



云南省普通高等学校“十二五”规划教材

轻稀贵金属冶金学

主 编 李 坚

副主编 俞小花 曲 涛

北 京

冶金工业出版社

2018

前 言

轻金属冶金、稀有金属冶金和贵金属冶金一直是冶金工程专业和其他相关专业重要的专业课程。随着冶金物理化学、钢铁冶金和有色金属冶金三个专业合并成为“冶金工程”一个专业后，一些高校为了更好地培养专业知识面宽、综合素质好、具有创新能力的通用型人才，在金属提取冶金的专业课教学方面，开设“钢铁冶金学”“重有色金属冶金学”和“轻稀贵金属冶金学”课程。本书的编写旨在满足冶金工程专业及相关专业学生学习轻金属、稀有金属和贵金属冶金知识的需要。

本书共分为三篇，第一篇为轻金属冶金学，主要介绍了铝、镁的物化性质、提取原理和主要的工艺流程；第二篇为稀有金属冶金学，主要介绍了钛、钨、钼、锆、铌的物化性质、提取原理和主要的工艺流程；第三篇为贵金属冶金学，主要介绍了金、银及铂族金属的物化性质、提取原理和主要的工艺流程。

本书由昆明理工大学李坚（第17章、20章、23章、24章、27~29章、31章）、俞小花（第8~14章、16章）、曲涛（第18章）、李艳（第1~4章）、刘战伟（第5~7章）、金炳界（第25章、26章）、高文桂（第30章）、宋宁（第21章、22章）、华一新（第19章）、朱云（第15章）共同编写。李坚任主编，俞小花、曲涛任副主编。

由于水平所限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2017年8月

目 录

第一篇 轻金属冶金学

1 轻金属概论	3
1.1 轻金属总述	3
1.2 铝的概述	3
1.3 镁的概述	4
复习思考题	6
2 铝土矿及氧化铝生产	7
2.1 铝土矿的分类	7
2.2 氧化铝生产概况	13
2.3 氧化铝生产方法概述	14
复习思考题	15
3 铝酸钠溶液	16
3.1 铝酸钠溶液的特性参数	16
3.2 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 系	17
3.3 铝酸钠溶液的稳定性及其主要影响因素	22
3.4 铝酸钠溶液的物理化学性质	23
3.5 铝酸钠溶液的结构问题	27
复习思考题	28
4 拜耳法生产氧化铝	29
4.1 拜耳法生产氧化铝的基础理论	29
4.2 拜耳法生产氧化铝的工艺流程	31
4.3 拜耳法溶出技术	32
4.4 氧化铝水合物在溶出过程中的行为	39
4.5 氧化铝的溶出率、 Na_2O 损失率及赤泥产出率	41
4.6 溶出过程的配料计算	43
4.7 杂质矿物在矿浆预热及溶出过程中的行为	45
4.8 拜耳法矿浆预热及溶出过程中的结疤问题	52

4.9 赤泥沉降分离技术	53
4.10 晶种分解技术	57
4.11 分解母液的蒸发与苏打的苛化	66
4.12 氢氧化铝的焙烧	71
4.13 拜耳法的技术经济指标	76
复习思考题	76
5 碱石灰烧结法生产氧化铝	77
5.1 碱石灰烧结法的原理和基本流程	77
5.2 铝酸盐炉料的烧结	79
5.3 熟料溶出及赤泥分离	87
5.4 铝酸钠溶液的脱硅过程	94
5.5 铝酸钠溶液的碳酸化分解	99
复习思考题	106
6 联合法生产氧化铝及其他低成本处理中低品位铝土矿的工艺	107
6.1 联合法生产氧化铝	107
6.2 其他低成本处理中低品位铝土矿的工艺	111
复习思考题	113
7 铝土矿的综合利用及氧化铝工业的可持续发展	114
7.1 铝土矿的综合利用	114
7.2 氧化铝工业的可持续发展	119
复习思考题	120
8 铝电解概述	121
8.1 铝电解发展简史	121
8.2 铝电解槽生产主要设备及参数	122
复习思考题	126
9 铝电解质的结构	127
9.1 电解质中各组分的固相结构	127
9.2 电解质熔体的结构	128
复习思考题	130
10 电解质的物理化学性质	131
10.1 相图与电解质的初晶温度	131
10.2 密度	134
10.3 电导率	136

10.4 黏度	138
10.5 铝电解质熔体的表面性质	140
10.6 铝电解质的蒸气压	146
10.7 铝电解质的离子迁移数	147
复习思考题	148
11 铝电解过程的机理	149
11.1 铝电解的电极过程与电极反应	149
11.2 铝电解机理	150
11.3 阳极过电压和阳极效应	150
复习思考题	155
12 铝电解的电流效率、电能消耗和能量平衡	156
12.1 熔盐电解中的法拉第定律	156
12.2 铝的电化学当量	156
12.3 铝电解的电流效率	156
12.4 电能效率	171
12.5 氧化铝的分解电压	174
12.6 铝电解槽的能量平衡方程式	176
12.7 铝电解槽的节能途径	179
12.8 铝电解的主要技术经济指标及发展方向	180
复习思考题	182
13 铝电解槽的焙烧、启动及正常生产工艺	183
13.1 铝电解槽焙烧的目的	183
13.2 铝电解槽焙烧方法的选择	183
13.3 电解槽的干法启动	187
13.4 电解槽的常规启动	187
13.5 铝电解的正常生产工艺	189
13.6 电解槽烟气的干法净化	191
复习思考题	192
14 原铝的精炼	193
14.1 原铝的质量	193
14.2 原铝精炼工艺	194
复习思考题	198
15 铝的再生	199
15.1 再生铝的原材料	199

15.2 再生铝锭的生产工艺	200
复习思考题	203
16 镁冶金	204
16.1 炼镁的原料	204
16.2 镁的冶炼方法	205
16.3 粗镁的精炼	217
复习思考题	219
第一篇 参考文献	220

第二篇 稀有金属冶金学

17 稀有金属概论	223
17.1 稀有金属的概念	223
17.2 稀有金属的分类	224
17.3 稀有金属的用途	224
17.4 稀有金属的生产方法	225
17.5 稀有金属的生产特点	225
复习思考题	226
18 钛冶金	227
18.1 钛冶金技术概述	227
18.2 高钛渣及人造金红石的生产	234
18.3 粗四氯化钛的生产	248
18.4 精制四氯化钛	262
18.5 镁热还原—蒸馏法生产海绵钛	273
18.6 致密钛的生产	286
18.7 残钛的回收	292
18.8 钛白粉的生产	294
复习思考题	306
19 钨冶金	308
19.1 概述	308
19.2 钨精矿的分解	312
19.3 钨酸钠溶液的净化和钨酸的生产	317
19.4 三氧化钨的生产	322
19.5 金属钨粉的生产	322

19.6 致密钨的生产	325
19.7 钨的再生	327
复习思考题	329
20 钼冶金	330
20.1 概述	330
20.2 辉钼矿的火法分解	334
20.3 钼焙砂的处理	339
20.4 辉钼矿的湿法分解	342
20.5 纯钼酸铵溶液的制备	344
20.6 从纯钼酸铵溶液中制备多钼酸铵及三氧化钼的制备	346
20.7 金属钼粉的生产	348
20.8 致密钼的生产	349
20.9 钼的再生回收	351
复习思考题	355
21 锆冶金	356
21.1 概述	356
21.2 锆的性质	356
21.3 锆的用途、产业链及产品	358
21.4 锆的资源	360
21.5 提取锆的各种方法	361
21.6 金属锆的制取与提纯	365
复习思考题	369
22 铪冶金	370
22.1 概述	370
22.2 铪的性质	370
22.3 铪的用途、产业链及产品	374
22.4 铪的资源	378
22.5 提取铪的各种方法	379
22.6 金属铪的制取与提纯	386
复习思考题	387
第二篇 参考文献	388

第三篇 贵金属冶金学

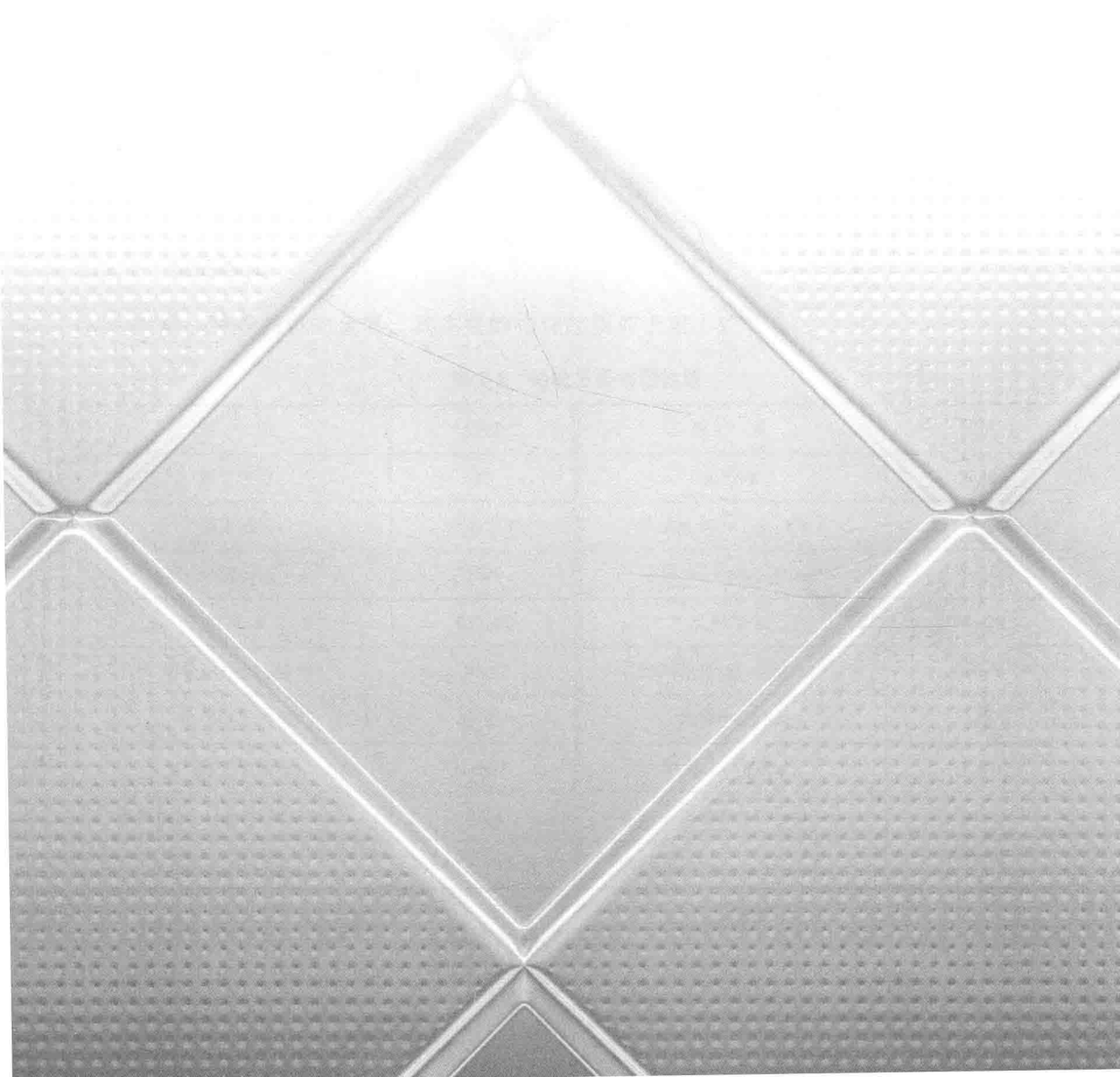
23 贵金属概论	393
23.1 贵金属及其化合物的性质	393

23.2	贵金属的生产及用途	398
23.3	提取贵金属的原料	403
	复习思考题	408
24	金银矿石的准备及选矿	409
24.1	金银矿石准备	409
24.2	金的重力选矿	409
24.3	金的浮选	412
	复习思考题	414
25	氰化法提取金银	415
25.1	氰化浸出金银的原理	415
25.2	氰化浸出过程中伴生矿物的行为	420
25.3	氰化浸出金银的主要影响因素	422
25.4	常规氰化浸出金银的工艺	424
25.5	炭浆法提取金银	436
25.6	树脂矿浆法提取金银	440
25.7	金银的电解沉积与熔炼	443
25.8	含氰废水的处理	448
25.9	使用氰化物的安全防护	451
	复习思考题	451
26	难浸金矿石的处理	453
26.1	难浸金矿石的基本特性与分类	453
26.2	难浸金矿石的预处理	454
	复习思考题	461
27	非氰化法提取金银	462
27.1	混汞法	462
27.2	硫脲法	464
27.3	硫代硫酸盐法	469
27.4	水溶液氯化法	471
	复习思考题	472
28	从冶金副产品中提取金银	473
28.1	铜阳极泥的处理	473
28.2	铅阳极泥的处理	494
28.3	从银锌壳中提取金银	503

28.4 从湿法炼锌渣中提取银·····	506
复习思考题·····	510
29 金银的精炼与铸锭·····	511
29.1 银的精炼·····	511
29.2 金的精炼·····	517
29.3 金银的铸锭和计量·····	529
复习思考题·····	532
30 铂族金属提取冶金·····	533
30.1 铂族金属矿物的选矿富集·····	533
30.2 含铂族金属矿物的冶金富集·····	535
30.3 铂族金属的分离提取·····	549
复习思考题·····	565
31 从二次资源中回收贵金属·····	566
31.1 含贵金属的二次资源·····	567
31.2 金二次资源的回收·····	569
31.3 银二次资源的回收·····	573
31.4 铂族金属二次资源的回收·····	581
复习思考题·····	586
第三篇 参考文献·····	587

第一篇

轻金属冶金学



1 轻金属概论

1.1 轻金属总述

在有色金属中，轻金属发展较晚，18 世纪末陆续发展后，19 世纪初才得以分离为单独的金属，20 世纪才开始工业生产。然而，轻金属的生产发展迅速，铝的产量在 1956 年超过了铜，跃居为有色金属之首，成为产量仅次于钢铁的金属。

轻金属一般指密度在 $3.5\text{g}/\text{cm}^3$ （钡的密度）以下的金属，包括铝、镁、铍和碱金属及碱土金属，有时也将密度为 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ 的钛和通常称之为半金属的硼和硅（密度分别为 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 及 $2.33\text{g}/\text{cm}^3$ ）列为轻金属。这类金属的共同特点是密度小，化学性质活泼。在轻金属中最具重要性和最有代表性的是铝和镁，因此，本篇着重介绍铝冶金学，简要介绍镁冶金学。

1.2 铝的概述

1.2.1 铝的性质

铝是一种银白色的金属，其主要的物理性质列于表 1-1。

表 1-1 铝的主要物理性质

性 质	数 值	性 质	数 值
原子序数	13	沸点/K	2740
晶体结构	面心立方	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	237(300K)
密度(298K)/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2698	电阻率(298K)/ $\Omega \cdot \text{m}$	2.7×10^{-3}
熔点/K	933. 52	反射率/%	85~90
熔化热/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	10. 47	汽化热/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	290. 8
价层电子模型	$2s^2 2p^1$	共价半径/pm	118
M^{3+} 离子半径/pm	50	电负性(Pauling)	1. 61
电离能($I_1+I_2+I_3$)/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	5114	电子亲和能/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	44
电导率/ $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$36 \times 10^{-4} \sim 37 \times 10^{-4}$	电化当量/ $\text{g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	0. 3356

铝的化学性质非常活泼，与氧的亲合力很强。在空气中，铝的表面生成一层厚度为 $0.005 \sim 0.02\mu\text{m}$ 的微密的薄膜，成为天然的保护层，使铝不再氧化因而具有良好的抗腐蚀

能力。

铝可溶于盐酸、硫酸和碱溶液，但对冷硝酸和有机酸化学上稳定，与热硝酸则发生强烈反应。因此，铝是典型的两性物质。

铝与卤素、硫和碳都能发生反应，生成相应的卤化物（如 AlCl_3 ， AlF_3 ）。

1.2.2 铝的用途

铝的密度小，仅为铁的 $1/3$ 。铝合金有很高的机械强度。铝和铝合金具有良好的加工性能，能加工成铝线、铝板、铝管以及各种形状的铝材和机器的零部件。

在航空方面，铝是飞机、导弹、火箭、人造卫星、宇宙飞船、潜艇、军舰不可缺少的结构材料，所以铝是一种重要的国防战略物资。

在交通运输方面，汽车、火车车厢的内外装饰，格子窗、散热器、发动机部件乃至车身都用铝材制造，以减少其本身的重量，增加运载能力。船舶的建造也需要大量铝材。

在房屋建筑方面，铝材用来制造门、窗、板壁、隔墙、落水管以及屋檐槽。

在电气方面，铝用作电缆、电线，许多部门用铝来代替铜。

此外，化工管道、贮罐、食品包装、冷库设施、日常生活用品等也广泛使用铝。铝还用作冶金生产中的还原剂、脱氧剂。

1.2.3 炼铝原料

自然界已知的含铝矿物有 258 种，其中常见的矿物约 43 种。实际上，由纯矿物组成的铝矿床是没有的，一般都是共生分布，并混有杂质。铝在自然界中多呈氧化物、氢氧化物和含氧的铝硅酸盐存在。铝土矿是目前氧化铝生产中最主要的矿石资源，世界上 99% 以上的氧化铝是用铝土矿为原料生产的。霞石、长石、高岭石、明矾石等也可以作为生产氧化铝的原料。

1.3 镁的概述

金属镁从发现至今已经历了 209 年的历史（1808~2017 年），工业生产的年代已有 131 年的历史（1886~2017 年），在这 131 年的发展与生产实践中，完善了以各种镁矿为原料（菱镁矿、海水、盐湖卤水、蛇纹岩、光卤石）的脱水、氯化及电解制镁的理论与实践；以白云石为原料的内热法、外热法与半连续熔渣导电的硅热法炼镁的理论与实践。20 世纪 80 年代至 21 世纪初，在各种镁冶炼的方法上（电解法与硅热法）出现了许多高新技术，世界镁产业发生了巨大变化，尤其是在镁合金材料工业的迅速发展下，进一步推动了镁工业的发展。在 20 世纪 90 年代末到 21 世纪，金属镁作为“时代金属”展现在冶金工业上，成为有色金属中的佼佼者。由于金属镁在民用市场（汽车工业、精密机械工业、结构材料工业、电化学工业）和空间技术的应用具有很大的优越性和独特性，因而推动了镁的平稳增长。

1.3.1 镁的性质

金属镁属于轻金属，比铁轻 $7/9$ ，比铝轻 $1/3$ ，镁是门捷列夫元素周期表中第三周期

第Ⅱ_A族化学元素。镁的晶格是密排六方晶系，镁的电子排列为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ ，所以镁一般为两价（ Mg^{2+} ），但是在电解熔融盐中也存在一价镁离子（ Mg^+ ），镁有三个自然同位素，其质量数分别为23.99、24.99和25.99。在自然界的混合物中镁的同位素含量分别为78.6%、10.11%和11.20%。镁的物理化学常数见表1-2所示。

表 1-2 镁的物理化学常数

名 称		数 值	名 称		数 值
原子序数		12	熵(25℃时)/J·(cm·s·℃) ⁻¹		32.2
原子价数		2	热导率/W·(m·K) ⁻¹		157 (154.5)
相对原子质量		24.32	线膨胀系数 /℃ ⁻¹	20~100℃时	26.1×10 ⁻⁶
原子体积/cm ³ ·mol ⁻¹		13.99		651~800℃时	380×10 ⁻⁶
原子半径/nm		0.16	电导率(20℃时)/(Ω·m) ⁻¹		22.37×10 ⁶
离子半径/nm		0.074	电阻温度系数 (20℃时)/℃ ⁻¹		0.0165
密度 /t·m ⁻³	20℃时 (Mg99.9%)	1.74	标准电位/V		-2.38
	熔点 651℃时	1.572	电化当量/g·(A·h) ⁻¹		0.453
	液态 700℃时	1.544	电离势/eV		7.65 和 15.31
熔融潜热 (Mg99.99%)/J·mol ⁻¹		8786.4±418.4	沸点/℃		1107
蒸发潜热 /kJ·mol ⁻¹	1107℃时	127.6±6.3	熔点/℃		651
	25℃时	140.6±8.4	升华热	651℃时	142.3±6.2
			/kJ·mol ⁻¹	25℃时	146.4±8.4

在常温下，镁在空气中相当稳定。当温度高于350℃时，镁的耐氧化性明显下降。在400℃时，镁在空气中的化学活性明显增长，并随着温度的升高而快速增长。

实际上致密的镁在冷水中不起反应，当加热时相互反应析出氢。镁在沸水中反应激烈，在400℃时，与水蒸气发生反应生成MgO和氢气。固体镁不易燃烧，在熔融状态和接近熔点温度条件下燃烧。镁明显地与氮发生反应；在670℃时，镁的氮化反应非常迅速；在高温下镁可以分解CO₂和SO₂。在盐酸、硫酸、硝酸、磷酸等溶液中，镁易发生反应。

镁在浓度70%的KOH、NaOH、KCN溶液中以及在FeCl₃、CuCl₂、NiCl₂、SnCl₄、Hg₂Cl₂、HgCl₂、ZnCl₂、FeSO₄、KNO₃溶液中发生反应。镁在有机酸（乳酸、油酸、醋酸、氯代乙酸等）溶液中，在脂肪酸中，在乙醚、碳酸、甲醛溶液中，在三氯乙醛CCl₃CHO溶液中均发生反应。

镁在氯气介质中加热时，镁与氯气激烈反应，发光，生成MgCl₂，在加热条件下，Mg与Br₂和I₂蒸气激烈反应，生成MgBr₂与MgI₂。

1.3.2 镁的用途

金属镁在21世纪已成为“时代金属”，随着科学技术的进步，它不再是主要用于难熔金属的还原剂、钢铁工业的脱硫剂、球墨铸铁中的球化剂以及作为建材的铝-镁合金材料。一种新型的密度小，高温强固性好，高温耐腐蚀性能好的AZ、AM、AE系列合金应用于航天工业、汽车运输工业、结构材料工业、电化学工业（电子技术、光学器材），在精密机械工业中其应用将具有更大的优越性和独特性。到2000年，压铸镁合金已上升为仅次于铝合金的第二大用户。统计表明，20世纪90年代，北美的压铸铝合金用量持续增

长, 平均年增长率达 19%, 21 世纪初其增长率仍保持在 15%~20%, 压铸镁合金如此高的增长率, 归因于对产品轻量化的要求日益迫切, 以及镁合金的性能不断改善及压铸技术的显著进步。

由于镁合金在降低产品质量、节省能耗及增强产品可靠性等方面所具有的优势, 镁合金的开发应用虽然没有像在航空、航天领域中的应用那样成熟, 但是近十年来却得到了很大的发展。石油危机的爆发, 对轿车工业节省能耗提出了要求, 使得厂家不得不通过降低轿车自重达到减少对汽油的消耗, 同时, 使用镁合金零部件降低了汽车启动和行驶质量, 使汽车驾驶起来灵活舒适, 具有更好的加速和减速性能, 因此大量镁合金汽车零部件被生产出来代替钢和铝合金零部件。美国福特公司 2000 年在每台轿车上使用 103kg 镁合金, 可以降低重量 45% (由 188.6kg 降至 103kg, 即减重 85kg), 这是一个十分可观的数值。

我国镁合金压铸件主要用于汽车工业, 林业, 机械, 电动工具以及航空、航海等工业, 其中 80% 用于汽车工业, 我国上海大众汽车公司生产的大部分轿车使用镁合金压铸件, 用于生产变速箱壳体和壳盖等部件。在计算机部件及家用电器方面使用镁合金的量也正在增大。

1.3.3 炼镁的原料

镁是地壳中分布较广的元素之一, 占地壳质量的 2.1%。在自然界中, 镁只能以化合物状态存在。在已知的 1500 种矿物中, 镁化合物占 200 多种, 即 12% 以上。自然界的镁矿物及含镁矿物很多, 含 MgO 大于 40% 的就有菱镁矿、方解石、氯镁石、水纤菱镁矿、氟镁石、水菱镁矿、硼镁石、羟磷镁石、镁橄榄石、蛇纹石、粒硅镁石, 这 11 种矿物中的镁含量都高, 但只有菱镁矿是主要的工业矿物, 因它分布广、易选冶。镁橄榄石、蛇纹石和粒硅镁石分布也广, 但冶炼加工困难。方镁石和水镁石若有大量聚集时也可用于提镁。其他富镁矿物分布很稀少, 不具工业意义。还有两种含镁矿物虽然本身含镁并不高, 但分布广, 易加工, 也是很重要的工业用镁矿物, 如白云石和光卤石。

此外, 还有大量的镁, 主要以氯化物和碳酸盐的形式存在于海水、盐湖水中, 地壳中镁总量的 3.7% 存在于海水中。目前炼镁工业上使用的原料多为菱镁矿、白云石、光卤石及海水、盐湖水中 MgCl_2 。



复习思考题

- 1-1 轻金属的定义是什么?
- 1-2 轻金属的特点是什么?

2 铝土矿及氧化铝生产

2.1 铝土矿的分类

氧化铝水合物是铝土矿中的主要矿物。从铝土矿或其他含铝原料中生产氧化铝,实质上是将矿石中的 Al_2O_3 与 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等杂质分离的过程。根据其氧化铝水合物所含结晶水数目及晶型结构的不同,把铝土矿分成三水铝石型($\text{Al}(\text{OH})_3$ 或 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、一水软铝石型($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ 或 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、一水硬铝石型($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ 或 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)和混合型四类矿种。采用不同类型的铝土矿作原料,氧化铝生产工艺的选择和技术条件的控制是不同的,所以对铝土矿类型的鉴定有着重大意义。

2.1.1 氧化铝水合物的性质

2.1.1.1 物理性质

氧化铝及其水合物由于结构不同,而有不同的物理性质。常见的几种铝矿物的折光率、密度和硬度是按下列次序递增的:三水铝石→一水软铝石→一水硬铝石→刚玉。它们最重要的结晶状态及物理特性见表 2-1。

表 2-1 氧化铝及其水合物的物理性质

矿物名称	三水铝石 $\text{Al}(\text{OH})_3$	拜耳石 $\text{Al}(\text{OH})_3$	一水软铝石 AlOOH	一水硬铝石 AlOOH	刚玉 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
晶石	单斜晶系(假六方晶系)	单斜晶系	斜方晶系	斜方晶系	斜方六面体
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.42	2.53	3.01	3.44	3.98
折光率(平均)	1.57	1.58	1.66	1.72	1.77
莫氏硬度	2.5~3.5		3.5~4.0	6.5~7.0	9.0

2.1.1.2 化学性质

铝属于元素周期表中第 3 周期的第Ⅲ_A族元素,其氧化物及水合物是典型的两性化合物,它们不溶于水,但可溶于酸和碱。在中性介质中,氢氧化铝的电离常数很小,但碱式电离常数大于酸式电离常数,因此,通常氢氧化铝略显碱性。

氧化铝及其水合物的两性性质,使氧化铝生产既可以用碱法,也可以用酸法。

不同形态的氧化铝及其水合物的化学活性,即在酸和碱溶液中的溶解度及溶解速度是不同的。三水铝石与拜耳石的化学活性最大、最易溶,一水软铝石次之,一水硬铝石特别是刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)很难溶。因为刚玉具有最坚固和最完整的晶格,晶格能大,化学活性最差,即使在 300℃ 的高温下与酸和碱的反应速度也极慢。 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的化学活性较强、在

低温下焙烧获得的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的化学活性与三水铝石相近。同一种形态的氧化铝及其水合物，由于生成条件不同，性质也不相同，甚至有一定的差异。

2.1.2 铝土矿资源及分布

铝在地壳中分布广泛，其在地壳中的平均含量为 8.8%（以 Al_2O_3 计，则为 16.62%），仅次于氧和硅，居第三位；而在金属元素中，铝则居第一位。铝属亲石亲氧元素，因此在自然界中只能以化合物状态存在，其中以铝硅酸盐形式存在的含铝矿物占 40%，最重要的含铝矿石有铝土矿、霞石、明矾石等。

国外铝土矿矿石主要是三水铝石型，其次为一水软铝石型，而一水硬铝石型铝土矿极少。但我国则主要是一水硬铝石型铝土矿，三水铝石型铝土矿极少。

国外的三水铝石型铝土矿具高铝、低硅、高铁的特点，矿石的品质好，适合耗能低的拜耳法处理。我国的一水硬铝石型铝土矿，总体特征是高铝、高硅、低硫、低铁、中低铝硅比，矿石品质差，加工难度大，氧化铝生产多用耗能高的碱石灰烧结法和联合法。

2.1.2.1 铝土矿的化学组成

铝的化学性质活泼，所以其在自然界中仅以化合物状态存在。地壳中的 250 多种含铝矿物中，约 40% 是各种铝硅酸盐。

铝矿物很少以纯的状态形成工业矿床，基本上都是与各种脉石矿物共生在一起的。在世界许多地方蕴藏着大量的铝硅酸盐岩石，其中，最主要的铝矿物列于表 2-2 中。

表 2-2 主要的含铝矿物

名称与化学式	质量分数/%			密度 /g · cm ⁻³	莫氏硬度
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O+K ₂ O		
刚玉 Al ₂ O ₃	100	—	—	4.0~4.1	9
一水软铝石 Al ₂ O ₃ · H ₂ O	85	—	—	3.01~3.06	3.5~4
一水硬铝石 Al ₂ O ₃ · H ₂ O	85	—	—	3.3~3.5	6.5~7
三水铝石 Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O	65.4	—	—	2.35~2.42	2.5~3.5
蓝晶石 Al ₂ O ₃ · SiO ₂	63.0	37.0	—	3.56~3.68	4.5~7
红柱石 Al ₂ O ₃ · SiO ₂	63.0	37.0	—	3.15	7.5
硅线石 Al ₂ O ₃ · SiO ₂	63.0	37.0	—	3.23~3.25	7
霞石 (Na, K) ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	32.3~36.0	38.0~42.3	19.6~21.0	2.63	5.5~6
长石 (Na, K) ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O	18.4~19.3	65.5~69.3	1.0~11.2	—	—
白云母 K ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O	38.5	45.2	11.8	—	2
绢云母 K ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O	38.5	45.2	11.8	—	—
白榴石 K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 4SiO ₂	23.5	55.0	21.5	2.45~2.5	5~6
高岭石 Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · 2H ₂ O	39.5	46.4	—	2.58~2.6	1
明矾石 (Na, K) ₂ SO ₄ · Al ₂ (SO ₄) ₃ · 4Al(OH) ₃	37.0	—	11.3	2.60~2.80	3.5~4.0
丝钠铝石 Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2CO ₂ · 2H ₂ O	35.4	—	21.5	—	—