

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2019.00576

• 工程史 •

包头白云鄂博矿综合利用之中科院化工冶金研究回顾

刘伟¹, 方一兵², 李道昭¹

(1. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院 自然科学史研究所, 北京 100190)

摘要: 包头白云鄂博矿是我国大型多金属共生矿床, 1954年开始建设的包头钢铁公司是新中国最早建设的钢铁工业基地之一, 在1978年全国科学大会上又被确定为全国矿产资源综合利用三大基地之一。时任国务院副总理方毅领导和部署白云鄂博矿的综合利用工作, 并调集了全国上百家相关单位参与该矿的研发利用。中国科学院化工冶金研究所(现过程工程研究所)首任所长叶渚沛早在1952年就主张以稀土元素综合利用为主, 1962年他与同事实地考察后发表了《关于合理利用包头稀土稀有资源的建议》, 但当时未被完全采纳。1978年起, 作为中国科学院参与研究单位之一, 化工冶金研究所承担了白云鄂博矿综合利用项目中的高炉富稀土渣综合利用等研究任务, 经过协同攻坚, 取得系列研究成果, 为白云鄂博矿综合利用做出了重要贡献。梳理了叶渚沛在国家如何利用好稀土这种战略资源方面屡次建言献策得到中央领导重视的史实, 记述了中科院科研人员开展包头矿化工冶金研究方面科技攻关的历程, 分析了国家重大战略需求与科学技术咨询和研究之间的关系。藉此反映以过程工程研究所为代表的国立科研机构, 围绕国家重大战略需求开展科技攻关的过程、成果及作用。

关键词: 稀土; 叶渚沛; 化工冶金; 流态化; 高炉渣; 缓冷结晶

中图分类号: TF1 ; K2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2019)06-0576-11

我国的矿产资源中, 多金属共生矿占相当比重, 如何综合回收和利用矿产资源的各种金属成为国家发展金属工业的重大战略需求。位于内蒙古包头的白云鄂博矿, 是世界罕见的多金属共生矿, 现已发现175种矿物、71种元素, 稀土储量居世界第一位, 铈储量居世界第二位^[1]。包头一直以来都是我国重要的钢铁原料基地, 白云鄂博素有“稀土之乡”的美誉。

建国之初, 百废待兴, 急需钢铁支持国民经济和国防建设。1949年12月重工业部召开全国

钢铁工业会议, 确定对白云鄂博进行资源调查, 并把包头列为“关内未来的钢铁中心”之一, 白云鄂博矿区被列为首批地质评价工作的重点^[2]。自此, 包头白云鄂博跟随着新中国前进的步伐共同成长。从1952年起, 冶金学家叶渚沛(1958年被任命为中国科学院化工冶金研究所首任所长)多次就合理利用稀土资源提出了建议, 颇具建设性和前瞻性, 符合白云鄂博矿可持续开发的实际, 但当时因为种种原因未被完全采纳。1953年, 根据《关于苏维埃社会主义共和国联盟政府

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-10-14

基金项目: 中国科协“老科学家学术成长资料采集工程”(郭慕孙院士和陈家镛院士项目); 中科院自然科学史研究所重大突破项目: 中华人民共和国科学技术史纲(Y621081)

作者简介: 刘伟(1981-), 男, 六级职员, 主要研究方向为科学技术史。E-mail: wliu@ipe.ac.cn

方一兵(1971-), 女, 研究员, 主要研究方向为近现代技术史。

李道昭(1936-), 男, 研究员, 主要研究方向为化工冶金。

援助中华人民共和国中央人民政府发展国民经济的协定》,苏联援助中国新建大冶(即武钢)和包头两座钢铁联合厂,1954年包钢正式获批成立。经1963和1965年两次召开“包头矿综合利用和稀土应用工作会议”(即“415”会议)研讨,国家最终确定了“以铁为主,综合利用”的方针,包钢逐渐发展壮大,生产的大型钢材开始支援全国各地的建设^[3]。1978年3月,在全国科学大会上,包头白云鄂博含稀土铁矿与金川硫化铜镍矿、攀枝花钒钛磁铁矿(简称“三大矿”)一起被国家列为全国矿产资源综合利用三大基地之一。时任国务院副总理方毅九年间七下包头,从1978年起至1986年,每年组织上百位科技工作者前往包头,进行科技大会战,在包头召开资源综合利用科技攻关大会,对科研工作整体会商、系统攻关^[4]。

方毅在“第七次包头资源综合利用科技工作会议”上的报告中回顾:自从1978年开始,在冶金部、国家科委和内蒙古自治区等部门的组织协调下,全国上百个科研、设计、生产单位和中国科学院、高等院校的专家、学者,针对包头资源综合利用中迫切需要解决的问题,进行了大规模的联合攻关。经过8年努力,攻克了采矿、选矿、冶炼、成材和稀土提取分离等一批生产技术难关,使包钢的面貌发生了巨大变化^[4]。化工冶金研究所作为参与单位,派出一批中青年科研骨干投入到白云鄂博矿综合利用科技攻坚的项目中。

本文以白云鄂博矿稀土综合利用历史为研究对象,主要追忆了叶渚沛院士与稀土的故事,及他创建的化工冶金研究所在稀土综合利用研究方面所做的贡献,藉此反映作为科技国家队的中国科学院,在我国当代重大矿产资源特别是复杂矿综合利用的科技攻关,以及科技创新推动钢铁和有色金属工业发展中的地位与作用。

1 叶渚沛与包头白云鄂博矿综合利用的提出

叶渚沛(1902-1971年),祖籍福建厦门,出

生在菲律宾马尼拉,著名冶金学家,中国科学院学部委员(院士)。他先后就读于美国科罗拉多矿业学院、芝加哥大学、宾夕法尼亚州立大学,获得金属物理化学博士学位,毕业后在美国联合碳化物研究所和中央合金钢公司任职,1933年回国后在南京国民政府资源委员会创建了冶金研究室并担任主任。1938年南京沦陷前,他带领同事携重要仪器设备内迁重庆。在长沙停留期间,完成了生产电解精铜的科研任务,炼铜厂生产出含铜99.9%质量优良的电解精铜,用于制造枪弹支援抗日战争。内迁途中,叶渚沛还接待了路易·艾黎带来的加拿大外科医生诺尔曼·白求恩,他将自己的积蓄全部拿出来,为白求恩置办了行装和医疗设备,送其登上了去往延安的旅程。1941年皖南事变后,叶渚沛为周恩来副主席与英国使馆代办安排了一次秘密会晤,将皖南事变的真相公之于众。1944年叶渚沛出国考察,先后受聘于联合国教科文组织任科学组副组长和联合国经济事务部任经济事务官^[5]。

新中国成立后,叶渚沛回到祖国,被任命为重工业部(冶金工业部前身)顾问。关于包头矿如何利用问题,从1952年重工业部组织的包头小组会议上就有两种观点交锋:一种是苏联专家的以开采铁矿为主的观点;另一种便是叶渚沛的应以利用稀土元素为主的观点^[6]。在这次会议上,苏联专家提出以铁矿开采为主的方案,叶渚沛认为该方案会导致资源浪费和环境污染,因此他提出了包头稀土综合利用的主张,理由是:稀土金属为尖端工业所必需、来源少、用途特殊,价值远超一般钢铁,且包头稀土矿贮量极大;如果单一开采铁矿,不仅浪费资源,还会造成污染,带来其他无法解决的问题。但当时这种观点没被接受,反而成为“反苏罪状”之一。为此,叶渚沛于1953年不得不开重工业部^[7]。

1954年10月24日,刘少奇副主席接见了来我国访问的英国物理学家、世界和平理事会副主席约翰·贝尔纳教授时,贝尔纳表示“你们中国

自己还有一位专家没有很好利用”，即指叶渚沛。1955年，叶渚沛当选为中国科学院技术科学部委员（院士）。中国科学院原副院长张稼夫曾在《我与中国科学院》中提到叶渚沛，“他是冶金、化学的多面手，他很注意冶金工业的综合利用，认为矿石都是综合体，除了炼铁，还应当把其他的东西也收回来。解放初期，他在冶金部工作，宣传自己的观点，因和苏联的一位专家意见不一致，因而不受重用。吴玉章同志就把他推荐给我，于是就留在了科学院工作。这次陪同巴尔金（苏联科学院副院长、冶金专家）参观访问，收获很大。巴尔金曾经看过叶渚沛的学术论文，对他很尊重。巴尔金回国后，我对叶渚沛同志说，给你成立一个研究所，由你调人，他非常高兴。后来，他在石景山钢铁厂附近建了一个小高炉，定名为化工冶金研究所，这可有用武之地了^[8]。”

在苏联专家的建议下，包头矿开发在大跃进中匆匆上马。投产后，产量指标上不去，高炉生产不正常，打乱了矿山生产计划，而且叶渚沛所提过的大量资源流失和放射性污染等问题也突显出来。在1962年2月召开的广州科技会议上，叶渚沛得知这些消息后，决定去包钢进行一番实地考察^[7]。1962年5月，叶渚沛、郭慕孙、刘侠等到包钢实地考察，发现只有一座高炉处于半生产状态，稀土、稀有金属等资源流失，污染严重。同年，作为中国科学院学部委员，叶渚沛向国家正式提出《关于合理利用包头稀土稀有资源的建议》，指出“早在10年前，考虑到稀土储量巨大、用途重要、具有极高的经济价值和国防意义等情况，为了强调它们的重要性，曾提出了该地区的建设应以稀土元素利用为主的建议。但是，这一建议当时并未得到有关部门的重视和采纳，仍按一般钢铁基地作了一系列的试验研究和设计。”为此，他再次提出：“该地区的资源究竟如何利用，以什么为主的问题，值得进一步探讨。根据现有的资料，我们认为应该以稀土稀有为主。如果必

须开采铁矿，则应在开采的同时，使稀土稀有的损失尽可能小。宁可多损失1%~2%的铁，而不应该损失1%的稀土稀有。稀土稀有的需要量目前虽不多，但其用途重要、经济价值很高，应用的范围在进一步研究后，还可大大扩大。因此，从资源的长远利用考虑，并对我们的子孙后代负责，目前必须对这一资源进行很好的保护^[7]。”

实际上，包头矿稀土资源的综合利用在广州会议之前因国家实施国防新材料攻关而再度受到关注。1959年底，为发展国防尖端科技，主管科学技术工作的聂荣臻副总理将新材料、精密仪器仪表、大型设备作为重点攻关的三个方面提出，新材料方面，国家科委和国防科委组织成立了新技术材料小组，组织全国范围的新材料攻关。1960年，中央批准了发展新材料方案，高性能合金钢作为尖端武器制造的重要材料受到重视，包头矿稀土资源对新材料研制的重要性因此受到聂荣臻的关注^[9]。1960年10月，聂荣臻赴包头视察，随后向周恩来总理并中共中央、毛泽东主席提交了《关于包头稀土合金钢试验使用和钢铁生产问题》的报告。其中指出，“像这样大的具有战略意义的矿藏，同时又处在腹地，必须集中力量研究，予以综合利用。这不仅是个远景问题，而且当前显示需要非常迫切，也大有可能……近10年来国际上稀土元素的应用研究，发展极为迅速，我们又有这样优越的条件，因此迫切需要尽早建立我国自己的合金钢体系钢材，其中包括我国自己的稀土合金钢体系”^[10]。正是在这样的背景下，叶渚沛于1962年再次提出的关于合理利用包头稀土资源的建议获得重视。

在聂荣臻的建议和主持下，1963年4月1日包头冶金研究所（现包头稀土研究院）正式获批成立。1963年4月15~28日，由国家科委、冶金部和中科院共同主持召开的“包头矿综合利用和稀土应用工作会议”（即第一次“415”会议）在北京举行^[11]。会议成立了有关部委领导组成的领

导小组,汇集了相关领域的专家、学者和工程技术人员等百余人,还特邀了叶渚沛、邹元曦、侯德封三位著名科学家。叶渚沛将《关于合理利用包头稀土稀有资源的建议》提交给大会,并附有具体开发方案和技术路线,得到聂荣臻的高度重视^[7]。本着“保护国家资源、合理开发利用”的方针,这次会议充分讨论后一致认为白云鄂博铁、稀土、稀有元素是世界罕见的宝贵资源,必须进行综合利用。会议讨论制订了包头矿综合利用稀土科研、生产、应用(1963~1965年)的3年规划,部署了矿山地质研究和综合勘探及冶炼方面的任务。为满足推广应用的需要,特别是稀土合金钢的需要,要试制多品种中间合金、研究各种经济合理的处理稀土精矿的流程^[11]。就如何执行综合利用这一方针,与会代表有三种意见:(1)综合利用应以铁为主,保护好稀土和铈,充分考虑回收利用,包钢仍按原计划建设;(2)综合利用应以稀土、稀有为主,在对稀土、稀有及放射性元素的资源、选矿、应用等科研工作作出结论之前,包钢暂停建设和停产;(3)要强调综合利用,但不要提以什么为主,包钢暂时维持现状,不宜再扩大建设,加强选矿,冶炼和应用研究,待研究做出结论后,再全面考虑包钢的建设方针^[12]。叶渚沛以稀有稀土为主的建议虽然未被完全采纳,但综合利用的方针被确定下来。这在当时“钢铁元帅升帐”的大背景下,也不能不说是叶渚沛等专家据理力争的结果^[7]。6月3日,聂荣臻就“白云鄂博矿藏开发问题”致信周恩来、李富春、薄一波,信中简要介绍了“415”会议情况,介绍了专家们的意见,请中央对白云鄂博矿的开发决定一个方针,同时上报了国家科委《关于包头白云鄂博矿藏开发问题的报告》^[12]。

1964年,中共中央委员会总书记邓小平视察包钢时指出,“白云鄂博蕴藏着大量稀有金属,有个综合利用的问题。……要双管齐下,设立一个搞稀土的机构,有步骤的开发。”当知道已有一个

稀土研究机构,邓小平高兴地说:“那就好,我们绝不可浪费资源。”视察白云鄂博矿时,他提出要综合开发,利用宝贵的矿产资源^[3]。1965年,毛泽东主席指示:“矿山保护,综合利用很重要,要注意”,“综合利用大有文章可做^[12]”。1965年4月15~24日,国家科委、国家经委和冶金部在包头召开第二次“包头矿综合利用和稀土应用工作会议”(即第二次“415”会议)。会上传达了国家关于包钢的建设和白云鄂博矿的开发方针,也就是“以铁为主,综合利用^[12]”。

综合利用是指在矿石的选、冶过程中,对其所含的各种有益组份,要在技术条件允许范围内最大程度的予以提取、回收。开采过程中,如果现有技术暂不能利用,也应将富集有益伴生组份的矿石在适当场所,不能废弃^[13]。以铁为主开采还是以稀土、稀有为主,实质上也是一个保护稀土资源的问题。一致的方面是都同意开采利用,如果以稀土、稀有为主,根据当时市场需求情况,规模会比较小,这对保护资源是有利的;如果以铁为主,规模就会很大,对稀土稀有的损失必然要大,但当时国家对钢铁的需求又非常迫切,叶渚沛也知道当时国家对钢铁的迫切需求,所以他在报告中说:“如果必须先开采铁矿,则应在开采铁矿的同时,使稀土、稀有元素的损失,尽可能小”。作为冶金方面的专家,他的建议是认真负责的,国家科委对如何充分利用包头矿的稀有稀土资源非常重视,召集全国性会议进行讨论,寻求最优方案,最后做出了以下几项重大决策^[12]。(1)在开采中使稀土的损失尽可能小,包钢采取两项措施:建设尾矿坝,选铁后的含稀土尾矿堆存;采铁矿时剥离的含稀土围岩专设堆置场。(2)尽快开发利用,组织全国力量进行技术攻关,推进包头冶金研究所建设。(3)建设稀土试验厂704和8861厂(包钢稀土一、三厂前身)。(4)开辟稀土应用市场:加快国内的推广稀土应用,成立全国稀土推广应用领导小组;也提出开拓国际市

场, 鼓励出口。

可以说, 叶渚沛在 20 世纪 50 年代特殊的时代环境下, 率先提出不同于苏联专家的观点, 是他作为冶金学家所体现出的因地制宜和前瞻性的专业精神。而当合金钢等新型材料的研发受到国家重视的情况下, 他再次提出以稀土稀有为重的包头矿综合利用的建议和方案, 则体现了其作为科学家的责任感和大局观。正是在以叶渚沛为代表的科学家建议的推动下, 我国稀土资源得以走上综合利用的发展之路。

2 化工冶金研究所对包头白云鄂博矿开展研究回顾

中国科学院化工冶金研究所由叶渚沛创建并担任首任所长, 1958 年 9 月 26 日获批成立, 研究方向是用化学工程的观点和方法来改进冶炼过程和设备, 在其创办和发展过程中, 确立了五个方面的研究任务: 强化高炉冶炼过程; 流态化焙烧; 湿法冶金; 转炉炼钢中的问题; 复杂矿的综合利用。复杂矿的综合利用主要是化工冶金所针对国家急需开发利用的攀枝花钒钛磁铁矿、包头含稀土铁矿、金川硫化铜镍矿已有工艺流程的完善和新工艺流程的开发, 以及钒、钛、稀土、钼、镍、钴等分离提取新方法进行了大量的应用基础研究和工艺流程开发。建所之初, 化工冶金所设立了炼铁、炼钢、流态化、湿法冶金四个研究室, 其中叶渚沛负责炼铁室和炼钢室, 流态化室、湿法冶金室分

别由郭慕孙、陈家镛负责。20 世纪 60~80 年代的几十年间, 化工冶金研究所几代科学家投身到包头白云鄂博矿的研究工作中, 在使用化工冶金的研究方法实现稀土资源综合利用方面发挥了不可替代的重要作用。

2.1 早期对包头白云鄂博矿的流态化焙烧研究

化工冶金所进行包头矿的流态化焙烧研究始于 20 世纪 50 年代末, 当时包头铁矿的开采和利用以钢铁为主, 稀土资源尚未真正利用。1960 年 4 月, 叶渚沛曾语重心长地告诉白万海等年轻科研人员, 稀土是我国珍贵的不可再生资源, 一定要对稀土做详细分析。他拿到包头矿稀土分析报告后面露喜色, 对流态化室的科研人员说: “我所承担着好几项国家重点任务, 其中有攀枝花钒钛铁矿, 包头含稀土的铁矿等。要从综合利用的观点对这些矿进行研究工作, 对于资源决不能浪费, 比如包头矿中的稀土问题, 我们现在还没有完善的提取稀土的研究结果。为此我向中央提出过, 是否暂缓开采包头矿。可是现在包头钢铁公司成立了, 包头矿开采了, 因此我们在利用铁资源时, 一定把其中的稀土保存好。去包钢公司汇报工作时, 一定要向公司领导提出, 把选矿中的尾矿和炼铁时的高炉渣保存好, 以备将来从中提取稀有元素。向他们说明我的意见。”^[14]

1962 年 7 月, 根据包头考察情况, 叶渚沛与郭慕孙主持完成了《关于合理利用包头稀土稀有资源的建议》, 提出的流程方案如图 1 所示。



图 1 化工冶金研究所建议的流程方案

这一流程的特点是: 在获得铁精矿的同时, 将稀土和稀有元素富集于尾矿中, 进一步分离提取。早在 1958 年, 化工冶金研究所就开展了流态化磁化焙烧的研究工作。在叶渚沛的鼓励和支持

下, 郭慕孙带领科研团队, 于 1959 年对包头矿进行了日处理 7.5 吨的逆流两相磁化焙烧扩大试验, 1963 年又在包钢选矿厂进行了类似的试验。1963 年, 国家科委决定由化工冶金研究所在马鞍山建

设日处理 100 吨原矿的流态化磁化焙烧中试工厂,1965 年建成,该项目面向全国,为在建厂矿提供建设依据和试验数据。1966 年,又设计了日处理 1.2 吨的顺流两相流态化磁化焙烧炉,对包头矿细粉进行了 58 小时的连续磁化焙烧,试验均获得满意效果^[14]。“文革”开始后,化工冶金研究所大部分科研工作几乎全部中断,被迫转向搞半导体材料的研制和生产。

2.2 对包头白云鄂博矿高炉富稀土渣的综合利用研究

1978 年全国科学大会召开,我国迎来了“科学的春天”,包头、攀枝花、金川被列为我国三大矿产资源综合利用基地,化工冶金研究所的科研工作逐渐回归正轨。中国科学院作为三大矿综合利用项目主要科技攻坚单位之一,安排沈阳金属研究所、长春应用化学研究所、上海冶金研究所、上海有机化学研究所、长沙矿冶研究所、昆明贵金属研究所、化工冶金研究所等单位参与包头、攀枝花、金川三地矿产资源综合利用项目的基础和应用研究。针对包头矿的研究,主要是开展选矿实验、稀土的提取与分离,以及稀土在钢铁工业中的应用等工作。化工冶金研究所科研人员主要进行了与高炉富稀土渣火法冶炼相关研究。难能可贵的是,科研人员在完成科技攻坚的同时,还充分考虑到了当地企业控制生产成本增加经济效益的问题。

包头矿床中 useful 矿物种类多、组成复杂,而且嵌布粒度细。普通选矿流程复杂、回收率低、成本高,而且铁精矿和稀土精矿的冶金性能不好,给冶金过程造成了许多难以解决的困难。而火法选矿流程的实质在于用火法冶金的方法,把原矿直接入炉,铁、钕、锰、磷等有用元素在高温下还原并形成熔融状态的铁水,在铁水炼钢时上述

有用元素氧化后进入钢渣得以回收。与此同时,其他元素基本上以氧化物或硫化物的状态进入熔融状态的液态高炉渣。在高温液态炉渣结晶过程中,它们(如稀土、钡、氟等)或者形成为数不多的独立矿物,或者以类质同象形式进入其他炉渣中的人造矿物中(如钍、钷、铈、锰等)。这一过程与地质成矿过程类似,并符合地球化学的一些法则,并且明显简化了矿物组成。其中,人造矿物在合适的条件下,可以发育成几十微米以至超过一百微米的晶体。因此,火法选矿手段采用简单的选矿流程就可以取得较好的选矿指标并获得人造精矿。这种从白云鄂博矿直接入高炉生成含钕铁水和液态高炉渣到产出含钕钢渣和人造稀土的过程为白云鄂博复杂矿火法选矿过程,其效率远远高于其他选矿流程。这为综合利用白云鄂博矿提出了一个新思路,特别是近年来大量进口优质铁矿石已成常态,该方法对包钢集团和白云鄂博矿的可持续发展具有更深层次的意义。该方法对其他难选复杂矿也有可借鉴的实际意义。

2.2.1 高炉富稀土渣的物质组成研究

针对苏联专家提出的流程(称作一流程)造成的选矿流程复杂、回收率不高等问题,化工冶金研究所参与的新流程(称作二流程)研究的目的是让稀土提取更简单化,提取钕的效率更高。在稀有金属冶金及材料专家李东英的鼓励和支持下,化工冶金研究所李道昭、冯华栋等科研人员在 1978 年之后的十余年时间里开展了包钢高炉富稀土渣的相关研究,李道昭于 1956~1960 年留苏期间就是从事这方面的研究。首先是开展物质组成的研究,以加深对所含各类矿物比重及磁性的认知,从而为重选及磁选提供可靠的数据支撑。

炉渣的化学组成随入炉原矿组成变化而变化。一般范围:TR₂O₃:11%~17%,F:14%~17%,Al₂O₃:~5%,MgO:~3%,CaO/SiO₂:1.0~1.1。

炉渣中的主要矿物组成为：铈氟硅石、铈镧钨石、萤石、黄长石、白云母及褐硫钙石等。

对自由碱度为0.98， $TR_2O_3 = 12.6\%$ 的高炉富稀土渣，在工业缓冷结晶器中缓冷结晶后测得各矿物的占有率及比重见表1。

表1 缓冷结晶后各矿物所测参数

矿物名称	铈氟硅石	黄长石	萤石	褐硫钙石	钡白云母
占有率%	19.7	42.7	35.1	1.5	-
比重 g/cm^3	4.6	3.0	3.3	-	3.5

可见铈氟硅石在比重及磁性上与其他矿物都有明显的差异，为重选及磁选提供了依据。

2.2.2 高炉富稀土渣的缓冷结晶研究

搞清高炉富稀土渣的物质组成为后续缓冷结晶步骤研究奠定了基础，炉渣火法选矿的技术经济指标在很大程度上取决于渣中稀土含量及稀土矿物结晶粒度的大小。高温液态高炉富稀土渣的结晶过程是属于自发结晶过程，结晶粒度主要取决于降温速度，在实验室条件下以1 /分的降温速度缓冷结晶，用1米摇床一次分选可以得到 $\beta TR_2O_3 = 34.9\%$ ， $\epsilon TR_2O_3 = 39.6\%$ ，最高 $\beta TR_2O_3 = 40.0\%$ 。工业缓冷结晶器由于降温速度更低，结晶发育良好，可得更高的选别指标。

化工冶金研究所科研人员曾试验过几种类型的工业缓冷结晶器：2.6m³的渣罐，11m³高炉渣罐，11m³倒圆锥台形缓冷结晶器，7m³及10m³梨形缓冷结晶器。按结晶器内衬材料可分为没有内衬的铸钢或钢板结构和内衬碳质高炉炮泥或复合碳质耐火材料两类。第一类，特别是铸钢罐体，形成的渣砣外部有20~50毫米的急冷层。在这一层里，铈氟硅石粒度小于20微米。容积越小，这一层所占比例越大，对其后的选别指标影响也越大。第二类，内衬耐火材料的结晶器，这种结晶器可基本上消除渣砣外部的急冷层。

在工业规模下，如何控制熔渣的降温速度？通过多次缓冷结晶半工业规模试验及工业试验，确

定用控制渣砣体积及其比表面积（即总表面积（A）与体积（V）之比）的办法来控制降温速度。也就是说，当结晶器的几何形状一定时，体积越大，A/V越小，降温速度越小；则渣砣的完全凝固时间（t）越长。并且可以用契伏利诺夫规则进行结晶器的模拟放大，即： $t=C(V/A)$ ，C值用实测t值求出。

由于球形的A/V最小，化工研究所科研人员设计了一种接近球形的梨形结晶器，即由两个对称的截圆锥台大小相等，用法兰对接而成。在V值确定后，求出A/V最小时的尺寸作为结晶器内轮廓尺寸。结晶器的容积为10m³，采用钢板焊接结构，重量轻，造价低。内衬50毫米厚的碳质复合耐火材料，一方面可以防止高温渣水直接与钢板接触，另一方面防止生成急冷层。由于结构上的对称性，防止了钢板结构的变形。1983年4月10日至5月16日，科研人员在包头东风钢铁厂100m³高炉上，用七个10m³梨形结晶器接渣27罐，共生产750吨缓冷渣，约占该阶段总产量的20%。图2和图3是其现场实际操作的照片。

每个结晶器的运转周期为五天，渣砣从结晶器翻出顺利，只要操作正常，内衬只经小修补可连续使用3~5次。经上述生产的缓冷渣费用平均11.07元/吨，100m³高炉年生产3.6万吨渣使用21个缓冷结晶器即可维持正常运转。

2.2.3 缓冷结晶渣的选矿及经济效益测算

由于铈氟硅石的比重及比磁化系数与渣中非稀土矿物有明显差异，用重选和磁选方法均可获得人造稀土精矿。1979~1983年化工冶金研究所与北京钢铁学院（现北京科技大学）先后研究发展了几种单一重选及重选-磁选流程。其中，用11m³高炉渣罐缓冷结晶的渣样于1980年6月进行了日处理量为1吨的连续选矿试验，试验了两个流程（一段磨矿），其结果如下。

I：单一摇床（一次粗选一次扫选）流程

II：螺旋-摇床-摇床-离心-离心流程



图2 高温液态高炉富稀土渣注入结晶器

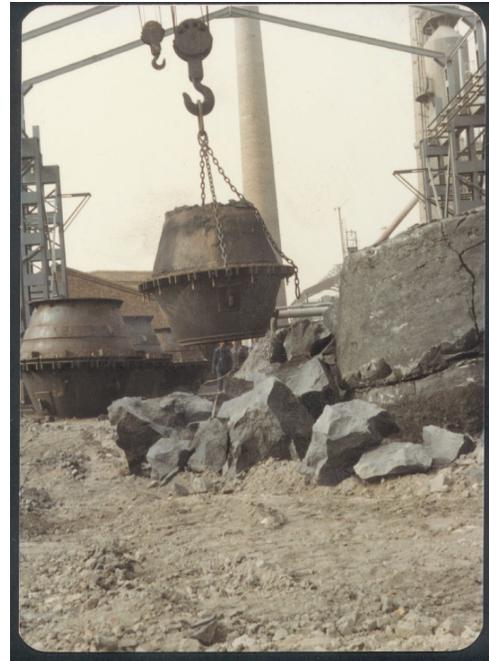


图3 缓冷后的炉渣被运至渣场

表2 连续选矿实验结果

产品 流程 指标	K1		K2		K3		X		原渣	
γ	5.45	2.53	4.93	8.07	-	17.00	89.62	72.50	100	100
$\beta\text{TR}_2\text{O}_3$	56.78	58.94	48.76	37.13	-	17.69	7.73	5.92	12.43	11.08
$\epsilon\text{TR}_2\text{O}_3$	24.64	12.72	19.42	25.33	-	25.57	55.94	36.38	100	100

重选加工费参照1978年(1~4月)包钢实际值,计算结果是:流程 I 每吨品位53%精矿盈178.2元,扣除缓冷加工费净盈67.5元/吨。流程 II 略有亏损。考虑到原渣品位偏低,因而可以认为这两个流程从经济上是可以做到持平的。1983年配合 10m^3 梨形结晶器工艺试验,取得了如下指标。

表3 梨形结晶器工艺试验指标

精矿1	γ -9.83%	$\beta\text{TR}_2\text{O}_3$ -55.66%	$\epsilon\text{TR}_2\text{O}_3$ -35.09%
精矿2	γ -10.11%	$\beta\text{TR}_2\text{O}_3$ -24.37%	$\epsilon\text{TR}_2\text{O}_3$ -15.80%
尾矿	γ -80.06%	$\beta\text{TR}_2\text{O}_3$ -7.58%	$\epsilon\text{TR}_2\text{O}_3$ -49.11%

对于高炉富稀土渣火法选矿过程的经济效益的评价,应把此过程看成二流程关键性环节,放

在整个流程中来看。二流程在稀土产品结构上除了初级产品外,还应有深加工产品,这样才能扩大稀土产品出路,从而可以扩大二流程的规模,发挥出在铈产品上的优势。如:1座 100m^3 高炉年产3.6万吨高炉富稀土渣,出售0.2万吨,其余可生产8500吨30-RE合金,年盈利约1030万元。但是,由于市场需求量限制,这个前景是难以达到的。多年来每年只能生产4个月左右。因而年产30吨10%品位的铈铁也难于得到。当时根据1981年的原料和能源价格及 10m^3 梨形结晶器样品实验室结果,经过计算得到的数据显示,产品所得高品位稀土精矿和稀土铁合金能够为企业带来可观经济效益,年利润可达469万元。

2.2.4 关于铈和铈的研究

与此同时, 化工冶金研究所科研人员还开展了包头含稀土高炉渣中富集提取铈和铈的相关研究。铈产量很少, 常用来制特种玻璃、轻质耐高温合金。铈是稀土元素中最活泼的金属, 广泛用于制造反应堆控制材料和中子防护材料, 在铈激光材料及原子能工业中有重要的应用。因为铈还可以用作彩色电视机的荧光粉, 所以在当时需求量越来越大。

炉渣中的铈主要贮存于钡白云母中, 用浮选法: 处理重选尾矿可选得含 BaO (12.6%) 的云母精矿 (单矿 BaO=26.54%), 并探索用火法-湿法双连法处理重选尾矿 (其中 $\text{Sc}_2\text{O}_3=0.0232\%$), 可使 95% 以上的铈转入水溶液中。在高炉下部高温强还原条件下, Eu 在炉渣结晶过程中, 于铈氟硅石中出现亏损, 这是由于 Eu^{2+} 半径比三价稀土离子要大的多, 而接近于 Sr^{2+} , 因而容易以类质同象形式进入钡白云母中。对铈的这种异常现象在地球化学中已有大量报道。对铈在火法选矿中的行为进行深入研究, 目的是在此过程中能以很高的选择性将铈引入某些矿物中, 从而实现选择性地从高炉富稀土渣中提取铈。这将会使二流程获得更大的经济效益。通过现场试验发现, 在特定的冶炼条件下, 所生产的缓冷高炉渣可选出含 Eu_2O_3 0.1% 以上的富集物。

基于上述研究成果, 化工冶金研究所在当时提出的包头白云鄂博矿高炉富稀土渣火法选矿技术是一项全新的稀土提取技术, 是根据我国包头资源特点发展起来的, 虽当时因为种种原因未能尚未完善, 但应用潜力很大。

除上述研究成果外, 20 世纪 70 年代, 地质部门发现攀枝花红格矿区矿石中含有较多的铈, 方毅即批示化工冶金研究所研究铈在冶炼及选矿中的行踪以及铈的可能提取方法。1979~1982 年, 化工冶金研究所陈家镛与高能物理研究所合作开展了研究, 发现正在开采的攀枝花矿区的铈的含量比红格矿区更高。在确定了铈的走向后,

决定从钛精矿氯化时的氯化烟尘中提取铈。在用水浸取烟尘后, 用 TBP 可从水溶液将铈富集并与杂质 Fe^{2+} 等分离, 可得到 99% 或 99.5% 的氧化铈产品^[11]。

3 化工冶金研究所在包头白云鄂博矿综合利用中的作用

叶渚沛最早提出开发包头矿应贯彻稀土稀有为主综合利用的方针, 化工冶金研究所也是第一批投入到稀土研究的科研院所。

回看当年叶渚沛围绕稀土的多次建言献策, 其富有前瞻性的专业精神和对国家资源利用的责任感无不令人钦佩。他的专业精神, 既体现在 20 世纪 50 年代不顾困难地率先对包头稀土资源加以利用的呼吁, 也体现在当国家尚未明确包头矿综合利用的具体方案时, 他便带领化工冶金研究所的同事们开展了稀土初步研究, 进而向政府多次提出了稀土资源综合利用的建议, 最终得到了国家领导人的高度重视, 有力支持了包头矿稀土资源综合利用的国家宏观决策, 这不仅体现了他作为科学家的责任感, 也体现了中国科学院作为国家科学技术方面最高咨询机构的作用。

在 1978 年的包头矿综合利用工作汇报会上, 方毅坚信“综合利用, 大有可为”。1978~1986 年, 在他的组织下, 全国上百家单位协力攻坚, 把包头矿综合利用工作推向了新高度。化工冶金研究所在这段时期, 发挥其在钢铁冶炼、流态化焙烧和复杂矿综合利用方面的学科优势与积累, 在高炉富稀土渣综合利用方面取得的一系列成果。随着产学研合作的深入开展, 又在中国稀土公司二厂、三厂进行了扩大试验, 在包头东风钢铁厂实现了工业试验, 取得了一大批珍贵试验数据和资料, 为成果转移转化奠定了基础。可以说, 在包头矿的综合利用的协作攻关进程中, 化工冶金研究所因在复杂矿综合利用方面深厚的研究积淀和经验积累, 成为稀土科研的一支重要队伍, 通过对包头矿高炉富稀土渣综合利用的长期基础和应

用研究,在技术层面推动了包头稀土资源的开发和利用,也体现了中国科学院研究机构作为国家战略科技力量的历史担当。

4 结语

几十年来,叶渚沛等老一辈科学家对包头白云鄂博矿资源和我国稀土资源开发的关注,不仅给过程工程研究所(即原化工冶金研究所)形成了独特的学科特色和积淀,也在自身发展中留存着关注稀土资源的责任感与使命感。2005年8月20日,曾经奋战在白云鄂博科研一线的过程工程研究所名誉所长郭慕孙院士,与徐光宪、师昌绪等院士再次向国家提交“紧急呼吁保护和有效利用我国白云鄂博和钍资源”的建议,指出:“我国稀土资源世界第一,钍资源世界第二,最主要的稀土和钍矿石内蒙古包头白云鄂博的主矿和东矿,现作为铁矿已开采40%,稀土利用率不到10%,钍利用率为0%,如果不采取措施,再过35年将全部采完,形势十分紧迫。……尤其是16种稀土元素是高技术和国防的战略元素,钍是未来最重要的能源。如果不采取措施保护白云鄂博主东矿,后果不堪设想。”^[14]这种坚持可持续发展的眼光,再一次体现了对国家战略矿产资源的前瞻性开发的责任感。

2019年5月,习近平总书记在江西省赣州市考察调研稀土产业发展情况时指出,“稀土是重要的战略资源,也是不可再生资源。要加大科技创新工作力度,不断提高开发利用的技术水平,延伸产业链,提高附加值,加强项目环境保护,实现绿色发展、可持续发展。”这无疑是我国稀土资源开发利用的又一重要发展契机。为落实习近平总书记重要指示精神,以过程工程研究所为依托单位的绿色过程制造创新

研究院将继续开拓创新,推动与江西省的院地合作,谋划稀土研发布局,为稀土产业绿色发展提供科技支撑。

谨以此文庆祝中华人民共和国成立70周年,庆祝中国科学院建院70周年,祝贺中国科学院绿色过程制造创新研究院正式启动。

参考文献

- [1] 包钢集团. 包钢集团公司简介[EB/OL]. [2017-03-18]. http://www.btsteel.com/istool/JSZX/JSP/bao_rownum_detail.jsp?JSZX.F10101.1_TOP.NONE&XXFB:XXFB_01=JS010101&MODEL=公司介绍&PINDAO=JS_PINDAO&YW=JS_LANMU_010101&menuCode=JS010101.
- [2] 周飞飞. 稀土大国的崛起——白云鄂博新生纪事[N]. 中国国土资源报, 2009-09-07.
- [3] 武月清, 仪德刚. 包头钢铁公司成立初期的发展之路[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2017(4): 21-26.
- [4] 贾银松. 方毅同志的革命精神激励稀土事业创新发展[J]. 稀土信息, 2016(3): 6-10.
- [5] 刘伟, 王启梅. 叶渚沛的报国情怀与抗战义举[J]. 中国档案, 2015(4): 78-79.
- [6] 中国稀土行业协会网站. 叶渚沛[EB/OL]. [2011-03-30]. <http://www.cre.net/show.php?contentid=95061>.
- [7] 雪红. 一个值得稀土界怀念的人叶渚沛[J]. 稀土史话, 2004(11): 22-23.
- [8] 张稼夫. 我与中国科学院[J]. 科学新闻(中国科学院建院50周年专刊), 1999(13): 22-23.
- [9] 聂荣臻. 聂荣臻元帅回忆录[M]. 北京: 解放军出版社, 2005: 647-650.
- [10] 聂荣臻. 聂荣臻科技文选[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 199-204.
- [11] 倪嘉缙, 洪广言. 中国科学院稀土研究五十年[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 23-29.
- [12] 马鹏起. 正确认识中国稀土(中国稀土行业协会网站)[EB/OL]. [2016-02-17]. <http://www.cre.net/show.php?contentid=123532>.
- [13] 涂光炽, 赵振华. 谈矿产资源的综合找矿、综合评价、综合开发与综合利用[J]. 矿产综合利用, 1982(1): 1-7.
- [14] 艾菁, 赵兰英, 刘伟, 等. 追求卓越郭慕孙传[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015: 44-48.

An Overview of Comprehensive Utilization Research on Bayan Obo Mineral Resources by IPE CAS

Liu Wei¹, Fang Yibing², Li Daozhao¹

(1. *Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *Institute for the History of Nature Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)*

Abstract: Bayan Obo in Baotou is a large polymetallic symbiotic mine in China. In 1978, comprehensive utilization research on Bayan Obo mineral resources was listed as one of the 108 key projects and 3 major research centers in China. As deputy premier of the State Council, Fang Yi, distributed scientific and technological research to more than a 100 institutes, universities, and enterprises. The first director of the Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences (ICM CAS, now Institute of Process Engineering, IPE CAS) Yap Chu-Phay made a forward-looking and strategic suggestion on the comprehensive utilization of Bayan Obo mineral resources in the 1950s-1960s; however, it was not totally accepted by the central ministries at that time. From 1978, ICM CAS assumed the important comprehensive utilization research mission that was to extract rare earth from the blast furnace slag of Bayan Obo ore. Scientists of the ICM CAS made fruitful research achievements with pilot test successes in Baotou enterprises. This paper analyses the relationship between scientific and technological consultation and research and major national strategic needs through studying the history of Yap Chu-Phay's suggestion of the comprehensive utilization of rare earth and the chemical metallurgy research on Bayan Obo mineral resources comprehensive utilization. From this case study, the paper reflects how Chinese state-run research institutions such as IPE CAS conduct scientific and technological research to meet major national strategic needs.

Key Words: rare earth; Yap Chu-Phay; chemical metallurgy; fluidization; furnace slag; slow cooling crystallization