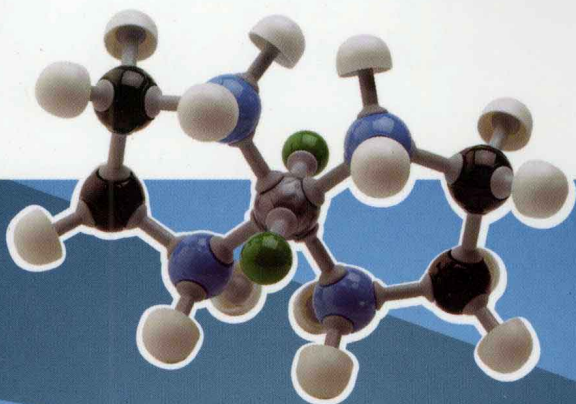


材料科学与工程实验系列教材

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林
总主审 王明智 翟玉春 肖纪美



材料科学与工程实验教程

(金属材料分册)

主 编 潘清林 孙建林
副主编 黄继武 杨道媛 张永宏
主 审 汪明朴 崔占全

荟材料实验之经典 拓学生创新之潜力

数十所高校参与、多家出版社联合打造
材料科学与工程实验教学研究会倾力推荐

冶金工业出版社
国防工业出版社

北京大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

材料科学与工程实验系列教材

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林
总主审 王明智 翟玉春 肖纪美

材料科学与工程实验教程

(金属材料分册)

主 编	中 南 大 学	潘清林	北京科技大学	孙建林
副主编	中 南 大 学	黄继武	郑 州 大 学	杨道媛
	陕 西 理 工 学 院	张永宏		
主 审	中 南 大 学	汪明朴	燕 山 大 学	崔占全

北 京

冶金工业出版社
北京大学出版社
国防工业出版社
哈尔滨工业大学出版社

2011

内 容 提 要

本书汇编了材料科学与工程专业系列课程典型的和共性的实验,主要包括材料科学基础(金属学)、金属熔炼与铸造、金属塑性加工、金属材料热处理、材料力学性能、材料物理性能、金属腐蚀与防护、X射线衍射及电子显微分析(材料结构分析)等专业主干课程的79个实验。实验内容以全面提高学生实验技能的常规基础实验为主,按照材料科学基础实验、材料工程基础实验、材料性能检测实验、材料结构与成分分析实验四大部分进行分模块排序;此外,根据材料科学与工程专业发展的需要,又特意编写了以培养学生科学研究能力和创新能力为主的综合性、设计性与研究创新性实验。本教材旨在为材料类专业课程的实验教学提供指导。

本书可作为高等院校材料类专业,如材料学、材料物理、材料加工工程、材料成形与控制工程、材料化学等相关专业本科生系列课程实验教学的教材,也可供有关教师、研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学与工程实验教程. 金属材料分册/潘清林, 孙建林主编.
—北京: 冶金工业出版社, 2011. 8
材料科学与工程实验系列教材
ISBN 978-7-5024-5669-6

I. ①材… II. ①潘… ②孙… III. ①金属材料—材料试验—
高等学校—教材 IV. ①TB302

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第177952号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 尚海霞 常国平 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5669-6

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011年8月第1版, 2011年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.75印张; 548千字; 347页

43.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《材料科学与工程实验系列教材》

总编委会

总主编 崔占全 潘清林 赵长生 谢峻林

总主审 王明智 翟玉春 肖纪美

《材料科学与工程实验系列教材》

编写委员会成员单位

(按汉语拼音排序)

北方民族大学、北华航天工业大学、北京科技大学、成都理工大学、大连交通大学、大连理工大学、东北大学、东北大学秦皇岛分校、哈尔滨工业大学、河南工业大学、河南科技大学、河南理工大学、佳木斯大学、江苏科技大学、九江学院、兰州理工大学、南昌大学、南昌航空大学、清华大学、山东大学、陕西理工大学、沈阳工业大学、沈阳化工大学、沈阳理工大学、四川大学、太原科技大学、太原理工大学、天津大学、武汉理工大学、西南石油大学、燕山大学、郑州大学、中国石油大学(华东)、中南大学

《材料科学与工程实验系列教材》

出版委员会

(除出版本书出版社外, 其他出版社按汉语拼音排序)

冶金工业出版社 曹胜利 张 卫 刘小峰

北京大学出版社 杨立范 林章波 童君鑫

国防工业出版社 邢海鹰 辛俊颖

哈尔滨工业大学出版社 黄菊英 杨 桦 许雅莹

序 言

近年来，我国高等教育取得了历史性突破，实现了跨越式的发展，高等教育由精英教育变为大众化教育。以国家需求与社会发展为导向，走多样化人才培养之路是今后高等教育教学改革的一项重要内容。

作为高等教育教学内容之一的实验教学，是培养学生动手能力、分析问题、解决问题能力的基础，是学生理论联系实际的纽带和桥梁，是高等院校培养创新开拓型和实践应用型人才的重要课堂。因此，实验教学及国家级实验示范中心建设在高等学校建设上至关重要，在高等院校人才培养计划中亦占有极其重要的地位。但长期以来，实验教学存在以下弊病：

1. 在高等学校的教学中，存在重理论轻实践的现象，实验教学长期处于从属理论教学的地位，大多没有单独设课，忽视对学生能力的培养；

2. 实验教师队伍建设落后，师资力量匮乏，部分实验教师由于种种原因而进入实验室，且实验教师知识更新不够；

3. 实验教学学时有限，且在教学计划中实验教学缺乏系统性，为了理论教学任务往往挤压实验教学课时，实验教学没有被置于适当的位置；

4. 实验内容单调，局限在验证理论；实验方法呆板、落后，学生按照详细的实验指导书机械地模仿和操作，缺乏思考、分析和设计过程，被动地重复几年不变的书本上的内容，整个实验过程是教师抱着学生走；设备缺乏且陈旧，组数少，大大降低了实验效果；

5. 整个高等学校存在实验室开放程度不够，实验室的高精尖设备学生根本没有机会操作，更谈不上学生亲自动手及培养其分析问题与解决问题的能力。

这样，怎么能培养出适应国家“十二五”发展规划以及建设“创新型

国家”需求的合格毕业生？

“百年大计，教育为本；教育大计，教师为本；教师大计，教学为本；教学大计，教材为本。”有了好的教材，就有章可循，有规可依，有鉴可借，有路可走。师资、设备、资料（首先是教材）是高等院校的三大教学基本建设。

为了落实教育部“质量工程”及“卓越工程师”计划，建设好材料类特色专业与国家级实验示范中心，实现培养面向21世纪高等院校材料类创新型综合性应用人才的目的，国内涉及材料科学与工程专业实验教学的40余所高校及国内四家出版社100多名专家、学者，于2011年1月成立了“材料科学与工程实验教学研究会”。“研究会”针对目前国内材料类实验教学的现状，以提升材料实验教学能力和传输新鲜理念为宗旨，团结全国高校从事材料科学与工程类实验教学的教师，共同研究提高我国材料科学与工程类实验教学的思路、方法，总结教学经验；目标是，精心打造出一批形式新颖、内容权威、适合时代发展的材料科学与工程系列实验教材，并经过几年的努力，成为优秀的精品课程教材。为此，成立“实验系列教材编审委员会”，并组成以国内有关专家、院士为首的高水平“实验系列教材总编审指导委员会”，其任务是策划教材选题，审查把关教材总体编写质量等；还组成了以教学第一线骨干教师为首的“实验教材编写委员会”，其任务是，提出、审查编写大纲，编写、修改、初审教材等。此外，冶金工业出版社、国防工业出版社、北京大学出版社、哈尔滨工业大学出版社等组成了本系列实验教材的“出版委员会”，协调、承担本实验教材的出版与发行事宜等。

为确保教材品位、体现材料科学与工程实验教材的国家级水平，“编委会”特意对培养目标、编写大纲、书目名称、主干内容等进行了研讨。本系列实验教材的编写，注意突出以下特色：

1. 实验教材的编写与教育部专业设置、专业定位、培养模式、培养计划、各学校实际情况联系在一起；坚持加强基础、拓宽专业面、更新实验教材内容的基本原则。

2. 实验教材编写紧跟世界各高校教材编写的改革思路。注重突出人才素质、创新意识、创造能力、工程意识的培养,注重动手能力,分析问题及解决问题能力的培养。

3. 实验教材的编写与专业人才的社会需求实际情况联系在一起,做到宽窄并举;教材编写应听取用人单位专业人士的意见。

4. 实验教材编写突出专业特色、深浅度适中,以编写质量为实验教材的生命线。

5. 实验教材的编写,处理好该实验课与基础课之间的关系,处理好该实验课与其他专业课之间的关系。

6. 实验教材编写注意教材体系的科学性、理论性、系统性、实用性,不但要编写基本的、成熟的、有用的基础内容,同时也要将相关的未知问题在教材中体现,只有这样才能真正培养学生的创新意识。

7. 实验教材编写要体现教学规律及教学法,真正编写出一本教师及学生都感觉到得心应手的教材。

8. 实验教材的编写要注意与专业教材、学习指导、课堂讨论及习题集等配套教材的编写成龙配套,力争打造立体化教材。

本材料科学与工程实验系列教材,从教学类型上可分为:基础入门型实验,设计研究型实验,综合型实践实验,软件模拟型实验,创新开拓型实验。从教材题目上,包括材料科学基础实验教程(金属材料工程专业);机械工程材料实验教程(机械类、近机类专业);材料科学与工程实验教程(金属材料工程);高分子材料实验教程(高分子材料专业);无机非金属材料实验教程(无机专业);材料成型与控制实验教程(压力加工分册);材料成型与控制实验教程(铸造分册);材料成型与控制实验教程(焊接分册);材料物理实验教程(材料物理专业);超硬材料实验教程(超硬材料专业);表面工程实验教程(材料的腐蚀与防护专业)等一系列与材料有关的实验教材。从内容上,每个实验包含实验目的、实验原理、实验设备与材料、实验内容与步骤、实验注意事项、实验报告要求、思考题等内容。

本实验系列教材由崔占全（燕山大学）、潘清林（中南大学）、赵长生（四川大学）、谢峻林（武汉理工大学）任总主编；王明智（燕山大学）、翟玉春（东北大学）、肖纪美（北京科技大学、院士）任总主审。

经全体编审教师的共同努力，本系列教材的第一批教材即将出版发行，我们殷切期望此系列教材的出版能够满足国内高等院校材料科学与工程类各个专业教育改革发展的需要，并在教学实践中得以不断充实、完善、提高和发展。

本材料科学与工程实验系列教材涉及的专业及内容极其广泛。随着专业设置与教学的变化和发展，本实验系列教材的题目还会不断补充，同时也欢迎国内从事材料科学与工程专业的教师加入我们的队伍，通过实验教材这个平台，将本专业有特色的实验教学经验、方法等与全国材料实验工作者同仁共享，为国家复兴尽力。

由于编者水平及时间所限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

材料科学与工程实验教学研究会
材料科学与工程实验系列教材编写委员会

2011年7月

前 言

实验教学是材料科学与工程专业教学中的重要组成部分，它不仅是学生获取专业知识和经验的重要途径，而且对培养学生科学研究能力、创新思维和实践动手能力起着相当重要的作用。长期以来，我国材料科学与工程专业培养的学生通常具备较高的专业基础理论知识，但实践动手能力较弱，这与新世纪高素质创新人才的培养要求差距较大，不能够很好地满足社会对人才的要求，为此我们编写了本书。

本书汇编了材料科学与工程专业系列课程典型的和共性的实验，主要包括材料科学基础（金属学）、金属熔炼与铸造、金属塑性加工、金属材料热处理、材料力学性能、材料物理性能、金属腐蚀与防护、X射线衍射及电子显微分析（材料结构分析）等专业主干课程的79个实验。实验内容主要涉及以全面提高学生实验技能为主的常规的基础实验，按照材料科学基础实验、材料工程基础实验、材料性能检测实验、材料结构与成分分析实验四大部分进行分模块排序；此外，根据材料科学与工程专业发展的需要，又特意编写了以培养学生科学研究能力和创新能力为主的综合性、设计性与研究创新性实验。

本书的主要特点是：第一，根据材料学科发展的最新动态和各专业实验教学的要求，坚持面向材料科学与工程一级学科，拓宽专业面，加强常规的基础实验，并注重协调材料科学与工程一级学科中材料物理与化学、材料学、材料加工工程三个二级学科专业共性与个性实验的关系，实现同一学科多专业知识的交叉与渗透，能满足宽口径材料人才培养的要求。第二，注重实验教学新体系的探索。在实验内容的编写上，尽可能安排以全面提高学生实验技能为主的常规的基础实验，同时又根据专业发展的需要，特意编写了以提高研究能力与创新思维为主的“三性”实验。第三，本实验教程吸取了国内同类实验教材的精华，实验内容深度与广度适中，既增强了该实验教材的适用性和针对性，又

把握了该教材的科学性和系统性。

本书所列实验共 79 个。每个实验主要由实验目的、实验原理、实验设备及材料、实验内容与步骤以及实验报告要求等组成。学生在具体实验时根据各自的实验条件，可以有选择地完成部分内容。

本书由中南大学潘清林教授和北京科技大学孙建林教授任主编，中南大学黄继武高级实验师、郑州大学杨道媛教授和陕西理工学院张永宏副教授任副主编。参加编写的有中南大学潘清林（实验 4 ~ 实验 7，实验 15 ~ 实验 19，实验 38 ~ 实验 40），黄继武（实验 52 ~ 实验 54，实验 65 ~ 实验 67，实验 72 ~ 实验 75），徐国富（实验 57 ~ 实验 59，实验 62 ~ 实验 64），宋练鹏（实验 42 ~ 实验 46），李周（实验 76 ~ 实验 79）；北京科技大学孙建林（实验 20 ~ 实验 25），熊小涛（实验 50 和实验 51，实验 55 和实验 56）；郑州大学杨道媛（实验 1 ~ 实验 3，实验 47 ~ 实验 49）；陕西理工学院张永宏（实验 29 ~ 实验 32，实验 68 ~ 实验 71）；国防科技大学白书欣（实验 8 和实验 9，实验 33 ~ 实验 35）；大连理工大学张贵锋（实验 10 ~ 实验 14）；燕山大学李慧（实验 60 和实验 61）；北华航天工业学院庞国星（实验 41），陈志勇（实验 26 ~ 实验 28），李忠磊（实验 36 和实验 37）。全书由中南大学汪明朴教授和燕山大学崔占全教授主审。

本书在编写过程中，参考了中南大学材料科学与工程学院以及兄弟院校所编写的实验教材和实验指导书，中南大学尹志民教授和燕山大学崔占全教授对本书的初稿提出了宝贵的修改意见，本书的出版得到了冶金工业出版社的大力支持，谨此一并深表谢意。

由于编者水平所限，书中不足之处恳请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 5 月于中南大学

目 录

第一章 材料科学基础实验	1
第一节 晶体结构及金属凝固基础实验	1
实验 1 典型金属晶体结构的钢球堆垛模型分析	1
实验 2 金属凝固过程观察	4
实验 3 用热分析法建立二元合金相图	6
第二节 金相显微组织分析基础实验	10
实验 4 金相显微镜的构造、成像原理与使用	10
实验 5 金相样品的制备与显微组织观察	20
实验 6 铁碳合金平衡组织观察与分析	26
实验 7 二元和三元合金显微组织观察与分析	30
实验 8 金属的塑性变形与再结晶组织分析	37
实验 9 碳钢热处理后显微组织的观察与分析	41
第三节 扩散与固态相变基础实验	45
实验 10 扩散实验	45
实验 11 钢的 C 曲线测试	48
实验 12 钢的珠光体转变及显微组织观察	52
实验 13 钢的马氏体转变及显微组织观察	55
实验 14 铝合金的脱溶 (时效硬化) 实验	59
第二章 材料工程基础实验	63
第一节 金属熔炼与铸造基础实验	63
实验 15 合金钢的真空电弧炉熔炼	63
实验 16 铝合金的熔炼与铸造	68
实验 17 铝硅合金的晶粒细化与组织变质处理	72
实验 18 铸造工艺对金属铸锭组织的影响	74
实验 19 金属熔炼炉前检测及铸造性能实验	78
第二节 金属塑性加工基础实验	84
实验 20 金属塑性变形基本特点的观察	84
实验 21 金属室温压缩的塑性及其流动规律	87
实验 22 最大咬入角及摩擦系数的测定	89

实验 23 挤压变形力变化规律与金属流动	92
实验 24 拉拔的安全系数及拉伸力的测量	94
实验 25 冲压成形(拉深)实验	97
第三节 金属热处理实验	100
实验 26 钢的普通热处理	100
实验 27 渗碳及渗层组织性能分析	104
实验 28 高频感应加热表面淬火及其性能检测	108
实验 29 固溶淬火温度对铝合金时效效果的影响	111
实验 30 钢的淬透性测定	115
第四节 宏观分析及无损检测实验	118
实验 31 宏观断口、缺陷及低倍组织分析	118
实验 32 晶粒度的测定	125
实验 33 钢的火花鉴别	128
实验 34 内部缺陷无损检测	132
实验 35 表面缺陷无损检测	143
第三章 材料性能检测实验	151
第一节 力学性能实验	151
实验 36 金属拉伸力学性能的测定	151
实验 37 金属材料硬度测定	155
实验 38 金属缺口试样冲击韧性的测定	161
实验 39 金属平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测定	165
实验 40 金属疲劳实验	170
实验 41 金属磨损实验	177
第二节 物理性能实验	180
实验 42 综合热分析实验	180
实验 43 金属材料热膨胀系数的测定	185
实验 44 导热系数的测定	189
实验 45 双电桥法测量金属及合金的电阻	194
实验 46 磁性材料的直流磁特性测量	198
第三节 腐蚀与电化学性能实验	202
实验 47 盐雾腐蚀实验	202
实验 48 线性极化法测定金属的腐蚀速度	205
实验 49 极化曲线的测定与分析	208
实验 50 钢铁的氧化发蓝处理	210
实验 51 铝合金的阳极氧化、着色与封闭处理	213
第四章 材料结构与成分分析实验	217
第一节 X 射线衍射分析实验	217

实验 52	X 射线衍射仪的结构、原理与使用	217
实验 53	物相定性分析	228
实验 54	物相定量分析	233
实验 55	点阵常数的精确测量	237
实验 56	微观应力与亚晶尺寸的测量	240
第二节	电子显微分析实验	244
实验 57	扫描电镜的结构、工作原理及使用	244
实验 58	扫描电镜的二次电子像及断口形貌分析	250
实验 59	扫描电镜的背散射电子像及高倍组织观察	254
实验 60	透射电镜的结构、成像原理及使用	257
实验 61	透射电镜样品的制备及典型组织观察	261
实验 62	电子探针的结构、原理及应用	266
第三节	能谱、波谱与光谱分析实验	277
实验 63	能谱仪的结构、原理及使用	277
实验 64	波谱仪的结构、原理及应用	284
实验 65	等离子体原子发射光谱分析	290
实验 66	红外光谱分析	294
实验 67	激光拉曼光谱分析	300
第五章	材料综合性、设计性与研究创新性实验	303
第一节	综合性实验	303
实验 68	材料热处理综合实验	303
实验 69	材料力学性能综合实验	306
实验 70	材料现代分析测试综合实验	310
实验 71	典型金属材料显微组织的观察与分析	312
第二节	设计性实验	322
实验 72	钢的强韧化设计	322
实验 73	钢的热处理工艺设计与组织性能分析	325
实验 74	材料失效案例分析	329
实验 75	典型零件材料的选择和应用	331
第三节	研究创新性实验	335
实验 76	热模拟法测定金属的高温力学性能	335
实验 77	电阻法研究合金的相变过程	337
实验 78	热膨胀法测定钢的连续冷却转变图	341
实验 79	形状记忆合金相变的微观结构分析	345
参考文献		347

第一章

材料科学基础实验

第一节 晶体结构及金属凝固基础实验

实验 1 典型金属晶体结构的钢球堆垛模型分析

[实验目的]

- (1) 了解面心立方、体心立方和密排六方晶体结构中常用晶面、晶向的几何位置，原子排列和密度；
- (2) 掌握三种典型晶体结构的四面体间隙和八面体间隙的位置和分布；
- (3) 熟悉面心立方和密排六方晶体结构中最密排面的堆垛顺序。

[实验原理]

一、晶体

原子、分子或它们的集团，在三维空间做有规则的周期性重复排列，即构成晶体。在金属晶体中，金属键原子（离子）的排列趋于尽可能地紧密，构成高度对称性的简单的晶体结构。最典型的金属晶体结构有三种，即面心立方结构、体心立方结构和密排六方结构，其结构如图 1-1 所示。

二、晶面

晶体中原子的排列构成了许多不同方位的晶面，并用晶面指数来表示这些晶面。任一晶面指数表示晶体中相互平行的所有晶面，不同指数晶面的空间方位、原子排列方式和原子面密度不同。

三、晶向

晶体中任一原子列均构成一晶向。任一晶向指数代表晶体中相互平行并同向的所有原子列，不同指数的晶向有不同的空间方位和原子间距。

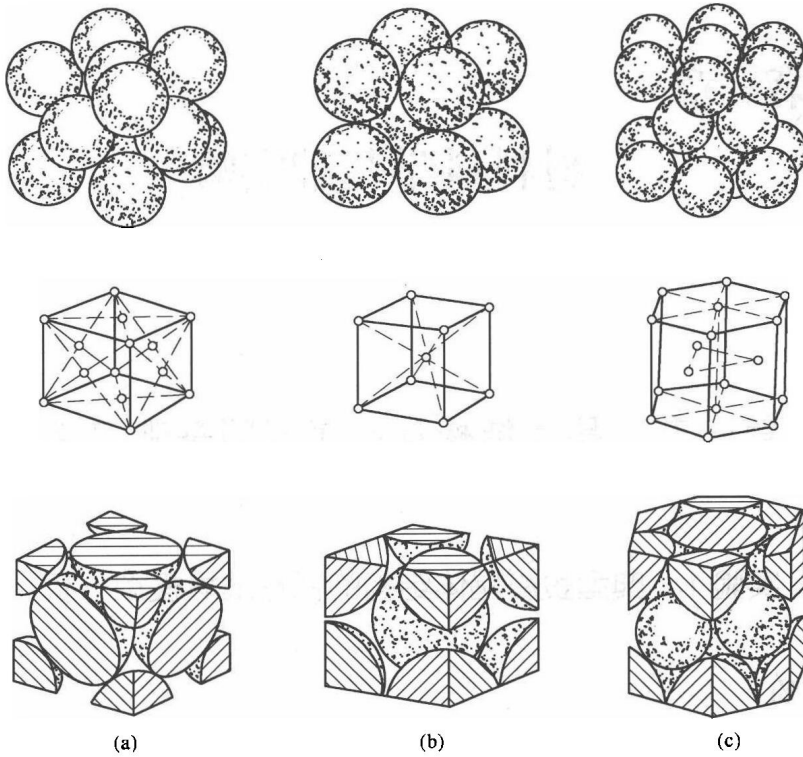


图 1-1 三种典型晶体结构
(a) 面心立方结构；(b) 体心立方结构；(c) 密排六方结构

四、面心立方和密排六方晶体结构最密排面的原子堆垛方式

面心立方和密排六方晶体结构均为等径原子最密排结构，二者致密度均为 0.74，配位数均为 12，它们的区别在于最密排面的堆垛顺序不同，致使其晶体结构不同。面心立方晶体的最密排面 {111} 按 ABCABC……顺序堆垛，而密排六方晶体的最密排面 {0001} 按 ABABAB…顺序堆垛，如图 1-2 所示，其中，A、B、C 均代表堆垛的原子所占据的相应位置。

五、晶体中间隙的意义、位置、大小和数量

从晶体中原子排列的钢球模型可见，球与球之间存在有许多间隙。分析晶体结构中间隙的数量和每个间隙的大小等，对于了解金属的性能、合金相结构和扩散以及相变等问题都是很重要的。按周围原子的分布状况可将间隙分为两种，即四面体间隙与八面体间隙。晶体中间隙的大小和数

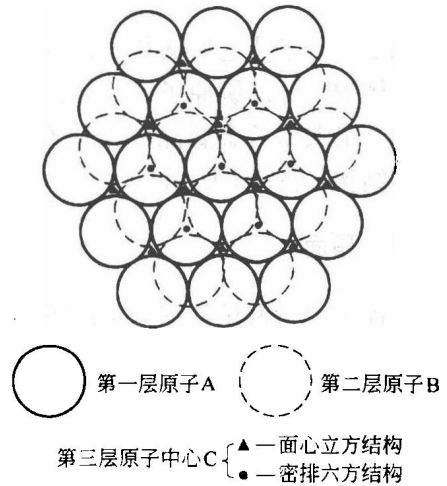


图 1-2 面心立方结构和密排六方结构中
原子堆垛顺序示意图

量见表 1-1。

表 1-1 晶体中间隙的大小和数量

晶体结构	间隙	大小	晶胞中的数量/个
面心立方结构	八面体间隙	$r_B = 0.414r_A$	4
	四面体间隙	$r_B = 0.225r_A$	8
体心立方结构	八面体间隙	$r_B = 0.155r_A$	6
	四面体间隙	$r_B = 0.291r_A$	12
密排六方结构	八面体间隙	$r_B = 0.414r_A$	6
	四面体间隙	$r_B = 0.225r_A$	12

六、晶面上原子密度的计算

晶面上原子排列的紧密程度，可用 δ 表示，即：

$$\delta = \frac{S}{S_0}$$

式中 S ——晶面上所有原子占有的面积之和；

S_0 ——晶面的总面积。

[实验设备及材料]

- (1) 立方形有机玻璃盒、涂有凡士林油的钢球、医用镊子，每人一套。
- (2) 晶体结构模型若干套。
- (3) 晶体结构多媒体教学软件。

[实验内容与步骤]

- (1) 把钢球作为金属原子，堆垛出面心立方和体心立方结构中 (100)、(110)、(111) 和 (112) 晶面。
- (2) 在已堆出的上述晶面上，至少确定三个不同方位原子列的晶向指数。
- (3) 按最密排的面堆垛的顺序堆垛出面心立方和密排六方晶体结构。
- (4) 借助模型，找出三种晶体结构中两种间隙位置。

[实验报告要求]

- (1) 写出实验目的及内容。
- (2) 画出面心立方、体心立方晶体结构的 (100)、(110)、(111) 和 (112) 晶面的原子分布图，并求出各晶面的原子面密度。
- (3) 在上述每个晶面中，至少标出三个不同方位的晶向。
- (4) 指出三种晶体结构的最密排晶面和最密排晶向。