuxian	209
氧化铝在冰晶石熔体中溶解的动力学模型.....	徐 宁 杨振海 邱竹贤等	215
熔融冰晶石中氧化铝的溶解 (摄影研究)	杨振海 高炳亮 徐 宁等	221
工业铝电解质分子比测定方法研究与应用.....	邱竹贤 张金生 孙挺等	225
铝电解质的酸度问题.....	高炳亮 杨振海 邱竹贤	231
冰晶石-氧化铝熔体中的酸碱体系	徐 宁 郭咏梅 邱竹贤	234
铝的电位-pH 图及铝腐蚀曲线的测定	杨振海 徐 宁 邱竹贤	238
电流密度对铝电解电渗现象的影响.....	李 冰 王兆文 高炳亮等	242
电解质的组成对铝电解中电渗的影响.....	李 冰 王兆文 高炳亮等	246
铝电解阴极碳块渗透现象的研究.....	李 冰 王俊青 高炳亮等	249

160kA 大型预焙阳极铝电解槽流场的数值计算·····	冯乃祥 孙 阳 邱竹贤等	254
NaCl-KCl-Na ₂ WO ₄ -WO ₃ 电解质体系中熔盐电解法制取超细钨粉的实验与研究 ·····	冯乃祥 高玉明 刘希诚等	258
Continuous bath temperature measurements in Al electrolysis cells ·····	Qiu Zhuxian, Li Jingjiang, Cui Xiaoli, et al	263
纪念霍尔-埃鲁法发明一百年——兼论其改进的可能性 ·····	邱竹贤	270
Key improvements to Hall-Héroult since the end of World War II ·····	K. Grjotheim, H. Kvande, Qiu Zhuxian	276
中国铝电解工业迈入二十一世纪的新发展·····	邱竹贤 孙淑萍 李冰等	284
我国铝电解技术创新途径·····	邱竹贤	289

电极材料部分

惰性电极和绝缘侧壁在低温铝电解中的应用·····	邱竹贤 邱清亮 朱旺喜等	294
Aluminium electrolysis in a 100A laboratory cell with inert electrodes ·····	K. Grjotheim, H. Kvande, Qiu Zhuxian, et al	301
铝电解清洁生产工艺的开发研究·····	卢惠民 邱竹贤	306
NiFe ₂ O ₄ 基铝用惰性阳极的试制 ·····	于先进 戴厚晨 邱竹贤	310
金属陶瓷基惰性阳极试样的低温电解行为研究·····	杨宝刚 于佩志 邱竹贤	314
惰性阴极在铝电解中的应用·····	黄光夏 张式成 邱竹贤等	317
TiB ₂ -coating on cathode carbon blocks in aluminium cells ·····	Qiu Zhuxian, Li Qingfeng, Chen Xuesen, et al	322
二硼化钛粉末的研制·····	王兆文 邱竹贤 李涯	330
MoSi ₂ 对二硼化钛惰性阴极材料性能的影响 ·····	王兆文 孙淑萍 李冰等	336
浮选法从废旧阴极碳块中回收电解质的研究·····	翟秀静 邱竹贤	340
铝工业废旧碳阴极材料的综合利用·····	邱竹贤 翟秀静 卢惠民等	345
优质阳极是铝电解稳定生产的保证·····	刘 钢	348
炼铝用碳阳极中碱金属氧化物作用机理的量子化学研究·····	董贞俭 刘尚长 邱竹贤	352
锂盐糊阳极在铝电解中的作用机理·····	邱竹贤 朱旺喜 孙挺等	357
添加锂盐活化预焙阳极的研究·····	姚广春 孙挺 董贞俭等	362
MgO 在氯化镁电解过程中的电泳行为 ·····	杨宝刚 于佩志 李冰等	366
铝电解槽干防渗混合材料的开发与应用·····	马志成 朱旺喜 铁 军等	370

合 金 部 分

Formation of aluminium-titanium alloys by electrolysis and by thermal reduction of titania in cryolite-alumina melts	Qiu Zhuxian, Zhang Mingjie, Yu Yaxin, et al	378
半固态浆制备新技术——液相线铸造.....	路贵民 董 杰 崔建忠	385
Measurement of thermodynamic properties of liquid Al-Mg alloys	Lu Guimin, Qiu Zhuxian	390
碳热还原混合型稀土精矿制取稀土硅化物合金的放大实验研究	赵 群 涂赣峰 李鸿宾	397
中国古代有色金属冶铸中融盐的应用.....	邱竹贤	401
Electrodeposition of Al-Mn, Al-Mn-Ti, and Al-Mn-Ce alloy coatings from NaCl-KCl-AlCl ₃ melts at 200℃	Sun Shuping, Chu Songzhu, Li Qingfeng, et al	404
电泳研究及应用的进展.....	李卫红 徐 宁 杨宝刚等	410
电热还原法生产铝硅铁合金.....	邱竹贤	414
用直流电弧炉制取铝硅合金的研究.....	姚广春 张晓明 孙挺等	418
制取铝镧合金在我国的研究进展.....	杨宝刚 高炳亮 杨振海等	422
NaCl-KCl 熔融体系电镀钛的研究	陈书荣 谢刚 张雄飞等	426
Cu-Ni 基合金在氧气中的高温氧化腐蚀	于先进 邱竹贤	431
烟道灰颗粒增强铝基复合材料的研究现状.....	朱旺喜 张荣发 吴琳丽	435
铸造铝合金熔炼技术的发展.....	李德成 李玉胜 邱竹贤	441

电 池 部 分

锂离子电池正极材料 LiNi _y Mn _{1-y} O ₂ 的结构与性能研究	翟秀静 刘忠文 暴永生	449
镍酸锂电池材料的热分解动力学研究.....	张中林 杨春芳 暴永生等	453
铝电池的开发与应用进展.....	李庆峰 邱竹贤	458
铝在 NaCl-AlCl ₃ 熔盐体系中的电化学沉积	李庆峰 邱竹贤 N. J. Bjerrum	467
固相金属铝电沉积中枝晶生长的浓差极化机理	李庆峰 邱竹贤 N. J. 比隆	472
NaCl-AlCl ₃ 融盐电解中 MnCl ₂ 对改善 Al-Mn 合金电沉积层的作用 ...	邱竹贤 李庆峰	476

综 合 部 分

我国铝电解技术的新进展——庆祝邱竹贤院士八十寿辰.....	李金声	480
-------------------------------	-----	-----

中国铝电解技术的进步与邱竹贤院士对中国铝工业的贡献——庆贺邱竹贤院士

八十华诞暨铝冶金与材料学术讨论会.....	王平甫	483
中国铝电解槽计算机控制技术发展的回顾与展望.....	杨振海 孙淑萍 邱竹贤	485
WEB 数据库应用程序	铁 军	489
一种基于脑电信号分析的中枢神经系统损伤检测的韧性自适应方法	邱天爽 X. Kong 鲍海平等	494
自然铝.....	邱竹贤	502
金在炉渣熔体中聚集作用的研究.....	袁玉蝶 姚玉田 邱竹贤	507
金浸出液浓度的在线连续自动监测方法研究.....	孙 挺 邹 巍 谢 颖等	512
铬镁矿焙烧试验研究.....	杨大锦 邱竹贤	516
氧化铝晶种分解过程的附聚机理.....	谢雁丽 赵 颖	522
提高烧结法氢氧化铝粒度的分解工艺与实践.....	张用花 陈宝民 李 冰	526
利用水合碳铝酸钙深度脱硅的研究与应用.....	张用花 陈宝民 李 冰	531
半煤气卧式炉生产锌粉.....	岑 华 吕玉花 李 冰	535
提高直接法氧化锌比表面积的试验研究.....	岑 华 吕玉花 李 冰	540
$(\text{MgO})_x (\text{SiO}_2)_{1-x}$ 系熔渣结构的分子动力学计算	谢 刚 陈书荣 侯怀宇等	543
Molten salt and slag in ancient China	Qiu Zhuxian	548
Ceramics and glazes in ancient China	Qiu Zhuxian	553
铝用化学防渗料的研究与应用.....	邱仕麟	561

我的炼铝生涯

东北大学 邱竹贤

我是江苏省海门县人,生于1921年农历4月12日,1943年8月毕业于交通大学唐山工程学院矿冶系。毕业后,先后在四川电化冶炼厂、台湾高雄铝厂、抚顺铝厂任工程师12年。1955年调来东北大学(当时称东北工学院)任教至今。现为教授、博士生导师,中国工程院院士,挪威技术科学院国外院士,挪威科学院国外院士。

一、平生最有意义的事情——炼铝

我一生中最有意义的事情莫过于炼铝。我在初中念书的时候,从书上知道地壳中含有8%左右的元素铝。如此丰富的金属竟然就在我们的脚下,因此我曾幻想有朝一日能够把铝从泥土中提取出来。

我的父亲是江苏海门县一条小镇上的中医生,平时为人切脉开方,借以养活全家。我看到父亲工作很辛苦,五十来岁时头发已经花白了,就想跟他学习中医,以便助父亲一臂之力。父亲也乐意培养我成为他的助手,教我念《药性赋》。至于炼铝的事,我自忖此生无缘。

1935年夏天我14岁的时候,初中毕业了,父亲突然病故。我只好放弃学习中医的念头。我的二哥邱竹师是家乡海门中学的一位教师,他立意继续供我上学。这时候,家乡海门中学高中招生,有一个半工半读的名额,免收学杂费,我考上了。于是我进入高中读书,并在校内图书馆工作,这样我可以自由进入书库。我利用此方便,每天清晨在书库内温习功课,或者高声朗读中文和英文课文,背诵若干课文。另外一件开心的事儿是,我可以在书库内看到有关科技方面的书。

二、在贵州的大学生涯

1938年夏天,我高中毕业。这年秋天,我考入位于上海的国立暨南大学化学系。因为我考试成绩优异,获得公费待遇,每月发给我15块大洋,作为买书和生活费用。当时物价飞涨,在十里洋场中,我过着穷学生的生活。学校里没有宿舍,我和三四位同学合租了一个亭子间(即阁楼),住在校外,经常在弄堂口的摊子上吃阳春面。这时,上海已被日寇侵占,暨南大学要搬迁。1939年秋天我已是化学系二年级学生了,又重新考入交通大学唐山工程学院矿冶系。是年冬天,我和两位同学一起从海路经香港至越南海防,然后从滇越铁路至云南昆明,最后经滇黔公路到达学校所在地——贵州省平越县(今福泉县)。这是我一生中的重大转折。学校中有多位名师:茅以升、罗忠忱、何杰、王钧豪、王绍瀛等,他们献身教育事业的高尚品德和渊博的知识,言传身教,对我一生影响很大。我对地质学和冶金学很感兴趣,在学习《钢铁冶金》和《非铁冶金》两门课程时,仔细阅读了这两本英文书,清早在福泉山下一个亭子里大声读书,对炼钢贝色麦法和铝冶金两部分读到能够背诵其中若干句子为止。

贵州省有丰富的铝矿和煤田,兼有典型的喀斯特溶岩地质环境,对我有很大的吸引力。我在攻读矿冶学科的四年中,经常和同学利用节假日去郊外做地质旅行,锻炼了体力,树立了为我国炼铝事业献身的壮志。大学中清苦的生涯,越发激励我勤奋学习。1941年夏,学校派送我去贵阳参加全国矿冶学科大学生竞赛,科目是矿物学和分析化学,荣获第一名,受到奖励。

1943年大学毕业后,我进入四川碛江电化冶炼厂炼铜车间任技术员。1945年秋有幸参加了炼铝试验。当时所用的原料冰晶石和氧化铝是从南京撤退时带到四川的,直流电流是3000A铜电解槽系列串联过来的。电解槽的钢质外壳的下面用柴火和木炭火加热,作为辅助热源,当时因原料冰晶石数量有限,所以只能保持很低的电解质水平,经数天电解之后,得到少量铝球。

三、在台湾高雄铝厂

1945年日本投降。1946年春我被调到台湾高雄铝厂。台湾高雄铝厂建于1937年,是日本侵占我国台湾时建的。工厂位于高雄港的西岸,海风可以直接吹入电解厂房内。厂内有一个氧化铝车间,用拜耳法生产氧化铝,赭红色的铝矿石从南洋平坦岛运来。铝厂的电解车间,年产铝1万吨,槽电流是24000A。一个30000A铝电解车间尚未竣工。还有一个阳极糊车间。在太平洋战争期间,工厂曾遭受美军轰炸,工厂修复时,挖掘出数枚未爆炸的炸弹。当时铝厂里还有一些留下来的日本技师。我和他们合室办公。1947年2月“二·二八事件”之后,这些日本技师都被遣返。不久铝厂便开工生产,电流增加到27000A,我用干法启动了首台27000A自焙阳极侧插棒铝电解槽。在电解车间内我任助理工程师。工厂总经理是孙景华先生,厂长是陈定闾先生,一起值班的同事有施鼎禹、张宏斌等人。我在台湾高雄铝厂工作了三年。1949年3月,人民解放军陈兵长江北岸,即将渡江南下,我和夫人缪秀荏女士因怀念大陆的家园,便离开台湾高雄铝厂,回到上海。当时正在掀起一股从大陆来台湾的风潮,而我和夫人却反其道而行之,因此许多人很不理解。

四、在抚顺铝厂

1950年春,东北工业部来上海招聘技术人员。我应聘。1950年5月携同夫人缪秀荏到达沈阳,会见了东北有色金属局李华局长,他分配我去抚顺铝厂。抚顺铝厂成立于1936~1937年间,当时隶属于伪满轻金属株式会社。厂内还有24000A铝电解槽136台,到1943年达到最高年产量8000吨。厂内有氧化铝生产车间,利用我国本溪小市牛心台一带的铝土矿,用柏德逊法在电弧炉内制造铝酸钙和低品位硅铁合金,然后用碳酸钠溶液从铝酸钙中提取出氧化铝,1945年日本投降时停产。1950年时抚顺铝厂是筹备处,主任是王成之,副主任是王俊峰,我担任计划科科长,工厂里生产电石。当时抚顺铝厂是国家156项工业建设项目之一。我在抚顺铝厂工作了5年,主要从事铝厂的恢复建设和人员培训,当时我是国内惟一的有炼铝经验的工程师。不久,来了20多位苏联专家。负责人是克里苗诺夫,他是全苏铝镁设计研究院的总工程师,他带领各个方面的专家来厂。东北有色金属局局长李华指派我组成相应的配合苏联专家工作的人员,因为原有的厂房和设备还可利用,所以要做详细的调查研究工作,以便拟定改造方案。此项工作在1950年10月完成。

为了迎接即将来临的恢复铝生产,培养人才便成为重要工作。1951年,由王成之主任率十来人去苏联乌克兰的扎波罗热铝厂实习,其中有袁作仁、徐树田、韩薇、赵锦玲、郝玉美等技

术人员,还有老电解工国明宣和孙玉贵等,实习了2年。

除了派一部分人去苏联学习之外,主要的人员培训工作落实在国内。在国内做了三件事:第一,在厂内举办一个冶训班以及成立技工学校;第二,去沈阳工学院培训大学毕业生;第三,在厂内建造“小电解”试验基地。

(一)培养冶训班学员

1950年下半年,厂里成立了一个冶炼训练班,从上海招募20多名高中毕业生来厂培训铝冶炼技术,由郭德藩、罗绍周同志负责培训班的工作,我担任铝电解的授课,并编写了一本铝冶炼教材(油印本)。这个冶训班于1952年结束。后来,毕业的学员成为铝厂建设和生产的骨干力量。冶训班学员中有陆洪、沈泽方、金惠华、朱家昆、陈毓灵等20多人。

(二)培养沈阳工学院应届毕业生

1952年春,沈阳工学院向东北有色金属局借调铝冶炼与加工方面的技术人员来校教书,培训应届毕业生以适应铝工业建设的需要。东北有色金属局便派马龙翔先生(当时在葫芦岛锌厂)和我(在抚顺铝厂)二人去沈阳工学院临时任教一个学期。当时靳树梁先生为沈阳工学院院长,马先生教铝加工课,我教铝电解课,王延明老师任助教,培训了应届和下一届学生共计50多人毕业,他们毕业后分配到抚顺铝厂和哈尔滨铝加工厂。在这批学员中有韩沛川,王立若,徐树田,韩薇,沈时英,姚世焕,尹家麟,李达人,杨均阁,杨瑞祥,裴尚魁,王德润,孔繁秀,朱宝章等人。他们在新中国铝镁冶炼和加工事业中,成长为技术领导,有的成为厂长、研究院院长,有的成为设计大师、总工程师或教授,贡献重大。

(三)筹办“小电解”

1952年暑期,我从沈阳工学院返回到抚顺铝厂,和科内黄光夏同志合计筹建一台2000A的小型预焙阳极电解槽。氧化铝和冰晶石等原料利用抚顺铝厂在解放时留存下来的,阳极用石墨电极。我画了一个电解槽的图样,送给当时在厂的苏联设计专家巴甫洛夫看,征求他的意见,他欣然同意了。后来由张大有同志设计这台电解槽。

黄光夏是福建人,毕业于一个专科学校,他有良好的专业修养,善于思考并解决问题,动手能力很强。在1950年进厂后,他解决了制造铜电刷用的铜粉生产问题,获得了抚顺市劳动模范的光荣称号。

一次,我和黄光夏一起到沈阳市铁西区的沈阳冶炼厂去调拨一台2000A直流发电机。办完调拨手续后,黄光夏随车返回抚顺,不料中途遇险,车子翻入山沟中,幸未发生重大事故。

不久,一台2000A的预焙阳极电解槽建成了。厂里调集几位伪满时代工作过的老电解工人,其中有聂东明、关佳文、冀梅山、李祖顺等,还调来了几位新入厂的技术人员,其中有王德润、孔繁秀、李达人、朱宝章等。由黄光夏任试验负责人。许多老工人向我叙述了他们在伪满时代抚顺铝厂中受到种种迫害的情况,他们亲热地称呼我为“邱工程师”。此台2000A电解槽启动不久,便生产出了新中国的第一块铝锭。以后为了适应培训更多的新电解工人的需要,增建了10台3000A自焙阳极电解槽。抚顺铝厂内称此试验车间为“小电解”。想不到在20世纪60年代大跃进时期,全国各地掀起了一股兴办小电解厂的热潮。1954年10月,新建的大电解槽开工,“小电解”便停顿下来了。当时我和冀梅山二人最后从“小电解”撤退出来,转入大电解。

(四)铝厂建设和工业生产

1952年正式成立了抚顺铝厂,由张戈任厂长。不久便开始了铝厂的设计与建设工作,王连第任设计科科长,我担任计划科科长。

1952年,苏联又派一个团组来抚顺铝厂,其任务是改建设计抚顺铝厂,使之年生产铝达到25000吨。此项目包括:新建一座120米高,直径12米的大烟囱,用以排放电解厂房内的烟气;改建电解厂房,把旧厂房向上提升1米,同时加大天窗的通风面积100%。为此把厂房梁柱提高1米,此法称为“托梁换柱”,完全成功。不久,144台54000A电解槽安装起来了,分布在4个厂房内(即2个双跨度的厂房内),1个高达120米的大烟囱竖立起来了。1954年10月间便投入工业生产。电解厂的电流从原设计的54000A增大到60000A。工厂的额定生产能力达到了25000吨。当时的车间主任是徐树田,书记是谢建,我是第三厂房主任。抚顺铝厂是新中国的第一个铝厂,它在1954年至2000年的46年中,为国家生产了四百多万吨铝,并且培养了上千名工程技术人员,产生了巨大的经济效益和社会效益,贡献很大。

我在抚顺铝厂的5年内,做了不少很有意义的工作。第一,我是一个旧社会出身的知识分子,又是从台湾回来的,竟然受到了党和政府的信任并委以重任,参加了抚顺铝厂的计划、设计和人员培训工作,颇为欣慰。在新社会中和许多老工人融合在一起,认识到工人阶级的优秀本质,他们勤劳勇敢、不畏艰难困苦、大公无私的精神,使我深受教育。第二,我和苏联资深设计专家巴甫洛夫等结下了深厚的友谊。巴甫洛夫在回国之前,将自己随身携带的俄国老一代铝冶金专家费道切夫所写的《冶金中的电解》(俄文本第二卷)(1934年出版)送给我,在书的扉页上他写了两句话:一句是“纪念和邱竹贤同志共同工作的时光”,另一句是“理论是实践的良友”。这是一份非常宝贵的纪念品。此外,在工业铝生产中,我用不太熟练的俄语,同苏联的生产专家讨论电解槽生产中出现的问题,他们称赞说:“邱同志有良好的生产技术”。第三,在担任厂房主任以及“小电解”工程师期间,我认真地钻研生产技术,仔细观察槽内火眼中喷冒出来的火苗颜色和形状。对于病槽的治疗我采用中医标本兼治的方法,果然有些效果。当时我每天早上7点上班,晚上8点下班,中午带个盒饭,虽然烟熏火燎,我却乐此不疲。这不仅有助于提高炼铝的技术水平,而且有助于锻炼旺盛的意志。我认为,这五年是我的黄金时代。望花区的瓢儿屯、七百商场以及抚顺市区都是我至今仍然留恋的地方,特别是我的夫人先后在市内东山医院里生产下了两个儿子,所以说,抚顺也是我的故乡。

五、调入东北大学

1955年春天,东北大学(当时称东北工学院)派王延明老师来我的住处谈起,学校里来了一位苏联教授,要成立轻金属冶炼教研室,想调我去任教。以后厂里管人事的同志跟我谈:东北工学院要我去那里教书,征求我的意见,我当时便同意了。

1955年4月间,我到东北工学院冶金系会见了吴锦主任。他说,欢迎您来校任教,名义是副教授,担任新成立的轻金属冶炼教研室主任,待遇照抚顺铝厂的。当时我在抚顺铝厂里的工资是480分(东北流通券)。

从1955年5月起,我便在东北工学院就职了,到2000年超过了45年。我在东北工学院开始了教书的生涯,但是仍然离不开轻金属(铝)。数十年来,我先后承担轻金属专业本科生的教学工作,计有数百名学生毕业,以后又培养硕士研究生26名,博士生30名(已毕业)。我把工业生产经验与理论研究结合起来,写成有用的书籍,撰写了专著《铝冶金物理化学》、《铝电解原理与应用》等书。同时,我积极参与国内工业生产试验,并与国外十多家铝厂和研究所取得联系,有助于发展我国的铝工业,并提高学术水平。

我先后出访了奥地利、挪威、丹麦、日本、美国、澳大利亚、新西兰、俄罗斯等国的大学、铝厂和研究所,结识了许多学识渊博的学者,其中挪威奥斯陆大学的格罗泰姆教授(Professor Kai

Grjotheim)对于我的学术思想启迪甚大,而且5次邀请我去挪威访问。此外,他接受我推荐的6名青年教师去挪威大学每人进修2年,并供给生活费和往返路费。他和福兰德教授(Professor Tormod Förländ)、尔耶教授(Professor Harald Öye)等推荐我为挪威科学院院士和挪威技术科学院院士,我受惠之余,深为感激。

六、探索铝工业节能的规律和有效途径

(1)铝工业是个用电大户,节省电能是一项重要的研究课题。我在研究融盐电解理论的基础上,致力于探索铝工业节电的基本规律和有效途径。1988年在美国矿冶工程师年会上发表的“铝电解中节能”的论文是研究心得的总结。从计算近40年来世界上不同型号和不同电流强度的24台电解槽的能量平衡入手,总结出减少电解槽的热损失系数、提高电流效率和保持能量平衡三条节电基本规律。我以单位电量核算电解槽的热损失量,称之为热损失系数,其单位为伏特。每减小1单位热损失系数,相当于节电3300千瓦·时/吨铝。我以亲身的工作经验认识到提高铝电解槽的电流强度可以节电。20世纪40年代我在台湾高雄铝厂工作时,电解槽的电流强度只有2.7万安培,而现在大型槽已达到28万~30万安培。由于热损失系数减少1.3伏特,电能消耗量减少4300千瓦·时/吨铝。这三条节电理论具有普遍的适用性,也可推广至其他金属或合金的电解冶炼(见图1)。

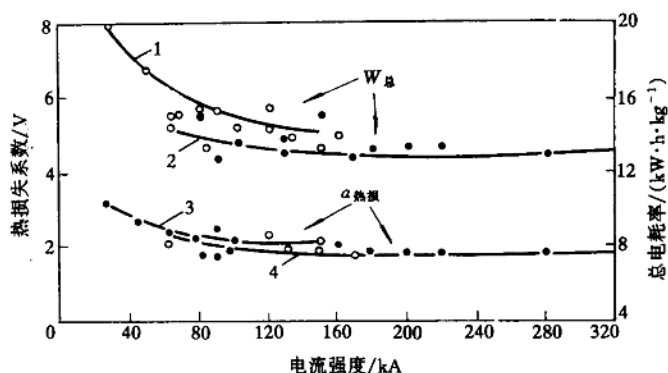


图1 铝电解槽的能量消耗和热损失系数随电流强度的变化曲线

1,2—自焙阳极电解槽;3,4—预焙阳极电解槽

(2)为了节省铝电解的电能消耗量,我长期研究铝电解质的新组成,谋求改进铝电解的生产指标。早在1956年,在苏联教授A.И.莱涅尔的指导下,我完成了铝电解质添加氟化镁的论文。抚顺铝厂的6万安培电解槽试验此种新型添加剂成功,全厂推广应用,以至于全国。经过40年来的长期考验,确认氟化镁是一种优良的添加剂,可以提高电流效率并且节电,而且价格低廉,其原料菱镁矿是我国丰产资源,有长远的应用价值。

我从1959年开始研究低温铝电解。低温铝电解的目标是要实现温度在800~900℃的铝电解,得到液体铝。因为铝的熔点为660℃,要得到液体铝,电解温度只要达到800~850℃即可,大约高出铝的熔点150~200℃。当初所用的电解质为氟-氯化物体系,添加氟化铝,在此体系中找到一系列的低熔点成分,可在850℃左右进行电解,在实验室内有较好的效果。1975年,我用 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-AlF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元共晶系附近的电解质做电解试验,得到一颗5g重的铝球,温度750℃。近20多年来,继续研究纯氟化合物体系,添加氟化铝,在此体系中找到宽

广的低熔点区域,可以在 750~900℃ 进行电解。何鸣鸿和李庆峰在此项研究中系统地测量了低熔点电解质体系的物理化学性质、电化学性质以及电解的电流效率和碳耗量等。我在 1985 年美国矿冶工程师年会上发表了低温铝电解的论文。1996 年又研究了纯氟化物、氯-氟化物和纯氯化物电解的低温铝电解。因此对低温铝电解有了较多认识。现在已建立 1000A 试验槽,而且已经开始进行工业电解试验。预期电解槽的热损失量会因电解温度降低而明显减小,而且电流效率会明显提高,两者均可节电。此项研究受到国际学术界的重视。这是一种具有广阔应用前景的新型电解质。

(3) 我们于 1975 年提出了加宽电解槽导电母线以减少其电压降的建议,这和许多铝厂的工程技术人员想法相符合。我国铝厂在此项技术改造中群策群力,取得了明显的节能效果,每吨铝节电 200 千瓦·时。

1982~1984 年,我参加了抚顺铝厂的首批三台 13.5 万安培大型电解槽的试制工作,承担铝电解质组成研究和电流效率测量。大型槽试验成功后,经过中国有色金属工业总公司鉴定,电能消耗率降低到 13500 千瓦·时/吨铝,该课题获有色金属工业总公司一等奖。此种槽型在抚顺铝厂和包头铝厂得到推广应用,成效显著。后来郑州轻金属研究院建设 28 万安培大型铝电解槽,我参加了方案论证和生产总结鉴定。

七、研究铝基母合金与新型电极材料

(1) 历年来,我与合作者用融盐电解法研制了多种铝基母合金,其中有铝-硅、铝-钛、铝-钛-硼、铝-锰、铝-镁、铝-铬、铝-锶、铝-稀土等,合金的质量提高了,而生产成本降低。图 2 是生成铝基合金自由能变化图。

(2) 1997 年全世界的铝产量约为 2400 万吨,需要大量的优质石油焦用来制造碳素阳极。按每吨铝计算,需 0.6 吨碳素阳极。近年来,因优质碳素材料价格上涨,大约占铝生产成本的 20%,故谋求不消耗的电极材料(又称为惰性电极, dimensionally non-consumable electrode)以及电解槽的绝缘侧壁材料。

我们从 20 世纪 80 年代起开始研制此种惰性阳极、惰性阴极和绝缘侧壁材料。在惰性阳极方面采用 SnO_2 基材料和镍、铁、锌基氧化物的陶瓷材料。在惰性阴极方面采用 TiB_2 基材料。在绝缘侧壁方面采用碳化硅和氧化镁-碳材料。至今惰性阳极仍属实验室试验阶段,尚未在工业上应用。今后可做的工作很多,但是难度很大。

制造惰性阴极是在 20 世纪 80 年代末,当时研究生王晶和李冰先后在实验室内研制 TiB_2 -

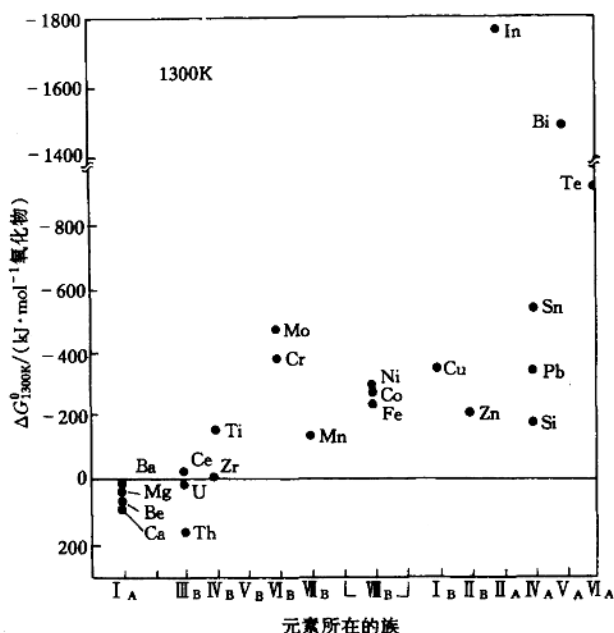


图 2 各种元素氧化物在冰晶石熔液中被铝还原反应的 ΔG°

C 糊, 然后与山东铝厂在 60000A 工业槽上合作进行 TiB_2 惰性阴极工业试验, 1992 年通过有色金属工业总公司鉴定, 每吨铝可节电 200 千瓦·时。

(3) 在钢板上电镀 Al-Mn-RE 合金, 以及在铝材上电泳涂漆, 制成色彩鲜艳的各种材料。

八、发展融盐电解理论

(1) 电极现象的观察和解释。融盐是一种高温离子熔液, 冶金工业上应用于电解法生产铝等多种金属。我的工作主要在于发展融盐电解理论, 涉及融盐相图和结构, 工业铝电解质组成和性质, 界面现象和电极过程等。

融盐不但温度高, 而且具有很大的腐蚀性, 理论研究工作难度大, 若干基本理论至今仍然存在分歧意见, 其主要原因在于研究得不透彻。我与合作者对于所研究的课题一一付出了艰辛的劳动, 因而获得若干新的重要进展。

在融盐电解中, 由于电极带了电荷, 融盐对电极的湿润性因此改变。融盐湿润性研究起始于 1964 年, 在当时的实验中观测到电极对融盐的“排斥—吸引—再排斥—再吸引”的现象, 通过拍摄大量而系统的实验照片, 归纳了普遍的湿润现象, 提出阳极排斥电解液和阴极吸引电解液的基本规律。其规律是: 不论阳极和阴极的材质为何, 正在析出气体的阳极对熔液有一种排斥力, 力图把熔液从阳极表面上排挤开, 这种现象称为“阳极排斥”现象; 而正在析出金属产物的阴极对熔液有一种吸引力, 力图把熔液拉向阴极, 这种现象称为“阴极吸引”现象, 这两条规律都具有电化学的特性。运用这一规律可以解释融盐电解中发生阳极效应以及电解液向阴极渗透的机理, 从而可以设法在工业上加以防范, 达到节省电能和物料、延长电解槽寿命的目的。

在阳极效应研究中最重要发现是观测到阳极效应发生时, 阳极上气泡的喷射现象, 特别是当槽电压增大时气泡的喷射现象异常强烈, 其结果是对铝电解电流效率产生不良影响, 这是由于阳极气体在高温时膨胀造成的。美国铝业公司豪平教授说, 这种现象是前人未曾报道过的。(图 3)

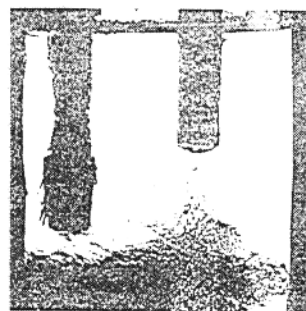


图 3 阳极效应时发生的阳极
气体喷射现象
左—阴极; 右—阳极

(2) 金属雾的观察。我和范立满等研制了一台高温透明电解槽, 在此槽内观测了铝电解、镁电解以及各种碱性金属融盐界面上的溶解现象, 用照相机和摄像机记录下金属雾的颜色和特征。发现: 铝雾呈蓝紫色, 镁雾呈灰黑色, 钾雾呈绿色, 钠雾呈蓝色, 锂雾呈灰色。把 $78\% \text{Na}_3\text{AlF}_6 + 16\% \text{AlF}_3 + 3.5\% \text{CaF}_2 + 2.5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ 熔液盛置于 BN 管中, 当 $T = 850^\circ\text{C}$ 时, 铝的溶解度 = 0.202% (质量)。鉴别出金属雾是一种细微的粒子, 具有还原性。根据量子化学研究的结果, 提出了生成胶体溶液与真溶液的混合溶液观点。图 4 是铝在冰晶石-氧化铝熔液中生成金属雾的照片 ($T = 850^\circ\text{C}$)。

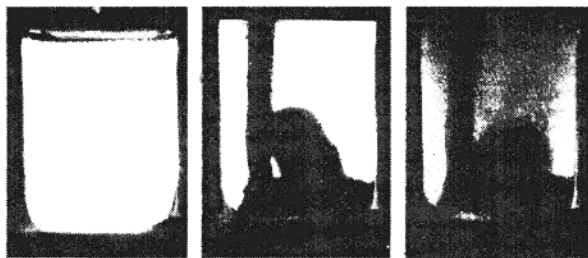


图 4 铝在冰晶石熔液中溶解时生成金属雾的照片
(透明电解槽摄像)

(3) 在上述融盐理论研究中, 我是总

体学术思想与重要创新点的提出者,我在《铝电解原理与应用》(中国矿业大学出版社出版,1998年)一书中刊登了有关的彩色照片45幅。所取得的丰硕成果,受到国内外学术界的重视。我与合作者先后于1989年和1990年获得国家教委科技进步奖二等奖(金属溶解和电流效率研究),和一等奖(铝电解中的界面现象和界面反应研究),以及1991年获国家自然科学基金三等奖(铝电解中若干物理化学问题的研究),1992年获国家科委科技进步一等奖(锂盐糊节能技术)。2000年获得教育部自然科学奖二等奖(低温铝电解的物理化学过程)。

九、研究生工作与科学著作

早在1961年,我开始培养研究生。1981年经国务院学位委员会审批,成为全国首批有色冶金专业博士生导师。至2000年8月,已有30名博士生和26名硕士生毕业。现在有6名博士生在读。我很看重研究生的培养工作,他们是年轻有为的人,怀抱振兴中华的雄心与壮志,克服种种困难,甘愿献身于科学事业。我的第一批研究生是在“文革”以前培养的,当时有柳连舜、李席孟等,未授予学位。“文革”后成立博士点,我开始培养博士研究生。我自己很惭愧,我本身没有博士学位,只是个学士。唐代韩愈在“师说”一文中写道:“弟子不必不如师,师不必贤于弟子,闻道有先后,术业有专攻,如是而已”,我以此自嘲。我培养的第一位硕士学位获得者是从包头铝厂来的王平甫同志,第一位博士学位获得者是张明杰同志,他是本校的教师。硕士和博士研究生在艰苦的科研工作中做出不少优秀的成绩,把融盐研究工作大大地推向前进。我在科研与教学中因此得益甚大,明白了“教学相长”的意义。在诸位研究生当中,确实有不少在自己的独立工作中出类拔萃,已经成为栋梁之材的,异常令人振奋。1995年我当选为中国工程院院士,在此崇高的荣誉面前,我于心有愧。我认为,现代中国的炼铝事业还比较落后,需要大批人才,赶超世界先进水平,使祖国早日强大起来。

目睹我国铝工业的落后现实,我认识到从事教育工作培育炼铝人才的重要性。故坚定地选择了从教的道路。为了提高教学质量,必须编写好教材。而要写好教材,宜先从事科学研究,取得科研成果,借以充实教材内容,加深理论认识,发展新的学说;同时又要密切联系工业生产实际,学以致用。因此,我和研究生一起成年累月地在实验室内从事科学研究工作,又深入到全国大小铝厂吸取丰富的营养,同时把知识毫无保留地传授给技术人员和工人。我把勤奋学习、努力开展科学研究和深入实际进行工业生产试验三者有机地联系起来。

《铝冶金物理化学》一书经徐采栋先生推荐,于1985年出版。其初稿则草拟于1964~1972年间。其间虽然历经“文革”坎坷,我始终坚毅地从事此书的撰写工作。1973年后,我又广泛地查阅了英、俄、日、德等国的有关文献,认真做了读书笔记,分门别类整理成60余册原始资料;对若干重要的课题——铝电解中的湿润现象、渗透现象、金属溶解、电流效率和电能节省等,积极从事实验室的研究和工业生产试验,并取得了一系列新成果,终于在1980年完成了此书初稿的修订。因此,我在此书中能够把物理化学的基本理论和铝冶金的生产实践联系起来。

1998年7月出版了《铝电解原理与应用》一书。此书刊载了我们自己拍摄的融盐电解彩色科研图片45幅,以及历年的主要科研成果,并汇集当代的国内外部分新文献资料。此书是一本具有重要理论意义和应用价值的专著。

我单独或者与他人合作撰写科学论文逾200篇,出书10本,翻译书8本。我在这些论文和书中,引用了诸位研究生和教师的许多研究成果,在此深致谢意。

我一生谨慎,勤奋工作,正在继续为发展我国的冶金工业而献身。我在幼年时期所怀抱的“炼铝”的理想终于实现了。这是我平生的一件大事。

十、赖炼铝以渡

在人的一生中悲欢离合是难免的。我一生中最大的幸福起始于 1947 年与年轻美丽的缪秀芷女士结婚。50 多年来,她始终不懈地呵护着我的炼铝生涯,她抚育养大了 2 个儿子(天红和天爽)和 1 个女儿(天庆),直到他们成长。她和我真诚地相爱着。“文革”以后,她常对我说:“你这个人‘可怜’,对我忠诚。”

她是浙江黄岩人,生于 1930 年 12 月 2 日,毕业于黄岩县立师范学校。我们结婚之后,总是在一起,经过台湾、抚顺,以至于沈阳。正当我们生活安定,生活水平越来越好的时候,她因多年积劳成疾,不幸于 2000 年 6 月 21 日病逝于沈阳。她的逝世留给我极大的悲伤。

她自幼受到优良的家庭和社会教育,具有出色的个人和文化素养,性情文静淑雅,为人平易谦和。数十年来,她操理家务,崇尚俭朴,相夫教子,默默地辅佐我的事业,辛勤地培育子女,她和我度过了“文革”的艰苦岁月,促成了我和子女在事业上和学习上的成就。她的一生是平凡的一生,但是她的生命将在我们今后的工作和生活中以及绵绵的怀念中得到延续。

她在临终前有遗言:“是也有,非也有。”这是她对我俩 50 多年来共同生活的总结,富有哲理和深刻内涵。我要做深入的回忆,撰写一本纪念册,藉以寄托我的哀思。

下面我引用我国桥梁专家茅以升先生的一段话:

“人生一段征途耳,其长百年,我已走过十之七八,回首前尘,历历在目,崎岖多于平坦,忽深谷,忽洪涛,幸赖桥梁以渡,桥何名欤?曰奋斗。”

茅老以造桥闻名于世,他是我的老师。我靠炼铝度过此生,也将奋斗不已。

2001 年元月于东北大学