



戴永年

Dai Yongnian

**戴永年** 有色金属真空冶金专家。1929年2月9日生,祖籍云南省通海县。1956年中南矿冶学院研究生班毕业。昆明理工大学教授。长期从事重有色金属真空冶金的教、科研工作。发展了金属真空空气化分离理论,形成了重有色金属真空冶金理论体系;研制成功锡铅真空分离新技术;发明了内热式真空炉和卧式真空炉,在50多家工厂应用并出口,经济效益显著;采用卧式真空炉,在韶关冶炼厂建成我国大型有色金属真空冶金车间。多次获得国家及省部级奖励。发表论文100余篇,出版专著5本。1999年当选为中国工程院院士。

## 研教有色冶金五十余年

20世纪初,家乡云南通海,医药不发达,父母的孩子,常常因病而不能抚育长大,他们有近亲住在昆明,于是就移居而来,我和二姐就在昆明生长,我1929年2月9日(确切地是农历正月初九)生,住在景虹街翠湖边。小学时住在中和巷,去昆女中附小(后来的武成小学)读书,初小结束。就在1938年,日本飞机轰炸昆明,幸好炸弹离我们远,只听到震耳的爆炸声,我们一家就疏散回通海老家。回去后在秀麓小学读高小两年,接着在通海中学(现在的通海一中)读初中三年。当时通海还没有高中,初中毕业是1944年初,就来昆明上高中。父母也到昆明,

在景星街开一个小店,供我上学。美国参战和中国一起抗日,其14航空队住在昆明,日本飞机就没有再来炸昆明。读高中我上过云大附中,后转到龙渊中学毕业(龙渊中学后来并入昆一中)。1947年秋,高中毕业,接着考入云大矿冶系。

### 1. 走向矿冶

云南处于横断山脉地区,地壳运动使地壳走向和层序发生了大变化,褶皱断层很多,规模大,一部分山脉由东西向变为南北向,成了滇北的横断山脉。于是,地层的矿物暴露出来,容易为人们所发现。矿很早就被开采,东川铜、个旧锡、会泽铅锌,早为人知。东川在历史上就被开采铸铜钱,古代曾有万人上山。个旧也早有传说,办锡矿发展,随时代而兴衰。所以云南的矿业早为人们重视,历来政府都重视其发展,希望它为人民造福。

20世纪20年代云南大学成立之初就设立了矿冶系,培养人才以作云南发展矿业之备。地方政府建办“留美预备班”,送学生去美国留学,学成归来,为发展矿业服务。

我受到这样一些思想感染,认识到云南矿业的重要。1947年高中毕业,报考大学时,又得知云大矿冶系的老师多为留学美、英、法、比利时等国学习矿冶的留学生,有的已是知名的教授、专家。系里的仪器设备许多都是进口的,如选矿机、矿物、岩石标本、矿山测量用的经纬仪、平板仪等,多数是美国进口,这说明矿冶在云南的重要,所以就决定报考矿冶系。入学后也就走入矿冶之门,开始了一辈子有色冶金之路。

### 2. 学研锡冶金

1951年在云大矿冶系毕业,随即留校任教,开始的教学任务是指导分析化学实验(定性、定量分析实验),开“耐火材料”和“锡冶金”等课。

由学生成为教师,是由多科、多门课学习转入一两门课学习、教学。必须深入学习,钻研课

程内容。提出授课提纲,准备讲稿、实验以及实验需要的仪器药品甚至配出溶液,从不熟悉到完成教学任务有许多工作要做。

分析化学在 1952 年时出现半微量分析,在原有烧杯、烧瓶、试管等设备之外增加滴瓶、滴管、反应瓷板,我们就自己去商店购买、配备,在实验中使用,在反应板上一滴溶液做一个实验,代替原来一管或一杯溶液,这样做就可以节约许多药品、仪器,所以我们就得认真准备。

分析化学的原理,如溶解各种元素的条件、分离每种元素的方法、判定元素离子的种类、浓度以及理论计算、实验操作,都和湿法冶金密切相关。熟悉掌握分析化学,不仅仅是“分析”而且也是冶金的基础。

1953 年开出“锡冶金”,计划时数是 30 学时,困难就多了。读大学时,学的是 6 个学时的锡冶金,锡只是“非铁冶金”课的许多金属中的一个,所讲的时间当然不长,只有几个学时。虽然说非铁冶金中其他金属的冶金方法与锡相关,但毕竟不是锡的问题。在教材方面,我国初期没有出版过锡冶金的系统专著,甚至国外也没有,美国有一本《锡——采矿、生产、工艺和应用》(1928 年 C. L. Mantell 著)讲了锡的采、选、冶、加工、相图、应用等。锡冶金只在全书近 600 页中占约 40 页,这样一些材料远不足以讲几十个学时,而系上决定由我来上这门课后,我就积极准备,从各方收集材料,并前往我国锡都个旧的云南锡业公司炼锡厂去学习。谭庆麟老师又给我找到一本苏联 H. H 穆拉契(Мурач)著的《锡冶金》。

云锡炼锡厂位于现在个旧湖南端湖底,选厂和机场都在湖底的位置,那时还没有这个湖。下雨天的水往落水洞流。1952 年我和一个班同学在炼锡厂实习,下雨了、落水洞不下水,后来反而出水,就形成今天的“个旧湖”。

去老炼锡厂学习和工人上班,和技术人员谈技术问题,向他们学习,在实践中学习。炼锡用鼓风机炼矿砂,加焦炭作燃料,也是还原剂,

鼓风机把空气送入炉中,冶炼的产物炉渣和金属锡流到炉外澄清分离。仔细观察,炉渣呈深灰黑色,有时成结晶状,有时成玻璃状。锡的颜色和粘稠情况也不同,有时“清”,有时“稠”,技术员和老工人就能借以判断炉况优劣。加焦炭的量是影响很大的,我就参与思考调节焦量的实验,逐渐减少焦炭量,发现减到一定程度时,出炉的锡由稠转清,产量也有所增加。由此可以具体体会到焦炭多时,还原强,使料中的铁一部分还原出来,溶解在锡里,使锡变稠了,产的清锡也就少了。这件事能让人理解冶金原理中的还原程度对炼锡的作用。焦炭多时,铁还原一些后炉渣中含氧化铁减少渣的硅酸度增高,出现玻璃状断口,这些内容就使书本知识与实践相联了,理论说明了实践的现象。

在老炼厂学习,白天去车间,晚上就在招待所整理笔记,作讲稿的素材,几个月的现场学习,收获颇为丰富,理论和实际联系,对理论的认识深刻了,看到冶金作业就立刻能由理论来理解,读书就会联想到工厂实际。也看到了工厂存在的问题,如劳动条件繁重,50 公斤一块锡锭,我虽可以堆两层,但也想到应当改变这种重体力劳动现象。看到车间有毒有害的废水、废渣、废气污染环境的情况也就会想到治理的必要性。通过在车间劳动,也和一些工人建立了联系,交了朋友。

开锡冶金课,我读了些书,参观考察了全国的各个炼锡厂,参加了若干次锡的学术讨论会,写过若干篇锡冶金方面的论文,也提过合理化建议,作过一些科学研究,多次带同学去实习,我几乎记不清去工厂的次数了。由 1951 年起至 80 年代的 30 余年教学科研中,一直围绕着锡的生产问题。

我和同学研究过锡炉渣含锡的形态,降低渣含锡的办法,分析了渣中金属锡、氧化亚锡和二氧化锡的存在和数量,从而知道渣含锡高的原因是渣子不好还是还原不够。也研究过锡在选矿中丢了 40%,提出除选出锡精矿之外,再

选出一些中矿,可提高锡的回收,写成建议给公司。我较仔细地研究过降低渣含锡的烟化法。我在烟化炉上与工人一道上班几个月,之后写出锡烟化炉的作业原理。看到它解决了锡冶金中重大问题之一的铁锡分离,它能使渣含锡降低到万分之几,较彻底地解决了渣锡分离问题。我也研究了锡冶金中另一个重大问题,锡—铅分离,参加过结晶机的研究,后来研究真空蒸馏分离铅锡合金,较彻底地解决了铅锡分离、回收的问题。对烟化炉较深入地学习、认识到炉内反应很强烈,空气和煤粉进到渣层中剧烈燃烧,熔化了炉料和完成还原反应,都很快速,炉料搅拌剧烈,传热和物质运动快捷,是一种很理想的动态熔炼设备。我就提出在这种炉中炼锡,工厂同意我的意见,作了实验,加了7吨料,由于开炉口困难延误了出炉时间,大量锡烟化入收尘系统,只得到约400公斤粗锡,但证明了这种炉型炼锡是好的,快的,若操作认真准备,能在反应终了就即时出炉,锡就能大量得到。动态的炉型能大大强化熔炼过程。现在看起来,它与现在引进的奥司麦特炉相似,而奥炉只有一个喷口,且材料特殊,不易制造,炉料也要仔细准备,才能操作顺利,而我们实验的炉子有相对的两排多个喷口,结构好,不用特殊材料,炉料可粗可细,不必多处理,炉子的处理量会比奥炉大。

后来(1970年左右)我建议用此种炉型来试炼铜,没有得到试验的机会。

70年代初,受冶金工业出版社之托,开始编写我国第一部《锡冶金》专著,由我们学校的三位老师和云锡公司的两位同志先到全国炼锡厂考察,而后编写,经过几年时间,此书1977年出版,它总结了我国多年来的炼锡经验,成为那个年代生产、教学、科研、设计的一部重要参考书和教科书。由于当时处于“文革”期,出书都不署名,我曾向冶金出版社责任编辑提出署名的事,未能实现。此书出版后得到有色总公司的奖励(优秀教材二等奖)。

锡冶金成为我前半辈子教学和科研没有离开过的主题。

### 3. 研制“内热式多级连续蒸馏真空炉”

在炼锡厂,看到厂里附产的锡—铅合金运去上海加工,分成锡和铅。因为这种合金不便直接用作焊料,需要分开成锡和铅,分离这种合金在上海冶炼厂。我曾去该厂二车间实习过。在50年代运焊锡去上海,交通不很方便,运费也不是个小数。后来才将此技术引到云锡,由炼锡厂自己加工,免去长途运输,省了不少事。

但是,这种加工用的氯化物电解法,流程长,它的工序有:铸阳极,电解,阴极锡熔化、加氯化亚锡除铅,阳极泥在反应锅处理成氯化亚锡,氯化亚锡配电解液送电解,产的铅又经氧化脱锡成粗铅,氧化物再还原成铅锡合金,共有7~8个工序,分离还不够彻底。工序多,占用设备多,金属损失增多,成本升高,对环境还有污染。所以,这个方法虽然可以分开铅和锡,但不够理想。

1957年,苏联专家谢夫留可夫(Н. Н. Севрюков)来我们学校讲锡冶金课,讲到真空蒸馏精炼锡的事,介绍了苏联专家穆拉契教授在小型真空炉中作真空蒸馏分离锡、铅、砷的实验,我们几个人就用学校的小型管式电炉改装成真空炉作铅锡合金的真空蒸馏实验,很快,也就使铅锡分开了。

以后,我看到这是一个好方法,应当继续研究,研究的方向应该是研究工业用炉型,因为实验室的小炉子是不能放大在工业上用的,而国内外都没有适合分离铅锡合金的炉子,若无适当的炉型,工厂就不能使用这个方法,小型试验的结果虽好也只能束之高阁。所以,一定要研究适合工业化的炉型。我就着手开始研究。

当时,国内有几家都在研究,有的也获得一些进展,但都不是经济有效,我们也互相交流、借鉴,那时也还没有“专利”之说,特别是学校的老师,只想自己研究的东西,能用于工厂就心满意足了,所以只要研究中有一点进展就立即告

诉人家,请他们来看我们的实验室,看我们工作的进展。在十多年时间中,我们也试过一些炉型,有个冶炼厂实验“自导”炉,我们作了多盘试验,但发现通电到一定强度后金属液会自动断开,又流回接通,从而引起不断的打弧,也难于用多盘进行,规模也受到限制,这种炉型的实验只有停止。

有个地方实验了一种炉型,可以基本上分开铅和锡,但一算耗电量每吨料 16 000 度,以当时 8 分钱一度电计,就合 1 200 多元的电费,超过了电解法的成本(每吨 1 000 多元)。知道这个结果后,我们也在考虑以其他途径研究,但这时学校内出现了一种议论:“戴某的实验,根本没有意义,只能作教学实验给同学看看。”同学中也传言此议论。听到后,我想这工作肯定要做下去,但也要弄清楚,耗电 16 000 度是什么原因,为此我计算了使合金加热到 12 000 °C,再将 30% 的铅蒸发,理论上的耗电量。计算结果使我大吃一惊,若热效率为 100%,只需耗电 160 度;若热效率为 30%,耗电也只有 540 度。而人家的实验是 16 000 度,是不是我算错了。经过反复核对,计算无误。这就说明是炉型的合理性及其热效率的问题,计算的结果坚定了我们继续实验的信心,也明确了研究方向,要想办法改善炉型,提高热效率!

经过长时期的思考,我提出“内热式多级连续蒸馏炉”炉型,开始与课题组的同志们制作炉子准备实验,学校和云南冶金局给予了支持,得到了最必要的经费,购置电气设备和制作炉子,课题组的同志和一些毕业班的同学,一起进行了数百次的实验,于 1977 年试验成功。在实验室研制的炉子上达到日处理 400 公斤铅锡合金。我们主动邀请云锡公司研究所和冶炼厂的人来看,来参加试验。他们来了多批人员,有的来看,仔细考察,有的就定下来和我们一起实验。以后扩大到日处理两吨料的工业实验,地点由学校搬到工厂。我和一些同事带了一批同

学去厂里做实验。到 1979 年由省冶金局主持鉴定。

实验中曾出现出锡管被腐蚀,很快蚀穿,真空炉漏气,炉子不能继续运行。为这根管子,又研究了几乎一年。试验(在管子内加衬、改变它的尺寸、采用冷却的办法等)。这个问题解决之后炉子顺利运行了。

炉内发热体经常被烧坏,因为它的温度最高,曾测得其温度在 1 600 °C 以上,因温度高,致使它易于烧坏,这是炉子的又一重要问题,经过在其结构、尺寸、材料、作业制度等方面研究之后得到较好的解决,发热体使用时间达到 1 个月以上。

铅—锡合金真空蒸馏,内热式多级连续蒸馏真空炉研制,由 1958 年开始,到 1979 年鉴定,这个项目是由锡冶金为起点,经过边研究边学习真空技术,多个问题解决,经历了一些非技术性的阻碍,经过漫长的 21 年时间,乃得完成。我们体会到若不是长期坚持,任何时候它的研究都可能夭折。

实验成功以后,由于它的优越性突出,使它迅速在全国炼锡厂得以推广,我们没有作过任何广告宣传,炉子在厂里运转、生产就是有力的宣传。各种专业会议使它很快传播,它比起工厂原用的电解法有许多优点:流程短,只有一个真空蒸馏工序,作业速度很快,物料在炉内停留约 20 分钟就完成作业,流出炉来就分别成为锡和铅。由于它工序少,只用了真空炉,和传统的方法相比,设备种类少了,消耗的人力、物力、财力都少了,连车间占地也大为减少(可减少约 80%),作业成本也减少了 80% 多,由原来的 1 千多元 1 吨,减至 120 元 1 吨(1980 年计算)。工序少,金属损失也减少了,回收率由原来的 96% 提高到 99.4%。作业快速,规模增大,炉子由每日 2 吨又扩大到每日 5 吨、10 吨,基本建设投资也减少约 80%。特别是使原来污染环境的过程改变为无污染的真空炉。这些优点使此炉的推广成为无可阻挡的发展趋势。在鉴

定会上一些反对的意见也未能阻止它的推广,由1980年起几年中就在国内9个省的一些工厂使用。还出口到了巴西、玻利维亚和东南亚的国家,也到了美国。从其中的7个工厂获经济效益估算,已获效益约二亿元。

处理锡—铅合金的内热式多级连续蒸馏真空炉研制成功,改变了锡冶金的流程,原来炼锡厂没有真空炉,现在真空炉成了炼锡厂必有的设备。也由此在一些其他有色冶金工厂有了真空冶金过程和设备,在工厂的人们思想上“真空冶金”不再是玄乎乎的,“又难、又贵”、“技术困难”在重金属冶金工厂不能实施的东西了。它对环境无污染、效益好,人们就进一步想着把真空冶金用到各方面去。比如用于分离铅银,代替自古以来铅银分离都用的“灰吹法”将铅氧化成渣,留下银,或加锌除银再对银锌渣作复杂的处理。用真空蒸馏则一次作业就把铅银分开,铅、银都以金属同时回收。还有铋—银合金等,都可以使用真空蒸馏法分离。

内热式多级连续蒸馏真空炉的用途在扩大,结构也在发展。以后又研究成功用于工厂中处理锡锡合金的炉子。

#### 4. 分离锌和铁,研制卧式真空炉

1990年,中南矿冶学院赵天从老师介绍我去看华中地区的一个工厂,那里积留着大量“热镀锌渣”,它含铁3%~5%和约90%的锌,实际上是在热镀锌时产生的一种锌铁合金,而国内外都没有适宜的方法和设备来处理,就被大量堆存起来或低价出售。工厂曾委托一些单位作过研究,要求产出锌含铁小于0.003%,都没有成功。找到我们,希望帮助解决。听介绍情况后,知道也有人用真空蒸馏法作过工作,没有达到要求。我想我们用真空冶金法能取得成功吗?

我们到工厂看到大堆热镀锌渣的情况之后,立即取试料回校作探索性研究,并进行理论分析,研究渣的结构,用我提出的方法计算得到锌—铁系的气—液相平衡成分图,图示,当锌铁

合金含铁高达10%~50%时,蒸馏出来的锌蒸气中含铁可降到 $10^{-10}$ ,即亿分之几,远低于工厂要求的0.003%(即十万分之三)。经过分析,想到若能创造条件保持锌蒸气不被铁污染,就能达到目的。这个计算和我们进行的小型试验结果一致,就从理论上确立了我们研究的信心。需要解决的第二个问题是用什么炉子来生产,由于国内外都无先例,只有自己来研究、设计。经过深思,我提出设计卧式真空炉来试验,于是课题组就动手设计此炉,委托工厂加工,在学校试验。

排除了新设计设备结构上的故障后,顺利出锌了,而且达到了工厂产锌含铁小于0.003%的要求。锌的直收率大于80%,电耗每吨料约2000度,设备作业顺利。工厂试生产时,我们的人在工厂时作业顺利,但当我们离厂回校以后,开炉就出了故障,锌的质量也不合格,炉子的发热体易坏,我们的人又到工厂开了几炉,锌的质量仍不合格,仔细检查到炉内有暴露的铁件,处理之后,锌的质量稳定下来全部合格。经大钢厂的检验室化验后含铁达到0.0000x%,千万分之几的水平。厂里邀请了公司各方面的负责人,开了产品质量认证会,正式验收这项研究工作。厂里试验炉转入生产。

这个项目我们的文章在加拿大国际会议上发表,中国有色金属总公司颁发了科技进步二等奖。

接着我们到另一工厂去考察,该厂有一种精炼锌的副产品称为硬锌,也是以锌为主含5%铁的合金,此料还含有0.2%锕和同数量级的钢、银,厂里希望在得到锌的同时将稀有金属锕、钢富集10倍,为后面提取这些稀有金属创造较好的条件。

我们有了研究热镀锌渣分离锌和铁的技术和设备的成功,对硬锌真空处理就胸有成竹了。经过小型试验,再在我们创制的卧式真空炉上作了些改造,以适应新的物料的不同要求,实验很快成功了。下一步就要设计扩大5倍的大炉

在工厂作工业试验。由于一些非技术上的原因,工业试验炉在厂里制作期近4年,时间长,又不能投试,项目几乎被中止。在准备工业实验期间,工厂同时委托另一单位进行湿法冶金处理硬锌研究,想得到结果后与真空法对比,选择优良者建车间生产,所以形势对我们是严峻的。决不能发生未参加对比就被淘汰的情况。这时管生产的一位副厂长吴坤霖,也是此项目起始制定人,他全力排除非技术性的障碍,使炉子很快建成,实验得以顺利完成。达到稀有金属富集10倍,电耗降到每吨料1500度,发热体寿命延长到近百炉,基建费用较低。厂里满意,厂方比较了真空法和湿法两种方案,没有宣布比较的结果就立即决定投资建5台我们创制的卧式真空炉的真空冶金车间,于1997年7月1日香港回归之日投产两台,同年10月1日又投产两台,年底又一台投产,共5台炉子,成为有色厂中最大的真空冶金车间,每年的经济效益4600万元。经过1998年、1999年到2000年的生产,效益已过亿元。至今该车间顺利、完满地负担着厂里产出硬锌的处理任务。

有色金属总公司为此项目颁发了科技进步二等奖。广东省颁发科技进步一等奖。

这个项目的成功,是学校与工厂合作的结果,成果是国内外首创,是我们的卧式真空炉系列又一种新型炉的成功,是新技术产业化的又一进展,它将用于另外一些工厂处理类似的物料,甚至用到国外去。

还是这一卧式真空炉系列,1999年我们为另一家工厂由等级锌制出了高纯锌(含铁小于百万分之三)。该厂需要生产此种锌,但若用常规的电解法则成本高,产量低,提出此课题给我们,我们根据锌—铁系气液相平衡成分图判断可以达到含铁小于亿分之几,工厂要求百万分之三在理论上是没有问题的,当然还需要解决生产实践中的一些条件问题,我们就答应作此项目了。

根据物料的特性和作业的要求,我们在设

计上调整了炉子结构材料,进行工业试验,很快就达到这个指标,厂方满意。

这一项目使高纯锌的生产过程大为简化,也不用什么药品试剂,仅耗电的作业,投入工业试验后立即达到要求,使高纯锌的生产费用大幅降低,经济效益好,对环境没有污染,这种方法生产高纯锌也是国内外的第一家。

我们研制成的卧式真空炉系列,做了这三件事:处理热镀锌渣,处理硬锌,生产高纯锌。都是国内外的第一家。获国家发明专利。为我国增加了一种真空炉系列,产业化效果好,都用于生产了,而且对环境保护好,经济效益好,得到了中国有色总公司的奖励,也为社会所称赞、所欢迎,在有色金属工业中增加了新内容,现在在一些工厂应用,另一些工厂打算使用。卧式真空炉系列的出现使改造传统冶金技术增加了一种新的手段。

这个项目到2003年获得国家技术发明奖二等奖,又用这类设备给工厂处理镍—锌合金和锡—锌合金。

#### 5. 研究合金分离的基本规律

我们研制的两个系列的真空炉及技术进入有色冶金材料工厂之后,不断有人提问:还有哪些物料可以用真空冶金技术处理?有人问铅—铋合金可以真空蒸馏分离吗?我们的实验研究工作中也碰到类似的问题,如铅—铋合金能否在全组成范围内分离?这些问题若能解答,将对真空蒸馏的应用很有帮助。

经过热力学推导、蒸气密度计算,我提出用分离系数 $\beta$ 来作判断标准,即在一定温度下,A—B二元合金的纯物质蒸气压 $P_A^*$ 和 $P_B^*$ 之比值,乘上此二元系的组成A和B的活度系数 $\gamma_A$ 的 $\gamma_B$ 的比值就是 $\beta$ 值,即 $\beta = \gamma_A \cdot P_A^* / (\gamma_B P_B^*)$ ,若 $\beta$ 值大于或小于1,真空蒸馏A—B二元合金,都能使气相物质成分与液相不同,就可以用真空蒸馏法使A和B分开。但若 $\beta$ 值等于1,则不能分开,因为气相成分和液相成分相同,蒸馏不能使两组分离。

用分离系数  $\beta$  值判断,较之于过去只用元素纯物质饱和蒸气压判断更为完全、准确,只要有了活度系数的值,计算出来就能无误,于是上面的几个问题都迎刃而解了。还进一步发现有个别的活度系数测得不够准确。例如铅—铋合金就是这样。因为我国广西产脆硫铅铋矿,铅铋共生,选矿分不开,冶炼也难分,都想到能否用真空蒸馏法来使铅铋分开。我们先试了高铅铋(含铅小于 10%),可以使铋提纯到合格,后有人问能否由粗的铋铅合金(含铅和铋相近的合金)作真空蒸馏以分开两元素,由国外已测得的活度系及计算, $\beta$ 都大于 1,应该可以分开,但是经过实验分得并不好,后经我和同学研究得到与国外数据不同的数值,计算的结果才与实验结果一致,从而看到国外测得的这个数值,还有进一步研究的必要。

有了  $\beta$  值判断,我又进一步推导出计算气液相平衡成分图,把一种合金的气相和液相平衡共存时的两相的成分计算出来绘制成图,就能清楚地看到蒸馏二元合金时原料和产品的成分的关系,若要求产品达到某种纯度则应该用什么条件(温度、原料成分),前面谈到分离铁锌,就使用了这种图,在其指导下我们完成了热镀锌渣和硬锌的处理,也完成了高纯锌的生产。

用气液相平衡成分图,我们也解决了铋—锡、铋—银、铅—银、铅—锡、锕—锌等许多合金的蒸馏分离的问题。

这些内容,在 1982 年昆工学报我写了《粗金属真空蒸馏时杂质的分离》一文,1989 年去美国参加 TMS 年会作了报告,会后,有意大利和伊朗的同行专家来信索要复本。

我们在真空冶金方面的工作,写成了《真空冶金在我国的进展》于 1990 年去苏联哈萨克斯坦选矿冶金研究所作报告,所长柯查赫米托夫说我们的研究工作达到国际先进水平。1988 年去西德亚琛大学有色冶金和电冶金研究所,对该所人员及一些工厂的专家们作了报告,得到他们的好评,该所所长克吕格说:“许多方面

的技术都是我们输送给你们,而在这方面有了你们的和我们的交流。”他还和我商榷了校间合作的可能性。

由于我们在真空冶金方面的工作做得较早,也有一定广度和深度,所以我率先在我校开出“真空冶金”课,此时国内其他大学尚未开出此课,1988 年出版了我和赵忠教授合作编著的《真空冶金》(北京冶金工业出版社出版),这是我国首部真空冶金系统专著,获全国优秀科技书二等奖(1990 年)。招收硕士研究生和博士研究生,至今已培养硕士生 39 名,博士生 24 名。由于我们在有色金属真空冶金方面较先行的工作,冶金工业部教材编审组委托我主编了高等学校教材《有色金属真空冶金》,并于 1998 年出版。由国家自然科学基金资助出版的我和杨斌教授编写的《有色金属材料真空冶金》,于 2000 年冶金工业出版社出版。此书总结了近半个世纪以来在真空冶金方面的工作,也介绍了国内外的一些工厂和研究材料,同时也指出一些值得研究的问题,供有关专业部门、学校参考,并作为研究生的读物。

近半个世纪在有色冶金、真空冶金的教学、研究中,我作为第一作者发表了百余篇论文,合作的有 60 多篇,其中发表在国外学术会议文集上的和国际会议文集上的约 10 篇,其他发表在国外的杂志上。

这些著作、论文和全国 30 余家工厂、单位使用我们的技术设备,将真空冶金引入工厂、学校,促使大家深入了解有色金属真空冶金及其作用,掌握这项技术,应用它来解决冶金中的问题,改造一些不适应现在需要的传统冶金技术,去研究新的金属及化合物的材料。

## 6. 研究新问题

学校教学与研究的内容,在 20 世纪 50—60 年代,专业范围限制得很窄,“有色金属”还被划成轻金属(铝、镁、钛)、重金属(铜、铅、锌等)、稀有金属、贵金属等,一个人的学习教学就在其一种的一个或几个金属。

我想我们不能再按这个限制。应当考虑尽可能满足当前社会的需要,改革已不适应现在的生产方法以及今后发展的需要等等。因此,我与所里的同事和学生作了一些较新的工作,突破了原来的框框。

**真空炼锂**是选定课题之一。由于锂是现代科技使用的重要金属,其传统生产方法是熔盐电解无水氯化锂,流程长,效益不够高。由我们熟悉的真空冶金技术考虑,锂的沸点仅 $1317^{\circ}\text{C}$ ,在真空中易于气化,可以研究真空炼锂以简化生产流程,降低成本。经过了解,金属锂价约70万元一吨,几年变化不大,估计其生产的经济效益会较好。还考虑到云南应当有些较新的生产工厂,若能炼锂自然是好事。经过三年调查、酝酿,1994年得到学校的支持。在先做了一些探索性的基础上,约经一年的时间完成了小型试验。接着就扩大到百克级,在学校支持下办起一个公司,申报了专利。但学校经费不足,就引进一家校外的公司合办,达到了每炉公斤级产量。此时又显出资金不足,于是又组合另一个公司,粗炼和精炼同时进行,由于初炼的新设计炉规模过大,不易改造而试生产进展没有精炼快。新公司由2001年开始动作,逐年有进步。这件事,我们算开了个头。在云南生产锂,算是头一家。生产锂的产业继续发展,估计会作出一些成绩,有益于地方工业的进步。

**锂电池及电池材料的研究**是在锂金属生产公司在社会上出现以后,考虑到应向锂系列产品发展,我们于2001年开始进行。这时锂电池在市面上的产品中应用日益广泛,手机、照相机、摄像机、计算器……里面都装了锂电池,但价格昂贵,一块手机电池五六百元。而且现在石油紧缺,车要找代替能源,锂离子的电池有可能成为一种代替能源。锂电池不污染环境,有好的发展前景。我们应当加入研发的行列,为高能电池的发展作出我们的贡献。于是我们就把学校奖给的200万元投入锂电池及材料研发

项目上去,这个项目得到同学们的欢迎,来报考的硕士生、博士生纷纷希望参加它的研究工作。在不长的三四年中,我们又得到省政府的支持,我们建起了专用实验室,配备了一整套锂电池的研制设备30余台,做出了手机电池,也研究了锰酸锂及其各种改进品,向代替或减少自然资源稀少的钴酸锂用量方向努力。我们经过自己的工作发现锂电池的价格和成本竟有如此大的差距,市售进口的手机电池至今仍卖几百元一块,而我们做的成本估算仅在十元以下,若我国几亿个手机,每年换一个电池,进口电池将要几千亿元。若用自己生产的,则制造费用仅几十亿到百亿元即可。可见这些新技术产品我们一定要自己研制、生产,决不能长期靠进口。在我们自己掌握生产技术之后,研究工作就会不断前进,创新技术及产品将不断出现,向世界水平前进。我们研究锂电池及其材料的方向是好的。我们在云南建起了第一个锂电池研究平台,成长起一批博士和硕士,并将与社会上的企业合作建立锂电池和相关的器件、产品,为地方的经济建设添砖加瓦。

由于在这里有了金属锂的电池及材料,研究所又进一步酝酿着锂合金、锂化合物等等的产品试制。

**真空碳还原法炼镁的研究**是在传统皮江法炼镁的问题上引出的。我国大量工厂用皮江法炼镁,使我国镁金属的产量达到第一位。但是,我们分析皮江法有三个问题:一是用硅作还原剂,硅价较高;二是皮江法用合金罐有消耗、价格高;三是规模受罐的大小所限。由我们熟悉的真空冶金技术出发,改革方法有三:一是用碳作还原剂,它与硅价相差好几倍;二是设计试制大型真空炉,可以扩大规模,不受罐子大小的限制;三是用不用罐子,大幅降低设备消耗费用。国外在1990年发表了一个扩大试验的未完全成功的报告,它只是得到粉状镁,试验中存在管道阻塞的问题。我们的理论分析认为碳还原过程可以进行,冷凝条件控制是个难点,要有适当的

温度保证绝大部分镁蒸气冷凝成液态,剩余气体再冷却成固体,管道堵塞是备料的问题和管道布置的问题。基于这种认识,从1993年,我们就和学生进行研究,结果证明炭还原氧化镁是可行的。2002年又进行了第二阶段的试验,如所预期,得到了块状的冷凝镁。在实验中得到的数据,暴露出残余少量镁粉燃烧的问题,烧伤一位学生的手。再与理论计算印证说明,还原产生的高温气体中镁蒸气的冷凝,大部分能冷凝成液体成为块状金属,当其温度降到镁的熔点 $650^{\circ}\text{C}$ 时还有少量镁蒸气( $\sim 500\text{ Pa}$ )未冷凝。气体继续冷却,这部分镁蒸气就冷凝成固态镁粉。这部分镁粉在空气中极易燃烧,甚至引起爆炸。进一步的研究应解决这个问题,现在想到的办法是在还原炉内消除此部分镁粉。2005年,第三阶段的实验已经开始,预计将会有些进展。

氧化铝碳还原卤化歧化法炼铝是另一项新炼铝的研究。长期以来铝已形成定型的生产方法,分两段,第一段由铝矿制成较纯的氧化铝,第二段在熔融冰晶石中电解氧化铝成金属铝。用这个方法世界年产铝二千多万吨,这个方法成本很高,耗电多(电解一吨铝用电 $\sim 1.4$ 万度),有的国家的铝厂亏本倒闭。能否用其他方法来代替现有的方法?世界上各个国家的许多专家都作研究,至今未成功。我想我们应当研究这样的课题。就算是个难题也总得去研究才能解决,当然有可能我们研究以后仍然得不到解决,那么后来的人可以吸取前人的经验继续研究。世界上的一切事物都在变化,在发展,不会永远停止在一种状态下。铝的生产方法也应有变化,基于这种认识,由1993年我和学生们开始探索低价铝化合物的歧化反应,由氧化铝及其矿物炼铝的方法。几位同学分别由理论和实验研究了铝低价硫化物、铝低价氧化物、铝低价氯化物等的歧化反应。研究了其过程的可能性、速度、设备类型等。到现在(2005年末)已有较大进步,得到了金属铝和卤化剂,这个项目

已经露出希望,继续研究,会得到一些较有益的进步。

硅提纯是当前存在的问题,当今信息产业、家电、电脑等使用的芯片基本上都是硅片制成,硅片用单晶硅制成,单晶硅用多晶硅来制作,多晶硅由工业硅提纯制成,由于生产多晶硅技术复杂、难度大,世界上有三个国家美、德、日生产,我国至今生产很少,2004年仅60吨。现在世界能源供应紧张,都在发展太阳能电池,以图部分代替石油能源,多晶硅是现在作太阳能电池的好材料,就显得更为紧缺。另一方面我国的硅石矿源很多,质量好,生产工业硅每年50万吨以上,出口50多个国家。目前我国需要多晶硅达每年3千余吨,出口的工业硅价格仅8千元/吨,进口多晶硅40~60万元/吨,所以由经济价值来看很不划算(出口 $\sim 80$ 吨工业硅,值1吨多晶硅),由发展产业缺口(国内能产工业硅、单晶硅,缺中间的多晶硅)看我国都应有较多的生产多晶硅工厂。我们由真空冶金广泛应用的角度出发,考虑用真空冶金综合方法来研究提纯工业硅,以达到生产多晶硅,希望能够代替原有的马丁法。所以我们由2004年开始这项研究。由于研究的目的明确,这个目的也是几十个生产工业硅厂家的愿望,所以他们知道我们的工作之后,有的就主动和我们联系,希望合作,促进研究工作的快速发展。校内老师和学生也表示出浓厚的兴趣和热情进行实验研究工作。这项工作的实验室,用省大力支持我们的重点实验室经费顺利建设,现在实验在稳步进行,希望这个项目能很好实施,取得进步。

无疑,硅系列的产品也能顺势发展,如硅的化合物、高纯氧化硅、半导体研制等。半导体是现代科学技术的一种基础材料,研究半导体材料、器件是当今高新技术产业发展的重要方面,我们的研究工作,也自然应该向这方面前进。

除了这几方面外,也还有一些事应该思考。例如云南的钛矿,也是品质较好的,但近年来一直输出精矿,价格在各种钛产品中是最底的,直

到这两年才有一部分加工成为钛白粉,也由于技术水平的原因,只能产出价值不高的产品。那些技术含量高、价值高的产品尚不能生产。像钛矿这样的问题云南还比较多,应该逐步思考,尽可能多做工作。

#### 7. 创建真空冶金材料研究所

我们长时间的真空冶金研究工作形成了一支队伍和一个固定的实验室,显露出一些良好的前景,1979年,学校领导批准我们成立真空冶金研究室。学习兄弟单位的经验,用我们的课题费建一幢专用的实验室。由于市面上买不到我们用的真空炉,我们的真空炉基本上都是自己研制的。再购买一些真空泵、真空计、各种仪表、电气设备及定型设备,配套使用。

1982年,那时我们因为课题费不多,只能选择较低的建房标准,又建了一幢实验室,和社会上相同性质的单位相比,我们的房子明显较差,但已能满足我们实验的需要,我们在这些实验室中工作到现在。到2004年才作一些修补。

现在,我们研究所里装了近20台大、中、小型真空炉,全是自己研制成的,小型的作本科生、研究生的实验,也用作科学研究探索性实验或小型系统实验。中型的可以作公斤级试验,在试验的基础上适当扩大,进一步在我们设计的百公斤级试验炉上作扩大试验。我们研制的两个系列真空炉的中型和大型的都各有一台安装在实验室,满足了我们对扩大的和半工业的实验工作。

当然,在我们所也自然按需要建立了设计室,完成对内对外的炉子设计工作。

1995年我们所又定名为“真空冶金材料研究所”。这个所是我们全体同事自力更生的努力和在学校领导和云南省的支持下创立的,创立以来完成了大量科研工作,为许多工厂提供了生产设备,为大批研究生和本科生提供实验场地。它的另一个特点是所内各种主体设备都是我们和学生一起设计、研制的,国内外别的地方没有的,是买不到的。在这些设备上我们做

了大量工作,还为其他单位提供了研究用真空炉,为工厂提供了生产用真空炉。

#### 8. 真空冶金前途广阔

真空冶金是近半个多世纪出现的新技术,过去冶金都是在常压下进行,即在空气中进行的,真空技术发展起来以后才有真空冶金,由于真空中基本没有了空气,也就是没有了氧气、氮气等稀有气体,情况就有很大的区别,例如生物(动物、植物)不能在真空中成活。在真空中的物理、化学过程都在低压下进行,和在空气中不完全一样。

上述我们研究、创造的两个系列真空冶金技术和设备,对一些粗金属及合金的提纯、分离很有用处,而且可以肯定地说,一切冶金过程、材料制造过程一旦放到真空中,就会不同于在空气中。由于真空冶金现在处于刚开始发展的阶段,许多问题还待研究,它在各种冶金过程中的特点尚未查清,今后一定会在研究工作方面步步深入,在生产中应用日益扩大。

我们所做的工作,也在逐渐拓宽范围,多方面地开展工作的。

还原提取金属过去在常压下进行,如前述,我们研究了几种金属氧化物在真空中还原,如氧化锌、氧化镁、氧化锂的真空还原,氧化铝的还原卤化歧化,得到一些优良的结果。其特点是超过了常压下的作业,也出现一些特殊的情况,例如产生的金属不易成金属块。但就其总的方面来说有许多过程可能在产业化后超过传统方法。

我和同事、同学也研究在真空中制备超细粉末,得到超细锌粉、金属锰粉、氮化硅粉等粉末物质,通过这些工作对真空中的成粉条件有所认识。也研究过在真空中镀金属膜层。

关于矿、粗金属、合金、化合物在真空中处理,我们也研究过一些物料。感觉到真空冶金用途很宽,值得继续深入研究。

#### 9. 大学要为社会发展服务

我在大学工作五十余年,在教学和科学研

究方面,大体上经历两个阶段,前一阶段,20世纪50年代,我们与社会上的工厂企业来往不多。到工厂是去实习,与工人同劳动,但对工厂没有实质上的帮助。学生的收获是认识了工厂,印证了教科书上的理论。教师搞科研,就用学生作实验的实验室及其设备,一个课题的科研费就几千元,作完后写个报告就存放起来,发表的也不多。这种小型报告的成果,因其实验规模太小,往往只有几克,故工厂不能使用,学校与社会的关系不亲不疏,也很少互相需要互相帮助,教师教学多由各种书刊收集材料,也到工厂考查,按教科书讲课。

后来我觉得科研报告只保管不够,学工程者科研成果应当用于工厂的生产,否则成果无大用,例如我们研究真空蒸馏分离铅—锡合金,小型实验完成得很好,但工厂无法用实验室的设备生产,这样的成果就不能发挥作用。于是,我们就继续研究工厂可以使用的工业型真空炉,为此需要在学校建立较大的设备,需用较多的经费,这是当时我们的难处。解决这些难题得到学校支持,学校经费不多只能少量提供,但给了我们很大的精神鼓舞;工厂尚不了解我们的工作有什么实际作用,在经费上还不能决定给我们支持,但在原材料和生产资料上可以帮助我们。经费支持主要来自领导部门,当时冶金局、省科委给予大力帮助。至于研究人员,就邀约青年老师和组织学生参加。学生参加研究就作为他们的部分学业,所以人员在学校是充分的。有了这些条件之后,研究过程中学校和社会、工厂、科研单位不断来往、交流信息、互通有无。与领导机关多次反映情况申请帮助。学校与社会的关系多了。到研究成功之时,鉴定成果,推广技术、帮助工厂使用新技术。总起来说,学校为工厂研究新技术、新设备、领导部门和工厂帮助学校作研究工作,学校老师得到锻炼、提高,学生在实际工作中、在教师指导下得到培养。

对比两个阶段,可以看到第二阶段很好,学

校科研为社会发展作出贡献,领导部门和工厂支持学校的发展,使学校为社会服务的能力提高,学校在科研中还在学术、技术水平上得到发展,出了论文、著作,开出新课,培养了学生,凝聚了高水平的人才,增加了博士、新的教授。

这些经历说明学校要为社会发展服务,把创新知识和培养人才融合其中,学校就会不断地欣欣向荣发展,成为促进社会发展的一种力量。

#### 10. 有色金属工业将持续发展

学习有色金属冶金和真空冶金半个世纪,深切地体会到有色金属的材料是人类不可少的物质,真不可想象人类会不要金属了,生活用品、生产资料、交通运输、船舰、车辆、航空航天、武器装备、高科技产品、信息时代的设备等无一不需要金属、各种金属材料 and 金属化合物材料。

多年研究让我感到几点:现在的有色金属企业一是产品单一,效益好的产品没有生产,只产出初级产品,经济效益低下,换句话说就是深加工产品很少。目前省里的金属经过深加工的不到20%,其余的80%多都以金属锭出售,价值相对很低。二是金属生产方法多数都是较早期发明的,存在问题是工艺过程冗长,消耗多,金属回收率较低,成本较高,经济效益低,而且污染环境。

这些问题应当解决,也应该能解决,冶金材料工业应该改变面貌。

结合我们自己工作,如前所述,我们研究真空蒸馏法代替传统的氯化物电解法,就使生产费用由每吨一千多元减少到一百多元。由有污染变为无污染,这就是研究新方法代替老方法取得的效益。用真空法生产高纯锌估计加工成本只是几百或上千元一吨,而用重电解法将会是多少呢?恐怕几倍甚至花费更多。

因此研究新方法,改造老的传统方法的工作应当要及早开展,并且要由舆论上和实际上给以支持。

我们这个时代就必须做这些事,因为传统

冶金技术有许多已经不适应现代社会的要求了,这个问题在国内如此,在国外也同样存在,改造传统冶金技术是国内外都需要做的事。在国外由于能源价高,人员工资高,对环境保护要求高,有的传统冶金技术到了不改革就要消亡的程度。例如日本的炼铝工业本来技术水平不低,有些国家还向他们买了一些炼铝技术和设备,但它毕竟还是传统技术,在 1982 年左右几年中,全部 110 万吨/年的炼铝工厂关闭,只留下 4 万吨生产能力,镁厂也关闭,需用的铝和镁全部进口。

有色冶金传统技术若不改造,则前景堪忧,正是这个时代,应当开展研究,创新技术使这项产业振兴。

再一方面,深深地感到传统有色冶金工业的另一大问题,是其经济效益较差的大问题,应当集中很大力量解决的重大问题,就是当前冶金工厂产品多属初级产品,以金属锭为主,而经过再加工的、技术含量较高的产品只有很少部分。

这个问题应当认真逐步解决,要生产多种科技含量高的产品适应社会需要,才能使其经济效益大幅上升。

有色金属、纯金属、化合物及其各种组成的材料种类多,数目很大,用于人类社会的生产、生活、军工等诸方面的材料实在太多了,其价格远远超过初级原料——金属锭。

如果我们仍停留在初级原材料的生产上,就难于改变经济发展状况。

#### 11. 结语

这一辈子我走进了有色金属冶金领域,由于所在环境安定、条件自如,单位的同事团结合作,领导的关心、帮助、支持,家中妻子赵瑞芳和三个子女的一贯支持、帮助,鼓励自己坚持教学和研究实际问题,才使我得以在锡冶金和真空冶金方面作了一点工作,取得一点成绩,得到国家和省里的充分肯定和奖励。我们所获国家级、省部级发明奖和科技进步奖励 20 余次,获专利 20 余项。1999 年 11 月我被评选为中国工程院院士,荣获国家的最高学术称号。

然而,我所处的这个领域实在是丰富多彩极了,里面有着许多色彩斑斓的金属材料用于人类生产、生活中,形成美好的世界,也存在着许多方面的挑战,需要人们去创造更有利于人类的千百万种物质。

我现在只是在内容极为丰富的世界上摸索到几个小亮点,看到无数的宝贝在前面,应当尽力去获取,告诉年青人去发掘,我想“人生一辈子,总要为人类社会多做一些有益的事”。

我也告诉年青人,首先要做一个品德好的人,然后才是当工程师、科学家。有 8 个字“**重德、好学、求新、奉献**”我们一起来做,力求做得好一些。以此相互勉励。