



主编 汪贻水
彭 觥
肖垂斌

矿山地质选集

第三卷 六十四种有色金属及中国铂业



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



主编 汪贻水
彭 觥
肖垂斌

矿山地质选集

第三卷 六十四种有色金属及中国铂业



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

内容简介

《矿山地质选集》是值中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 周年之际,根据“国务院关于加强矿山地质工作的决定”,将我国各矿山地质工作者及中国地质学会矿山地质专业委员会 35 年来在做好矿山地质工作方面所取得的成绩、进展和突破,以其阶段性总结、著作、论文形式集结出版,以达到承前启后,促进提升的作用。选集共分十卷,内容包括矿山地质实用手册,实用矿山地质学理论与工作,六十四种有色金属及中国铂业,矿山地质与地球物理新进展,工艺矿物学研究及矿山深部找矿,3DMine 在矿山地质领域的研究和应用,尾矿库设计、施工、管理及尾矿资源开发利用技术手册,铅锌矿山找矿新成就,铜金矿山找矿新突破,矿山地质理论与实践创新。

本卷为《矿山地质选集丛书第三卷:六十四种有色金属及中国铂业》,是《矿山地质选集》丛书主编汪贻水、彭觥、肖垂斌选编自《六十四种有色金属》(汪贻水、王志雄、沈建忠编著,中南工业大学出版社 1998 年出版)、《中国铂业》(主编:汪贻水,副主编:彭觥、肖垂斌、王小文、尹克强,冶金工业出版社 2012 年出版)以及《宝石资源与首饰市场》(彭觥编著,以前未出版)。本卷介绍了六十四种有色金属的基本知识、资源概况、性质与用途及生产流程;提出振兴中国铂业以及铂族元素勘查和开发的战略和战术;探索了矿山宝石资源开发和利用及市场状况。本书涵盖面广、内容丰富,对矿山地质工作者具有启发思维、扩充知识的作用。

本书主要供矿山地质工程师使用,对从事矿山地质领域的科研、设计、教学、矿山管理人员也是一部极为重要的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矿山地质选集第三卷:六十四种有色金属及中国铂业/汪贻水, 彭觥,肖垂斌主编. —长沙:中南大学出版社,2015. 8
ISBN 978 - 7 - 5487 - 1877 - 2

I. 矿... II. ①汪... ②彭... ③肖... III. ①矿山地质 - 文集②有色金属 - 文集③铂 - 有色金属矿床 - 矿业 - 概况 - 中国 - 文集
IV. ①TD1 - 53②TG146 - 53③F426. 1 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 186312 号

矿山地质选集第三卷:六十四种有色金属及中国铂业

主编 汪贻水 彭 觥 肖垂斌

- ☐责任编辑 刘石年 胡业民
- ☐责任印制 易建国
- ☐出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
- ☐印 装 湖南地图制印有限责任公司

- ☐开 本 880 × 1230 1/16 ☐印张 28.75 ☐字数 987 千字
- ☐版 次 2015 年 8 月第 1 版 ☐印次 2015 年 8 月第 1 次印刷
- ☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1877 - 2
- ☐定 价 196.00 元

《矿山地质选集》编委会

顾问	何继善	孙传尧	沃廷枢	王道隆	陈景河	王京彬	
主编	汪贻水	彭 觥	肖垂斌				
委员	(按姓氏笔画排序)						
	王玉往	王建青	王建国	王 峰	王海龙	王静纯	文美兰
	邓金灿	申 萍	叶樟良	史海燕	冯晓元	巩恩普	刘石年
	刘代喜	刘全坤	刘金平	刘建军	刘建雄	刘铁兵	刘慎波
	江新华	孙信牙	孙振家	杜运斌	杨志刚	杨 兵	杨昔林
	杨保疆	李万亨	李义邦	李广斌	李升福	李克庆	肖仪武
	邱小平	何军生	邸明明	汪 宏	沈远超	沈建忠	宋晓军
	张小华	张木毅	张吉龙	张会琼	张锦章	陈军峰	陈 进
	陈锡廉	陈新旺	范其明	范洪海	罗已翀	罗先熔	周尚国
	郑小礼	屈绍东	胡业民	胡建明	胡祥昭	饶玉学	姚 曙
	袁怀雨	聂荣峰	莫江平	贾国相	党新生	高 林	陶 勇
	黄明然	黄 诚	常玉刚	梁新权	彭建堂	彭润民	韩秀丽
	韩润生	程 春	雷时斌	樊继平	潘 才	魏俊浩	
编辑部成员	汪贻水	彭 觥	肖垂斌	胡业民	刘石年	范其明	邸明明
	史海燕						

前 言

今年是中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 周年。35 年来,全国矿山地质找矿、勘探和开发取得了巨大成就,矿山地质学的理论研究和矿山地质找矿的新技术、新方法也有了长足的进展,发表的地质论著数以千计。此次就中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 周年之际,我们选择了部分论文著作编辑出版这套《矿山地质选集》,共分为十卷。第一卷为矿山地质实用手册,第二卷为实用矿山地质学理论与工作,第三卷为六十四种有色金属及中国铂业,第四卷为矿山地质与地球物理新进展,第五卷为工艺矿物学研究与矿山深部找矿,第六卷为 3DMine 在矿山地质领域的研究和应用,第七卷为尾矿库设计、施工、管理及尾矿资源开发利用技术手册,第八卷为铅锌矿山找矿新成就,第九卷为铜金矿山找矿新突破,第十卷为矿山地质理论与实践创新。

自中华人民共和国成立特别是改革开放 30 多年以来,广大地质工作者在全国范围内开展了大规模的矿产勘查工作,作出了巨大贡献,有力地为我国工农业生产及国民经济增长提供了矿产资源保障。矿业的发展,也给矿山地质工作带来了极为繁重的任务,但意义也极为重大。2006 年 1 月 20 日国发[2006]4 号文《国务院关于加强地质工作的决定》指出:“矿山地质工作对合理开发利用资源、延长现有矿山服务年限意义重大。按照理论指导、技术优先、探边摸底、外围拓展的方针,搞好矿山地质工作。加强矿山生产过程的补充勘探,指导科学开采。加快危机矿山、现有油气田和资源枯竭城市接替资源勘查,大力推进深部和外围找矿工作。开展共伴生矿产和尾矿的综合评价、勘查和利用。做好矿山关闭和复垦的地质工作。”

为贯彻上述宗旨,中国地质学会矿山地质专业委员会及其有关矿山 35 年来,竭尽全力,将扩大矿山接替资源、延长矿山服务年限作为首要任务,为发展矿山地质工作作出了重要贡献,为许多大、中型矿山提供了大量的补充资源,例如中国铂业——金川大型铜镍(铂)硫化物矿床;中国古铜都——铜陵及周边地区找矿理论及实践;紫金矿业及山东玲珑金矿的找矿进展;戈壁明珠——锡铁山铅锌矿和西南麒麟——会泽铅锌矿以及广东凡口铅锌矿的深边部找矿突破,均使这些大矿山获得了新的生命,全国矿山地质工作也取得了宝贵的经验。

为适应建设资源节约型、环境友好型社会的总体要求,必须以科技进步为手段,以管理创新为基础,以矿产资源节约与综合利用为重要着力点,全面提高矿产资源开发利用效率和水平。多年实践证明,工艺矿物学研究在矿产资源评价和矿产综合利用过程中起到了极其重要的作用,尤其在低品位、共伴生、复杂难选等矿产资源及尾矿资源的开发利用过程中取得了明显的效果。许多矿山在这一方面取得了重要进展和可观的效益。

加强矿山管理和环境地质工作,合理规划地质资源的开采,防止乱挖滥采,提高采、选回收率,减少贫化损失和浪费,也是矿山地质的一项重要工作,要大力开发利用排斥物质,变废为宝,增加矿山收益。

矿产资源是矿业发展的基础,人才资源是矿业发展的保障。中国地质学会矿山地质专业委员会成立 35 年来,一直得到我国老一辈地质学家的关心和支持。一方面是他们学会和对矿山地质发展的关心和支持,另一方面,在他们的培养和帮助下,大批年轻的矿山地质工作者不断成长、崛起。在大家共同努力下,开创出今天的矿山地质事业的大好局面。《矿山地质选集》所收录的部分论文著作,反映了我国老一辈和新一代地质工作者在矿山地质理论研究、矿山地质地球物理找矿新方法新技术、计算机技术和 3DMine 软件在矿山地质中的应用、矿山深边部找矿等方面的新进展、新突破。只是鉴于选集篇幅所限,无法将 35 年来矿山地质工作者的论文全部选入,敬请谅解!

展望未来,虽形势大好,但任务仍然艰巨。唯有以此为新的起点,努力攀登新的高峰!

让我们共同努力吧!

《矿山地质选集》编委会
2015 年 3 月

目 录

一、六十四种有色金属

I 有色轻金属

1	铝(aluminium)	(1)
2	镁(magnesium)	(9)
3	钾(potassium)	(15)
4	钠(sodium)	(18)
5	钙(calcium)	(21)
6	锶(strontium)	(23)
7	钡(barum)	(25)

II 有色重金属

8	铜(copper)	(28)
9	铅(lead)	(35)
10	锌(zinc)	(39)
11	锡(tin)	(47)
12	钴(cobalt)	(53)
13	镍(nickel)	(58)
14	锑(antimony)	(67)
15	汞(mercury)	(72)
16	镉(cadmium)	(76)
17	铋(bismuth)	(78)

III 贵金属

18	金(gold)	(81)
19	银(silver)	(86)
20	铂族金属(PGE)	(90)

IV 稀有轻金属

21	铍(beryllium)	(96)
22	锂(lithium)	(100)
23	铷(rubidium)	(104)
24	铯(caesium)	(106)

V 稀有难熔金属

25	钛(titanium)	(109)
26	锆(zirconium)	(114)
27	铪(hafnium)	(117)

28	钒(vanadium)	(119)
29	铌(niobium)	(122)
30	钽(tantalum)	(126)
31	钨(tungstem)	(128)
32	钼(molybdenum)	(133)
33	铼(rhenium)	(138)

VI 稀有分散金属

34	镓(gallium)	(140)
35	铟(indium)	(142)
36	铊(thallium)	(144)
37	锗(germanium)	(146)

VII 稀土金属

38	稀土金属(RE, rare earth metals)	(149)
----	-----------------------------	-------

VIII 其他有色金属

39	硅(solicon)	(160)
40	硼(boron)	(167)
41	硒(selenium)	(171)
42	碲(tellurium)	(173)
43	砷(arsenlc)	(175)
44	钍(Thorium)	(177)

二、中国铂业

I 铂的资源

开拓铂族元素新资源的重要人途径	涂光炽	(179)
简论铂族金属	汪贻水	(184)
铂族金属	倪集众	(190)
世界铂资源形势预测	夏既胜 秦德先 付黎涅	(208)
铂族元素矿床地球化学勘查的战略和战术	成杭新 赵传冬 庄广民 姚文生	(213)
河北省丰宁县红石砬铂矿床	陈希廉	(218)
世界铂族金属矿产资源及开发	张 葶	(228)
甘肃金川铜镍矿体中铂、钯赋存状态研究	於祖相	(238)
元谋朱布铂钯矿地质特征及成因类型	王小文 王在权	(242)
河南省唐河县周庵发现含 30 余吨铂族金属及 400 余万吨铜镍硫化物矿床	群 集	(249)
四川大岩子铂-钯矿床(点)热液成矿的地球化学证据	成杭新 赵传冬 庄广民 刘英汉 张 勤 赵支刚	(250)
陕西太白金矿含金角砾岩中铂族元素特征	邱士东 朱和平 林龙华	(256)
中国铂族元素矿床类型和地质特征	梁有彬 李 艺	(262)
新疆北部镁铁-超镁铁质岩的 PGE 成矿问题研究	王玉往 王京彬	(267)

II 铂的资源回收

我国铂族金属开发状况	王淑玲	(280)
------------	-----	-------

我国铂族金属资源现状与前景 张光弟 毛景文 熊群尧(288)

我国铂族元素矿床特征及资源潜力分析 耿 林 翟裕生 彭润民(292)

金宝山低品位铂钯矿浮选中蛇纹石类脉石矿物的行为研究 许荣华(299)

III 铂的加工

先进铂材料与加工制备技术 宁远涛 朱绍武 管伟明 张昆华 陈伏生(304)

以科技促进生产 同社会共进步 杨志先(313)

IV 铂的首饰

我国铂钯首饰市场现状 彭 颢(315)

振兴我国铂业必由之路——开源节流 彭 颢 汪贻水(318)

三、宝玉石资源与首饰市场

1 中国珠宝开发史略 (321)

2 历代宝玉石首饰及工艺品精华 (336)

3 中国珠宝首饰产业园区大发展 (345)

4 钻石资源、市场与戴比尔斯 (368)

5 翡翠资源与辨石技巧 (392)

6 白玉与碧玉 (399)

7 祖母绿、准祖母绿与人工合成祖母绿 (407)

8 红宝石和蓝宝石及其他的矿床 (412)

9 珍珠——生命之光 (423)

10 三种重要宝玉石矿床 (434)

后记——珠宝生涯 30 年 (450)

一、六十四种有色金属

I 有色轻金属

1 铝 (aluminium)

1.1 铝的发现小史

Aluminium 一词是从古罗马语 alumen(明矾)衍生而来的。1746 年德国科学家波特(J. H. Pott)用明矾制得氧化铝。1807 年英国人戴维(H. Davy)电解熔融氧化铝得到金属，第二年戴维给预想的金属取名为 alumium，后改为 aluminium。1825 年丹麦科学家奥斯忒(H. C. Oersted)用钾汞齐还原无水氯化铝，获得几毫克金属铝。1827 年德国科学家沃勒(F. Wohler)用钾还原氧化铝得到少量金属铝。1854 年法国科学家德维尔(S. C. Deville)用钠还原 NaAlCl_4 配合盐制得铝，并建厂生产一些头盔、餐具及玩具，其价格昂贵，等同于黄金。1886 年(美)霍尔(Hall)和(法)埃鲁特(Heroult)同时提出了冰晶石-氧化铝熔盐电解炼铝方法。1888 年美国匹兹保建立第一家电解铝厂，铝生产进入一个新阶段。1956 年世界铝产量超过铜，跃居有色金属首位。

1.2 铝的性质

铝的标准电极电势(25℃)为 -1.662 V ，电化当量 $0.3356\text{ g}/(\text{A} \cdot \text{h})$ 。表 1-1 为纯铝的主要物理性质。

表 1-1 纯度为 99.99%的金属铝的主要物理性质

密度(20℃)	2.70	g/cm^3
熔点	660.1	℃
沸点	2520	℃
平均比热(0~100℃)	917	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
熔化热	10.47	kJ/mol
汽化热	291.4(估算值)	kJ/mol
热导率(0~100℃)	238	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
电阻率(20℃)	2.67	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$

1.3 铝的资源

铝在地壳中的平均含量为 7.47%，次于氧和硅居，第三位。自然界中铝矿物和含铝矿物约有 250 多种，其主要含铝矿物见表 1-2。

表 1-2 主要铝矿物与含铝矿物的含铝量

矿物名称	化学式	Al ₂ O ₃ /%	Al/%
刚玉	Al ₂ O ₃	100	52.9
一水软铝石	Al ₂ O ₃ · H ₂ O	85	45
一水硬铝石	Al ₂ O ₃ · H ₂ O	85	45
三水铝石	Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O	65.4	34.6
高岭石	Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · 2H ₂ O	39.5	20.9
红柱石	Al ₂ O ₃ · SiO ₂	63.2	33.3
硅线石	Al ₂ O ₃ · SiO ₂	63.2	33.3
正长石	K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂	18.4	9.7
钙长石	CaO · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	36.7	19.4
霞石	(Na, K) ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	33.2	17.6
丝钠铝石	Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2CO ₂ · 2H ₂ O	35.4	18.7
明矾石	K ₂ SO ₄ · Al ₂ (SO ₄) ₃ · 4Al(OH) ₃	37	19.6
冰晶石	Na ₃ AlF ₆	—	12.9

目前我国提炼铝的矿石主要是铝土矿，以一水硬铝石型为主，其次为少量三水铝石型铝土矿。

我国铝土矿分为沉积型、堆积型和红土型三种，占我国铝土矿储量 92% 以上的沉积型铝土矿又可按铁和硫成分的不同划分为低铁硫铝土矿、高铁铝土矿和高硫铝土矿。我国目前开采利用的主要是低硫铝土矿，其品质、特征、产地见表 1-3。

表 1-3 中国铝土矿类型及特点

类型	亚型	主要矿物	特征	典型矿床
古风化壳型 (占 98.33%)	修文式	一水硬铝石	石炭系铝土矿超覆在寒武系、奥陶系碳酸盐岩岩溶侵蚀面上，铝土矿之下华北有山西式铁矿，贵州有清镇式铁矿	贵州小山坝
	新安式	一水硬铝石	铝土矿分布同上，但铝土矿之下无湖相沉积铁铁矿	河南张窑院
	平果式	一水硬铝石	上二叠统层状铝土覆在下二叠统碳酸盐岩之上，并有近代岩溶风化堆积铝土矿	广西平果那豆
	遵义式	一水硬铝石	铝土矿与下伏地层连续过渡，与上覆地层之间有侵蚀间断	贵州苟江
红土型(占 1.17%)	漳浦式	三水铝石	第三系到第四系玄武岩经近代风化作用形成的残、坡积红土型铝土矿	福建漳浦

各国对铝土矿床都有严格的工业要求。氧化铝的含量和铝硅比值[Al₂O₃/SiO₂]是评价铝土矿质量的主要依据。铝硅比值不同，其炼铝的方法也不同。

根据我国已知铝土矿床工业指标及数理统计资料和生产实践经验，仅对一水硬铝石沉积型矿床提出一般要求(见表 1-4)，而对堆积型、红土型铝土矿床，因缺乏生产实践经验，仅列出矿床实例的工业要求(见表 1-5)。

表 1-4 一水硬铝石型沉积矿床一般要求

项目		矿石类型	一水硬铝石型	
			沉积矿床	
			露采	坑采
边界品位	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	1.8 ~ 2.6	1.8 ~ 2.6	
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	≥ 40	≥ 40	
块段工业品位	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	≥ 3.5	≥ 3.8	
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	≥ 55	≥ 55	
可采厚度/m		0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 1	
夹石剔除厚度/m		0.5 ~ 0.8		
剥采比(m^3/m^3)		10 ~ 15		

表 1-5 我国某些铝矿床的工业要求

矿区名称	品位要求					有害组分允许含量/%				开采技术条件			
	边界品位 (A/S) *		矿块最低 平均品位 A/S	矿区最低 平均品位 A/S	Al ₂ O ₃ /%	S	CO ₂	MgO	P ₂ O ₅	可采厚度 /m		夹石剔除 厚度/m	剥采比 /(m ³ · m ⁻³)
	表内	表外								露天	地下		
山西克俄	2.1	1.8	2.6	3.5		0.7				0.5	0.7	0.5	12
河南贾沟	2.6			3.8	45	0.7				0.5	0.3	0.5	16
河南张窑院	2.6	2.1		3.8	45					0.5	0.8	0.8	
贵州小山南坝	2.6	2.1	3.5		40	0.7	2	1	0.6	0.5	0.8	露0.5地1	15
广西太平 (堆积型)	2.6		≥0.5	3.8 (单工程)	40	≤0.3	≤1.3	CaO + MgO	≤0.6	≥0.5		露0.5 地1	见注 ^①
广东海南岛 (红土型三水铝石)	2.6	2.1			28			≤1.5		0.2			12 ~ 15

* A/S 为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 的缩写，后同。①含矿率：边界 $\geq 200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，矿区(段)平均 $\geq 300 \text{ kg}/\text{m}^3$

对铝土矿综合评价，还要全面考虑到铝土矿矿石中含有镓、钒、铈、钽、铀及放射性元素等有用组分。目前已综合利用的主要有镓。沉积型铝土矿层常常相变为耐火黏土，其上部、下部常共生多种有用矿产，如“山西式铁矿”、硫铁矿、熔剂灰岩、煤层、油页岩等，常共生在一起；红土型铝土矿常共生有钴土矿等。对具有价值的共生矿产，应注意综合评价。

根据铝土矿其他质量标准，又划分为不同的矿石类型。

(1)三氧化二铁：

- 高铁型， $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3\%$ ；
- 含铁型， $\text{Fe}_2\text{O}_3 3\% \sim 6\%$ ；
- 中铁型， $\text{Fe}_2\text{O}_3 6\% \sim 15\%$ ；
- 高铁型， $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 15\%$ 。

(2)硫：

- 低硫型， $S < 0.3\%$ ；
- 中硫型， $S 0.3\% \sim 0.8\%$ ；
- 高硫型， $S > 0.8\%$ 。

表 1-6、表 1-7 和表 1-8 分别为铝土矿品级标准以及用作电熔刚玉原料和高铝水泥原料的质量要求的有

关标准。

表 1-6 铝土矿品级标准 (GB 3497—83)

品级	品位		用途
	A/S(不小于)	Al ₂ O ₃ /%(不小于)	
1	12	73	研磨料、高铝水泥、铝氧 铝氧 铝氧 铝氧
		69	
		66	
		60	
2	9	71	铝氧、高铝水泥 铝氧 铝氧 铝氧
		67	
		64	
		50	
3	7	69	铝氧 铝氧 铝氧
		66	
		62	
4	5	62	铝氧
5	4	58	铝氧
6	3	54	铝氧
7	6	48	铝氧(三水铝石)

表 1-7 铝土矿用作电熔刚玉原料的质量要求 (企业标准)

项目	企业	第二砂轮厂	第四砂轮厂	备注
Al ₂ O ₃ /%		≥85	≥80	①一水硬铝石型铝土矿 ②熟料 ③供矿品位
Fe ₂ O ₃ /%		<5	<6	
SiO ₂ /%		<5.6		
TiO ₂ /%		3.5~6.5	<5.5	
CaO/%		<0.4		
CaO + MgO/%			<1.2	
烧失量/%		<0.5	<1	
A/S		≥15	≥12	
进厂块度/mm		<250	20~300	
烧生率			<4	

表 1-8 铝土矿用作高铝水泥原料的质量要求 (企业标准)

项目	郑州水泥厂	浙江萧山炼铁厂	备注
Al ₂ O ₃ /%	>72	>70	①一水硬铝石型铝土矿 ②生料 ③供矿品位
SiO ₂ /%	<6	<6	
Fe ₂ O ₃ /%	<2	<1.5	
TiO ₂ /%		<4	
A/S	>7	>7	

全世界已查明的铝土矿的工业储量约 250 亿 t, 加上远景储量共约 350 亿 t。储量丰富和产量较大的国家有几内亚、澳大利亚、巴西、牙买加、印度等国。这些国家的铝土矿多属于高铁低硅的三水铝石型, 适合于用较简单的拜耳法生产氧化铝。

中国已探明的铝土矿主要分布于河南、山西、贵州、山东、广西等地, 除个别地区外都为高铁高铝的一水硬铝石型, 杂质主要是高岭石中的 SiO_2 和少量的 Fe_2O_3 、 TiO_2 。中国还有丰富的明矾石矿。浙江、安徽两省有以亿吨计的钾明矾石资源, 是生产氧化铝和钾肥的原料。此外, 在云南等地也发现有较丰富的霞石资源。

和各种常用有色金属矿石相比, 铝矿中的铝含量高得多, 而铝矿的储量又非常丰富, 这就使铝工业在资源上占有较大的优势。

1990 年全世界生产铝土矿 11258.6 万 t, 主要生产国有: 澳大利亚(4139.1 万 t)、几内亚(1752.4 万 t)、牙买加(1093.7 万 t)、巴西(987.6 万 t)、苏联(535.0 万 t)、苏里南(326.7 万 t)、印度(434.0 万 t)、南斯拉夫(295.2 万 t)、匈牙利(255.9 万 t)、希腊(250.4 万 t)、圭亚那(142.4 万 t)。目前我国年产铝土矿仅 200 万 t 左右。

1990 年世界金属铝产量为 1803.2 万 t, 其中: 美国 404.8 万 t、加拿大 156.7 万 t、澳大利亚 123.3 万 t、巴西 93.0 万 t、挪威 87.1 万 t。我国年产金属铝 75 万 t, 居挪威之后。

1.4 铝的制取

铝的制取包括由矿石生产氧化铝, 再由氧化铝生产金属铝两大部分。

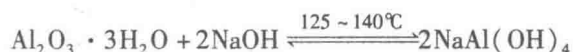
氧化铝生产方法主要有拜耳法、碱石灰烧结法、拜耳-烧结联合法等。拜耳法一直是生产氧化铝的主要方法, 其产量约占全世界氧化铝总产量的 95%。

1.4.1 拜耳法

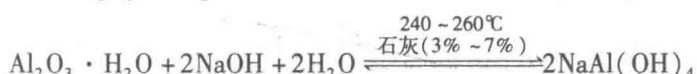
由奥地利拜耳(K. J. Bayer)于 1888 年发明, 其原理是用苛性钠(NaOH)溶液加热溶出铝土矿中的氧化铝, 得到铝酸钠溶液; 溶液与残渣(赤泥)分离后, 降低温度, 加入氢氧化铝作晶种, 经长时间搅拌, 铝酸钠分解析出氢氧化铝; 氢氧化铝经过洗涤, 在 $950 \sim 1200^\circ\text{C}$ 温度下煅烧, 便得氧化铝成品; 析出氢氧化铝后的溶液称为母液, 经蒸发浓缩后返回配料循环使用。

拜耳法的简要化学反应如下:

溶出:



或



分解:



煅烧:



拜耳法生产的经济效果决定于铝土矿的质量, 主要是矿石中的 SiO_2 含量, 通常以矿石的铝硅比, 即矿石中的 Al_2O_3 与 SiO_2 含量的质量比来表示。因为在拜耳法的溶出过程中, SiO_2 转变成方钠石型的水合铝硅酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.7\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), 随同赤泥排出, 所以矿石中 1 kg SiO_2 大约要造成 1 kg Al_2O_3 和 0.8 kg NaOH 的损失。铝土矿的铝硅比越低, 拜耳法的经济效果越差。直到 20 世纪 70 年代后期, 拜耳法所处理的铝土矿的铝硅比均大于 7~8。由于高品位三水铝石型铝土矿资源逐渐减少, 如何利用其他类型的低品位铝矿资源和节能新工艺等问题, 已是研究、开发的重要方向。

1.4.2 碱石灰烧结法

该法适用于处理高硅的铝土矿。该法是将铝土矿、碳酸钠和石灰按一定比例混合配料, 在回转窑内烧结成由铝酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、铁酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)、原硅酸钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)和钛酸钙($\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$)组成的熟料; 然后用稀碱溶液溶出熟料中的铝酸钠, 此时铁酸钠水解得到的 NaOH 也进入溶液, 如果溶出条件控制适当, 熟料中的原硅酸钙就不会大量地与铝酸钠溶液发生反应, 而与钛酸钙、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 等组成赤泥排出; 溶出熟料得

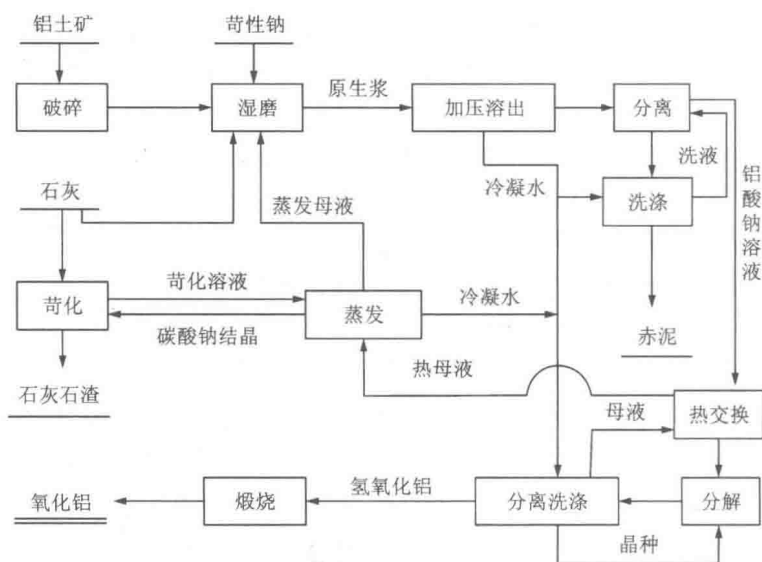
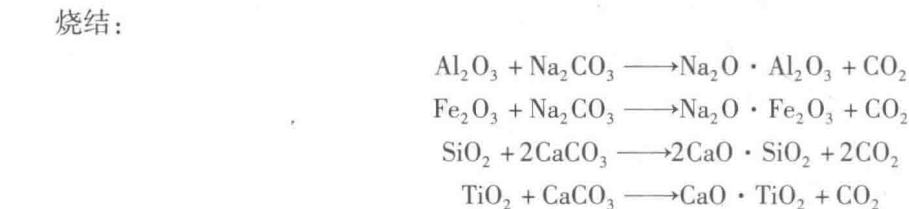


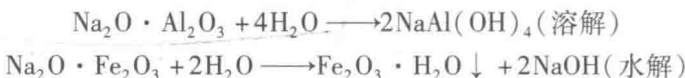
图 1-1 拜耳法工艺流程

到的铝酸钠溶液经过专门的脱硅过程，SiO₂形成水合铝硅酸钠(称为钠硅渣)或水化石榴石3CaO·Al₂O₃·xSiO₂·(6-2x)H₂O沉淀(其中x≈0.1)，而使溶液提纯；把CO₂气体通入精制铝酸钠溶液，和加入晶种搅拌，得到氢氧化铝沉淀物和主要成分是含碳酸钠的母液；氢氧化铝经煅烧成为氧化铝成品。水化石榴石中的Al₂O₃可以再用含Na₂CO₃的母液提取回收。

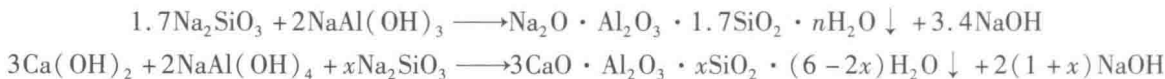
碱石灰烧结法的主要化学反应如下：



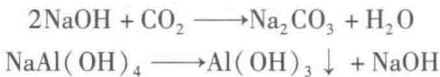
熟料溶出：



脱硅：



分解：



中国碱石灰烧结法生产氧化铝的主要技术成就是：在熟料烧成中采用低碱比配方，在熟料溶出工艺中采用二段磨料和低分子比溶液，以抑制溶出时的副反应损失，使熟料中Na₂O和Al₂O₃的溶出率分别达到94%~96%和92%~94%。Al₂O₃的总回收率约90%，每吨氧化铝的Na₂CO₃的消耗量约95 kg。碱石灰烧结法可以处理拜耳法不能经济利用的低品位矿石，其铝硅比可低至3.5，且原料的综合利用较好是其特色。

碱石灰烧结法的常用流程见图1-2。

1.4.3 拜耳-烧结联合法

该法可充分发挥上述两法的优点，取长补短，利用铝硅比较低的铝土矿，求得更好的经济效益。联合法有多种形式，均以拜耳法为主，而辅以烧结法。联合法的目的和流程连接方式不同，又分为串联法、并联法和混联法三种工艺。

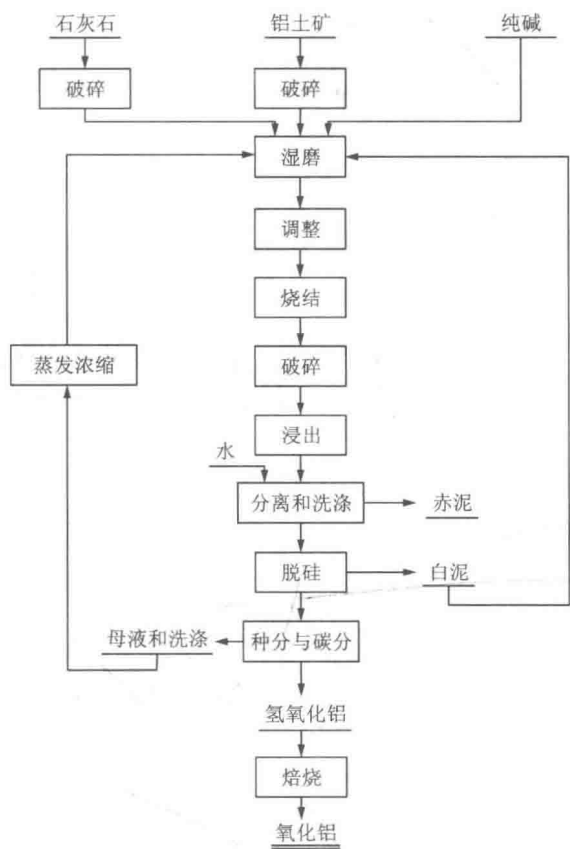
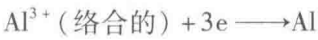


图 1-2 碱石灰烧结法流程

1.4.4 铝电解

铝电解的原理是使直流电通过以氧化铝为原料、冰晶石为熔剂组成的电解质，在 950 ~ 970℃ 下使电解质熔液中的氧化铝分解，在阴极上析出的铝液汇集于电解槽槽底，而在阳极上析出二氧化碳和一氧化碳气体。铝液从电解槽中吸出，经过净化除去氢气、非金属和金属杂质并澄清，然后铸成各种铝锭，其流程如图 1-3 所示。

铝电解过程的电化学反应冰晶石 - 氧化铝溶液具有离子结构，其中阳离子有 Na^+ 和少量 Al^{3+} ，阴离子有 AlF_6^{3-} 、 AlF_4^- 和 Al-O-F 络合离子以及少量 O^{2-} 和 F^- 。在温度 1000℃ 下，钠的析出电位大约比铝负 250 mV。由于阴极上离子的放电不存在很大的过电压，所以阴极反应是：



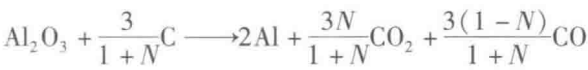
而阳极反应是：



铝电解过程的总反应式是：



由于溶解在电解质熔体中的触媒被 CO_2 所氧化，引起电解效率降低，所以铝电解的总反应式实际上应为：



式中， N 为阳极气体中的 $\text{CO}_2/(\text{CO} + \text{CO}_2)$ 体积百分比。

在冰晶石 - 氧化铝熔液中， Al_2O_3 的含量一般保持在 3% ~ 5%，为了改善电解质的性质，通常添加铝、镁、钙和锂的氟化物。

1.5 铝的用途

在各种常用的金属中，铝的密度小，导电、导热和反光性能都很好；铝的电导率相当于国际标准退火铜的 62% ~ 65%，约为银的一半，如果就相等的质量而言，铝的导电能力超过这两种金属。铝在低温下（-198℃）不

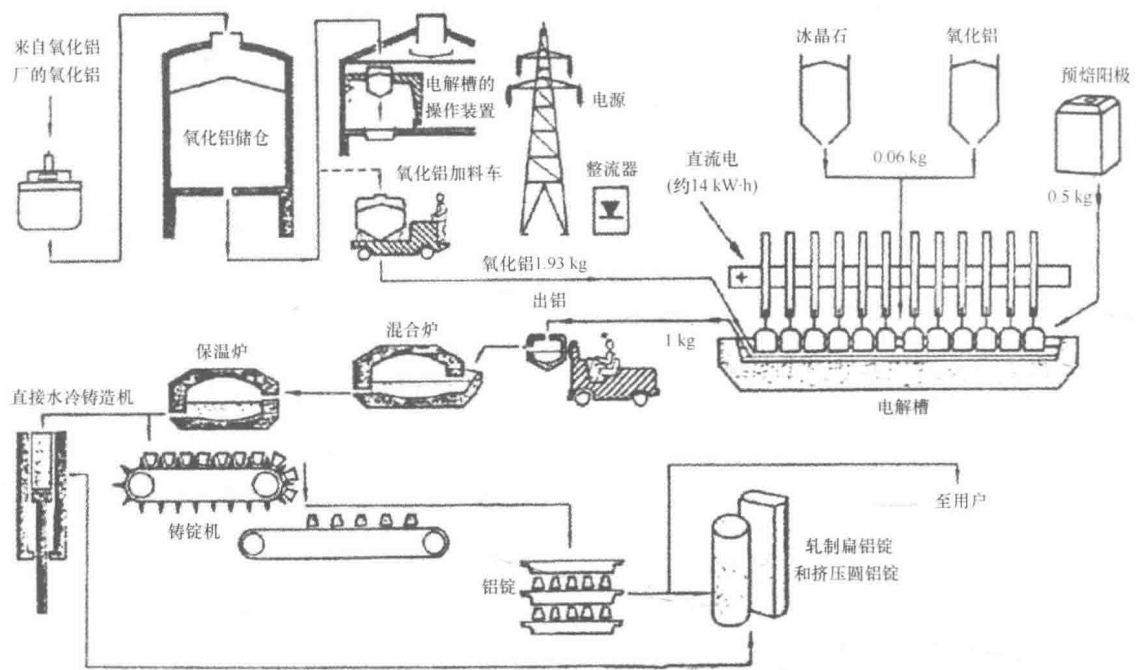


图 1-3 铝电解流程

变脆。在空气中铝的表面上生成一层致密而坚硬的氧化铝薄膜，厚度为 $0.005 \sim 0.02 \mu\text{m}$ ，而成为本体铝的天然保护层，因而铝有良好的抗腐蚀能力。此外，还可以用阳极氧化或电镀的方法，在铝材和铝制品表面生成色彩鲜艳的表层。铝的表面也可电镀其他金属。铝和多种铝合金有很好的延展性，可以进行各种塑性加工，制成铝丝、铝箔和铝材。铝的熔点低，铸造性能好，铸造铝合金的使用量也很大。

铝对氧的亲合力很大，氧化铝的生成热 ΔH_{298} 为 $-400.9 \pm 1.5 \text{ kJ/mol}$ ，所以铝可以作炼钢用的脱氧剂和一些高熔点金属氧化物（如 MnO_2 、 Cr_2O_3 ）的金属热还原剂。铝和氮、硫和卤族元素在高温下发生反应，生成如 AlN 、 Al_2S_3 、 AlCl_3 之类的化合物。这些化合物（除 AlN 外）和铝在真空中加热到 1000°C 以上时，生成相应的低价铝化合物。这些低价化合物，在低温下发生歧化分解，生成金属铝及其三价化合物（例如： $\text{AlCl}_3 + 2\text{Al} \longrightarrow 3\text{AlCl}$ ）。 AlN 加热到 2000°C 以上温度时，开始分解为单质元素。

铝是两性元素，它与大多数稀酸可缓慢地反应，但是能迅速溶解于浓盐酸中。浓硝酸使铝钝化。铝与苛性碱溶液发生强烈反应，迅速溶解，生成铝酸根离子： $2\text{Al} + 2\text{OH}^- + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_2 \uparrow$ 。铝在各个工业部门和日常生活中应用广泛。航空工业是传统的用铝部门。在建筑工业中用铝合金作房屋的门窗和板壁。用铝和铝合金制造的各种车辆，由于质量轻，可减少运输能量消耗，从而可以补偿炼铝时所消耗的能量。在电力输送方面，铝的用量早已居首位，现在 90% 的高压导线是用铝制的。在食品工业方面，从仓库、储槽到罐头盒，乃至饮料容器等都可用铝制造。

参考文献

[1] 中国矿产信息研究院. 中国矿产[M]. 北京：中国建材工业出版社，1993.
[2] 全国矿床储量委员会. 矿床工业要求参考手册[M]. 北京：地质出版社，1987.
[3] 中国百科全书总编辑委员会. 矿冶[M]. 北京：中国大百科全书出版社，1984.

2 镁 (magnesium)

2.1 镁的发现小史

1808 年英国化学家戴维 (H. Davy) 用电解汞和氧化镁的混合物制得镁汞齐, 首次获得金属镁。Magenesium 是希腊的城市名, 是戴维制得金属镁的地方。1828 年法国科学家比西 (A. A. B. Bussy) 用钾还原熔融氯化镁制得金属镁。1833 年英国科学家法拉第 (M. Faraday) 又用电解熔融氯化镁的方法制得金属镁。1886 年德国用此法进行工业生产。

2.2 镁的性质

镁的化学性质活泼, 固态镁在潮湿空气中很容易被氧化, 熔融镁会在空气中强烈地燃烧。300℃ 时, 镁开始与氮反应, 生成氮化镁 (Mg_3N_2)。镁不溶于碱性溶液, 但能溶解在各种有机酸和无机酸 (氟氢酸和铬酸除外) 中。表 2-1 所示为镁的主要物理性质。

表 2-1 镁的主要物理性质

密度(20℃)	1.74	g/cm^3
(熔点时, 固态)	1.64	g/cm^3
(熔点时, 液态)	1.57	g/cm^3
熔点	649	℃
沸点	1090	℃
平均比热(0~100℃)	1038	$J/(kg \cdot K)$
熔化热	8.71	kJ/mol
汽化热	134.0	kJ/mol
热导率(0~100℃)	155.5	$W/(m \cdot K)$
电阻率(20℃)	4.2	$\mu\Omega \cdot cm$

2.3 镁的资源

镁是自然界分布很广的重要有色金属, 属二价碱土金属, 占地壳质量的 2.35%。

镁的资源丰富, 种类很多, 最主要的是海水、盐湖卤水中的氯化镁和光卤石以及呈碳酸盐形式的菱镁矿和白云石。

菱镁矿 $MgCO_3$, 含 MgO 47.81% ;

白云石 $MgCO_3 \cdot CaCO_3$, 含 MgO 21.7% ;

水镁石 $Mg(OH)_2$, 含 MgO 69% ;

光卤石 $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$, 含 $MgCl_2$ 34.5% 。

我国菱镁矿产地 24 处, 矿石储量 28 亿 t, 全国总储量约 80 亿 t。其特点: 比较集中, 辽宁占总量 84.7%, 山东占 10%; 大型矿数量多、储量大, 10 个大型矿的储量占全部储量 94%; 质量好、杂质少 (MgO 含量 46% ~ 47.26%), 一级品 ($MgO > 46\%$) 以上的矿石量占全国总储量的 14%。

世界各地还有很多含镁的盐湖、地下卤水和盐矿床。海水是取之不尽的镁资源, 据估算 $1 km^3$ 海水中含有 130 多万吨的镁。中国辽宁、山东产菱镁矿, 各省都有白云石矿, 青海有盐湖卤水和光卤石, 沿海盐场的副产品卤水, 均可作炼镁的原料。

1990 年世界镁产量 37 万 t, 中国镁产量 0.8 万 t。

目前镁矿石的工业要求, 可参考以下资料。