

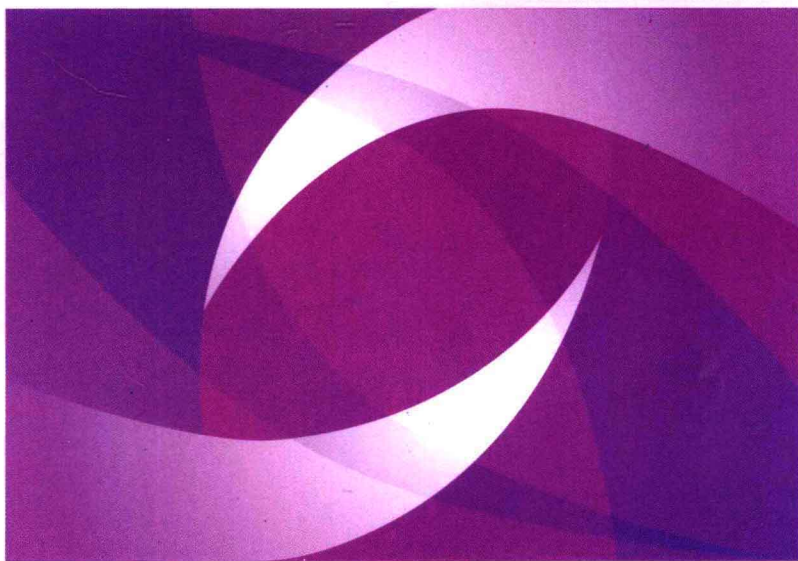



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12.5" GUIHUA JIAOCAI

复合矿与二次资源 综合利用

孟繁明 编



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

复合矿与二次资源综合利用

孟繁明 编

北京
冶金工业出版社
2013

内 容 提 要

本书主要讲述了复合矿与二次资源综合利用的原理及工艺,内容侧重于我国典型的复合矿产资源及二次冶金资源综合利用相关方面,还简要介绍了冶金领域的环境保护、节能减排、循环经济等基础知识,对典型冶金废弃物综合治理的原理及工艺也进行了阐述和探讨。书中每章后均设有复习思考题,以供读者练习。

本书可作为高等院校冶金工程专业本科生、研究生的教学用书,也可供冶金相关企事业单位的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合矿与二次资源综合利用 / 孟繁明编. —北京: 冶金工业出版社, 2013. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6097-6

I. ①复… II. ①孟… III. ①共生矿物—综合利用—高等学校—教材 ②伴生矿物—综合利用—高等学校—教材
③冶金工业废物—再生资源—资源利用—高等学校—教材
IV. ①P618 ②P578 ③X756

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 282454 号

出版人 谭学余

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 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6097-6

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京印刷一厂印刷

2013 年 1 月第 1 版, 2013 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 17.25 印张; 414 千字; 260 页

36.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

目前,多数高等院校冶金专业开设了冶金资源综合利用、冶金环保等相关内容的课程。有关此领域的书籍较多,但由于受学时的限制,教师与学生在选择教材时还是感到茫然,有时需要选择多本参考书籍,从中选择重点内容,结合专业实际进行相关内容的学习。此外,由于新技术、新工艺的迅猛发展,有些教材的相关内容已不适应实际需要。因此,急需一本既能够反映此领域重点内容、满足实际教学要求,又能够反映最新相关领域发展变化的新教材。基于这一考虑,编者结合多年的教学实践编写了本书。

全书分为上、下两篇,共14章。上篇为复合矿综合利用部分,共6章;下篇为二次资源综合利用部分,包括第7~14章。第1章为理论基础,主要介绍提取冶金过程中必备的基础热力学知识,教学时可根据实际需要进行取舍。第2章概述了复合矿综合利用,对复合矿资源的分类、特点以及相关的基本概念等进行了论述。第3~6章介绍了我国典型的复合矿资源,主要以我国复合矿资源综合利用的三大基地,即攀西钒钛磁铁矿、包头白云鄂博矿以及金川镍铜复合矿为例,对其特点、综合利用原理及工艺进行了较为详细的论述。第7章之后为冶金二次资源综合利用及环保方面的内容,以黑色冶金过程为主,对典型钢铁冶金过程的排放(炉渣、废气、废水)特点、危害、治理及利用方法等进行了论述和示例总结。此外,书中还介绍了循环经济、节能减排的相关概念和技术措施,对硫酸渣、冶金煤气及废旧金属的综合利用也做了较详细的介绍和分析。

本书力求介绍复合矿与二次资源综合利用的国内外最新技术和工艺流程,力争反映国内外该领域的新近状态及发展趋势。通过本书的学习,以期能够丰富和扩展读者的专业知识,使其具备必要的资源和环保基础知识以及解决实际问题的基本能力,为从事冶金工程领域的相关工作打下坚实基础。

本书由东北大学孟繁明编写。在编写过程中,参考和引用了大量的相关文

献。此外，东北大学王文忠和施月循、鞍钢集团技术中心车玉满、攀钢集团钢铁钒钛股份有限公司供应分公司徐存粮为本书的编写提供了宝贵资料和建议，在此向相关人员表示衷心感谢。

由于编者水平所限，加之成稿时间仓促，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2012年9月

目 录

上篇 复合矿综合利用

1 提取冶金基础	1
1.1 火法冶金	1
1.1.1 氧势及氧势图	1
1.1.2 选择性还原	3
1.1.3 选择性氯化	4
1.1.4 金属硫化物的选择性转移	8
1.1.5 煅烧、焙烧及烧结	9
1.1.6 熔炼与精炼	12
1.2 湿法冶金	16
1.2.1 湿法冶金概述	16
1.2.2 电位 - pH 图及其应用	16
1.2.3 浸出	20
1.2.4 浸出液的净化	23
1.2.5 金属沉积提取	24
1.3 卤化冶金	25
1.3.1 卤化冶金与氯化冶金	25
1.3.2 金属氯化反应	26
1.3.3 金属氧化物与氯的反应	27
1.3.4 金属硫化物与氯的反应	27
1.3.5 氯化剂的选择	27
1.4 电解提取	28
1.4.1 电解提取的分类	28
1.4.2 电解精炼	28
1.4.3 电解沉积	29
1.4.4 熔盐电解	30
复习思考题	33
2 复合矿综合利用	34
2.1 自然界中的矿产资源	34

2.1.1	矿物元素在地壳中的分布	34
2.1.2	矿产资源分类	35
2.1.3	复合矿与二次资源	36
2.2	复合矿的成因与评价	36
2.2.1	复合矿的成因	36
2.2.2	综合勘探与评价	38
2.3	复合矿综合利用概述	39
2.3.1	复合矿综合利用现状	39
2.3.2	综合利用的经济评价	40
2.3.3	我国矿产资源的特点及应对措施	44
2.3.4	复合矿综合利用的意义	46
	复习思考题	47
3	攀西钒钛磁铁矿	48
3.1	钒钛资源的分布	48
3.1.1	钒资源	48
3.1.2	钛资源	49
3.2	攀西钒钛资源的特征	49
3.2.1	化学成分与矿物组成	49
3.2.2	矿物特征及元素赋存状态	51
3.3	钒钛磁铁矿的高炉冶炼	55
3.3.1	高炉冶炼流程的形成	55
3.3.2	含钛高炉渣的冶炼特性	56
3.3.3	钛渣高温变稠—— TiO_2 还原	58
3.3.4	高炉冶炼钒钛磁铁矿的难点及技术措施	59
3.3.5	钒钛磁铁矿高炉冶炼流程现状	61
3.4	钒钛磁铁矿中钒的回收	63
3.4.1	高炉炼铁—铁水提钒工艺	63
3.4.2	精矿钠化焙烧—水浸提钒工艺	66
3.4.3	精矿直接还原—熔分后提钒工艺	67
3.4.4	攀钢钒综合利用现状	68
3.5	钒钛磁铁矿中钛的利用	69
3.5.1	高炉钛渣的利用	69
3.5.2	钛精矿的回收及处理	69
3.5.3	钛精矿电炉冶炼高钛渣	70
3.5.4	钛精矿制取人造金红石	71
3.6	铬的回收利用	74
3.7	存在问题及展望	74
	复习思考题	75

4 包头白云鄂博矿	76
4.1 包头白云鄂博矿的特点.....	76
4.1.1 铁、稀土、铈等多金属共生.....	76
4.1.2 化学成分与矿物组成.....	77
4.1.3 主要元素的赋存状态.....	78
4.2 包头白云鄂博矿的利用现状.....	79
4.2.1 铁资源.....	79
4.2.2 稀土资源.....	79
4.2.3 其他主要有用矿物.....	80
4.2.4 有价资源保护及展望.....	80
4.3 包头白云鄂博矿的高炉冶炼.....	81
4.3.1 铁精矿烧结的特点.....	81
4.3.2 高炉冶炼的难点.....	81
4.3.3 高炉冶炼技术的进步.....	83
4.4 包头白云鄂博矿中稀土的提取.....	84
4.4.1 稀土精矿的生产.....	84
4.4.2 稀土的分离提取.....	86
4.5 包头白云鄂博矿中提铈的难点.....	88
4.5.1 难选的铈矿.....	88
4.5.2 火法提铈的现状.....	88
复习思考题.....	89
5 金川镍铜复合矿	90
5.1 金川镍铜复合矿的特点.....	90
5.1.1 镍、铜等多金属共生.....	90
5.1.2 矿物组成.....	90
5.2 金川镍铜复合矿综合利用的原则工艺流程.....	94
5.3 镍、铜的富选与分离.....	95
5.3.1 硫化镍精矿的造钼熔炼.....	95
5.3.2 低镍钼的吹炼.....	98
5.3.3 高镍钼的缓冷和磨浮分离.....	98
5.4 铜、镍、钴的分离提取.....	99
5.4.1 铜精矿的处理.....	99
5.4.2 镍精矿的处理.....	100
5.4.3 钴的提取.....	101
5.5 贵金属的提取.....	105
5.5.1 贵金属精矿的富集.....	105
5.5.2 贵金属精矿的分离提纯.....	106

复习思考题	108
6 其他复合矿资源	109
6.1 硼铁矿	109
6.1.1 硼资源与硼铁矿	109
6.1.2 辽东硼铁矿	110
6.1.3 硼铁矿综合利用工艺	111
6.2 铝土矿	115
6.2.1 铝工业与铝土矿	115
6.2.2 广西高铁铝土矿	116
6.2.3 铝土矿综合利用工艺	117
6.3 铅锌复合矿	119
6.3.1 重金属复合矿的特点	119
6.3.2 铅锌复合矿资源及其组成	121
6.3.3 铅锌复合矿综合利用实例	122
复习思考题	124

下篇 二次资源综合利用

7 冶金过程排放与二次资源综合利用	125
7.1 冶金产业的特征	125
7.1.1 典型的流程制造业	125
7.1.2 广泛的产业关联性	125
7.1.3 高物耗、高能耗、高排放产业	126
7.2 冶金生产流程及废弃物排放	126
7.2.1 烧结与球团	126
7.2.2 炼焦生产	127
7.2.3 高炉炼铁	128
7.2.4 转炉炼钢	128
7.2.5 电炉炼钢	129
7.2.6 轧钢	130
7.3 冶金废弃物的分类及特点	131
7.3.1 废气	131
7.3.2 废水	132
7.3.3 废固	132
7.4 二次资源综合利用的意义	133
7.4.1 新型经济模式——循环经济	133
7.4.2 发展循环经济的需要	133

7.4.3 实现产业多重功能的发挥	134
7.5 曹妃甸——钢铁循环经济的范本	135
7.5.1 曹妃甸钢铁基地发展循环经济的目标	135
7.5.2 曹妃甸钢铁基地发展循环经济的措施	135
7.5.3 曹妃甸钢铁基地循环经济产业链的构成	136
复习思考题	137
8 高炉渣的资源化	138
8.1 高炉渣的组成与分类	138
8.1.1 高炉渣的化学组成	138
8.1.2 高炉渣的矿物组成	139
8.1.3 高炉渣的分类及特性	140
8.2 高炉渣的处理工艺	142
8.2.1 水淬处理	142
8.2.2 干法处理	145
8.2.3 化学处理	148
8.2.4 水淬与干法处理工艺的对比	148
8.3 高炉渣的资源化	150
8.3.1 水渣的利用	150
8.3.2 重矿渣的利用	152
8.3.3 膨胀矿渣的利用	153
8.4 高炉渣综合利用新技术	153
8.4.1 生产矿渣棉	153
8.4.2 制作微晶玻璃	154
8.4.3 配制硅肥	155
8.4.4 加工高炉渣微粉	155
复习思考题	157
9 炼钢渣的资源化	158
9.1 炼钢渣的组成与性质	158
9.1.1 炼钢渣的组成	158
9.1.2 炼钢渣的冷却与加工	159
9.1.3 固态钢渣的特性	162
9.2 炼钢渣的资源化	162
9.2.1 冶金回用	162
9.2.2 筑路材料	166
9.2.3 建材原料及制品	166
9.2.4 农业应用	169
9.2.5 治理废水	170

9.3 炼钢渣开发利用的新趋势	171
复习思考题	172
10 硫酸渣的资源化	173
10.1 硫酸渣及其性质	173
10.1.1 硫酸渣的产生及分类	173
10.1.2 硫酸渣的性质	173
10.1.3 硫酸渣对环境的影响	174
10.2 硫酸渣的资源化利用	175
10.2.1 硫酸渣利用现状	175
10.2.2 回收铁及有色金属	176
10.2.3 生产净水剂及铁系产品	176
10.2.4 应用于建材	178
10.2.5 其他	178
复习思考题	179
11 含铁尘泥的资源化	180
11.1 含铁尘泥的来源及性质	180
11.1.1 含铁尘泥的来源及特征	180
11.1.2 含铁尘泥的产生量	181
11.1.3 含铁尘泥的组成和性质	181
11.2 含铁尘泥的资源化利用	183
11.2.1 作为烧结料	183
11.2.2 生产金属化球团	183
11.2.3 作为炼钢冷却剂	184
11.3 含铁尘泥的高附加值利用	184
11.3.1 高炉瓦斯泥(灰)的利用	185
11.3.2 炼钢尘泥的利用	185
11.3.3 轧钢铁鳞的利用	185
11.4 锌在钢铁工业中的循环富集	186
11.4.1 锌的特性及其对高炉冶炼的危害	186
11.4.2 锌在钢铁工业中的循环路径	186
11.4.3 改变锌的循环富集	187
11.5 含锌尘泥的处理	188
11.5.1 物理法分离	188
11.5.2 湿法分离	188
11.5.3 火法分离	190
11.5.4 含锌尘泥的处理新工艺	192
复习思考题	193

12 冶金煤气利用与废气治理	194
12.1 冶金煤气综合利用.....	194
12.1.1 冶金煤气的分类及特性.....	194
12.1.2 冶金煤气的利用.....	195
12.2 冶金工业废气治理.....	200
12.2.1 烧结烟气脱硫、脱硝.....	200
12.2.2 二氧化碳的捕集及资源化.....	208
12.3 冶金工业节能减排.....	210
12.3.1 节能减排的意义.....	210
12.3.2 节能减排技术举例.....	211
复习思考题.....	218
13 冶金废水治理与循环利用	219
13.1 冶金废水概述.....	219
13.1.1 冶金废水的分类及特征.....	219
13.1.2 冶金废水的危害.....	223
13.1.3 冶金废水排放指标.....	225
13.2 焦化酚氰废水的生物处理与回用.....	225
13.2.1 废水生物处理的原理.....	225
13.2.2 焦化酚氰废水的生物处理过程.....	226
13.3 高炉煤气洗涤水的治理与回用.....	228
13.3.1 悬浮物的去除.....	229
13.3.2 温度的控制.....	229
13.3.3 水质的稳定.....	229
13.3.4 氰化物的处理.....	230
13.4 转炉除尘废水的治理与回用.....	231
13.4.1 两种炉气处理方法与废水特点.....	231
13.4.2 转炉除尘废水处理技术.....	231
复习思考题.....	234
14 废旧金属的资源化	235
14.1 废钢资源化概述.....	235
14.1.1 废钢的来源.....	235
14.1.2 废钢资源化的意义.....	236
14.1.3 废钢指数——“第二矿业”的象征.....	236
14.2 废钢的资源化.....	238
14.2.1 废钢质量要求.....	238
14.2.2 废钢处理工艺.....	238

14.2.3 废钢资源化流程·····	240
14.3 我国的废钢利用·····	241
14.3.1 我国废钢利用现状·····	241
14.3.2 我国废钢利用面临的问题·····	242
14.3.3 我国废钢利用前景·····	244
14.4 有色金属再生概述·····	244
14.4.1 有色金属再生的意义·····	245
14.4.2 再生有色金属的来源及特点·····	245
14.4.3 有色金属再生的一般方法·····	246
14.5 我国再生有色金属现状·····	247
14.5.1 再生铜·····	247
14.5.2 再生铝·····	248
14.5.3 再生铅·····	248
14.5.4 再生锌·····	249
14.6 有色金属再生举例·····	249
14.6.1 废旧计算机及其配件中的铜·····	249
14.6.2 废铝饮料罐中的铝·····	250
14.6.3 废铅蓄电池中的铅·····	252
14.6.4 热镀锌渣中的锌·····	253
复习思考题·····	254
参考文献·····	255

复合矿综合利用

1 提取冶金基础

自然界中大多数金属都是以氧化物（如 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 Cu_2O 、 SnO_2 等）、硫化物（如 PbS 、 ZnS 、 Ni_2S 、 HgS 等）和含氧盐类（如硅酸盐、硫酸盐、钛酸盐、碳酸盐等）等形态存在于矿石之中，将金属从这些矿石或二次原料中提取出来的过程称为提取冶金。提取冶金是复杂的多相物理化学反应过程，根据矿石的种类和性质不同，金属的提取需采用不同的过程来完成，如火法冶金、湿法冶金及电冶金等。

1.1 火法冶金

1.1.1 氧势及氧势图

火法冶金是指在高温下，使矿石或精矿中的有用矿物进行一系列物理化学反应，使金属与脉石及其他杂质分离，达到提取、提纯金属目的的工艺过程。

冶金过程涉及的反应都可利用反应的自由能变化 ΔG 判定反应进行的方向。若 $\Delta G < 0$ ，反应自发进行，即反应的产物稳定存在；若 $\Delta G > 0$ ，反应逆向进行，则反应产物不能稳定存在。当任一元素（纯物质）与 1mol 氧（101325Pa）反应生成氧化物（ $2x\text{M} + y\text{O}_2 \rightarrow 2\text{M}_x\text{O}_y$ ）时，其反应的标准自由能变化为 $\Delta G^\ominus = RT \ln p_{\text{O}_2}$ 。式中， ΔG^\ominus 称为氧势， T 为热力学温度， p_{O_2} 为氧的分压（Pa）， R 为摩尔气体常数。

在火法冶金中，为了便于更加直观地分析和比较各种化合物的稳定顺序、氧化或还原的可能性以及冶金反应进行的条件，常将金属氧化物生成反应的 ΔG^\ominus 与温度（ T ）的关系作图，即氧化物标准生成吉布斯自由能图（又称氧势图），如图 1-1 所示。同样，硫化物生成自由能图称为硫势图，氯化物生成自由能图称为氯势图。此外，还有金属硫化物的氧化自由能图、金属氧化物的氯化自由能图以及金属硫化物的氯化自由能图等。各种化合物自由能图的绘制、分析和使用方法都是相似的。

在图 1-1 中，纵坐标是 ΔG^\ominus ，横坐标是温度 T 。 $\Delta G^\ominus - T$ 关系为一直线，即 $\Delta G^\ominus = A + BT$ 。在关系式 $\Delta G^\ominus = \Delta H^\ominus - T\Delta S^\ominus$ 中， ΔH^\ominus 、 ΔS^\ominus 是温度的函数，不是常数。 A 、 B 可

以认为是在一定温度范围内 ΔH^\ominus 、 ΔS^\ominus 的平均值，即 $A = \Delta H^\ominus$ ， $B = -\Delta S^\ominus$ 。因此，直线的斜率是氧化物生成反应熵的负值 ($-\Delta S^\ominus$)，截距是氧化物生成反应焓 ΔH^\ominus 。由于 $(d\Delta G^\ominus/dT) = -\Delta S^\ominus$ ，温度对氧化物稳定性的影响取决于 ΔS^\ominus 的数值和符号。当反应的 ΔS^\ominus 为负值时，直线的斜率为正，表明氧化物的稳定性随温度的升高而降低，大多数金属氧化物的 $\Delta G^\ominus - T$ 直线都有这种特征；当反应的 ΔS^\ominus 为正值时，直线的斜率为负，表明氧化物的稳定性随温度的升高而增大；当反应的 ΔS^\ominus 接近于零时， $\Delta G^\ominus - T$ 直线近似呈一水平直线，氧化物的稳定性几乎不随温度而变化。

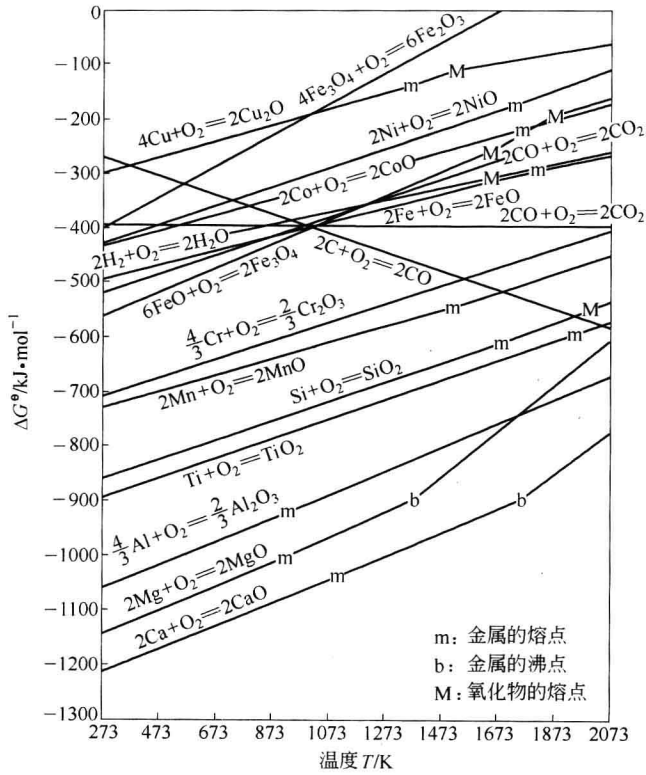


图 1-1 各种氧化物的氧势图

在火法冶金过程中，常利用自由能图来分析和确定化合物的基本热力学性质。特别是在分析元素的氧化和氧化物的还原过程中，自由能图具有广泛的应用。

1.1.1.1 氧化物的稳定性

氧势图中 $\Delta G^\ominus - T$ 直线位置越低，则该氧化物越稳定。温度增加，则氧化物的稳定性降低。所以，理论上只要有足够高的温度，就能实现氧化物的热分解。

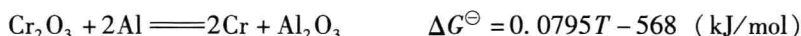
1.1.1.2 氧化物之间稳定性的比较

在某一温度下，几种元素同时与 O_2 相遇时，其氧化顺序可根据氧势图中 $\Delta G^\ominus - T$ 直线位置的高低进行判断。位置最低的元素最先氧化，低位置的元素可以将高位置的氧化物中的元素还原。

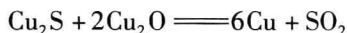
1.1.1.3 还原剂的选择

火法冶金中用得最多的还原剂为 CO、H₂ 和 C。氧势图中 2CO + O₂ = 2CO₂ 和 2H₂ + O₂ = 2H₂O 两条直线的位置较高, 因此, CO、H₂ 只能用来还原位置比其更高的氧化物, 如 Cu₂O、NiO、Fe₂O₃ 等。用 C 作还原剂时, 由于反应 2C + O₂ = 2CO 的 ΔG^\ominus 值随温度的升高而减小, 因而升高温度时其能够还原较多的氧化物。例如, 当 $T < 1273\text{K}$ 时, 可还原 NiO、Cu₂O、FeO 等; 当 $T = 1273 \sim 1873\text{K}$ 时, 可还原 MnO、Cr₂O₃ 等; 当 $T = 1873 \sim 2273\text{K}$ 时, 可还原 TiO₂、SiO₂ 等; 当 $T > 2273\text{K}$ 时, 可还原 CaO、MgO、Al₂O₃ 等。

由于 C 和 O₂ 生成 CO 的 $\Delta G^\ominus - T$ 直线向右下方倾斜, 而绝大多数金属氧化物的 $\Delta G^\ominus - T$ 直线却向右上方倾斜, 两者必然相交, 因此碳以万能还原剂著称。此外, 可用与氧亲和力强的金属还原另一种金属氧化物, 制取不含碳的金属或合金。例如用 Al 还原 Cr₂O₃ 时, 反应为:

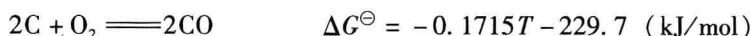
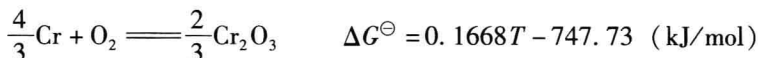


当 $T = 1573\text{K}$ 时, $\Delta G^\ominus = -443.637\text{kJ/mol}$, 这就是所谓的铝热法制取铬的化学反应过程。还可利用金属化合物还原同种金属的另一种化合物, 例如:



1.1.1.4 开始还原温度的确定

在氧势图中, 不同元素 $\Delta G^\ominus - T$ 直线的交点即为某一元素氧化物开始还原的温度。现以 C 还原 Cr₂O₃ 为例, 相关反应的 $\Delta G^\ominus - T$ 关系式如下:



以上两式对应的 $\Delta G^\ominus - T$ 直线在某一温度处相交, 交点所对应的温度即为标准状态下 Cr₂O₃ 的开始还原温度, 经计算可知, 其交点温度 $T_{\text{交}} = 1531\text{K}$ 。由以上两式可得到用 C 还原 Cr₂O₃ 的反应式:

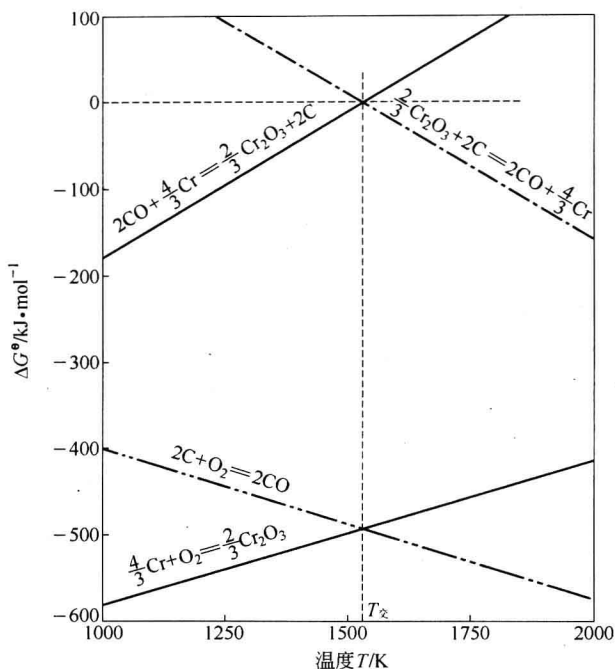


从图 1-2 中可以看到, 在 $T_{\text{交}}$ 下, 上式的 $\Delta G^\ominus = 0$, 反应达到平衡。 $T_{\text{交}}$ 为 Cr₂O₃ 被 C 还原的最低还原温度。若温度低于 $T_{\text{交}}$, 则 $\Delta G^\ominus > 0$, Cr 将被 CO 氧化。

1.1.2 选择性还原

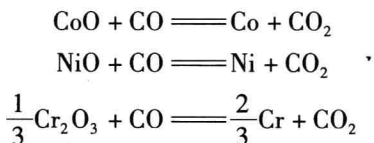
控制适当的还原条件(温度、压力、气氛、浓度等), 使一部分金属氧化物还原, 而保持另一部分金属氧化物不被还原, 从而实现元素的分离, 此过程称为选择性还原。

复合矿中除 Fe 元素外, 还含有数量不等的其他元素, 如 V、Ti、Ni、Cr 等, 这些元素都是有用元素。如将这种矿石作为铁矿使用, 必须考虑有用元素的综合提取问题。采用高炉冶炼这种复合矿时, Ni、Co、Cr 等都将进入铁水, 大部分 Ti 则进入炉渣。在炼钢时, 大部分 Cr 又将被氧化进入渣中, 而 Ni、Co 则被留在钢液内。这样得到的既不是普通的碳素钢, 也不是合格的合金钢。因为钢液中的 Ni、Co 含量将随矿石的 Ni、Co 品位而波动, 镍钴合金成分很难得到控制。因此, 冶炼这种复合矿时, 必须先将 Ni、Co 分离出去, 常

图 1-2 标准状态下用 C 还原 Cr_2O_3 的最低还原温度

采用的方法就是选择性还原工艺。

这种复合矿所含金属元素的还原顺序是：Co、Ni、Fe、Cr。当进行选择性还原时，首先使 Ni、Co 全部还原， Fe_2O_3 还原为 Fe_3O_4 ，大部分 Fe_3O_4 还原为 FeO，但必须控制 FeO 不能进而还原为 Fe。可以通过控制还原温度和气相成分来实现这一过程。例如，在沸腾炉中用 CO 作为还原剂还原复合矿时，可能的反应如下：



从图 1-3 可以看到，CoO 及 NiO 非常容易还原，而 Cr_2O_3 则不能被 CO 还原，它只能用一条最上端的横线来表示。为了避免生成金属铁，防止沸腾床筛板及管道钢件烧损，还原温度不能过高或过低，一般控制为 $500 \sim 700^\circ\text{C}$ ，CO 含量控制为不超过 $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ 的平衡反应线。

1.1.3 选择性氯化

1.1.3.1 选择性氯化依据

金属氯化物与相应的氧化物或硫化物相比，具有低熔点、高挥发性和易溶于水等特点。利用氯化剂 (Cl_2 、 NaCl 、 CaCl 等) 焙烧含有多种金属元素的低品位矿或难处理氧化矿，根据不同金属元素的氯化顺序以及生成氯化物的熔点、沸点和蒸气压等性质的差异，将金属与金属或金属与脉石分离，这就是所谓的选择性氯化。因此，比较