

高等学校教材

复合矿综合利用

王文忠 主编

东北大学出版社

801200

前 言

本书是根据冶金部和有色金属总公司教材会议制订的教材编写计划,参照有关院校“复合矿综合利用”教学大纲编写的,用做钢铁冶金、有色金属冶金等专业选修课教材。

复合矿资源丰富,种类繁多是我国矿产资源的一大特点,本书结合我国的实际着重介绍了复合矿资源,复合矿选别、分离提取的基本工艺原理及工艺方法,结合若干典型资源系统地讲述了复合铁矿、重金属复合矿及非金属复合矿的综合利用及有价元素的综合回收,并就资源综合利用中的技术经济评价进行了分析与论述。

本书的编写人员有:王文忠(第2章,第5章)、唐贤容(第1章,第7章,第8章,第4章4-3节)、佟发勇(第3章,第4章4-1节)、林茂森(第6章,第4章4-2、4-4节)。全书由王文忠总纂、定稿。

重庆大学裴鹤年、北京科技大学宋建成、华东冶金学院张景智、东北大学施月循等同志参与了本书的审阅,并提出许多宝贵意见,对此编者谨致以衷心感谢!

本书内容涉及面广,且又第一次以公开出版的方式与读者见面,限于编者水平,难免有错误之处,恳请读者提出宝贵意见。

王文忠

1994.5

目 录

第 1 章 复合矿综合利用评述.....	(1)
1.1 我国矿产资源的特点	(1)
1.2 复合矿综合利用的目的及意义	(2)
1.3 复合矿综合利用现状及存在问题	(2)
1.4 复合矿综合利用的发展前景	(5)
第 2 章 我国的复合矿资源.....	(7)
2.1 复合矿成矿概述	(7)
2.2 复合矿综合勘探与评价	(9)
2.3 复合矿资源示例.....	(10)
2.3.1 攀—西地区钒铁磁铁矿.....	(10)
2.3.2 包头白云鄂博复合铁矿.....	(18)
2.3.3 金川镍铜复合矿.....	(21)
2.3.4 铅锌复合矿.....	(27)
2.3.5 辽东硼铁矿.....	(29)
2.3.6 广西贵港高铁铝土矿.....	(30)
2.3.7 炭质页岩(石煤).....	(31)
第 3 章 复合矿的选矿分离	(33)
3.1 选矿分离.....	(33)
3.1.1 概述.....	(33)
3.1.2 选矿工艺指标.....	(33)
3.1.3 选矿前准备作业.....	(34)
3.1.4 选矿方法.....	(37)
3.2 典型工艺流程举例.....	(47)
3.2.1 铜、铅、锌矿石混合浮选流程.....	(47)
3.2.2 矿物的综合回收联合流程.....	(48)
第 4 章 复合矿分离提取的基本工艺方法及原理	(49)
4.1 火法冶金提取分离.....	(49)
4.1.1 火法分离提取原理.....	(49)
4.1.2 焙烧.....	(59)
4.1.3 熔炼.....	(61)

4.1.4	复合矿火法提取有用元素示例	(64)
4.2	湿法冶金提取分离	(65)
4.2.1	湿法冶金提取原理	(66)
4.2.2	浸出	(70)
4.2.3	浸出液的净化	(74)
4.2.4	金属沉积	(77)
4.2.5	湿法分离提取有用元素实例	(79)
4.3	卤化提取法	(79)
4.3.1	氯化过程	(79)
4.3.2	氟化过程	(82)
4.3.3	碘化过程	(84)
4.4	电解提取法	(85)
4.4.1	电解精炼	(85)
4.4.2	电解沉积	(86)
4.4.3	熔盐电解	(88)
4.4.4	槽电压、电流效率与电能消耗	(91)
第5章	复合铁矿综合利用	(93)
5.1	攀枝花钒钛磁铁矿冶炼与综合利用	(93)
5.1.1	有用元素的赋存形态与选矿	(93)
5.1.2	钒钛磁铁精矿烧结	(98)
5.1.3	高炉冶炼钒钛磁铁矿	(100)
5.1.4	含钒铁水提钒	(105)
5.1.5	钒钛磁铁精矿综合利用新流程	(107)
5.1.6	钛的回收利用	(110)
5.2	包头矿冶炼与综合利用	(111)
5.2.1	有益元素赋存形态及选矿方案	(113)
5.2.2	包头铁精矿烧结特点	(115)
5.2.3	包头矿高炉冶炼	(116)
5.2.4	稀土元素的提取	(118)
5.2.5	铈的提取	(121)
5.3	硼铁矿综合利用	(122)
5.3.1	矿物结构及选矿分离	(122)
5.3.2	硼铁矿火法分离	(123)
5.3.3	硼铁矿湿法分解	(126)
第6章	有色重金属复合矿综合利用	(127)
6.1	金川镍铜复合矿的综合利用	(127)

6.1.1	镍铜的富选与分离	(128)
6.1.2	铜、镍、钴的分离提取	(132)
6.1.3	贵金属的提取	(137)
6.2	其它重金属复合矿的综合利用	(140)
6.2.1	有色重金属伴生元素概况	(140)
6.2.2	铅锌复合矿综合利用实例	(142)
6.2.3	从锌厂烟尘中提取稀散金属	(144)
第7章	非金属复合矿及工业废弃物的综合利用.....	(148)
7.1	煤伴生元素的综合利用	(148)
7.1.1	煤中碳的有效利用	(148)
7.1.2	劣质煤的综合利用	(148)
7.1.3	煤灰渣和粉煤灰的综合利用	(150)
7.2	复合磷矿的综合利用	(150)
7.2.1	磷矿床	(150)
7.2.2	复合磷矿的综合利用	(151)
7.2.3	磷矿石的深加工	(153)
7.3	选矿尾矿的综合利用	(154)
7.3.1	尾矿的综合评价	(154)
7.3.2	尾矿的综合利用途径	(155)
7.4	工业弃渣的综合利用	(156)
7.4.1	冶金渣的综合利用	(156)
7.4.2	硫酸渣的综合利用	(157)
7.4.3	钢铁渣的综合利用	(160)
7.4.4	其它工业渣的综合利用	(161)
第8章	复合矿综合利用的技术经济评价.....	(163)
8.1	复合矿综合利用程度的评价	(164)
8.1.1	矿石的综合开发利用指数	(164)
8.1.2	元素的综合开发利用系数	(164)
8.1.3	复合矿综合经济品位的计算	(165)
8.1.4	复合矿综合品位的计算	(166)
8.1.5	复合矿最低经济品位计算	(166)
8.2	复合矿综合利用的经济效益评价	(167)
8.2.1	财务内部收益率(FIRR)	(167)
8.2.2	财务净现值(FNPV)	(167)
8.2.3	投资回收期(pt)	(168)

第1章 复合矿综合利用评述

矿产资源是自然资源中的一部分,是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。自从现代化工业、现代化农业发展以来,矿产资源已成为社会繁荣、国家富强的决定因素之一。17世纪欧洲各国得以迅速发展为资本主义国家,是与矿产资源开发分不开的。美国和原苏联由于幅员辽阔,矿产资源丰富,是其发展成为超级大国的重要条件之一。因此,对矿产资源合理开发利用,绝不能掉以轻心或缺乏远见,否则将受到历史的惩罚和子孙后代的谴责。

1.1 我国矿产资源的特点

矿产资源一般可分为三大类:金属矿产、燃料矿产和非金属矿产,金属矿产用于提炼金属,燃料矿产用于提供能源,非金属矿产包括非金属矿、岩石等自然产出的物质。用于提供非金属材料及建材等。我国矿产资源特点为:

1)在已探明的储量中,45种矿产资源的潜在价值仅次于原苏联、美国,居世界第三位。但我国是一个人口众多的国家,按人均所占有的矿产资源量,约为世界人均水平的1/2,在世界上列第80位。其中我国人均矿物能源(煤炭、石油、天然气)是原苏联的1/7,美国的1/4。因此,从人均占有资源量上看,我国却是一个“资源小国”、“人均穷国”,是一个矿产资源相对不足的国家。出路只有一条,积极采取“开源节流”对策。

2)我国矿产资源贫矿多,富矿少:如铁矿探明的储量中,品位在30%~35%之间,而国外重要铁矿品位一般在60%以上;铜矿探明的储量中,品位大于1%的不到30%,品位大于2%的只占储量的6%;磷矿品位大于30%的只占7%;铝土矿中铝硅比大于7的,只占储量的20%;其它矿种也是如此,贫矿多而富矿少,均面临人工富集问题。

3)我国共、伴生复合矿多,单一矿少:这种情况在我国矿床里相当普遍,如在铁矿当中含有钛、钒、稀土、锡、铜等元素;我国的有色金属矿产多属于共、伴生矿,如银矿储量的80%是伴生银矿;金矿储量的40%是伴生矿;钨、锡、钼和铅、锌等有色金属矿产常共生在一起。煤炭中共生有铝土矿、硫铁矿、耐火粘土、高岭土等。如果我国大中型矿山的伴生有益元素都能综合利用的话,可一矿变多矿,其价值相当于元素价值的30%~40%。

从这些资源的特点出发,我们应采取相应的勘查、开发方针和对策。如从矿产资源人均占有量相对不足考虑,就应该走资源节约型道路,逐步建立起“资源节约型经济发展战略模式”,有效保护和合理开发利用矿产资源,杜绝过度耗费、破坏、浪费现象。从贫矿多、富矿少的实际出发,矿产开发中要坚持贫、富兼采,不能采富弃贫,并要加强科学研究,提高选冶技术水平,走人造富矿的道路。根据共、伴生复合矿多,单一矿少的特点,就应该实行综合勘查、综合评价、综合开发、综合利用的方针。

总而言之,要清醒地认识我国矿产资源的形势,合理开发利用和有效保护有限的矿产资源,以创造最大的经济效益和社会效益。

1.2 复合矿综合利用的目的及意义

随着单一富矿的逐年减少,矿产原料需求量的不断增加,复合矿的综合开发利用已成为当代重大科技问题之一,一直受到世界各国政府的重视。复合矿综合利用的重要意义在于:

1)复合矿综合利用是扩大矿物原材料的唯一方针:在各种自然资源中,矿产资源不能再生。处在地球表面开放系统的某些自然资源,可以吸收外部能源恢复,唯独矿产处在封闭系统中,开发后不能恢复。因此,必须提高主元素的回收率,全面充分地利用共、伴生元素,以扩大矿物原材料供应数量和品种,缓解我国矿产资源日趋严峻的局面。

生产 1t 铜需要加工 120~200t 的矿石,生产 1t 锡、钼或钨则需要 1700~2500t 矿石,若只回收主要元素,矿石中其它有价值元素不能利用,则将造成资源大量流失和浪费。

2)复合矿综合利用是解决国民经济供需矛盾的重要途径。据预测:世界人口每年大约增加 2%~2.5%,而矿产原料的需求量每年增加 5%~8%。解决矿产资源日趋不足的问题,只有采取“开源”与“节流”并举措施。“开源”即扩大矿产资源来源,包括找新的、用贫的、再生的、开发潜在的、人造代用的等。“节流”即提高矿产综合利用水平,使有限的资源得到最大限度的利用,使矿产资源的人为损失减少,以适应矿产品日益增长的需要。

3)复合矿综合利用是提高企业经济和社会效益的主要手段:一般矿物资源费用占了原料加工部门生产总成本中的 70%~80%。随着贫矿的难采、难选、难冶矿石的开采量迅速增加,千方百计降低成本是发展生产的紧迫问题。在这种情况下,除了采用先进的采选冶加工技术外,综合利用复合矿的全部组分就成了降低生产成本的重要手段。

原苏联矿产综合利用的先进企业,副产品占销售额 28%,而副产品所创的利润超过 50%,可见矿产综合利用在增加产品品种,降低产品成本,提高企业经济和社会效益等方面是相当显著的。

4)复合矿综合利用是减少环境污染和维护生态平衡的根本方法:采选冶过程中每日每时都产出大量的矿物废料,美国每年排放的固体废料达 47 亿 t。废料堆放占用土地,废料流失污染水质。国外从 60 年代后期起,对公害的治理从消极的防止转向积极保护。把工业的废料还原成原料,构成“封闭式生产圈”,发展“无废工艺技术”,既充分利用了矿产资源,又彻底解决了环境污染。

可见,复合矿综合利用意义重大,应该从矿产开发、加工等多方面入手,并把矿石、废渣、烟尘、尾矿以及废旧产品再生等全部利用起来,形成效益最佳的综合利用技术体系。

1.3 复合矿综合利用现状及存在的问题

经过广大科技人员和职工多年的努力,我国复合矿综合利用已取得了比较显著的成绩。

1. 金属矿产综合利用情况

有色金属行业 45 种共、伴生复合矿中,目前选、冶可以回收的已有 33 种。据 1986 年工

业普查材料,10种有色金属,400多个国营矿山企业中,70%的矿山企业程度不同地开展了综合利用工作;已有的绝大部分采、选、冶联合企业都对有价元素进行了综合回收,其中一部分企业已初步形成了综合利用生产体系,而且正在向资源综合利用的深度、广度发展。例如,我国年回收的伴生金已占全国金产量的20%,年回收的伴生银已占全国银产量的90%,年回收的硫精矿400多万t。据统计,有色金属行业综合利用产值达20亿元,占有色金属全行业总产值的10%。江西德兴铜矿,每年从铜精矿中回收黄金数吨,白银数吨;金川镍矿共、伴生铂族元素数百吨,钴12万t,每年综合利用产出的铂族元素数百公斤,钴300多吨;江西宜春铌钽矿,是一个铌、钽、锂、铍、铷、铯等稀有金属复合矿,经过多年的生产实践,使其共、伴生元素和矿物全部能综合利用,其经济效益和社会效益大幅度提高,为我国无尾矿生产树立了典型。

黑色金属矿产共、伴生组分很丰富,大约有30多种,目前回收利用的约有20多种。在这些复合矿组分中,经济价值较高的有钒、钛、稀土、铌、铜、铬、钴、金、钨等,其中大型或巨型复合矿床共、伴生组分共17种之多。由于经济技术等方面的原因,我国铁矿的综合利用水平还比较低。例如攀西铁矿床中,伴生组分的价值是铁的价值13倍,矿石总价值相当于富铁矿石价值的五倍多。目前除炼铁外,只能回收部分钛和钒,其它十多种有价元素都不能回收。每年大约回收钛精矿10万t,回收率不到10%,冶炼时回收钒渣7万t(含 V_2O_5 15%),回收率约为40%。又如白云鄂博铁矿床共生稀土、铌等,每年仅产稀土精矿1.7万吨t,利用率约为3%。我国黑色金属矿产综合利用前景光明,潜力很大,可以发挥巨大优势,为我国经济发展作出贡献。

在金属复合矿中,除了开发利用有价组分外,对尾矿的开发利用也有一定的进展。如利用尾矿生产装饰面砖、建筑用砖等,但利用比例不大,有待进一步推广应用,大力开发。

2. 非金属矿产综合利用情况

我国非金属矿产资源极其丰富,探明有储量的矿种达85种,其中占世界首位的有石膏、重晶石、石墨、滑石、菱镁矿、膨润土、石灰石等,居世界前列的有十余种。近年来,我国非金属材料飞速发展,综合利用技术也有所提高。非金属矿的综合利用主要是进行深加工。目前我国已生产石棉制品200多种,石墨制品155种,滑石制品50多种,高岭土制品42种,云母制品几十种,仅云母深加工就使产值提高40%。非金属矿产品已逐步向精加工高级产品转化和基本无尾矿生产方向发展。如高岭土选矿厂生产造纸涂料级产品,还开发利用石英作玻璃砂,利用尾矿做釉面砖、地砖、外墙砖。此外还从某些沉积型高岭土矿中以浮选或重选手段回收硫铁矿。

我国对粘土矿物的开发利用,经加工提纯和改性处理,前景光明,如用膨润土加工的产品已达6个品种之多。

在我国磷矿石中,伴生有金属铀,远景储量有几万t,是一个不小的潜在资源。对这一资源的综合利用,国外已有了成功经验,我国在技术上也已过关。此外,磷矿中伴生的碘、氟等还没有得到利用,如四川的硫磷铝锶矿、盐湖钾盐矿伴生的镁、钠、硼、锂、溴、碘等元素均有待开发。

我国非金属工业一直是粗放式经营,以销售原矿为主,深加工产品比例很小,资源利用效率极低。今后应提高科学技术水平,扩大非金属应用领域,向深加工精加工方向发展。

3. 煤炭资源的综合开发利用情况

我国的煤系地层中共生、伴生的矿种有近 20 种之多,其中共生高岭土远景储量 180 多亿 t,共生硫铁矿 170 多亿 t,还共生大量的膨润土。在煤炭资源中有 200 多亿 t 高硫煤,在石煤中还伴生多种稀有、稀散元素。如年产 10 亿 t 煤炭中含有 2000 多万 t 高硫煤,同时副产品 1.6 亿 t 煤矸石。因此,对煤炭资源综合开发利用很有必要,潜力很大,这不仅对合理利用资源有益,而且对保护周围环境有好处。

近十年来,在煤炭资源综合开发利用方面开展了大量的科研工作,并取得了一定成绩。据统计,目前我国煤矸石年利用量约 3000 万 t,从洗选煤矸石中回收的硫精矿 20 多万 t。但从总体上看,综合开发利用刚刚起步,综合开发利用技术水平较低,与煤共生的膨润土、伴生的镓、锗等元素只有极少数矿山进行了利用;与煤伴生的十多种有用元素中,现在只能提取 V_2O_5 ,其它元素的提取技术尚待开发。

我国北方煤层中共生的优质高岭土,其层位稳定,厚度一般在 0.6m 左右,特别是被矿山称作“黑砂石”或“黑瓷土”的高岭土,只要经过焙烧,其白度就可达 90%以上,高岭土含量一般在 80%左右,较纯者可达 95%以上,其中有 80%~90%的组分呈小于 $2\mu m$ 的鳞片状结构,能满足造纸涂布级的要求,但目前的开发利用率只有百分之几。据了解,我国造纸涂布高岭土一直短缺,每年需花外汇进口;而在蒲白矿务局、大同矿务局、焦作矿务局却有大量的资源。其中蒲白矿务局生产的高岭土可用于造纸、橡胶、塑料工业的填料,可作为洗衣粉的添加剂,也可作高级陶瓷、化妆品、医药等方面的原料,在国际市场上也是抢手货,这样对国家和企业均有显著的经济效益。

自建国以来,尽管我国在矿产资源综合开发利用方面取得了可喜的成绩,但还存在许多问题。为了改善我国复合矿资源综合开发利用环境,促进我国复合矿综合开发利用工作的发展,我们应该研究存在的问题,寻求解决问题的对策。

(1) 深化矿产资源国情教育:我国是一个矿产资源相对不足的国家,要改变“地大物博”的传统观念,树立起资源忧患意识,为子孙后代着想,为国家长远利益着想。让广大企业干部、职工了解矿产资源是有限的、不可再生的,用一点,少一点,自觉地执行有关矿产资源的政策法规,合理开发利用和有效保护矿产资源,应该成为办好矿业的行动准则。严格遵守自然规律和经济规律,作好矿产资源综合开发利用的统筹规划,使国内有限的矿产资源发挥最大的效益。

(2) 完善矿产资源政策法规:综合开发利用矿产资源是我国一项重要的经济技术政策。国家对此十分重视,我国已基本建立了资源综合开发利用的法规体系,可用法律手段来解决复合矿的综合开发利用问题。但有些具体措施还很不完善,有些条文还有待进一步修改、补充。开展综合利用,必须打破部门、行业界限,不搞一家独办,国家提倡和支持企业一业为主,多种经营,从而调动企业进行综合回收的积极性。

(3) 加强矿产资源科研攻关:我国复合矿综合开发利用科研攻关,虽然取得了象白云鄂博、金川、攀枝花这样一些重大科研成果,但科研水平还有待进一步提高。如超细粒有用组分的回收技术,复杂难选贫矿的分离技术等,离工业应用还有相当差距。特别是解决复合矿综合开发利用的新技术、新工艺、新设备,还必须花大力气开展科研工作。技术是复合矿开发利用的关键,没有过硬的技术,要很好的综合开发利用复合矿是不可能的。

(4) 严格矿产资源监督管理:国家赋予地质矿产部对矿产资源开发利用实行监督管理的职能,这是深化改革的体现。根据“矿产资源法”,一是建立健全跨部门的各级管理机构,实行督察员制度,实行严格管理;二是加速“资源综合利用法”等的立法进程,完善各项规章制度;三是加强矿产资源保证程度和矿产品供需情况的预测研究。随着我国经济的发展,矿业开发规模不断扩大,因而进行综合利用也越来越重要,但直到目前很多可以回收的有价值组分没有达到应该达到的回收水平,不仅浪费了宝贵的矿产资源,还造成了严重的环境污染。尤其要解决有法不依,执法不严和违法不追究的严重现象。

1.4 复合矿综合利用的发展前景

从当今西方国家矿产资源综合利用的现状,概略地可以看到今后几十年内世界矿产开发利用的主要趋势是向“高、大、自、综”的方向发展。所谓“高”,就是要求对矿产储量综合利用程度高,有用组分的回收率高,产品质量高;“大”是指矿山的开采规模与加工企业规模向大型化发展;“自”是采、选、冶等加工过程自动化程度不断提高;“综”是指对矿产实行综合开发、综合利用。并且还向采、选、冶联合企业发展,由产品的单一化逐渐发展为多样化,甚至将行业性的工业(冶金、机械、化工、建筑等)发展成为综合工业体系。加强复合矿综合利用是我国一项重要的经济技术政策。随着我国矿产资源日趋紧张,今后势必越来越重要,为促其发展,除了矿业管理外,以下几个方面值得我们思索。

1. 提高综合利用指数和回收率是复合矿开发利用的重点

国外一些先进的矿产冶金企业,矿石中所含的全部或几乎全部有用组分都能回收,如原苏联乌斯特—卡明诺戈尔斯克铝—锌联合企业的原料中所含的全部 18 种有用组分都已组织回收。根据我国 184 个重要矿山企业统计的资料,综合利用指数达 70% 以上的矿山企业仅占 2%,综合利用指数达 50% 的矿山企业不到 15%,而综合利用指数小于 25% 的矿山企业却高达 75%。单打一开发,造成后果更为触目惊心。通过 101 个铜、铅、锌、钨、钼、铝等矿山调查,9 种主要有色金属矿矿井回采率只有 53%,而最终利用率只有 30%,即每产 1t 有色金属产品,需要消耗 3t 多金属储量。从工业普查提供的资料分析,矿山企业的金属总回收率普遍较低,主金属总回收率低于 40% 的矿山企业在 70% 以上,个别矿山或矿种的总回收率更低,资源浪费严重存在,尤其是乡镇企业浪费更为惊人。因此,提高复合矿综合利用指数,提高有价值元素的总回收率是节约矿产资源、增加矿产品种和数量、降低生产成本、减少环境污染、提高企业经济效益的重要环节,也是当前最紧迫的任务。

2. 研究应用现代综合科学技术是复合矿综合利用的关键

由于一些组成较为单一的富矿和易选矿产的不断开发,储量迅速减少,而复杂共、伴生矿产和难选冶矿产的综合开发利用已提到生产日程,采用传统的单一方法已不适应新的情况。研究应用现代综合科学方法,才能积极提高复合矿综合利用水平。

(1) 改进传统的矿床地下和露天开采系统,或采用全新的矿产回收系统。如在地下溶化矿产并呈液态输送到地面(如元素硫和天然碱矿);煤的地下气化;从岩石中浸出有价值组分并把溶解的组分送往地面(如铜);海底矿床开采工艺技术。

(2) 发展综合方法联合处理工艺技术。如在细粒选矿中采用絮凝浮选,高梯度振动磁

选;在难选冶复合矿中,发展选矿—冶金联合处理工艺,或者采用火法—湿法联合处理技术等。总之,综合科学技术可以收到取长补短、互相补充的效果,将使复合矿综合利用达到一个新的水平。

3. 开拓矿物新材料加工技术是复合矿合理利用的方向

近 20 年来材料学科发展非常迅速,特别是非金属材料、复合材料、新材料。大多数新材料的共同特点,已不是单一成分制成的材料,而是以其中 1 种以上含量多的元素为基体,制成多元素(也可以添加别的物质)结合在一起的具有特殊功能或多功能的结构材料,复合矿正好是多组分矿物,经过简易加工过程,就能制成矿物新材料。矿物新材料应具有如下特点:

- (1) 可综合发挥各种矿物的优点,具有综合性能;
- (2) 可按市场需要进行材料设计和制造;
- (3) 可制成所需要的任意形状的产品。

如果矿物新材料具有比现有材料更好的功能,必将对技术进步产生重要影响。它简化现有的矿石破碎、分离、提取、加工等一系列工艺过程,充分地提高复合矿综合利用指数,可以收到空前的经济效益和社会效益。

开拓矿物新材料,尤需重视非金属矿种的深加工和精加工以及改性技术的发展,这样才会使之具有耐高温、耐酸碱、绝缘、导电、润滑、吸附等特殊功能。目前已用高强度纤维与金属基体或陶瓷基体复合,可以得到耐热性良好的新材料,并改善了陶瓷的脆性。

4. 复合贫矿开发,二次资源再生也是扩大矿产资源的途径之一

随着矿产资源日趋紧张,开发复杂贫矿已成为矿业发展的明显趋势。对我国部分省区来说,短缺矿种的贫矿利用尤为重要,如能研究出高效节能、经济合理的贫矿处理工艺,将使矿物原料的品种和数量剧增。

有关专家预言:下世纪我国某些企业将面临无米之炊的危险,一些资源将日益枯竭,加强废旧金属的再生利用;废渣、尾矿等综合利用,也是缓解我国矿产资源不足的又一途径。据统计,世界工业发达国家再生金属的比重在有色金属总产量中占 30%,最高达 52%,无疑有色金属废料、废件的返回利用,使有色资源大为增加。同时再生金属具有投资少、能耗低、效益大的特点。

复合矿综合利用是一项多学科、多层次、多因素的系统工程,也是一个带有战略性的大课题,关系着一个国家经济建设的持续发展和繁荣。摆在我们面前的出路,急需强化科学研究,千方百计合理开发利用和有效保护矿产资源。

第2章 我国的复合矿资源

2.1 复合矿成矿概述

地球诞生于约 60 亿年前,由液态冷凝形成,由三部分组成:地心(高温液体),地幔(高温塑体),地壳(固体)。用以支撑人类文明的全部无机物料均取自于地壳。地壳的厚度很不均匀,平均约为 16km。它由岩石组成,岩石是由矿物组成的。矿物是由一种或多种元素组成。周期表中的化学元素在地壳中几乎都有,但所占的比重极不平衡,其中氧、硅、铝、铁、钙、钠、钾、镁、氢九种元素占地壳总重的 98.13%,其余 90 多种元素只占 1.87%。

各种元素在地壳岩石中的分布是不均匀的,它的平均含量以“克拉克值”或“丰度”表示,其单位有的用百分比表示,有的用 g/t 表示,在地质作用和成矿作用下,元素可相对富集,形成可资开采的矿产。各种矿产最低可采品位与其克拉克的比值称为该元素的“浓集系数”。部分元素的克拉克值和浓集系数列于表 2-1。

表 2-1 某些元素的“浓集系数”

元 素	克拉克值 (%)	最低可采品位 (%)	浓集系数	元 素	克拉克值 (%)	最低可采品位 (%)	浓集系数
Ag	1×10^{-5}	0.02	2000	K	2.6	30	12
Al	8.8	25	~3	Li	6.5×10^{-3}	0.5	80
As	5×10^{-4}	2	4000	Mg	2.1	13	~6
Au, Pt	5×10^{-7}	0.0003	6000	Mn	9×10^{-2}	10	110
B	3×10^{-4}	5	17000	Mo	3×10^{-4}	0.04	130
Ba	5×10^{-2}	~30	600	Na	2.64	39	15
Be	6×10^{-4}	0.4	670	Ni	8×10^{-3}	0.6	70
Bi	2×10^{-5}	0.5	25000	Pb	1.6×10^{-3}	1	600
Ca	3.6	40	11	Sb	4×10^{-5}	1	25000
Co	3×10^{-3}	0.1	30	Si	27.6	~46	1.50
Cr	2×10^{-2}	~8	400	Sn	4×10^{-3}	0.15	40
Cu	1×10^{-2}	0.5	50	Ti	6×10^{-1}	10	~7
Fe	5.1	30	~6	V	1.5×10^{-2}	0.5	30
Hg	7×10^{-6}	0.1	14000	Zn	5×10^{-3}	3	600

元素的富集与元素在各种地质作用下发生迁移有关。如地下深处的岩层,局部熔化成岩浆,使组成岩层的元素活化,转移到硅酸盐熔体中,随硅酸盐熔体而迁移,最后岩浆结晶,元素以各种新的独立矿物或类质同象等形式固定下来形成矿床。我国承德钒钛磁铁矿就属此类矿床。又如,岩浆经历了不同的结晶阶段以后,剩下的是一种富含挥发性成分和各种金属物质的气水溶液。由于热液作用,岩石被浸溶,以各种形式存在的元素遭受不同程度的淋失,

并随热液而迁移。在一定条件下以蚀变矿物或矿化结果固定下来,形成气成—热液矿床。我国的铅锌矿、钨矿、锑矿等多属此类。在成矿过程中由于元素及其化合物的物理化学性质以及类质同象的作用,很容易生成多金属复合矿,特别是贵金属和稀有金属一般不能单独成矿,即使是那些容易富集成矿的金属也难免伴生其它金属矿物,因而地壳中复合矿的存在具有普遍性。

影响元素共生的主要因素有:

1. 元素类质同象能力

所谓类质同象是两种或两种以上的化学性质相近而结晶构造相似的物质,在一定的外界条件下结晶时,晶体中的部分构造单位(原子、离子、络离子、分子)发生相互置换或代替,替换后只引起晶格常数的微小改变,并不破坏原有的晶体构造。形成类质同象的条件主要决定于相互替换的质点的离子半径、电价、晶格类型等,同时也受外界的温度、压力、介质浓度等有关因素的影响。

类质同象是矿物中微量元素的重要存在形式,如 Ga、In、Ge、Tl、Cd、Se、Ra、Rb 等主要以类质同象方式存在于寄生矿物中。

又如,铁族元素中 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 可代替 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 进入硅酸盐晶格,往往使橄榄石和辉石含有较多的 Ni、Co。此外, Ni^{2+} 、 Co^{2+} 还能代替 Fe^{2+} 而进入铁的硫化物中,镍黄铁矿中的 Ni 和 Fe 之比可高达 1:1。在硫钴矿中 Ni 的最高含量可达 50%。

Au 和 Ag 同属 I_B 族,原子半径相同均为 0.144nm,单质晶体构造类型也相同,均为面心立方格子,因此 Au-Ag 完全类质同象,形成自然金→银金矿→金银矿→自然银的矿物系列。

Ag 的离子半径与 Cu 的离子半径相近,自然铜里含 Ag 可达 0.1%~4.0%。

铌、钽同属 V B 族,离子半径分别为 0.069、0.068nm,就目前已知的 72 种铌钽矿物中,所有的铌矿物中都含有钽,钽矿物中也含有铌,只是主次不同而已,因而铌钽矿孪生。

2. 元素及其化合物的物理化学性质

元素及其化合物的沸点、熔点、溶解度、结晶温度,化学亲和力相近者在成矿过程中易于生成共生矿,如 Cu、Pb、Zn 在自然界中常常紧密共生,这是由于它们都具有铜型离子结构,都有着强烈的亲硫性的缘故。这些金属硫化物在硅酸盐的熔浆中,在高温高压下彼此混熔,当温度压力降低时,首先发生硫化物和硅酸盐的液态分离,金属硫化物的比重大,富集于岩浆的底部形成共生矿床。

由于元素、矿物、岩石、矿床在一定的环境里产出有其共生组合规律,所以自然界的矿产绝大部分都是综合性共生资源。常见矿产的可能共生矿产及其常见的伴生有用组分列于表 2-2。

由于成矿机制的不同复合矿中共生元素存在的主要形式有独立矿物和类质同象等。元素在矿石中的存在形式与选别工艺处理关系极大。构成独立矿物的有用元素,当结晶粒度大于 0.02mm 时,基本可用现行的机械分选工艺分别予以回收。粒度 10 μm 以下,一般难以用现有的机械选矿方法回收,对于这些极其细微的独立矿物可以通过火法冶金或湿法冶金予以处理。至于以类质同象方式存在于载体中的有用元素,通常采取的方法是选取载体矿物,然后从载体矿物的精矿中回收。

表 2-2

常见伴生有用组元

矿产名称	可能共生矿产	常见伴生有用组分、矿物
铁	视同类型不同而异	Co Ni V Ti Mn Cu Sn Mo Pb Zn Ge Ga P 稀土等
锰	铁等	Co Ni Fe 稀有等
铬	石棉 滑石 菱镁矿等	铂族 Co Ni V Ti 等
钛	钒钛磁铁矿 独居石 锆石英 石榴石	V Fe P 等
铜	铁(热液型、火山岩型)	Fe Mo W Sn Bi Pb Zr Ni Co Sb Au Ag As Cd 等
铅锌		Cu Au Ag Ge Cd Ga In Sb Bi Sn FeS 萤石等
铝	煤 硫铁矿 耐火粘土 铁	Ga V Ti Se 等
镁	石灰岩 大理岩 石棉滑石等	Ni Co Pt 等
镍	铬 石棉 滑石等	Cu Fe Cr Co Mn 铂族蛇纹岩等
钴	常伴生于砂卡岩型铁矿热液多金属矿 硫化铜 镍矿 铜矿等	Fe Cu Ni Mn 稀散等
锡	钨 稀有稀土 铅锌	W Mo Bi Au Ag Cu Pb Zn Sn S As Fe 稀有等
钨	铜	Re W Sn Bi Cu P Zn Au Ag Li Be S 等
钼	锡 稀有稀土	Sn Mo Bi Au Ag Cu Pb Zn Sb Be Li Nb Ta 等
金	有色金属(原生)砂矿	Ag Cu Pb Zn Sb Ho 金红石 独居石等
铌钽	有关原生砂矿	Be Sn Zr Hf 稀土独居石 金红石等
铍	铌钽 铍 钨锡 铅锌 云母等	Li Nb Ta W Sn 等
锂	铌钽 铍 钾盐 云母 萤石 钾盐 镁盐 芒硝	Be Nb Ta Rb Cs K I Er 等
油页岩	石油 煤 黄铁矿	V I P B Ge
磷矿	镍 铝 稀土	Mn Mo U Y Yb Dy V Ti Fe Pt Li Be 等
煤	油页岩 铝土矿 耐火粘土 磷矿等	U Ge Ga In S 等
硫	铜 铅 锌	Au Co Ni Pt 稀有稀散等

2.2 复合矿综合勘探与评价

矿床勘探是在矿区普查评价的基础上,选择具有工业远景的矿区,应用各种勘探技术手段与方法,全面研究矿床的成矿地质条件,矿体的赋存规律,矿石的储量,质量及其空间分布、矿石的技术加工性能,矿床开采的技术条件及矿区的水文地质条件等,为矿山建设和设计提供各种基础资料。由于自然界中绝大部分矿床除主元素外,都伴生有若干有益组元,其中包括在高、新技术方面极为重要的稀有及分散元素,因此在矿床勘探中必须遵守综合勘探、综合评价的原则。

复合矿的综合勘探是指对矿床的主要矿产进行勘探和评价的同时,相应查明矿石中伴生的有用组分,为综合开发和利用矿产资源提供储量和矿产资料。实行综合勘探和综合评价,不仅可以提高矿床地质勘探工作的成效,而且可以大大提高矿床的工业价值,使单一开发的矿床变为可供综合开采利用的工业矿床。在矿产勘探中往往出现这种情况,从单一矿产

资源考虑,或由于矿石品质的原因,或由于矿物赋存形态的复杂性,不能经济有效开发利用,如果综合考虑回收利用伴生的有价值元素,则可使弃置不用的“呆矿”变为有开采价值的资源。如广西贵港地区蕴藏着数千万吨高铁铝土矿,该矿矿床埋藏浅,大部裸露地面,开采极为方便,但由于矿石品质和赋存形态的原因,不论从铁或铝资源都不能利用,使之成为无价值的“呆矿”长期搁置。近年深入研究铁、铝综合利用方案,获得可喜成果,使该矿成为有经济效益的可资利用的资源。

在以往的矿床勘探工作中,也有由于对伴生有益组分的综合勘探、综合评价和综合开发利用问题重视不够,给矿山设计、生产建设都带来不少困难,造成重复勘探和矿山被迫改建等不良后果,使国家的宝贵资源得不到充分利用。例如甘肃某铜矿是一个伴生铅锌等多种金属的黄铁矿型铜矿,但由于对铅锌矿石综合研究不够,作了否定的评价。在矿山投产以后,不但使有工业价值的铅锌不能回收,反而由于铅锌矿石的存在而严重影响了主金属铜的选冶效果。为了改变这种不正常的生产状况,矿山又根据原有的地质资料重新圈定了铅锌矿体,增设铅锌的选矿流程,使之陷入新投产企业即需进行流程改造的被动局面。

由上可见,在勘探主要矿种的同时,对伴生有益组分和共生矿产,应根据资源条件,矿山建设设计需要和一孔多用的原则,进行综合勘探和综合评价,研究其含量、赋存状态和分布规律,对有综合利用价值的组分,应分别计算其储量。

2.3 复合矿资源示例

2.3.1 攀—西地区钒钛磁铁矿

四川省攀枝花—西昌地区蕴藏着极为丰富的钒钛磁铁矿。目前已探明构成特大型矿床的有攀枝花、红格、白马、太和四大矿区,远景储量达 100 亿 t。其中攀枝花矿床为现开采矿区,已经成为我国重要的钒铁基地之一。金属钒的资源量为 860 万 t,占我国钒资源 60.4%,世界资源的 12.2%。钒的金属储量为 46570 万 t,占我国钛储量 97%,占世界储量 39.1%。除铁、钒、钛外还伴生有钴、镍、铬、镓、钨等有益元素。四大矿区的保有储量见表 2-3。

表 2-3 攀西地区钒钛磁铁矿保有储量				
矿 区	储量(万 t)	含 量(%)		
		TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅
攀 枝 花	107892.0	16.7~43	7.76~16.7	0.16~0.44
白 马	120334.0	17.2~34.4	3.9~8.2	0.13~0.35
红 格	35451.1	16.2~38.4	7.6~14.0	0.14~0.56
太 和	75120.0	18.1~36.6	7.7~17.0	0.16~0.42

攀—西地区钒钛磁铁矿属岩浆内生矿床,其中攀枝花、白马、太和矿体属基性岩,红格矿属基性—超基性岩体。

此谓岩浆岩矿床(火成岩)是由岩浆(含硅酸盐、气体和各种金属元素的高温熔浆)中的各种组成物质按在岩浆中熔点不同顺序结晶,早期结晶的有用矿物受重力作用下沉而富集

形成矿床,此谓结晶分异作用。岩浆岩按其中 SiO_2 含量不同(通常以 SiO_2 代表酸性,以 FeO 、 Fe_2O_3 、 MgO 代表基性)分为超基性岩、基性岩、中性岩和酸性岩四大类。

1. 矿石的化学成分

四大矿区原矿的平均化学成分列于表 2-4。矿石按主元素 TFe 的高低划分为 I 品级和 II 品级, TFe 品位大于 20% 为 I 品级, TFe 品位在 15%~20% 之间者为 II 品级。

由表 2-4 可看出四大矿区有用元素含量有以下特点:

表 2-4 四大矿区原矿平均化学成分

矿 区	红 格		攀 枝 花		白 马		太 和	
品级含量(%) 成 分	I 品级	II 品级	I 品级	II 品级	I 品级	II 品级	I 品级	II 品级
SiO_2	25.56	34.25	18.42	35.89	27.52	36.32	21.50	31.88
Al_2O_3	6.44	7.55	9.18	11.50	10.65	15.11	7.47	9.69
TFe	26.15	16.99	33.40	16.92	25.42	18.28	28.30	18.51
Fe_2O_3	15.24	8.36					18.44	10.03
FeO	19.92	14.22					19.68	14.65
TiO_2	10.0	7.63	11.45	7.63	5.63	4.05	11.40	8.01
V_2O_5	0.245	0.144	0.33	0.124	0.24	0.18	0.23	0.18
Cr_2O_3	0.209	0.102	0.018	0.0028	0.030	0.022	0.012	0.013
MgO	8.93	9.25	5.01	7.01	10.43	7.79	7.34	7.86
K_2O	0.43	0.53		0.088	0.36	0.34	0.21	0.279
Na_2O	0.75	0.90		1.94	1.42	1.86	0.77	1.09
CaO	8.34	12.70	5.82	11.07	5.21	7.30	8.89	12.19
Cu	0.022	0.019	0.017	0.004	0.036	0.022	0.011	0.015
Co	0.015	0.010	0.018	0.008	0.013	0.009	0.014	0.008
Ni	0.041	0.026	0.024	0.0017	0.026	0.015	0.008	0.006
S	0.494	0.399	0.51	0.334	0.41	0.30	0.414	0.420
P	0.214	0.413	0.063	0.031	0.036	0.043	0.372	0.420
MnO	0.212	0.166	0.227	0.206	0.237	0.190	0.290	0.290
Ga	0.0030	0.0020		0.0025	0.0029	0.003	0.0029	

铁: I 品级全铁品位为 25%~34%, 攀枝花矿区含铁品位最高, 白马矿区最低。II 品级全铁品位为 17%~19%, 白马、太和矿区略高于红格、攀枝花。以铁而论, 全部属于贫矿, 非经分离富集不能直接入炉冶炼。

TiO_2 : 除白马矿区外, 其余三矿区基本一致, I 品级 TiO_2 为 11% 左右, II 品级为 8% 左右, 白马矿区明显偏低, 仅相当于其它矿区一半。作为提钛资源, 参考表 2-1 所列数据, 仅达最低可采品位, 即使将铁分离出去后, 其富集浓度亦很低, 较之 TiO_2 大于 90% 的天然金红

石钛矿亦属贫矿,为其利用增加困难。

V₂O₅:矿石中 V₂O₅ 与全铁的品位成正相关, I 品级为 0.23%~0.33%, II 品级为 0.124%~0.18%。如单以钒资源评价,其品位达不到最低可采品位,不能做为钒资源单独开采。

其它有益元素,如铬、镍、钴、镓等含量都很低,利用价值不高,但由于矿床储量大,其总量仍构成特大型矿产资源,应当加以综合回收利用。

2. 矿石的矿物成分

攀枝花四大矿区的矿物成分列于表 2-5。

矿石中的有益元素主要赋存于钛磁铁矿、钛铁矿及硫化矿物中,它们是选矿回收的主要对象。这些矿物在矿石中的平均含量列于表 2-6。从有用矿物的平均含量看,不论钛磁铁矿或是钛铁矿,其含量都较低,脉石矿物占据矿石总量的 40%~75%,这将大大增加选矿流程的加工量。

表 2-5		四大矿区矿物成分		
矿 相 对 量	种 物 类	金 属 矿 物		非 金 属 矿 物
		氧化物	硫(砷)化物	
主 要 的	钛磁铁矿 钛铁矿	磁黄铁矿 黄铁矿	普通辉石 拉长石 中长石 橄榄石	
次 要 的	磁铁矿 磁赤铁矿	黄铜矿 镍黄铁矿	蛇纹石 普通角闪石 黑云 母	
少 量 的	赤铁矿 假像赤铁矿 金红石 白钛石 钙钛矿	紫硫镍矿 硫铁镍矿 辉钴矿 马基诺矿 哈帕 莱矿 硫钴矿 硫镍钴矿 闪锌矿 方铅矿 方 黄铜矿 辉钼矿 墨铜矿 辉铜矿 黝铜矿 针 镍矿	磷灰石 绿泥石 方解石 透闪石 绢云母 镁铝尖晶 石 铁铝尖晶石 榍石 伊 丁石 锆石 石榴石 电气 石 黝帘石	

表 2-6 四大矿区主要矿物平均含量(wt%)

矿 区	钛磁铁矿		钛铁矿		硫化物(总)		脉石(总)	
	I	II	I	II	I	II	I	II
攀 枝 花	46.71	14.91	9.51	11.00	1.16	0.96	42.62	73.13
红 格	30.40	13.51	13.47	11.48	1.43	1.25	54.70	73.76
白 马	28.82	19.44	4.96	3.45	1.34	0.79	64.88	76.32
太 和	33.53		14.15		0.93		51.39	