

“十一五”国家重点图书出版规划项目

Cu

中国有色金属丛书
中国有色金属工业协会组织编写

铜及铜合金 物理冶金基础

邓至谦 唐仁政 编著

Nonferrou

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



铜及铜合金物理冶金基础

中国有色金属工业协会组织编写

 中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

铜及铜合金物理冶金基础/邓至谦,唐仁政编著. —长沙:
中南大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5487-0186-6

I. 铜... II. ①邓...②唐... III. ①铜—物理冶金②铜合金—
物理冶金 IV. TF811

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012928 号

铜及铜合金物理冶金基础

邓至谦 唐仁政 编著

责任编辑 田荣璋

责任印制 文桂武

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙市华中印刷厂

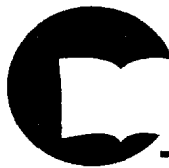
开 本 787 × 1092 1/16 印张 13.5 字数 335 千字

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-0186-6

定 价 48.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换



中国有色金属丛书

CNMS

编委会

主任：

康 义

中国有色金属工业协会

常务副主任：

黄伯云

中南大学

副主任：

熊维平

中国铝业公司

罗 涛

中国有色矿业集团有限公司

李福利

中国五矿集团公司

李贻煌

江西铜业集团公司

杨志强

金川集团有限公司

韦江宏

铜陵有色金属集团控股有限公司

何仁春

湖南有色金属控股集团有限公司

董 英

云南冶金集团总公司

孙永贵

西部矿业股份有限公司

余德辉

中国电力投资集团公司

屠海令

北京有色金属研究总院

张水鉴

中金岭南有色金属股份有限公司

张学信

信发集团有限公司

宋作文

南山集团有限公司

雷 毅

云南锡业集团有限公司

黄晓平

陕西有色金属控股集团有限公司

王京彬

有色金属矿产地质调查中心

尚福山

中国有色金属工业协会

文献军

中国有色金属工业协会

委员(以姓氏笔划排序)：

马世光

中国有色金属工业协会加工工业分会

马宝平

中国有色金属工业协会铝业分会

王再云

中铝山东分公司

王吉位

中国有色金属工业协会再生金属分会

王华俊

中国有色金属工业协会

王向东

中国有色金属工业协会钛锆铅分会

王树琪

中条山有色金属集团有限公司

王海东	中南大学出版社
乐维宁	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
许 健	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
刘同高	厦门钨业集团有限公司
刘良先	中国钨业协会
刘柏禄	赣州有色冶金研究所
刘继军	荏平华信铝业有限公司
李 宁	兰州铝业股份有限公司
李凤轶	西南铝业(集团)有限责任公司
李阳通	柳州华锡集团有限责任公司
李沛兴	白银有色金属股份有限公司
李旺兴	中铝郑州研究院
杨 超	云南铜业(集团)有限公司
杨文浩	甘肃稀土集团有限责任公司
杨安国	河南豫光金铅集团有限责任公司
杨龄益	锡矿山闪星锑业有限责任公司
吴跃武	洛阳有色金属加工设计研究院
吴锈铭	中国有色金属工业协会镁业分会
邱冠周	中南大学
冷正旭	中铝山西分公司
汪汉臣	宝钛集团有限公司
宋玉芳	江西钨业集团有限公司
张 麟	大冶有色金属有限公司
张创奇	宁夏东方有色金属集团有限公司
张洪国	中国有色金属工业协会
张洪恩	河南中孚实业股份有限公司
张培良	山东丛林集团有限公司
陆志方	中国有色工程有限公司
陈成秀	厦门厦顺铝箔有限公司
武建强	中铝广西分公司
周 江	东北轻合金有限责任公司
赵 波	中国有色金属工业协会
赵翠青	中国有色金属工业协会
胡长平	中国有色金属工业协会
钟卫佳	中铝洛阳铜业有限公司
钟晓云	江西稀有稀土金属钨业集团公司
段玉贤	洛阳栾川钼业集团有限责任公司
胥 力	遵义钛厂
黄 河	中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
黄粮成	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
蒋开喜	北京矿冶研究总院
傅少武	株洲冶炼集团有限责任公司
瞿向东	中铝广西分公司

中国有色金属丛书



CNMS 学术委员会

主任：

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

常务副主任：

黄伯云 院士 中南大学

副主任(按姓氏笔划排序)：

于润沧	院士	中国有色工程有限公司
古德生	院士	中南大学
左铁镛	院士	北京工业大学
刘业翔	院士	中南大学
孙传尧	院士	北京矿冶研究院
李东英	院士	北京有色金属研究总院
邱定蕃	院士	北京矿冶研究院
何季麟	院士	宁夏东方有色金属集团有限公司
何继善	院士	中南大学
汪旭光	院士	北京矿冶研究院
张文海	院士	南昌有色冶金设计研究院
张国成	院士	北京有色金属研究总院
陈景	院士	昆明贵金属研究所
金展鹏	院士	中南大学
周廉	院士	西北有色金属研究院
钟掘	院士	中南大学
黄培云	院士	中南大学
曾苏民	院士	西南铝加工厂
戴永年	院士	昆明理工大学

委员(按姓氏笔划排序)：

卜长海	厦门厦顺铝箔有限公司
于家华	遵义钛厂
马保平	金堆城钼业集团有限公司
王辉	株洲冶炼集团有限责任公司
王斌	洛阳栾川钼业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑 莆	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战 凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高 顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖 明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限公司
戴云俊	锡矿山闪星锡业有限责任公司
黎 云	中铝贵州分公司

总序



有色金属是重要的基础原材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

A stylized, calligraphic signature in black ink, consisting of two characters: '康' (Kang) and '瑞' (Rui). The characters are written in a fluid, expressive style with varying line thicknesses and some overlapping strokes.

2009年3月

目 录



第1章 绪 论	1
第2章 铜及铜合金中合金相的晶体结构	5
2.1 金属晶体结构基本知识	5
2.1.1 晶体与非晶体	5
2.1.2 晶格、晶胞、晶格参数	5
2.1.3 典型的金属晶体结构	7
2.1.4 描述晶体结构特征的几个参数	8
2.1.5 晶面指数和晶向指数	10
2.1.6 晶体的原子堆垛方式和晶体中的间隙	14
2.2 铜合金中的相及其结构	18
2.2.1 固溶体	19
2.2.2 中间相(金属间化合物)	24
第3章 金属中晶体缺陷的基本概念	26
3.1 点缺陷	26
3.2 线缺陷——位错	27
3.2.1 位错的基本类型及特征	27
3.2.2 柏氏矢量	30
3.2.3 位错的运动	30
3.2.4 位错能量与位错线张力基本概念	32
3.2.5 位错与晶体缺陷的交互作用	33
3.3 面缺陷	34
3.3.1 表面	34
3.3.2 晶界	35
3.3.3 亚晶界	37
3.3.4 孪晶界	38
3.3.5 堆垛层错	38
3.3.6 相界	39

第 4 章 铜合金典型二元相图	41
4.1 二元相图基本知识	41
4.1.1 相律	41
4.1.2 二元相图表示方法及杠杆定律	41
4.1.3 二元铜合金相图基本类型	43
4.2 Cu - Ni 二元相图	43
4.2.1 相图分析	43
4.2.2 Cu - Ni 合金平衡凝固及组织	44
4.2.3 Cu - Ni 合金非平衡凝固及枝晶偏析	44
4.3 Cu - Ag 二元相图	46
4.3.1 相图分析	46
4.3.2 Cu - Ag 合金平衡凝固和组织	46
4.3.3 Cu - Ag 合金的非平衡凝固和组织	48
4.4 Cu - Zn 二元相图	50
4.4.1 包晶反应及其特点	50
4.4.2 相图分析	51
4.4.3 典型合金凝固及组织	52
4.5 Cu - Pb 二元相图	53
4.6 Cu - Mg 二元相图	54
4.7 Cu - Be 二元相图	54
4.8 Cu - Au 二元相图	56
4.9 Cu - Al 二元相图	57
第 5 章 三元相图	59
5.1 概述	59
5.2 三元相图的成分表示法	59
5.3 三组元在液态与固态都无限互溶的三元相图	61
5.3.1 相图的立体模型	61
5.3.2 等温截面	61
5.3.3 变温截面	62
5.4 简单三元共晶相图	63
5.4.1 相图的立体模型	63
5.4.2 相图的投影图	64
5.4.3 等温截面	65
5.4.4 垂直截面	65

5.5 其他类型的三元相图	66
5.5.1 固态有限溶解的三元共晶相图	66
5.5.2 具有包共晶四相平衡反应的三元相图	69
5.5.3 固态有限互溶并具有三元包晶反应的相图	72
5.6 三元相图的一些基本规律	72
5.6.1 根据液相投影图中单变量线的走向判定四相平衡反应类型	72
5.6.2 三元相图中三相平衡类型的区别与判断	73
5.6.3 三元相图垂直截面中四相平衡类型的区别与判断	74
5.7 铜合金三元相图举例	74
5.7.1 铜-银-锌相图	74
5.7.2 Cu-Sn-P 三元相图	77
第6章 铜及铜合金的凝固	79
6.1 金属凝固的基本规律	79
6.1.1 金属凝固的过冷现象	79
6.1.2 金属凝固的一般过程	80
6.2 晶核的形成	80
6.2.1 均匀形核	80
6.2.2 非均匀形核	83
6.2.3 形核率与过冷度的关系	84
6.3 晶核的长大	86
6.4 晶体长大后的形态	87
6.4.1 正温度梯度及其对晶体长大形态的影响	87
6.4.2 负温度梯度及其对晶体长大形态的影响	88
6.5 单相合金的凝固	90
6.5.1 溶质再分布及成分过冷	90
6.5.2 成分过冷对晶体长大形态的影响	93
6.6 铸锭的宏观组织与控制	94
6.6.1 三个晶区的形成	94
6.6.2 铸态组织的控制	96
6.7 铜合金凝固时的偏析与反偏析	99
6.7.1 显微偏析	99
6.7.2 宏观偏析	99

6.8 铜及铜合金的定向凝固与单晶制备	102
6.8.1 定向凝固与单晶制备技术	102
6.8.2 定向凝固铜合金及单晶	104
6.9 铜合金的快速凝固	105
6.9.1 快速凝固技术	105
6.9.2 快速凝固晶态合金的组织结构特点	107
6.9.3 快速凝固铜合金	108
第7章 铜合金的塑性变形	110
7.1 单晶体金属的塑性变形	110
1.1.1 滑移	110
1.1.2 孪生	117
1.1.3 其他变形方式	117
7.2 多晶体金属塑性变形特点	118
7.2.1 取向差效应	118
7.2.2 晶界对滑移的阻滞效应	119
7.2.3 晶粒大小对力学性能的影响	119
7.3 合金的塑性变形	121
7.3.1 单相固溶体合金的塑性变形	121
7.3.2 复相合金的塑性变形特点	123
7.4 塑料变形对金属组织和性能的影响	124
7.4.1 显微组织的变化	125
7.4.2 加工硬化	125
7.4.3 变形后金属中的残余应力	128
7.4.4 塑性变形对金属其他方面的影响	129
第8章 铜合金的回复与再结晶	130
8.1 冷变形金属在加热时组织性能变化的一般规律	130
8.2 铜合金的回复与低温退火	131
8.2.1 回复过程亚结构的变化与回复机制	131
8.2.2 回复阶段性能变化的倾向	133
8.2.3 铜合金的低温退火及低温退火硬化效应	134
8.3 铜及铜合金的再结晶	135
8.3.1 再结晶过程	137
8.3.2 再结晶温度	138
8.3.3 再结晶晶粒大小及再结晶全图	141

8.3.4 退火孪晶	144
8.4 晶粒长大	144
8.4.1 正常晶粒长大	145
8.4.2 反常晶粒长大(二次再结晶)	147
8.5 铜合金的织构	147
8.5.1 变形织构	148
8.5.2 再结晶织构	149
8.6 铜及铜合金的再结晶退火	150
8.7 铜合金的热加工	152
8.7.1 动态回复与动态再结晶	153
8.7.2 热加工对金属组织和性能的影响	155
8.7.3 铜合金热加工特性	155
8.8 超塑性	156
8.8.1 金属超塑性的基本特点	157
8.8.2 超塑性分类	157
8.8.3 微晶超塑性变形后的组织特征	158
8.8.4 微晶超塑性变形机制	158
8.8.5 超塑性的应用	159
第9章 铜合金中的固态相变	162
9.1 固态相变的基本特点	162
9.1.1 相界面	162
9.1.2 应变能	162
9.1.3 惯习面与位向关系	163
9.1.4 形成亚稳相(过渡相)	163
9.1.5 晶体缺陷在相变中的作用	164
9.2 脱溶转变	164
9.2.1 固溶处理	164
9.2.2 脱溶顺序	165
9.2.3 脱溶方式及组织变化	166
9.3 Spinodal 分解	167
9.4 共析转变	169
9.4.1 概述	169
9.4.2 Fe-C 合金中的共析转变	170
9.4.3 铜合金中的共析转变	172

9.5 马氏体相变和形状记忆效应	173
9.5.1 马氏体相变的基本特征	174
9.5.2 马氏体相变驱动力与相变温度	176
9.5.3 马氏体相变类型	176
9.5.4 超弹性和形状记忆效应	180
9.5.5 铜合金中的马氏体相变	181
第10章 铜合金的强化	185
10.1 固溶强化	185
10.2 细晶强化	187
10.3 形变强化(位错强化)	190
10.4 沉淀强化	191
10.4.1 沉淀强化机制	191
10.4.2 影响沉淀强化效果的因素	192
10.4.3 沉淀强化铜合金	193
10.5 弥散强化	193
10.5.1 概述	193
10.5.2 增强相选取原则及增强相种类	194
10.5.3 弥散强化铜合金复合方法分类	194
10.5.4 影响弥散强化效果的因素	195
10.5.5 Al_2O_3 弥散强化铜	196
10.6 纤维强化	198
参考文献	201

第1章 绪论

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的里程碑。所以历史学家以使用的材料作为人类发展的标志，把人类发展历史分为：石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代。随着人类文明的进步，18世纪以后钢铁冶金技术的进步和人工合成有机高分子材料的相继问世，都对人类社会的进步产生了巨大的推动作用。20世纪中叶以后，硅材料和计算机技术的飞速发展，使人类进入了信息时代，有人把它称之为“硅材料时代”。这些都充分说明材料对人类文明进步起了十分关键的作用。在20世纪70年代，人们把信息、材料、能源誉为当代文明的三大支柱，80年代以高技术群为代表的新技术革命又把新材料、信息技术和生物技术列为新技术革命的重要标志。总之，材料与国民经济建设、国防建设和人民生活息息相关，其重要性是不言而喻的。

材料除了具有上述的重要性之外，还具有多样性。材料种类繁多，特性各异，其分类方法也多种多样。按照材料的物理化学属性可分为：金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料以及不同类型材料组成的复合材料；按照材料的用途和特性来分，通常分为结构材料和功能材料；按照其具体的应用领域，又分为电子材料、航空航天材料、能源材料、核材料、生物材料、建筑材料等；另外还可根据材料生产和应用的规模及历史分为传统材料和新型材料。尽管材料可以进行上述各种分类，但这些分类方法并没有一个统一标准，也不是十分严格的。例如结构材料是以材料的力学性能为主，用以制造受力部件的材料；而功能材料则是以材料的物理化学性能，如磁、电、光、声、氧化、腐蚀、生物相容等特性为主，用以完成某一特定功能的材料。但是许多情况下，结构材料也要求具有一定的物理化学性能，如导电性、抗氧化和抗腐蚀性能等。一种材料可能既是结构材料又是功能材料。例如铁路电气化需要的架空导线铜合金，它既要求有较高的强度又要求高的导电性和耐磨性。传统材料和新型材料之间也没有明显的界限。例如传统的钢，由于采用了新的工艺技术和设备，明显地提高了性能成为细晶粒的超级钢就是一种新型材料。

在种类繁多的材料中，金属材料已有几千年的历史。我国是世界上最早制造、使用金属材料的国家之一。对许多出土文物的分析研究表明，早在4000多年前就使用了青铜器，使用铸铁和钢的历史也有3000多年的历史，例如河南安阳出土的重达875 kg重的鼎、湖北隋县出土的编钟、西安出土的青铜车马，都充分反映了当时中国冶金技术和制造工艺水平的高超；对辽阳三道壕出土的西汉宝剑进行金相分析表明，其组织和近代淬火的组织几乎没有区别，这说明2000多年前，我国对钢的热处理技术已达到惊人的水平。

随着人类文明的进步，到18世纪蒸气机的发明，19世纪电动机的出现，大大地推动了金属材料的快速发展。到20世纪，金属材料已成为结构材料的主体，同时各种金属功能材料也不断涌现。这一百多年来，人们对金属材料的生产 and 研究取得了巨大的成就，已经能够制造出适应各工业部门发展所需要的各种各样性能的结构材料和功能材料，积累了大量的经验资料，建立和发展了金属材料的许多基本理论。人们通过实践和总结发现，材料的性能与它们

的化学成分和生产工艺条件有关,因为不同成分和不同生产工艺制造出的金属材料,其内部组织、结构是不同的,所以其性能就会不同。例如人们很熟悉的黄铜是铜和锌的合金,当锌含量增加时,黄铜的强度增加,电阻率也增加,这就是由于合金成分的变化,其组织结构也随之发生变化的缘故。表 1-1 为几种黄铜的强度和电阻率。

表 1-1 几种黄铜的强度和电阻率

合金牌号	代号	Zn 含量/%	σ_b /MPa 退火态	室温电阻率/ $\mu\Omega\cdot m$
90 黄铜	H90	~ 10	200	0.040
85 黄铜	H85	~ 15	280	0.047
68 黄铜	H68	~ 32	320	0.064
62 黄铜	H62	~ 38	330	0.071
59 黄铜	H59	~ 41	390	0.072

对于同一成分的合金,如果热处理工艺或加工状态不同,其性能也差别很大。又以铜合金为例,68 黄铜在退火状态的抗拉强度约为 320 MPa,但冷变形态的抗拉强度可达 660 MPa;铍青铜 QBe1.7 在退火状态下的抗拉强度仅 400 MPa 左右,而经淬火时效以后抗拉强度可达 1 300 MPa 以上,这都是由于加工热处理状态不同,其内部组织结构产生了重要变化的结果。

以上简单的例子说明了材料的性能和它的化学成分、加工工艺、组织结构之间存在十分密切的关系。人们对生产实践和科学实验中所积累的大量资料,经过分析、总结和系统化,并进一步验证提高,逐步建立了一门独立的学科——金属学(或称物理冶金学),它就是研究金属材料的化学成分、加工制备工艺、内部组织结构、材料性能以及它们之间关系的科学。人们常常把材料的成分(Composition)、加工制备工艺(Processing)、组织结构(Structure)、性能(Properties)称之为材料的四个基本要素,并把这四个要素组成一个四面体,以表示它们之间的相互关系,见图 1-1。

我国科学院院士,著名材料科学家师昌绪老先生认为,材料的性能和使用效能并不是完全相同的概念,但它们有着特殊的联系。材料的使用效能是材料性能在使用条件下的表现,环境(如气氛、介质、温度等)对材能性能的影响很大,有些材料在一般环境下的性能良好,而在腐蚀介质下性能显著下降;有些材料在表面光滑时性能良好,当表面存在缺陷、划伤时性能大大下降,特别有些高强度材料表现尤为突出。因此把环境因素引入到工程材料中来十分重要,亦即材料应考虑 5 个基本要素。另外,材料的 5 个要素都有其相关的基本理论。根据基础理论建立模型,通过模型进行材料设计和工艺设计,以达到最优的性能和使用效能,并节约资源、减少污染、降低成本的最佳状态,这是材料科学与工程的最佳奋斗目标。因此师先生提出了一个六面体的材料要素图(见图 1-2)。理论处于六面体中心,表示 5 个要素和几个相关要素都需要基础理论的指导。这个六面体,十分全面的概述了材料的研究开发,生产使用中各种因素的相互关系。