

杜挺科技文集

——冶金、材料及其物理化学

杜 挺 著

冶金工业出版社

杜挺科技文集

The Selected Scientific and Technical Works of Du Ting

冶金、材料及其物理化学

Metallurgy, Materials and Physical Chemistry

杜 挺 著

Du Ting

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

1996

责任编辑 谭学余

图书在版编目(CIP)数据

杜挺科技文集:冶金、材料及其物理化学/杜挺著.
北京:冶金工业出版社,1996.12

ISBN 7-5024-1913-6

I. 杜… II. 杜… III. 冶金-文集 IV. TF-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 13012 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

文物出版社印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1996 年 12 月第 1 版,1996 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;66.25 印张;2 插页;1606 千字;1027 页;1-650 册

150 元

代 赞

Science is built of facts the way a house is built of bricks; but an accumulation of facts is no more science than a pile of bricks is a house.

Henri Poincaré

The means by which we live have outdistanced the ends for which we live. Our scientific power has outrun our spiritual power. We have guided missiles and misguided men.

Martin Luther King, Jr.

正当我们回顾祖国半个世纪中的辉煌成就、总结教训、展望未来的时候，我很高兴看到杜挺同志科技文集的出版。它记载了一个爱国家、爱人民的科学工作者在党和人民的培育下，一步一个脚印，前进成长的足迹；也是中华民族的一个优秀儿女，在他走过七十年坎坷历程中，为人类所作贡献的记录。

杜挺同志在和共和国共同成长的奋斗中，一直挺进在革命和建设的道路上，根据建立一个强大的社会主义祖国，保卫世界和平的需要，学习、掌握和发展了为冶炼高纯金属所必需的真空冶金，和理科的、工科的科学家、工程师、工人、干部一起，围绕任务，从基础理论到工艺、设备和工程，刻苦学习实践，自力更生，建成了我国核燃料工业，开发了核材料工艺。

他认识到我国独特富有而还有待垦殖的一块科学沃土的重要意义，茹苦含辛，为稀土元素的应用及其物理化学基础，做出了贡献。

他未雨绸缪，从我国能源、资源以及人口和消费的矛盾出发，探讨了新的熔融还原炼铁工艺。

从这些有意义的成果，它们蕴涵的艰苦困难和辛勤劳动以及它们的历史时代背景，可以看到一个为社会主义祖国勤奋献身的科学技术工作者和正直科学家的形象。

是对振兴中华民族、只有社会主义才能救中国的坚定信念，在党的培育下建立起的敬业精神，使他能够长期地辗转战斗在沙漠荒原，承担国防和科学基地的建设工作，安苦乐业，并以此自豪。

他的工作，他的方向，他的几百万字著作都是为了推动党和人民所交付的任务，为了促进生产的发展和科学进步。既然不是为了个人的名与利，也就不会因为挫折和不公而耿耿。

他的研究贯彻了理论指导实际，满足国防需要，结合能源和资源的利用，得以最小的代价取得最有效的成果。

在他的文集和著作中，我们可以看到祖国的几代优秀科学技术工作者，经历了半个世纪的风风雨雨，不惑于名利和纷扰，在党的领导下，无声地、踏实地勤奋耕耘，得以在我国悠长历史中的霎时间内，建立起威震世界的现代国防和举世瞩目的科学成就和综合国力。

所以，这本文集既是冶金和材料工作者的重要参考资料，也蕴涵着广大科学技术工作者值得思索的素材；祝愿它将伴随新一代的科学技术工作者和作者一起，继续发扬朴直扎实、艰苦奋斗的优秀传统进入 21 世纪，重振中华，使我国的古老文明再耀绚丽。

北京科技大学教授

中国科学院院士

柯俊

一九九六年七月

序 言

杜挺先生自 50 年代在苏联留学至今,在冶金学这一重要领域内辛勤耕耘了将近半个世纪,取得了十分丰富的研究成果。这本文集系由他的大量著作及文章中精选作品编辑而成的,反映了作者在冶金学的若干重要方面的丰硕成果与高深造诣。

杜挺博士在 50 年代即对真空冶金的物理化学过程有广泛的研究,收集了大量的文献资料,并进行了认真的分析与计算,对我国真空冶金的发展起到了有益的推动作用。这些成果集中地表现于他的著作《真空在冶金工业中的应用》(冶金工业出版社 1959 年出版)一书中。

60 年代初,他服从国家尖端科技发展的需要,调入当时的第二机械工业部,参加对我国第一颗原子弹的技术攻关。他毅然改变了自己的工作方向,转而研究不熟悉的放射性材料,诸多建树。他参加了铀材料攻关,写了《熔炼铀的物理化学》及几份重要技术资料,参加了翻译、审校 J. 柏克等编著的《铀合金物理冶金》一书,对当时核材料攻关及此后的研究工作都起了重要的促进作用。为了钚材料攻关,他受部委托,在收集大量资料的基础上,编著了《钚冶金》(原子能出版社 1967 年出版),填补了这方面的空白,对钚核材料攻关工作起了及时有效的指导作用。以他为攻关主要完成者之一的有关铀部件、钚部件制造技术的两个项目,均于 1985 年获国家发明奖二等奖。

1980 年调回冶金部钢铁研究总院,他又以饱满的工作热情开拓新的研究领域。在无焦炭钢铁冶金新技术、稀土等元素物理化学、冶金过程以及超磁致伸缩材料等方面都作出了创造性的工作,取得了很好的成绩,并培养了大批高水平的人才。《钢铁冶炼新工艺》(北京大学出版社 1994 年出版),《稀土碱土等元素的物理化学及在材料中的应用》(科学出版社 1995 年出版)等书是他在这一时期的代表作。稀土研究项目的论文于 80、90 年代曾多次获得国家、冶金部的奖励。经向国际权威检索系统检索,杜挺等已发表的论文有 112 篇为《美国科学引文索引》、《工程索引》、《化学文摘》等收录,被引用约七百多篇次,说明他在国际科学技术界已有一定声誉。他的研究成果对高温物理化学、稀土综合利用和钢铁新工艺的开发有推动与指导的作用。

几十年来,杜挺先生一直在学术上勤奋劳动,对自己要求很高,精益求精,对后辈满腔热情,诲人不倦。我过去有机会与他共事,经常讨论技术问题,受益匪浅。在他的科技文集出版之际,嘱我作序,我愿利用这个机会祝他在未来的研究工作中,在培养人才上都取得更大的成绩。

中国科学院院士

宋家树

一九九六年六月二十六日

自序

杜挺 (Du Ting), 1926 年 3 月 5 日生, 浙江省东阳市仓前村人, 1948 年 7 月于杭州国立浙江大学化工系毕业, 获学士学位, 毕业论文获吴蕴初化工奖金。毕业后留校当研究生, 研究生未毕业被地下党介绍去大洪山江汉军区江汉公学参加培养革命干部工作。1950 年参加中国共产党, 同年在湖北革命大学被评为教育工作模范, 获李先念校长签字的奖状。革大解散后分配去武汉中华大学 (后并入武汉大学) 任三人领导小组成员和教师。1950 年底调湖北大冶华中钢铁公司 (后分为大冶钢厂和武汉钢铁公司) 任助理工程师等职。1952 年 2 月被选派留学前苏联, 先在北京俄专学俄文一年多, 因由化工专业改为冶金专业研究生, 又去北京钢铁学院电冶金教研室、鞍钢、抚钢、太钢学习, 为留苏研究钢铁冶金专业作准备。1954 年 8 月去前苏联莫斯科钢和合金学院电冶金和铁合金教研室和前苏联科学院巴依科夫冶金研究所当研究生, 导师是 A. M. 萨马林院士, 侧重攻读特殊钢和真空冶金, 1958 年 2 月毕业, 被授予技术科学副博士学位。回国后先后分配在冶金部钢铁研究总院高温合金室、难熔金属合金室和炼钢室任工程师。1961 年 4 月被分配去包钢参加筹备稀土研究所 (后改稀土院), 在包钢冶金所任工程师、稀土规划领导小组组长等职。1962 年夏, 由中央组织部指名抽调到当时的第二机械工业部 (后改核工业部) 九院和九〇三厂, 曾任工程师、攻关组长、组织计划科长、技术管理处处长、总厂副总工程师等职。1980 年初又调北京冶金部钢铁研究总院。现任教授级高级工程师、博士生导师、钢铁研究总院工艺所顾问, 兼任北京市人民政府专家顾问团高新技术组顾问、冶金部熔融还原工艺技术开发委员会顾问、中国金属学会冶金过程物理化学学会副理事长、中国稀土学会理事等。

自参加工作以来, 我撰写论文 194 篇 (其中英文论文 37 篇), 已公开发表 187 篇, 专著 9 本, 公开出版 6 本。《杜挺科技文集》选了其中 80 篇论文和部分专著或专著中部分章节, 其它未选入本文集的均在本书最后索引附录。依据论著内容的学科性质和时间先后, 文集分为四大部分:

- I 真空冶金学
- II 铀、钚冶金学及其核材料
- III 熔融还原新工艺技术等钢铁冶金学
- IV 稀土等元素的冶金和材料物理化学及在材料中应用

一、真空冶金学

20 世纪 50 年代中期到 60 年代中期是我从事真空冶金的主要时期, 在前苏联攻读博士学位四年时间内, 专业重点是合金钢和真空冶金, 收集国际上刚兴起的真空冶金资料, 参加有关真空冶金国际会议, 参加有关特殊钢、不锈钢耐热钢、耐热合金的真空熔炼, 准备编著有关书籍。1958 年春回国到冶金部钢铁研究总院, 从事高温合金、真空冶金的研究, 承担国家重点攻关项目“米格 19 喷气飞机发动机材料的研制”, 一方面组建了真空冶炼实验室, 试制成功了国内第一台真空电弧炉, 为在国内推广真空电弧炉奠定了基础, 此炉子在钢铁研究总院三室冶炼难熔金属为基的合金近 30 年, 为开发研究起了大的作用。另一方面

在实验室进行铁基、镍基、难熔金属为基的高温合金研究，重点是飞机发动机的工作叶片、燃烧室和涡轮盘部件，在实验室研究确定了合金的成分、强化的机理、合适的工艺制度，并与航空部六院六所协作，由全钰嘉同志与我两人带领工作组去抚顺钢厂试制，历时半年，试制成功了具有良好综合性能的米格19喷气飞机发动机三大关键部件，为打破当时前苏联对我国的封锁，保证我国空军当时的主要机种的正常飞行、训练和发展起了作用。我们工作组被评为冶金部1959年的先进工作组。

为了促进我国高级合金、新型材料和高技术的发展，当时尽可能倡导真空技术在冶金工业中应用，我编著了《真空在冶金工业中的应用》，由冶金工业出版社于1959年7月出版，这是国内第1本有关真空冶金的册子，该书扼要介绍了物理化学基础、真空感应炉及其应用、真空电弧炉及其应用、真空处理钢水和真空浇注、真空中提取纯金属及其合金、真空泵等。当时国内有一股真空冶金热，北京、上海等地的金属学会、冶金局多次邀我去讲真空冶金，冶金工业出版社预约我再写一本较详细的《真空冶金》书，为此我又花了大量时间，于1960年写成40万字的真空冶金书稿。本书稿分五章：真空冶金的物理化学、真空技术概述、真空冶炼、真空处理和真空浇注、真空还原和真空烧结。因当时党内反右倾运动波及和下放劳动锻炼等原因耽误了出版。

1962年调去核工业部九院后，开始参加铀核材料的攻关，也需要真空精炼和真空铸造。在1962~1965年期间，我主要利用业余时间、节假日，特别是1965年参加农村四清运动得了慢性肝炎，回京休病假的5个月内，我没有听医生嘱咐“休息”，反而充分利用时间于1965年底编著完了两本书稿：

一是《真空冶金的物理化学》书稿（约25万字），1966年初经著名冶金物化科学家，中科院院士（学部委员）邹元熾先生审稿，同年推荐出版。本书的主要内容包括：

（1）综合提出了真空熔炼各种金属及其合金的净化原理、夹质元素净化的方法、工艺优化、净化程度、机理和速度；

（2）经热力学计算研究提出了液态金属与各种耐火材料相互作用的计算公式，作用完成程度，提出了降低相互作用的措施和合适的耐火材料；

（3）提出了充分发挥碳在金属氧化物真空热还原中的意义、作用、优化工艺、机理、速度和金属热还原金属氧化物的选择和应用；

（4）综合提出了真空烧结过程的反应、机理和工艺优化。

二是《真空熔炼》书稿（约30万字），1966年经著名钢铁冶金专家、院士（学部委员）邵象华先生审稿同意推荐出版，本书的主要内容有：

（1）综合论述了真空熔炼的意义，应用范围和主要效果；

（2）综合论述了当时国际上真空感应炉的原理、设计、设备的主要问题和解决措施，真空熔炼工艺和优化控制工艺条件，各种金属及其合金的真空熔炼的效果；

（3）综合论述了当时国际上真空电弧炉的原理、设计、设备的主要问题和解决措施，真空电弧炉熔炼工艺和优化控制工艺条件，各种金属及其合金的真空电弧炉熔炼效果；

（4）综合论述了当时双重真空熔炼、真空壳炉的原理、设备、应用领域及其熔炼效果；

（5）综合论述了当时真空电子轰击炉的原理、设计、设备的主要问题和解决途径、电子轰击熔炼工艺和优化控制工艺条件，各种金属及其合金的真空电子轰击熔炼效果。两本书稿经原九院保密审查，由当时的高潮（前九院副院长和前全国科协副主席）、张同经手交

当时九院核材料研究室主任陈宏毅审查，证明不牵涉九院保密，同意出版。两书稿送上海科技出版社，出版社审后计划在1967年内出版，后因“文革”，这两本书未能按时出版。我耽心遗失书稿，于1970年赴上海出差期间费了劲取回书稿。去年我把两本书稿请北京科技大学有关教授审阅，他们认为仍有参考价值值得出版。我又把两本书稿仔细审了几遍，只删去了个别内容陈旧的章节，基本以原貌收入《杜挺科技文集》中。

二、铀、钚冶金学及其核材料

1962年夏至1979年底，我在核工业部九院从事铀、钚核材料攻关、研制、核工厂的工艺设计、生产准备、生产的技术管理等工作，结合核材料攻关和实际需要，写了两本著作和7篇内部资料，审校译著1本。

1. 关于《熔炼铀的物理化学》著作和参加铀核材料研究、攻关、研制情况

我刚去九院时参加铀的真空精炼和真空铸造成型。依据物理化学原理和一些文献数据，在进行物理化学计算和分析基础上，提出：

(1) 真空熔炼铀能达到20多种金属夹质、非金属夹杂净化的有关计算公式、净化方法、净化程度、净化机理和速度，它们为优化精炼工艺参数、制定精炼工艺规程、预测精炼效果和解释净化作用机理，提供了理论与技术基础。

(2) 气体与液态铀相互作用的计算公式，得到有关热力学参数，提出了防止CO对铀的氧化、碳化，防止N₂对铀的氮化的措施。

(3) 液态铀与耐火材料坩埚的相互作用计算公式，作用完成程度，得到有关热力学参数，作用机理，提出了降低相互作用的优化工艺和措施。

(4) 提高U235回收率的优化条件。

(5) 对真空熔炼其它锕系元素、稀土元素及钛、锆、铪等活泼元素的净化有参考作用。

真空铸造成型无缺陷的铀235核部件的难度相当大，攻关由北京的九院核材料研究室转移到西北戈壁滩生产厂内进行，1963年12月九院派我、许纪忠、宾朋三人组成攻关小组去厂继续攻关和试制铀235正式核产品交国家第一次原子弹试验应用，院指定我为组长。此核部件的攻关研制受到中央和各级领导的高度重视：国防工办袁成隆副主任坐镇保证外部协作条件，核工业部张沛霖总工（院士）负责攻关抓总，公安部一位处长监督保安全，我提出把铀液热中心控制到锭表层的新观点，以便把液-固凝固收缩5%引起的孔洞，气孔排到表面外。经过四个月紧张的“实验-总结-实验”的研究采取了有效技术措施，得到无冒口、无气孔、无缩孔、密度接近理论值的锭，使我国有关铀熔铸技术达到国际先进水平。国防工办袁副主任要我执笔写一篇用实践论和矛盾论哲学观点总结攻关，我照办写了“铀235核部件研制总结”（内部技术资料，1964年5月）上报。这次铸造了两套产品：一套供第一次原子弹试验，一套备用。九院不仅参加攻关，又是使用单位，院领导又正式任命我为铀235核部件验收组组长，1964年10月16日15时，我国第一颗原子弹爆炸成功。几天后，党中央毛主席、周总理等领导在中南海集体接见我们参加研制、试验的有关领导和工程技术人员代表，并照相留念。后来又发给第一次原子弹爆炸成功有贡献的荣誉证书和奖章。1988年核武器研制办公室要我写一篇有关攻关回忆录，我写了一篇“关于第一颗原子弹爆炸用的铀235核部件攻关的回忆”（内部资料，1988）。1985年，核工业30周年时，1962~1964年间攻关成功的本项目“铀235核部件的铸造技术”获1985年国家发明二等奖。

2. 《钷冶金》书和参加钷 239 核材料的研究、攻关、研制情况

主要时间是在 1965~1969 年期间。1964 年浓缩铀部件攻关成功时,原二机部刘杰部长来西北某厂观察,有一天约我谈话,一方面表扬鼓励我已完成的重要任务,同时面授下步更艰巨任务,要我好好抓一下钷 239 核部件的科研、攻关、研制工作。部长的亲自交代一直是我多年攻钷任务的鞭策和动力。

钷 239 和铀 235 都是裂变材料,都是原子弹、氢弹爆炸的关键核燃料,钷 239 的优点是临界质量比铀 235 少,有利于核弹头的小型化。钷具有强放射性、临界性、强毒性、化学活泼性、自热性和自燃性;而且在低熔点 640℃ 以下有六个相变,相变温度狭,相变引起的体积变化大,有的高达±19%;它是周期表中最复杂、最具有战略价值的元素。钷的特性带来防护、安全、成型、加工、热处理、表面涂层等问题,铸件容易变形,产生裂纹,也带来是否需要低合金化来改善加工成型等工艺性能问题,同时也给运输、贮存带来困难。对准上述困难,我先抓好调研。二机部情报所和二局张沛霖总工都建议我写一本有关钷的书指导攻关和普及钷的知识。从 1964 年 11 月开始到 1966 年 8 月“文革”开始后 3 个月完成了《钷冶金》书的编著,依据攻关与应用需要,分成 17 章:概况、性质、相变、钷合金、临界质量、安全防护、检验、热还原、真空精炼、钷合金、铸造、合金均匀化退化、 δ 相合金的压力加工与机械性能、钷的机械性能和加工成型、钷的氧化腐蚀和涂层、电解提纯和回收、参考文献 382 篇,共 600 页,约 50 万字。书稿交给原子能出版社,由总参出版局所属印刷厂以急任务安排,只三个月就出版了(书号核材 7030,1967 年 3 月),由出版社发行给有关单位。当时出版社要给我二千多元稿费,我没有领,捐给出版社了。

本书的创新意义与实际价值在于较完整具体地提出了制造 α 相纯钷 239 和 δ 相钷 239 核材料的工艺技术路线,关键的科学技术问题及其解决措施, α 相纯钷和 δ 相钷合金的组织结构、相变、性质、临界质量、安全防护原则和措施,表面涂层防护措施等。

钷 239 核部件是继浓缩铀部件后的二弹研制的重点攻关项目。原九院副院长,现为全国政协副主席、中国工程院院长的朱光亚同志,亲自关心和检查攻关进展情况。他组织了攻关小组,常驻西北核工厂参加攻关。我经常提出解决关键技术的措施。这五年内,我与曹洪胜在厂内时间最长,驻厂总时间有二年多。攻关高潮也是“文革”高潮:厂内两派武斗不断,我坚持攻关小组不介入两派斗争,每天坚持在攻关第一线,对厂内参加攻关的职工也起了“抓革命、促生产”的促进作用。在大家努力下克服了许多技术困难后,终于 1967 年冬研制成功合金钷,随后研制成功 α 相纯钷。1988 年 1 月朱院长要我写了一篇“关于钷的情况报道”发给有关单位领导参阅。为了试验,九院组织了一个 10 人验收小组,任我为组长,九院二二一厂质量检查处倪副处长任副组长。验收小组按质量标准严格进行验收,验收合格后的第一套钷部件的出厂价格是等重量黄金价的几十倍,经国家试验获得成功。由于《钷冶金》书是国内第一本这方面的书,有关单位如西北核工厂、二二一厂、二炮核武器研究所、有关基地空军、海军有关使用人员、核工业部情报所都要我去作了技术与学术介绍。九院的几位老技术领导:王淦昌、彭桓武、邓稼先、陈能宽等著名核科学家约我研讨了有关钷的性质与武器中应用的有关问题。核弹关贮存基地司令员约我去研讨钷部件的贮存条件问题。

钷 239 核部件的研制成功,为核弹头小型化创造了有利条件。1988 年有关部门约我给核武器研制史写了回忆录:“关于原子弹、氢弹中的钷核部件攻关研制的回忆”。

1965~1969年期间攻关成功的本项目“钚核部件制造技术”获1985年国家发明二等奖。在本文集中，从《钚冶金》书中选了部分章节，略加修改，书名《钚冶金及其核材料性质》，愿她对研制纯钚核材料仍有指导作用。

3. 关于参加核工业基地建设的情况

1969~1979年10年内，我从北京被指名调去三线参加核工业建设。我从定点、方案设计、工艺设计、生产准备、研究到生产都参加技术领导，在山沟奋斗十年，直到建成国防现代化的核工厂。这10年的工作内涵相当丰富，在某些重要方面起了有效的参谋作用，促成了当时的基建投资节约一亿元左右，由于某些原因，不便详细说明。1989年三线国防工办编厂史时，要我写了“抢建核基地”和“六十年代研制铀、钚裂变核部件的回忆”。

4. 关于英文《铀合金物理冶金》书的翻译出版

此书是美国第三次陆军材料技术会议的论文集，1976年出版。此书包含美国几十年来对铀合金研究的大量成果，不仅对我国铀合金的研制有直接参考价值，对大量贫铀的利用有重要参考作用，而且对研究其它活泼性强的金属和合金也有借鉴和参考作用。1978年我就组织技术干部分工翻译，我负责校审，约60万字，有些篇的翻译质量不好，我花了大量业余时间审校，每篇至少审校了三遍，相当于我自己直接翻译一遍。1980年把译稿交出版社，出版有耽误，一直到1983年才由原子能出版社出版。

1979年部党组决定对九院系统从事原子弹、氢弹研制的第一代功臣首先晋升为高级工程师或研究员，并晋升一级。在核工厂晋升的是我们六名正、副总工程师。我是那时被晋升为相当于当时教授六级的高级工程师，开始享受教授待遇。我们办完晋升审批手续也是全国最早的。后来又授予我们核工业建设荣誉证书和奖章。

我一人长期在外工作，家在北京、爱人多病，小女儿年幼，家内困难较大；同时考虑到厂内技术力量很强，调离后影响不大；因而我于1977年申请调回钢研总院，经过二年多部党组和厂才同意。我于1980年元月开始回冶金部钢研总院工作。

依据国内外钢铁工业的发展态势，结合本人的专业基础，回钢研总院后我选中了两个方向：（1）熔融还原新工艺技术的研究开发；（2）稀土等元素的冶金和材料物理化学及在材料中的应用，属于富有稀土资源综合利用有关的应用基础与应用研究。

三、熔融还原新工艺技术等钢铁冶金学

国际钢铁冶金界公认熔融还原炼铁与近形薄板坯连铸是钢铁工业前沿的两项重大新工艺，这二者为核心技术的有关技术紧凑组合将是新一代钢铁工业流程。传统的高炉炼铁需要炼焦厂和烧结厂，炼焦需要焦煤，而焦煤在国际上只占煤产量的极小部分，一般不到1/10，而且焦化厂的环境污染严重，焦+烧结+高炉的能耗一般占钢铁厂的一半以上，流程较复杂，基建投资较贵。而熔融还原炼铁新工艺能以非焦煤代焦、缩短流程、显著改善环境污染、节能、增强生产灵活性、降低基建投资、降低生产成本。可见这是个钢铁工业发展的战略目标之一，又是个艰巨、复杂、费钱、费时的系统工程的研究开发任务。在我院老一辈钢铁冶金专家李文采、邵象华二位院士的影响下，1980年我还是刚过50的中年人，明知研究开发任务艰巨，还是下决心干，原希望十年或多一点干到有个示范厂，同时也准备二手，培养青年一代：刘浏、周渝生、杜昆、郑从杰等博士接下去干到下世纪推广应用。

1980年以来我就积极宣传、协助组织、负责或参加冶金部支持的熔融还原有关的单元

技术与关键技术的研究,1985年以来被冶金部聘请为熔融还原技术开发专家组组长,协助冶金部召开六次熔融还原研讨会,多次编写向国家申请“六五”、“七五”、“八五”计划立项。1988年在南京竹簧机械厂开拓性地进行了2~3吨铁矿含碳球团竖炉与铁浴的半工业试验,煤耗达到吨铁950公斤,利用系数达到5。1992年11月本项目“煤粉和铁矿粉直接冶炼铁水的方法和装置”被批准获得了国家发明专利(CN88104282-U)。

1988~1993年承担了国家自然科学基金和冶金部钢铁研究总院联合资助的“含碳球团-铁浴熔融还原法应用基础研究”重大课题的研究,已研究开发成功高含碳量、高强度、高自还原能力、高还原速度、高抗氧化能力的冷固结的新型铁矿含碳球团;研究提出了铁矿含碳球团自还原理论与还原机理;系统研究了十多个因素对含碳球团在铁浴中熔化还原速度的影响,优化了参数,提出了动力学模型,找到了控制泡沫渣、硫、碳含量的有效技术措施。经长期研究提出了有特色和创新技术的“含碳球团等铁矿料-铁浴熔融还原法炼铁”的流程方案,一系列主要研究成果综合在1994年1月杜挺,邓开文等著的《钢铁冶炼新工艺》一书中,该书由北京大学出版社出版。国家自然科学基金会验收有关重大项目时,评价含碳球团等技术有突破,综合评价“优”。我们申请了二项国家发明专利。

高含碳球团的优点有:

(1) 能在1200~1300℃高温下进行快速预还原,突破传统的竖炉只能在低于或等于900℃,回转窑只能在低于或等于1000℃进行还原的温度障碍,理论上可提高还原速度几十倍,实验室证明可提高十多倍,只需几分钟可达到50%预还原率;

(2) 在1450℃左右的铁浴中,试验证明少于或等于10min可达到大于或等于95%终还原率,而氧化球团只能达到60%的终还原率;

(3) 含碳球团有利于控制泡沫渣、能控制渣中低FeO含量,有利于降低对炉衬的侵蚀速度;

(4) 球团中高含碳量也是向铁浴中加碳的一种好方法,可以降低喷吹煤粉造成的损失和环境污染;

(5) 迄今的二步法是预还原慢、终还原快,现在加快预还原,能解决预还原与终还原生产能力不同步的难题,大大提高二步法炼铁装置的生产率和利用系数;

(6) 有可能省略煤气改质工序,因预还原以自还原为主,加热用的煤气允许有较高氧化性,如在1200℃以上 $CO/CO_2=30/70$ 的高氧化气氛中,含碳球团在几分钟内就可达到60%以上的预还原率;

(7) 我国的铁精矿粉很细,又很潮湿,适宜做成含碳球团。

发表的熔融还原论文36篇、专著1本。熔融还原文献目录1本。收到《杜挺科技文集》中的是16篇,其余列在附录论著索引中。我们的论著所起作用大致可概括为:

(1) 为提出有创新特色的“含碳球团等铁矿料-铁浴熔融还原法炼铁”流程方案打下了一些应用技术基础,为举国先统一到一个熔融还原流程方案提供了一些技术基础和较有说服力的理由。回忆1984年在平谷开熔融还原研讨会时,全国提出14个方案,后来也是几个方案得不到统一,90年代以来多数人逐渐赞成先实施含碳球团-铁浴方案;

(2) 为向国家科委B类“攀登计划”和国家九五攻关计划申请熔融还原项目准备了有利条件。由于我们与中科院化冶所完成国家自然科学基金熔融还原应用基础研究重大项目获得优的评价,1992年秋天国家科委“攀登计划”筹备组主动关照我申请,因而开始以个

人专家名义写了申请,后来又组织用五个单位的专家名义,通过冶金部向上申请。为1993年内由部领导挂帅,举国体制申请获得批准起了挂号,预申请的作用;

(3) 反映我国80年代以来熔融还原研究的动态、进展、主要成果、经验、教训;反映这么一个重大工程技术项目在我国进行研究、开发到工业应用的长期性和艰巨性;也反映了国外熔融还原工艺技术开发、工业应用的动态;

(4) 对国内制造含碳球团及在炼铁、钢中应用含碳球团有推广作用,仅河北省就有26家有关中小企业。

我从1950年大冶钢厂开始到1961年,1980年到现在都在不同程度从事钢铁冶金有关技术、材料研究。先后写了或合著写了有关钢液脱氧、脱硫、脱磷、铁水预处理技术、炉外精炼、近终连铸技术、钢铁工业短流程工艺优化等15篇论文和书1本(负责审校),收入到《杜挺科技文集》中论文有7篇,其它收入论著索引附录中。

钢铁冶金方面的论著内容与成果:

(1) 50年代研究提出了钢液中硅锰合金复合脱氧的热力学模型公式和脱氧产物硅锰酸盐上浮动力学计算公式及其工业实验验证,为生产预脱氧剂硅锰合金中锰/硅的最佳比例提供了理论与技术依据。并综合评述了钢液中脱氧原理,各种脱氧剂的预期脱氧效果;

(2) 通过合作,综合论述了钢铁生产中各种常用和有效脱硫剂的应用效果,为选择钢铁生产中的有效价廉脱硫剂提供有关依据;

(3) 合作研究提出了钢液中碳化钙脱磷的热力学、动力学研究成果,为应用碳化钙脱磷提供依据;

(4) 综合论述,并提出了各种铁水预处理技术的计算公式,为合理选择预处理技术,提供一些依据;

(5) 合作研究说明了RH—KTB及其RH真空精炼方法和RH法计算机自动控制发展态势;

(6) 合作研究提出了连铸结晶的保护渣润滑作用的数学模型及其应用分析;

(7) 综合论述了近期近终形连铸技术的现状及发展态势;

(8) 综合论述,并提出了钢铁工业短流程工艺优化的必要性和有关科技观点。

四、稀土等元素的冶金和材料物理化学及在材料中应用

我开始稀土科研是60年代初。1961年初冶金部从钢研总院和有色金属总院把我们二百多人分配去包头钢铁公司筹建冶金部稀土研究所(现叫稀土院),开始先挂靠在包钢冶金所,我当时虽然政治心境不舒畅,包钢又处在筹建阶段,条件艰苦,上下班远,来回走90分钟,我还是抓紧对稀土事业进行系统调研,并利用包冶所已有实验条件积极开展各种稀土加入剂在钢铁中作用机理研究,得到所领导及有关实验室科研人员的大力支持和积极参加,研究课题成为所的第一重点,因而进度快,数据多,1年内我就抓紧写出了1本《稀土在钢中作用机理第一次总结》(约12万字),当时算是国内、公司内第一本有关稀土科研较系统的论文,因而引起公司和所领导的重视,先在公司技术干部会上介绍,又要打印上送冶金工业部和国家计委,同时分发国内有关厂参考,部分成果在1962年上海举行的第一届冶金过程物化会议上宣讲,引起邹元熾学部委员的重视,他约我向《科学通报》投稿,1963年7月在《科学通报》上发表《稀土在冶金中应用》的论文,提出了稀土在冶金溶液及其

金属材料中存在净化、夹杂物夹质、改善铸态组织和性能、合金化等四方面 14 个具体作用及其机理的综合作用观点和发挥稀土在材料中优势作用和防止副作用的一些科技观点，迄今经过国内外三十多年的科研、生产验证是正确的。

1962 年 1 月党中央六千人大会上决定对 1959 年党内反右倾运动中受批判处分的党员进行区别平反，对我的处分很快被钢研总院党委彻底平反，并由冶金部决定调我回钢研总院，包钢不同意，不久由中组部指名调核工业部九院。这样我在包钢中工作一年多，时间短，但我对全世界第一稀土资源的白云鄂博矿及其稀土事业产生了浓厚的兴趣，为我后来继续研究稀土综合利用事业打下了思想基础。由于我去九院开始从事的核材料铀、钚等金属属于锕系元素，它们与稀土元素（镧系）的外层电子结构类似，特点都是 4f 能级未填满，因而统称 f 过渡元素，彼此的化学性质很相近，因此我对稀土的系统调研及其作用机理研究对我从事锕系元素核材料有借鉴作用。同样，研究锕系元素对我研究稀土元素也有参考作用。1980 年 1 月从九院回钢研总院后，稀土科研就自然地成为我 80 年代以来的两个科研方向之一，与熔融还原等新钢铁工艺方向平分秋色。

1980 年以来，我主持的科研组较系统地完成 70 多个铁基、镍基、铜基、铝基的三元和四元高温溶液体系的热力学性质与相平衡的研究，以及 20 多个钢、铁、含稀土材料的作用机理与应用研究，克服了各种金属溶液体系实验中的很多困难，如稀土元素化学性质很活泼，容易与空气、坩埚反应；一些低熔点元素容易挥发；稀土元素与溶质元素需要分析溶解态含量或固溶量，而不是化学总量；要分析超微量（百万或千万分之一）的氧溶解量或活度；平衡状态不易确定；平衡产物的正确鉴定；合金溶液温度很高；以及不同溶液体系需要设计不同的研究平衡的方法；如金属液与反应产物直接平衡法，固体电解质浓差电池测氧活度法，碳饱和溶解度法，气体与金属液平衡法，钼容器内铅蒸汽与金属液平衡法，石墨坩埚石英管真空密封管内蒸汽与金属液平衡法，银浴法等。实验得到一系列冶金溶液体系中轻、重稀土元素（2~5 个）在铁基溶液中（1300~1600℃）分别与 S、O、S+O、C、N、N+O、N+S、Sn、Sb、C+Sb、C+Sn、C+Pb、Cu、P、Ti、Nb、V、Si 等元素之间，稀土元素 Ce、Y 在镍基溶液中（1400~1600℃）分别与 S、O、S+O 等元素之间、Ce、Y 在铜基溶液中（1200℃）分别与 S、O、S+O、Sn、Ti、Fe、Al、Si、Zn、Pb 等元素之间，Ce、在铝基溶液中（700~900℃）分别与 Cu、Fe、Mg、Sn、Pb、Ni、Mn、Ti、Si、Zn、S 等元素之间相互作用规律和多种热力学性质，获得上述三百多个热力学性质与温度的数学关系式，几十个高温溶液中组元与稀土化合物的平衡相图、稀土化合物之间的平衡相图，能从这些数学关系式计算出不同合金溶液不同温度下成千上万个各种热力学性质，能预测这些合金溶液中生成各种稀土化合物的可能性、生成的热力学条件、生成什么类型的稀土化合物，它们之间的生成顺序、稳定存在范围等，同时，总结、发现并提出 10 多个有理论与实际价值的观点：

(1) 稀土元素在铁基、镍基、铜基溶液中与氧、氧加硫的亲和力比其他元素都强。当同时存在氧、硫时，一般优先生成 RE_2O_2S 型稀土硫化物，这是稀土元素在冶金溶液中有普遍意义的特点；

(2) 低氧低硫铁基、镍基、铜基溶液中加微量稀土元素还有深度脱氧硫和夹杂物球化变性作用，这对性能有好的作用；

(3) 镧、铈、钆、钇、铒在铁液中的脱硫能力都相当强，但也有差别，以镧最强；

(4) 稀土元素在铁基、镍基溶液中的脱硫存在硫溶解量的最低点, 超过此最低点, 硫溶解量反而随稀土溶解量的增加而增大, 因而适宜加微量稀土、合适的稀土溶解量或残余量在 0.005%~0.03% 范围内;

(5) 得到了含碳铁液中 5 个稀土元素生成稀土碳化物的条件, 为解决国际冶金界关于能否生成稀土碳化物的争论提供了理论依据; 稀土元素与碳相互增加溶解度, 碳高能增加稀土收得率;

(6) 得到铁液中铈、钇脱氮的条件, 为国际冶金界争论稀土有无脱氮作用提供了解决的依据;

(7) 铈、钇在铜基溶液中的脱氧能力比在铁液、镍液中强, 顺序为铜基>铁基>镍基;

(8) 发现铈能降低 15MnV 钢中锡的危害性, 以及球墨铸铁中铈的危害性, 这是由于铈、钇与低熔点金属 Sb、Sn 有相当强的作用能生成金属间化合物, 并彼此降低活度, 这是稀土降低 Sb、Sn 等在金属中危害性的主要机理;

(9) 铁液中铈与少量元素: Nb、V、Cu、P、Ti、Pb 等分别存在时, 彼此不生成化合物, 不可避免存在微量氧、硫的情况下, 都生成 Ce_2O_2S 型化合物, 铈与 Nb、V、Ti、Cu、Pb 彼此降低活度, 与 P 彼此增加活度;

(10) 稀土元素在铁基、镍基、铜基溶液中有一些好的作用, 但也要防止应用不当所引起的不良作用, 较常见的是氧、硫较高情况下加入过量稀土生成大量较重的稀土硫氧化物和硫化物, 在凝固过程中来不及上浮而聚集在锭中, 特别是集中在锭下部;

(11) 稀土在铁基和镍基溶液中同时具有净化、非金属夹杂物变性、改善铸造性能及铸态组织等作用, 而固溶稀土和球形细小弥散分布的夹杂物对固态金属起微合金化作用, 能改善金属材料性能, 如果夹杂物在晶界偏聚, 特别是在晶界的偏聚会降低金属材料的一些性能;

(12) 发现热力学性质与溶液的微观结构及元素的周期性质有一定的联系, 如铁液中稀土元素与碳元素的活度相互作用系数与稀土元素的有效自由电子数有关, 已用数学关系式表示, 并能预测其它元素与碳的活度相互作用系数。铝液中稀土元素的平衡产物类型与组元元素的负电性呈规律性变化, 而相互作用系数与组元的原子序数呈周期性变化, 与组元的有效自由电子数及原子半径有关。发现组元 j 与 Ce 在铁液中的相互作用能约是铜液中的 4 倍, 只有铝液中的 1/2。

这些学术观点都有理论与实际数据作依据, 其中多数观点是首次或首先提出。

这些系统研究成果丰富了冶金热力学和含稀土金属材料学的基础数据和内容, 对开发含稀土新材料和提高含稀土金属材料的质量有指导作用。已有九个研究项目通过部、省技术鉴定。评议鉴定认为本领域的研究新成果有系统性、创造性和先进性, 极大多数新成果未见国内外文献报道, 处于国内外先进水平, 授予 1987 年国家自然科学四等奖 (第一作者), 稀土元素与低熔点金属相互作用及稀土减少低熔点元素在钢铁中危害性的研究成果授予冶金部 1990 年科技进步二等奖 (第一作者), “稀土和控轧控冷对 15MnV 钢中作用与应用研究”是冶金部 1992 年科技进步一等奖中的内容之一, “稀土在 09CuPTi 钢中作用机理研究”成果, 具有学术和应用价值, 此钢是我国稀土处理钢中占最大比例的耐候优良钢种, 1989 年武汉钢铁公司处理 13.68 万吨, 每吨经济效益 300 多元, 武汉钢铁公司获利 4000 多万元, 做成火车车箱节省大修费用。此钢种已经多年为武钢和铁道部获得大的经济和社会

效益。搞清了稀土在此钢中的作用机理,有利于进一步推广应用,对生产也有指导作用。

关于稀土-铁系超磁致伸缩材料的研究开发应用:

室温下具有巨大磁致伸缩的稀土-铁系超磁致伸缩材料是近年迅速发展起来的高科技新材料,它具有比传统磁致伸缩材料应变量大10~60倍,能量密度高100~1000倍,且电能—机械能转换效率高,发生的力大,机械响应快等优点,在军用、民用都有广泛的应用前景,如用于声纳、油井探测、高精度快速位移的制动器、动力机械功率源、振子(共振、非共振),滤波元件、传感器、快速阻尼减震系统等。我是在1985年参加瑞士苏黎世第二届稀土材料与化学国际会议后,分析国际上研究开发稀土功能材料动态及国内富有重稀土资源等情况,选择研究此材料的。从1988年开始,在冶金工业部稀土办公室支持下,在国内较早进行实验研究,已培养二位博士,在制备多晶、定向晶、单晶工艺上有所突破,研制出七种不同成分和性能的材料;与中科院声学所合作,1993年就开发出有应用前景的水声换能器,受到当年召开的全国水声会议大会总结会上的赞扬。本领域已发表论文10篇,在本文集中新发表5篇,收入本文集共13篇,另2篇收入附录索引中。

专著《稀土碱土等元素的物理化学及在材料中的应用》由中国科学院科学出版基金和国家自然科学基金委员会基金作为优秀科研成果联合资助,科学出版社于1995年10月出版,作者杜挺、韩其勇、王常珍,全书共18章,65万字,分别阐述了稀土元素的物理性质,稀溶液性质,稀土元素在铁基、碳饱和铁基、镍基、铜基、铝基溶液中的相平衡和热力学性质,稀土元素、碳在铁基溶液中与低熔点元素相互作用的热力学,碱土元素在铁基、镍基和锰基溶液中的热力学,稀土元素在铁、钢液中与杂质元素作用的动力学,稀土的存在状态及显微分布,含稀土熔渣、含稀土氧化物及合金的热力学,稀土在各种金属材料中的作用,机理及应用,测定稀土、钙、低氧的化学传感法,稀土-铁系超磁致伸缩材料的研究成果等,国内外未见类似专著出版。

稀土科研方向已培养7名硕士和5名博士,已在国内外期刊,学术会议发表论文119篇,本文集中新发表15篇,收入本文集55篇,包括超磁致伸缩材料13篇。收入附录索引的有79篇论文和专著1本。

五、指导的博士学位论文、硕士学位论文和培养博士、硕士情况

1980~1989年共培养工程硕士9名,前3年协助李文采院士培养3名。

1983年至今已培养博士12名,在读2名,有1名今年9月内答辩。1988年毕业的4位博士中,有2名是协助李文采院士培养,有1名是协助邵象华院士培养。

1994~1996年收博士后1名。

学位论文、博士后、博士、硕士姓名和导师详见附录有关表。

六、关于被国际权威检索系统——美国DIALOG情报检索系统收录的论文情况及国内外引用情况

1996年第二季度我把在1984~1995年期间在国内外一级期刊中发表的英文论文和有英文摘要的中文论文百余篇,请中国科技信息研究所用国际联机中的《美国科学引文索引》(SCISEARCH)和工程索引(EI)检查,请机械工业部科技信息研究院用美国工程索引光盘数据库(EI Compendex plus)、美国金属文摘光盘数据库(Metadex)检索,开始他

们因所用的杜挺名字主题词不够确切，检索到的论文很少。我不信，我同博士生二人去北京图书馆用科学引文索引，工程索引，化学文摘，金属文摘进行手检一星期多，检出不少论文被收录，同时发现国外检索系统采用的中国人的英文名词也不统一，我的名字有四种写法：Du Ting；Du, Ting；Du, T；T, Du。我把手检结果告诉上述两个所、院，他们与我再一起用光盘或联机重新检索，用四种姓名主题词，检索结果不大一样。有的在我姓名之间加一标点 Du, Ting 就命中了。结果是手检、光盘检、联机检的结果基本符合，而手检与光盘符合很好，联机检有时有遗漏。最后由信息所、信息院开了检索证明：以我名义检索结果（1985~1995年）：被美国科学引文索引（SC）收录7篇，被工程索引收录22篇，被化学文摘收录46篇，被金属文摘收录39篇，有些论文被2, 3甚至4个检索系统收录。检索结果放在附录有关表中。

本人的论文及简要事迹被收进英国剑桥国际传记中心（IBC）1996年出版的《国际名人传记》第24卷中，并被聘为顾问委员会名誉顾问；美国传记研究中心（ABI）于1995年授予本人金奖，并多次聘请我兼任该中心名誉职务。

依据机械工业部科技信息研究院对国内外文献手检证明：杜挺等的已发表论文、著作被国内外文献资料引用的约700多篇次。

本书的出版，要衷心感谢同乡、亲友王惕吾先生的关心与支持；衷心感谢著名核物理科学家、国防科工委九院前副院长、中国科学院理论物理所名誉所长彭桓武院士和著名材料科学家、中国工程院副院长、中国科学院技术科学部前主任师昌绪院士为本文集出版题词；衷心感谢著名金属物理、材料物理和中国冶金史科学家、北京科技大学教授柯俊院士和著名核材料、核工程、金属物理科学家、核工业总公司九局前总工程师、中国工程物理研究院教授宋家树院士为本文集写序；对所有关心和帮助本文集出版的有关领导和同志，一并致以诚挚的感谢。

由于水平所限，文中不足之处，恳请阅者批评指正。

杜 挺

一九九六年八月二日