

压力容器实用技术丛书

压力容器用材料及热处理

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

压力容器实用技术丛书

压力容器用材料及热处理

主编单位：兰州石油机械研究所

《压力容器实用技术丛书》编写委员会 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

压力容器用材料及热处理/《压力容器实用技术丛书》
编写委员会编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 11
(压力容器实用技术丛书)
ISBN 7-5025-6231-1

I. 压… II. 压… III. ①压力容器-化工材料
②压力容器-热处理 IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 109856 号

压力容器实用技术丛书
压力容器用材料及热处理
《压力容器实用技术丛书》编写委员会 编
责任编辑: 张兴辉
文字编辑: 张燕文
责任校对: 洪雅姝
封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京永鑫印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 38 $\frac{3}{4}$ 字数 966 千字
2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6231-1/TH·247
定 价: 90.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《压力容器实用技术丛书》编写委员会

主任委员 魏 锋

副主任委员 涂善东 刘福录 张延丰 寿比南

委 员 (按姓氏笔画排序)

马耀文	刘福录	姜国锋	寿比南	杨永福	李世玉
李志义	吴树雄	沈 钢	宋小江	宋继红	张 钢
张亚明	张延丰	张红光	张迎凯	张建荣	陈 钢
陈建玉	陈建俊	林树青	段 瑞	俞树荣	费继增
徐积源	秦晓钟	高继轩	涂善东	谢铁军	裴德余
潘家祯	魏 锋				

序

随着科学技术的进步和工业生产的发展,特别是国民经济持续稳定的发展,压力容器已经广泛应用于化工、石油化工、冶金、国防等诸多工业领域及人们的日常生活中,且数量在不断增加,高参数大容积的设备也越来越多。这就对容器的设计、材料、制造、现场组焊、检验、监督、使用、防腐、维护、修理、管理等诸多环节提出了越来越高的要求。压力容器又是一种多学科、跨学科、综合性很强的学科,一台压力容器从参数确定到投入正常使用,要通过上述各环节及相关各部门的各类工程技术人员的共同努力才能实现。要使各类工程技术人员和管理使用者全面掌握容器的各种知识是非常困难的。《压力容器实用技术丛书》就是从这一客观实际需要出发,将容器的各种实用技术做一全面介绍,以满足不同岗位,不同部门的工程技术人员和管理者、使用者对其相关知识,特别是非本职、非岗位的其他相关知识的了解和掌握,以不断提高我国容器的建造和应用水平。

本丛书共分六册,第一册《压力容器设计知识》,第二册《压力容器用材料及热处理》,第三册《压力容器制造和修理》,第四册《压力容器检验及无损检测》,第五册《压力容器安全监察与管理》,第六册《压力容器腐蚀与控制》,涉及容器的全过程和方方面面知识。这是我国第一套有关压力容器实用技术的综合性丛书。

本丛书力求重点突出实用性和全面性,对常用标准管辖下的设计、制造、材料、检验、防腐等内容进行简化处理,对不常用的和标准中不易查找的内容和背景知识做详细介绍,力求写细、写透、写全。

本丛书还力求突出新颖性和公正科学性,除介绍现有知识内容外,还介绍许多新技术、新材料、新方法、新工艺、新标准。站在全国全行业的立场,公正、科学地反映容器的先进技术水平。

本丛书力求体现国内最新技术和国外技术的发展,邀请了国内 50 多个单位的近百名知名专家和学者参加编审,遍及容器教学、研究、设计、制造、监督、检验、使用、防腐等各个方面,反映国内的最新技术内容和研究成果以及国外容器技术的发展和趋势。

本丛书从编写形式上还力求突出适应读者需求和便于查找的特点,对较深较难的理论性问题做通俗化处理,重点介绍相关知识和背景知识,提出相关数据,将国外技术内容与国内技术进行对比。

本丛书由兰州石油机械研究所主编,刘福录教授级高工负责全套丛书的策划和组织工作。各册的负责人为:第一册朱保国,第二册高守成,第三册王增新,第四册王纪兵,第五册陈长宏,第六册任凌波。慕瑞峰同志负责主要的文字编辑工作。

由于本丛书篇幅浩大,编者甚多,各册和各章节内容的协调和取舍等方面,难免有不妥之处,而且限于编者的水平,错误之处不可避免,恳请广大读者批评指正。

《压力容器实用技术丛书》编写委员会

2003 年 7 月 6 日

前 言

压力容器广泛用于炼油、化工、石油化工、能源、航空航天、核工业、轻工、食品等工业以及民用天然气、液化气等领域。压力容器的设计、制造、检验、验收和使用都必须遵循国家(或行业)相应的法规、规程和标准。制造压力容器除大量使用碳素钢和低合金钢外,还常常选用高合金不锈钢、耐热钢、有色金属(如铜、铝、钛、铅及其合金)和特殊合金(如高温合金、难熔金属及其合金、镍及镍基耐蚀合金等),有时还选用铸钢、铸铁和非金属材料(如玻璃钢、工程塑料、石墨、陶瓷等)。压力容器的选材问题,是一个非常复杂而又庞大的问题,涉及的材料品种繁多,特点各异,既包括主体材料(各类钢、有色金属、非金属材料),又包括密封材料(非金属材料 and 金属材料)、防腐或隔热涂层(各种涂料和各类纤维及其制品)、防腐耐蚀衬里(不锈钢、有色金属、特殊合金和非金属材料)等。故压力容器的设计、制造、检验、使用行业的技术及管理人员均需对压力容器用材料及热处理有一定程度的了解和掌握。

本书为《压力容器实用技术丛书》之一。在编写中,我们努力写全、写透,为读者提供一本材料品种齐全、实用性强、数据新而可靠的压力容器用材料的工具书。编写中对理论性较强的金属材料基础知识和金属材料的热处理,只做了简要介绍,对人们较为熟悉且容易查找到资料的碳素钢和低合金钢做了简化处理,尽可能多地提供一些新的标准数据,以便于读者查阅、选用。对各类不锈钢、特殊合金及焊接材料则作了较为详尽的介绍。并尽可能地提供一些国外相关内容及数据,以供读者参考。本书可供从事压力容器设计、制造、检验和管理的工程技术人员使用,也可作为与压力容器相关人员了解压力容器用材料的重要参考资料。

本书共分10章,各章的编写人员是:第1章由马耀文(中国石油第二建设公司)编写;第2章由薛巍(兰州兰石机械设备有限公司)和王顺花(兰州交通大学)编写;第3章由谢良法、常跃峰、孙重安、李经涛、赵彦灵、龙杰(舞阳钢铁公司钢铁研究所)编写;第4章由张亚明、高平(山西太钢不锈钢股份有限公司)编写;第5章由彭斌、姜惠敏、罗剑秋、黄苍碧、邹红(中国成达工程公司)编写;第6章由杨永福、艾建玲(西部金属材料股份有限公司)和薛祥义、石卫东(西北锆管公司)编写;第7章由吴树雄(珠海雅各臣发展有限公司)编写;第8章由高守成(兰州石油机械研究所)和张红光(兰州兰石机械设备有限公司)编写;第9章由彭斌、姜惠敏、罗剑秋、黄苍碧、邹红编写;第10章由王增新、李晓辉(兰州兰石机械设备有限公司)编写。全书由高守成主编,秦晓钟、刘福录、王增新、杨光起审定。本书在编写过程中,得到了中国石油第二建设公司、兰州兰石机械设备有限公司、兰州交通大学、舞阳钢铁公司、山西太钢不锈钢股份有限公司、中国成达工程公司、西部金属材料股份有限公司、西北锆管公司、珠海雅各臣发展有限公司等单位的大力支持和协助,在此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评、指正。

编者

2004年5月于兰州

目 录

第 1 章 金属材料的基础知识	1
1.1 概述	1
1.2 金属材料的基本概念	1
1.2.1 金属材料的晶体结构	1
1.2.2 金属材料的分类方法	5
1.2.3 金属材料的表示方法	6
1.2.4 合金元素在钢中的作用	6
1.3 金属材料的组织	11
1.3.1 钢铁材料的组织	11
1.3.2 有色金属及其合金的组织	14
1.4 金属材料的性能	17
1.4.1 物理性能	18
1.4.2 耐腐蚀性能	20
1.4.3 力学性能	22
1.4.4 工艺性能	25
1.4.5 压力容器对材料的基本要求	26
参考文献	27
第 2 章 金属材料的热处理	28
2.1 概述	28
2.1.1 热处理的意义和作用	28
2.1.2 热处理的分类	28
2.2 钢的热处理基础知识	29
2.2.1 铁碳合金相图	29
2.2.2 钢的加热转变	32
2.2.3 钢的冷却转变	35
2.3 压力容器用钢的热处理	38
2.3.1 退火	38
2.3.2 正火	39
2.3.3 淬火	40
2.3.4 回火	41
2.3.5 调质	42
2.3.6 稳定化处理	42
2.3.7 固溶化处理	42
2.4 压力容器用有色金属的热处理	43
2.4.1 铜及铜合金的热处理	43

2.4.2 铝及铝合金的热处理	43
2.4.3 钛及钛合金的热处理	44
参考文献	44
第3章 碳素钢和低合金钢	45
3.1 概述	45
3.1.1 国内现状和发展趋势	45
3.1.2 基本概念	46
3.1.3 分类	46
3.2 碳素钢	47
3.2.1 特点与应用	47
3.2.2 我国碳素钢的化学成分	47
3.2.3 我国碳素钢的力学性能	48
3.2.4 国外碳素钢的钢号与化学成分	53
3.2.5 国外碳素钢的力学性能	54
3.3 低合金结构钢	56
3.3.1 特点与应用	56
3.3.2 我国常见低合金钢的化学成分	56
3.3.3 我国常见低合金钢的力学性能	60
3.3.4 国外常见低合金钢的化学成分	62
3.3.5 国外常见低合金钢的力学性能	63
3.4 合金结构钢与耐热钢	65
3.4.1 特点与应用	65
3.4.2 我国常用合金结构钢与耐热钢的化学成分	65
3.4.3 我国常用合金结构钢与耐热钢的力学性能	68
3.5 低温钢	76
3.5.1 特点与应用	76
3.5.2 我国低温钢的化学成分	77
3.5.3 我国低温钢的力学性能	77
3.5.4 国外低温钢的化学成分	78
3.5.5 国外低温钢的力学性能	82
3.6 耐腐蚀钢	86
3.6.1 特点与应用	86
3.6.2 我国耐候钢的化学成分	87
3.6.3 我国耐候钢的力学性能	88
3.6.4 国外耐腐蚀钢的化学成分	88
3.6.5 国外耐腐蚀钢的力学性能	89
3.7 压力容器常用钢种的物理、高温力学和焊接性能	91
参考文献	95
第4章 不锈钢	96
4.1 概述	96

4.1.1	不锈钢的概念	96
4.1.2	不锈钢的发展	97
4.1.3	不锈钢的腐蚀形式	100
4.1.4	合金元素对不锈钢性能和特性的影响	100
4.2	奥氏体不锈钢	102
4.2.1	常见钢种的化学成分与性能	102
4.2.2	奥氏体不锈钢的基本组织形态	153
4.2.3	奥氏体不锈钢的适用环境与基本用途	156
4.3	铁素体不锈钢	159
4.3.1	常用铁素体不锈钢的钢号、化学成分和性能特点	159
4.3.2	铁素体不锈钢的基本组织形态	183
4.3.3	铁素体不锈钢的适用环境与基本用途	185
4.4	马氏体不锈钢	187
4.4.1	常用马氏体不锈钢的钢号、化学成分和性能特点	187
4.4.2	马氏体不锈钢的基本组织形态	212
4.4.3	马氏体不锈钢的适用环境和基本用途	215
4.5	双相不锈钢	217
4.5.1	常用双相不锈钢的钢号、化学成分和性能特点	217
4.5.2	铬镍双相不锈钢的基本组织形态	248
4.5.3	双相不锈钢的适用环境与基本用途	249
4.6	超级不锈钢	250
4.6.1	超级双相型不锈钢	250
4.6.2	超级马氏体不锈钢	251
4.7	压力容器用不锈钢的选用	255
4.7.1	典型钢种介绍	255
4.7.2	压力容器用不锈钢的选择原则	256
4.7.3	用不锈钢制造高温压力容器的注意事项	270
	参考文献	283
第5章	有色金属	284
5.1	概述	284
5.2	铝及铝合金	284
5.2.1	简介	284
5.2.2	分类	284
5.2.3	物理性能与冶金性能	285
5.2.4	化学成分与力学性能	286
5.2.5	冷、热加工性能	289
5.2.6	焊接性能	290
5.2.7	耐腐蚀性能	291
5.3	铜及铜合金	293
5.3.1	简介	293

5.3.2	分类	293
5.3.3	物理性能与冶金性能	293
5.3.4	化学成分与力学性能	294
5.3.5	冷、热加工性能	298
5.3.6	焊接性能	298
5.3.7	耐腐蚀性能	299
5.4	钛及钛合金	299
5.4.1	简介	299
5.4.2	分类	300
5.4.3	物理性能与冶金性能	301
5.4.4	化学成分与力学性能	302
5.4.5	冷、热加工性能	303
5.4.6	焊接性能	304
5.4.7	耐腐蚀性能	304
5.5	其他有色金属	305
5.5.1	简介	305
5.5.2	铅及铅合金	305
5.6	复合板	307
5.6.1	简介	307
5.6.2	分类	307
5.6.3	焊接性能	309
5.6.4	用途	310
参考文献		310
第6章 特殊合金		311
6.1	概述	311
6.2	高温合金	312
6.2.1	种类	312
6.2.2	化学成分和力学性能	315
6.2.3	特性、用途和使用范围	327
6.3	纯镍及镍基耐蚀合金	334
6.3.1	中国镍及镍合金化学成分和性能	334
6.3.2	美国镍及镍合金	334
6.3.3	德国镍及镍合金	334
6.3.4	英国镍及镍合金	338
6.3.5	法国镍及镍合金	338
6.3.6	日本镍及镍合金	338
6.3.7	特性、用途和使用范围	372
6.4	难熔合金	386
6.4.1	钨及钨合金	386
6.4.2	钼及钼合金	388

6.4.3 钽及钽合金	391
6.4.4 铌及铌合金	396
6.4.5 锆及锆合金	400
参考文献	405
第7章 焊接材料	406
7.1 概述	406
7.1.1 焊接材料分类	406
7.1.2 压力容器对焊接材料的基本要求	406
7.1.3 焊接材料选用原则	408
7.1.4 焊接材料的质量管理、保管和检测	409
7.1.5 焊接材料的发展现状和趋势	411
7.2 焊条	413
7.2.1 组成和作用	413
7.2.2 分类	414
7.2.3 型号和牌号	416
7.3 埋弧焊用焊丝和焊剂	448
7.3.1 焊丝	448
7.3.2 焊剂	449
7.4 气体保护焊用焊丝和气体	475
7.4.1 实芯焊丝	475
7.4.2 药芯焊丝	481
7.4.3 气体	500
7.5 其他焊接材料	506
7.5.1 钢带	506
7.5.2 钎焊用钎料和钎剂	507
7.5.3 钨极	512
7.6 焊接材料的选用	512
7.6.1 碳钢、低合金钢焊材的选用	513
7.6.2 不锈钢焊材的选用	521
参考文献	526
第8章 铸铁和铸钢	527
8.1 概述	527
8.1.1 铸造的特点和发展趋势	527
8.1.2 用铸铁、铸钢制造压力容器的规定	529
8.2 铸铁	530
8.2.1 铸铁的特性	530
8.2.2 铸铁牌号的表示方法	530
8.2.3 铸铁件热处理状态的名称与代号	532
8.2.4 灰铸铁	533
8.2.5 可锻铸铁	536

8.2.6 球墨铸铁	537
8.2.7 高硅耐蚀铸铁	540
8.3 铸钢	541
8.3.1 铸钢的特点	541
8.3.2 铸钢牌号的表示方法	541
8.3.3 铸钢件的热处理	542
8.3.4 一般工程用铸造碳钢	543
8.3.5 焊接结构用碳素铸钢	545
8.3.6 低合金铸钢	546
8.3.7 耐热铸钢	550
8.3.8 不锈钢耐酸铸钢	552
参考文献	556
第9章 非金属材料及其他	557
9.1 概述	557
9.2 涂料	557
9.2.1 品种	557
9.2.2 性能和用途	558
9.3 玻璃纤维增强塑料	560
9.3.1 玻璃纤维的品种	560
9.3.2 树脂的品种	562
9.3.3 玻璃钢的耐腐蚀性能与用途	563
9.4 工程塑料	564
9.4.1 种类	564
9.4.2 物理性能	565
9.4.3 耐腐蚀性能与用途	565
9.5 橡胶	567
9.5.1 品种	567
9.5.2 性能	567
9.5.3 用途	568
9.6 石墨	569
9.6.1 品种	569
9.6.2 性能	569
9.6.3 用途	569
9.7 陶瓷	570
9.8 石棉及其制品	571
9.8.1 石棉板	571
9.8.2 石棉布	572
9.8.3 石棉盘根	572
9.8.4 石棉片	572
9.9 保温隔热材料	572

9.9.1 保温隔热材料的分类与基本性能	572
9.9.2 常用保温隔热材料的选择方法	573
9.10 填料	573
9.11 工业用网	573
参考文献	574
第10章 相关标准及参考资料	575
10.1 压力容器用材料标准目录	575
10.1.1 有关国家标准及我国国家、行业、专业标准名称和代号	575
10.1.2 国内压力容器用材料标准目录	576
10.1.3 常用国外标准目录	578
10.2 压力容器用焊接材料标准目录	579
10.2.1 国内外常用焊条、焊丝、焊剂标准代号及名称对照	579
10.2.2 国内其他焊接材料标准目录	582
10.3 金属材料常用参考资料	582
10.3.1 有关元素的物理性质	582
10.3.2 常用材料密度	585
10.4 有关单位换算资料	586
10.4.1 法定计量单位	586
10.4.2 常用法定计量单位与非法定计量单位换算	587
10.4.3 各种硬度值近似换算	589
10.4.4 应力单位换算	590
10.4.5 冲击功单位换算	598
10.4.6 温度换算	600
10.4.7 长度单位换算	603

第 1 章 金属材料的基础知识

1.1 概 述

金属材料普遍用于工农业生产和人们的日常生活中，在现代工程材料中占主导地位。金属材料广泛应用于民用工业，如机械制造、农业机械、交通运输、仪器仪表、炼油及化工设备、电机电器等，就是在国防工业，如枪炮、坦克、飞机、军舰、火箭、导弹、宇宙飞船、核动力装置等常规和尖端武器方面，也均离不开大量的、高性能的金属材料。金属材料之所以能获得如此广泛的应用，不仅是由于其来源丰富，而且还由于其具有优良的使用性能和工艺性能。金属材料在使用条件下表现的性能称为使用性能，包括物理、化学及力学性能。其在生产加工过程中所表现的性能称为工艺性能，包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能等。

在压力容器制造业中，金属材料也具有其他材料无法替代的地位和作用。压力容器对材料要求很高，如高强度、高韧性、优良的耐腐蚀性能及工艺性能等。对材料的较高要求是推动压力容器用材不断发展的基本动力，如在冶金技术方面，形成了炉外精炼、真空处理、连续铸锭、控轧工艺、微合金化等技术，使压力容器用钢的性能得到了显著提高，主要是大大提高了钢的洁净度，降低了杂质和气泡含量，精确控制合金成分和钢的组织结构，从而得到了良好的压力容器用钢，进而确保了产品在服役期内安全可靠运行。

1.2 金属材料的基本概念

1.2.1 金属材料的晶体结构

金属材料在固态时通常都是晶体，它们的许多特性都与其结晶状态有关。要了解金属材料内部的微观构造，就必须首先掌握其晶体构造情况，包括晶体中原子是如何相互作用和结合起来的，原子的聚集状态和分布规律，各种晶体的特点和彼此之间的差异等。

1.2.1.1 晶体学基础

(1) 晶体与非晶体

固态物质按其原子（或分子）的聚集状态分为两大类，即晶体与非晶体。虽然自然界的许多晶体具有规则的外形（如天然金刚石、结晶盐、水晶等），但是晶体的外形不一定是规则的，晶体是否具有规则的外形与其形成的条件有关，如果条件不具备，其外形也就变得不规则。所以，区分晶体与非晶体不能根据他们的外观判断，而应从其内部的原子排列情况来确定。晶体中原子（或分子）在三维空间有规则地周期性重复排列，而非晶体就不具有这一特点，这是两者的根本区别。

显然，气体和液体都是非晶体。在液体中，原子（或分子）也处于紧密聚集的状态，但不存在长程的周期性排列。固态的非晶体实际上是一种过冷状态的液体，只是其物理性质不同于通常的液体而已。玻璃就是一个典型的例子，故往往将非晶态的固体称为玻璃体。从液态到非晶态固体的转变是逐渐过渡的，没有明显的凝固点，加热非晶态固体时也无明显的熔点；而液体转变为晶体则是突变的，有一定的凝固点和熔点。非晶体的另一特点是沿任何方向测定其性

能，所得结果都是一致的，不因方向而异，称为各向同性或等向性；晶体就不是这样，沿着一个晶体的不同方向所测得的性能并不相同（如导电性、导热性、热膨胀性、弹性、强度等），表现出或大或小的差异，称为各向异性或异向性。晶体的异向性是因为其原子的规则排列而造成的。

非晶体在一定条件下可转化为晶体。例如，玻璃经高温长时间加热后能形成晶态玻璃；而通常呈晶体的物质如果将其从液态快速冷却下来也可能得到非晶体。金属因其晶体结构比较简单，很难阻止其结晶过程，故通常得不到非晶态固体，但近些年来通过采用特殊的制备方法和设备，已能获得非晶态的金属和合金。

由一个核心（称为晶核）生长而成的晶体称为单晶体。在单晶体中，原子都是按同一取向排列的。一些天然晶体如金刚石、水晶等都是单晶体；现在也能够人工培育制造出多种单晶体，如半导体工业用的单晶硅和锗，激光技术中用的红宝石和钇铝石榴石，以及金属和合金单晶等。但是金属材料通常是由许多不同位相的小晶体所组成，称为多晶体。这些小晶体往往呈颗粒状，不具有规则的外形，故称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。多晶体材料一般不显示出各向异性，这是因为其包含大量的彼此位相不同的晶粒，虽然每个晶粒有异向性，但整块金属的性能则是它们性能的平均值，故表现为各向同性。在某些条件下，如定向凝固、特定的轧制退火等，使各晶粒的位向趋于一致，则其异向性又会显示出来。

(2) 空间点阵

① 空间点阵的概念 为了便于研究晶体中原子或分子的排列情况，可把它们抽象为规则排列于空间的无数个几何点，这些点可以是原子或分子的中心，也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心，但各个点的周围环境都必须相同。这种点的空间排列称为空间点阵，简称点阵，点阵中的点称为阵点或结点。在表达空间点阵的几何图形时，为了观察方便起见，可作许多平行的直线把阵点连接起来，构成三维的几何构架，如图 1-1 所示。显然，在某一空间点阵中，各阵点在空间的位置是一定的，而通过阵点所作的空间格架则因直线的取向不同而有多种形式。

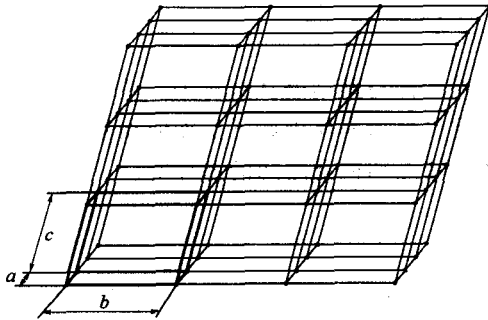


图 1-1 空间点阵的一部分

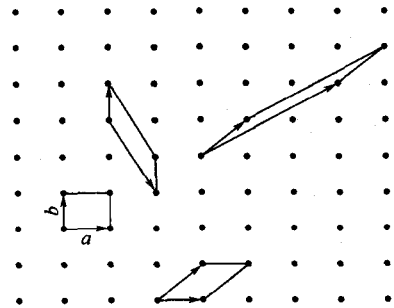


图 1-2 在点阵中选取晶胞

② 晶胞 从图 1-1 可以看出，位于同一直线上的阵点，每隔一个相等的距离就重复出现；同样，位于同一平面上的阵点构成了二维的点阵平面，将点阵平面沿一定方向平移一定距离，其阵点也具有重复性。总之，由于各阵点的周围环境相同，空间点阵具有周期重复性。因此，为了说明点阵排列的规律和特点，可在点阵中取出一个具有代表性的点阵单元（通常是取一个最小的平行六面体）作为点阵的组成单元，称为晶胞。在图 1-1 的左下方以粗黑线标出的平行六面体就是这个点阵的晶胞。可见，将晶胞作三维的重复堆砌就构成了空间点阵。同一空间点阵可因选取方式不同而得到不相同的晶胞，图 1-2 示出在一个二维点阵中取出的不同晶胞。为此，要求在选晶胞时应能尽量反映出该点阵的对称性，一般是选取只在每个角上有一阵点的最

小平行六面体作为晶胞，称为初级晶胞或简单晶胞。有时为了更好的表现出点阵的对称性，也可不取简单晶胞而使晶胞中心和面的中心也存在有阵点，如体心（在六面体的中心有一阵点）、面心（在六面体的每个面中心有一阵点）或底心（在上、下底中心个有一阵点）的晶胞。

通过晶胞角上的某一阵点（往往取左下角后面一点），沿其三个棱边作坐标轴 X 、 Y 、 Z （称为晶轴），则此晶胞就可由其三个棱边的边长 a 、 b 、 c （称为点阵常数）、几晶轴之间的夹角 α 、 β 、 γ 这 6 个参数完全表达出来，如图 1-3 所示。事实上，采用 3 个点阵矢量 a 、 b 、 c 来描述晶胞将更为方便。这 3 个矢量不仅确定了晶胞

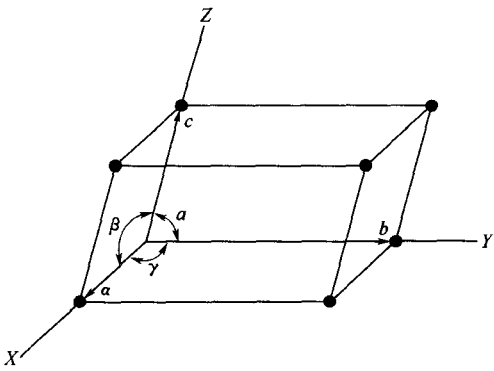


图 1-3 晶胞、晶轴和点阵矢量

的形状和大小，而且完全确定了此空间点阵，只要任选一个阵点为原点，以这 3 个矢量作平移（平移的方向和单位距离由点阵矢量所确定），就可以确定空间点阵中任一个阵点的位置。

$$r_{uvw} = u a + v b + w c \tag{1-1}$$

式中 r_{uvw} ——从原点到某一阵点的矢量；

u 、 v 、 w ——沿三个点阵矢量的平移量，亦即该阵点的坐标。

③ 晶系 在晶体学中，常按晶系对晶体进行分类，这是根据其晶胞外形即棱边长度之间的关系和晶轴夹角情况而加以归类的，故只考虑 a 、 b 、 c 是否相等， α 、 β 、 γ 是否相等和它们是否呈直角等因素，而不涉及晶胞中原子的具体排列情况。在这种情况下，晶系只有 7 种类型（表 1-1）所有的晶体均可归纳在这 7 个晶系中。

表 1-1 晶系

晶 系	棱边长度及夹角关系	举 例
三 斜	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	K_2CrO_7
单 斜	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$\beta-S, CaSO_4 \cdot 2H_2O$
正 交	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\alpha-S, Ga, Fe_3C$
六 方	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	$Zn, Cd, Mg, NiAs$
菱 方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Sb, Bi
四 方(正方)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$\beta-Sn, TiO$
立 方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Fe, Cr, Cu, Ag, Au

④ 布拉菲点阵 空间点阵可有多少种排列形式，按照“每个阵点的周围环境相同”的要求，布拉菲（A·Bravais）首先用数学方法确定，只能有 14 种空间点阵。这 14 种空间点阵以后就被称为布拉菲点阵，表 1-2 则把它们归属于 7 个晶系。

表 1-2 空间点阵与晶系

序 号	点阵类型	晶 系	序 号	点阵类型	晶 系
1	简单三斜	三 斜	8	简单六方	六 方
2	简单单斜	单 斜	9	菱形(三角)	菱 方
3	底心单斜		10	简单四方	四方(正方)
4	简单正交	正 交	11	体心四方	
5	底心正交		12	简单立方	立 方
6	体心正交		13	体心立方	
7	面心正交		14	面心立方	

1.2.1.2 金属的晶体结构

前面讨论了晶体结构的共性，即晶体的点阵类型、晶系等问题，这里结合元素周期表，给出元素的晶体结构，这有助于全面了解元素的晶体结构。按晶体结构类型，周期表中的元素可分为三大类，见表 1-3。

表 1-3 周期表中各元素的晶体结构

I A		II A												III A	IV A	V A	VI A	VII A	0
3	4											5	6	7	8	9	10		
A2 A1 A3	(A2) A3											H T R	R H A4		C (R) C		A1		
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
11	12											13	14	15	16	17	18		
A2 A3	A3												A4		C C C	O M R	A1 A3 A2		
Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	VIII	VIII	I B	II B	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
		(A2) A2 A1	A3 A2 A3	A2 A3	(A1) A2	A2 C C	A2 A1 A2	A2 A1 A3	A1 A3	A1	A1	A3	O	A4	A7	A8 M	O A1		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
	A2 A3 A2	A2 A3 A1	A2 A3	A2 A3	A2	A2	A3	A3	A1	A1	A1	A3	A6	A5 A4	A7	A8	O A1		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
	A2 (T) (H) A2	A2 A1 H	A2 A3	A2 A3	A2	A2	A3	A3	A1	A1	A1	R T	A2 A3	A1	A7	R C			
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Cs	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89																	
Fr	Ra	Ac																	
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
			A2 A1 H	A2 H	A2 H		(A2) R	A2	(A2) A3	(A2) A3	() A3	() A3	A3	A3	A3	A2 A1	() A3		
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tu	Yb	Lu			
			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
							A2 T A1 O M M												
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

注：A1 表示面心立方；A2 表示体心立方；A3 表示密排六方；A4 表示金刚石型立方；A5 表示体心正方；A6 表示面心正方；A7 表示菱方；A8 表示三角；H 表示六方（通常是 ABAC……密堆）；R 表示菱方（与 A7 不同）；O 表示正交；C 表示复杂立方；T 表示正方；M 表示单斜；() 表示未定。