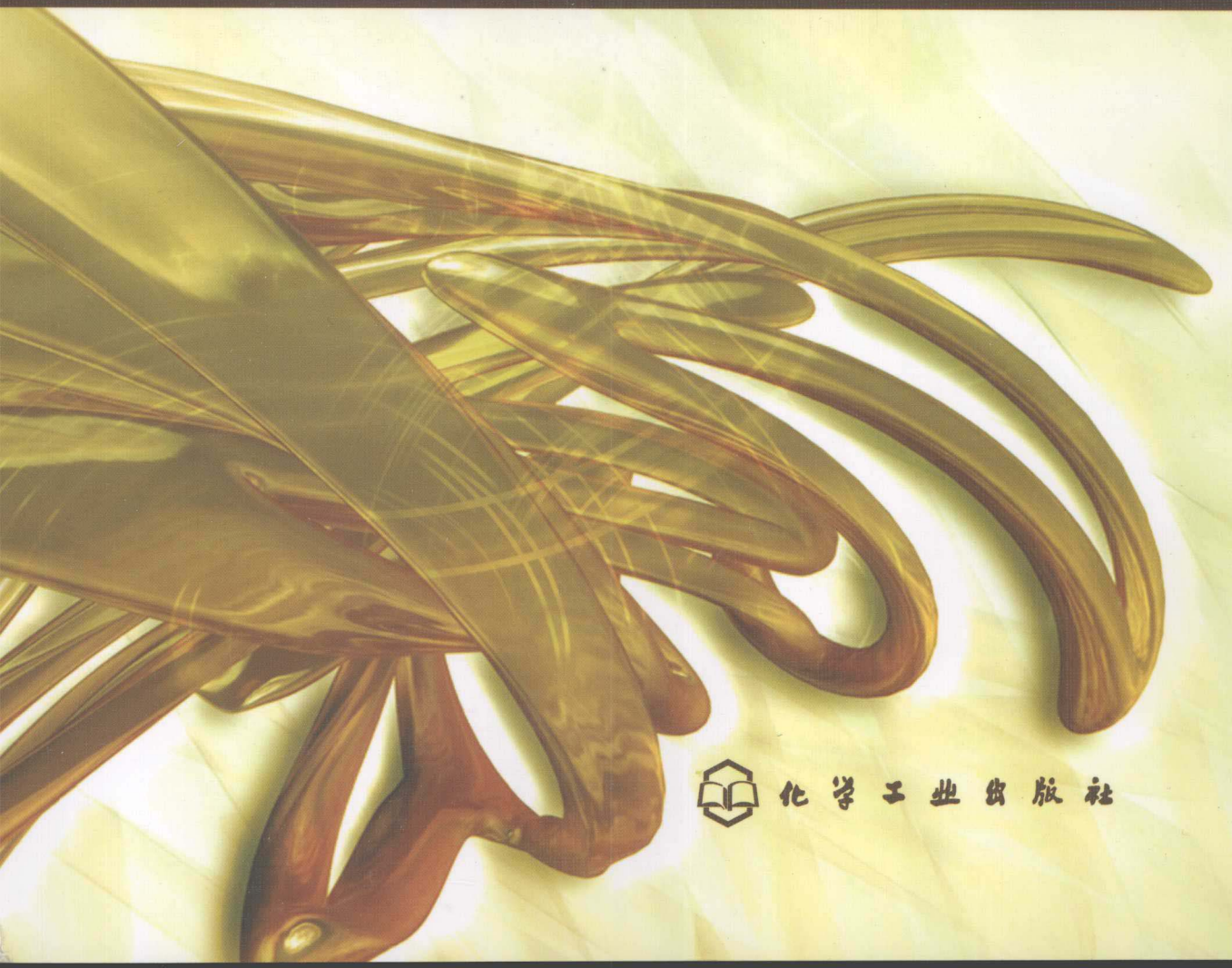


高 等 学 校 教 材

金 属 材 料

液 态 成 型 工 艺

贾志宏 傅明喜 编著



化学工业出版社

高等学校教材

金属材料液态成型工艺

贾志宏 傅明喜 编著



化学工业出版社

·北京·

本书是高等学校“材料成型与控制”专业的主干课程教材，它系统地阐述了液态成型工艺中相关的造型材料、零件结构的铸造工艺性、工艺设计方案的制定、浇注系统设计、浇冒口系统的原理及设计、工艺装备设计、特种铸造工艺（包括金属型铸造、压力铸造、熔模铸造、消失模铸造等）的原理及工艺、先进液态成型工艺等内容。

本书在阐述中力求做到重点突出、理论联系实际，具有较强的科学性、系统性及实用性，是材料成型及控制专业本科生的通用教材，也可作为材料以及机械类相关专业的教材或教学参考书，还可满足材料加工专业研究生以及广大铸造行业中相关工程技术人员进行学习及参考之需。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料液态成型工艺/贾志宏, 傅明喜编著. —北京:
化学工业出版社, 2008.1
高等学校教材
ISBN 978-7-122-01720-8

I. 金… II. ①贾…②傅… III. 液态金属充型-高等学
校-教材 IV. TG21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 198424 号

责任编辑: 杨 菁 彭喜英
责任校对: 洪雅姝

文字编辑: 颜克俭
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 579 千字 2008 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519680) 售后服务: 010-64519661

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是为了适应新时期材料成型及控制专业的教学改革需要,依据材料成型及控制的专业教学大纲,结合近几年教学实践而编写的。

由于目前材料成型及控制专业融合了铸造、焊接、塑性成型三大方向,材料成型工艺又是专业教学的主干课程。因此对于液态成型工艺课程就需要将造型材料、工艺方案的制订、砂型铸造工艺以及特种铸造工艺等知识综合,使读者能对液态成型工艺有个较全面、系统的认识。本书主要阐述砂型铸造和特种铸造的工艺以及相关的工装设计等内容,使读者能初步掌握液态成型工艺设计的基本内容、原则以及相应的方法、步骤,能为今后的学习或相关的工程实践奠定基础。

全书分为九章。第一章主要阐述造型材料的组成,各类型砂的特点、混配工艺以及应用,以及铸造用涂料等相关知识。第二章重点介绍了零件结构的铸造工艺性分析,分别阐述了砂型、金属型、压铸等工艺条件下对铸件结构的要求。第三章至第六章则以砂型铸造工艺设计为主要内容,其中第三章的重点是砂型铸造工艺方案的制订原则及铸造工艺参数的选取;第四章详细阐述了浇注系统的基本原理,以及常用合金浇注系统的设计方法;第五章对冒口的补缩原理及其设计方法着重进行了阐述,此外对冷铁、铸筋等常用砂型工艺也一并作了介绍;第六章则对砂型铸造工艺中所涉及的工艺装备进行阐述,主要介绍了模样、模板、砂箱、芯盒等最常用工装的特点及其设计。第七章至第九章对除砂型铸造以外的其他液态成型工艺进行了阐述,其中第七章主要介绍的是在重力场作用下的液态成型工艺,包括金属型铸造、熔模铸造、消失模铸造、陶瓷型铸造以及石膏型铸造等工艺方法;第八章则较详细地阐述了外力场作用下的液态成型工艺,主要包括压力铸造、离心铸造、挤压铸造、低压铸造、压差铸造等成型工艺的基本原理、工艺特点以及相应的工装设备;第九章则着重介绍了目前在液态成型领域出现的新工艺,主要选择了半固态铸造、电磁铸造、喷射成型以及快速成型技术在液态成型技术中的应用等几方面进行介绍。每章后面附有思考题,便于读者的学习及加深理解。

全书由江苏大学材料学院贾志宏、傅明喜编著。其中第一章至第三章由傅明喜编写,绪论、第四章至第九章由贾志宏编写,并由贾志宏进行统稿。

本书是材料成型及控制专业本科生的教材,也可作为材料以及机械类相关专业的教材或教学参考书。也可满足材料加工专业研究生以及广大铸造行业相关工程技术人员进行学习及参考之需。

作者在编写过程中,参阅了大量相关的著作、教材,谨对这些著作、教材的作者表示衷心的感谢。同时也对编者所在教研室、学院的同仁及领导提供的帮助和关心表示感谢。

由于编者的水平有限,书中内容及观点难免存在不当之处,恳请读者批评指正(E-Mail:jia_zh@163.com),以便进一步加以改进。

编者
2007年9月

目 录

绪论	1
一、液态成型工艺的发展历史	1
二、液态成型工艺的种类及其特点	2
三、液态成型工艺课程的内容及要求	3
第一章 造型材料	4
第一节 砂型铸造用原材料	4
一、原砂	4
二、黏土	9
三、辅助材料	12
第二节 黏土型(芯)砂	15
一、湿型砂	15
二、干型(芯)砂和表面烘干型	18
第三节 水玻璃砂及其他无机黏结剂砂	19
一、水玻璃概述	19
二、水玻璃的硬化机理	22
三、水玻璃砂型的制备工艺	23
四、其他无机黏结剂砂	26
第四节 油砂	27
一、油砂	27
二、合脂砂	28
三、渣油砂及其他	29
第五节 树脂砂	30
一、铸造用树脂	31
二、热芯盒	34
三、温芯盒法	35
四、气硬冷芯盒法	36
五、覆膜砂	39
六、自硬树脂砂	41
第六节 涂料	43
一、涂料的基本组成	44
二、涂料的作用	46
三、涂料的性能	46
四、涂料的制备及涂覆	48
五、砂型用涂料	49
思考题	51
第二章 零件结构的铸造工艺性分析	52
第一节 常用铸造方法的选用	52
一、选用依据	52
二、常用铸造方法的特点及应用	53
第二节 砂型铸造零件结构的工艺性	56
一、满足工艺合理性	56
二、简化工艺	62
第三节 其他铸造工艺中对铸件结构的铸造工艺性要求	65
一、压铸件结构设计的工艺性	65
二、金属型铸件结构的工艺性	68
三、熔模铸造铸件结构的工艺性	69
思考题	71
第三章 砂型工艺方案的确定	73
第一节 概述	73
一、工艺设计依据及内容	73
二、工艺设计与技术经济性和环保的关系	75
第二节 砂型铸造工艺方案的制订	75
一、造型、制芯方法的确定	75
二、浇注位置的确定	76
三、分型面的确定	78
四、砂芯设计	81
五、铸造工艺参数	90
思考题	99
第四章 浇注系统设计	101
第一节 概述	101
一、浇注系统对铸件质量的影响及对它的	

要求	101	二、浇注系统各组元截面积的确定	126
二、浇注系统的分类及特点	102	三、浇注系统设计的校核	126
第二节 液态金属在浇注系统各组元中的		第五节 铸铁件浇注系统的特点及设计	129
流动	106	一、阻流截面图表查找法	129
一、液态金属在铸型中流动的水力学		二、浇注系统大孔出流理论及设计	129
特性	106	三、阶梯式浇注系统的设计	135
二、液态金属在浇口杯中的流动	107	四、垂直分型浇注系统的设计	136
三、液态金属在直浇道中的流动	110	五、浇注系统的型内反应室	139
四、液态金属在直浇道窝中的流动	110	第六节 铸钢及非铁合金铸件浇注系统的特	
五、液态金属在横浇道中的流动	111	点及设计	140
六、液态金属在内浇道中的流动	116	一、铸钢件浇注系统的特点及设计	140
七、液态金属的过滤技术	118	二、非铁合金件浇注系统的特点及设计	142
第三节 浇注系统内浇道位置的选择	120	142
第四节 浇注系统的尺寸计算	121	思考题	147
一、Ossan 公式法	121		

第五章 冒口工艺及其他 **148**

第一节 冒口的种类及补缩原理	148	第四节 特种冒口	176
一、冒口的作用	148	一、大气压力冒口	176
二、冒口的设计原则	148	二、保温、发热冒口	177
三、冒口的补缩原理	150	三、易割冒口	180
四、冒口的分类	155	第五节 冷铁	181
五、冒口的形状	156	一、冷铁的作用	181
第二节 通用冒口的设计及计算	157	二、冷铁的分类	182
一、模数法	157	三、外冷铁	184
二、比例法	162	四、内冷铁	186
三、三次方程法	163	第六节 铸筋	188
四、周界商法	164	一、割筋	188
第三节 铸铁件的冒口设计	165	二、拉筋	190
一、铸铁件收缩的特点	165	第七节 出气孔	190
二、灰铁件的冒口设计	166	一、出气孔的作用及设置原则	190
三、球铁件的实用冒口设计	167	二、出气孔的种类	191
四、均衡凝固	172	思考题	192

第六章 工艺装备设计 **194**

第一节 模样	195	第四节 芯盒	215
一、模样材质的选择	195	一、芯盒的类型及材质	215
二、金属模样的结构设计	197	二、分盒面的确定	216
三、模样(芯盒)尺寸的标注	200	三、芯盒内腔尺寸的计算	216
第二节 模板	201	四、普通金属芯盒的结构设计	217
第三节 砂箱	209	五、热芯盒设计	220
一、砂箱的种类及材质的选择	209	六、其他芯盒的设计	224
二、砂箱的箱体结构设计	210	第五节 其他工艺装备	225
三、砂箱的定位	212	一、浇注系统模具	226
四、砂箱的夹紧机构	213	二、压砂板	226
五、砂箱的搬运及翻转机构	214	三、砂芯检验用具	227

四、烘芯板	227	思考题	229
五、下芯夹具	228		
第七章 重力铸造			230
第一节 金属型铸造	230	一、消失模铸造的原理	266
一、金属型中液态成型的特点	230	二、消失模工艺	268
二、金属型铸造工艺	233	三、造型工艺	269
三、金属型结构设计	237	四、浇注工艺	272
第二节 熔模铸造	252	第四节 其他重力铸造工艺	272
一、熔模制造工艺	253	一、陶瓷型铸造	272
二、制壳工艺	259	二、石膏型铸造	275
三、熔模铸件的工艺设计	263	思考题	279
第三节 消失模铸造	266		
第八章 外力场充型的液态成型工艺			280
第一节 压力铸造	280	第三节 挤压铸造	312
一、压力铸造过程原理	280	一、铸型垂直合型挤压铸造	312
二、压力铸造工艺	286	二、铸型旋转合型挤压铸造	315
三、压铸件的工艺设计	290	三、挤压铸造的发展及展望	316
四、压铸型的设计	294	第四节 反重力铸造	317
第二节 离心铸造	302	一、低压铸造	317
一、离心力场中铸件成型的特点	303	二、压差铸造	320
二、离心铸造工艺	307	三、真空吸铸	324
三、典型铸件的离心铸造工艺	310	思考题	327
第九章 液态成型新工艺			328
第一节 半固态铸造	328	一、间接 RP 铸型制造	336
一、半固态铸造浆料的制备方法	329	二、直接 RP 铸型制造工艺	337
二、成型工艺	330	第四节 喷射铸造	340
第二节 电磁铸造	332	一、喷射铸造的原理及特点	341
一、工作原理及特点	332	二、喷射铸造工艺过程	342
二、电磁铸造工艺	333	思考题	343
第三节 快速成型与铸造技术	336		
参考文献			344

绪论

液态成型即利用将液态金属（合金）浇注入一定的铸型中，使其凝固、冷却，最终得到相应形状零件的材料成型方法，通常也称为铸造。随着科学技术的发展，利用液态金属进行成型的新方法、新技术不断涌现，但传统的铸造生产仍是工业生产中不可或缺的基础产业，其装备及工艺水平的高低是衡量整个装备制造业技术水平的重要依据。

一、液态成型工艺的发展历史

传统的液态成型技术，即铸造工艺，据出土文物和文献的记载，在我国有着六千年悠久的历史。纵观整个世界的文明史，我国拥有最灿烂的青铜文化，是最早应用铁器的国家。我国古代铸造技术成就推动了农业生产、兵器制造、人民生活以及天文、医药、音乐、艺术等方面的进步。

我国早在夏代就已经成熟利用陶范（即泥型）铸造青铜器具，在商、周两代创造了灿烂的青铜文化。在青铜器鼎盛时代，所谓“钟鸣鼎食”是当时贵族权势和地位的象征，如现代出土的司母戊大方鼎（如图 0-1）、随州编钟等珍贵文物。其中，商代青铜文化顶峰时期的代表作——司母戊大方鼎，高 1.33m、长 1.16m、宽 0.79m，重达 875kg。司母戊鼎立耳、方腹、四足中空，除鼎身四面中央是无纹饰的长方形素面外，其余各处皆有纹饰。在细密的云雷纹之上，各部分主纹饰各具形态。鼎身四面在方形素面周围以饕餮作为主要纹饰，四面交接处，则饰以扉棱，扉棱之上为牛首，下为饕餮。鼎耳外廓有两只猛虎，虎口相对，中含人头。耳侧以鱼纹为饰。四只鼎足的纹饰也是匠心独具，在三道弦纹之上各施以兽面，其造型、纹饰、工艺均达到极高的水平。此外，古文献《周礼·考工记》中还出现了世界上最早的合金配方，对于青铜就有“四分其金（铜），而锡居一，谓之戈戟之齐；三分其金，而锡居一，谓之大刀之齐”的记载。

春秋时期，陶范工艺达到了新的高度，最具代表性的是该时期出土的编钟、剑等器物。湖北随州曾侯乙墓出土的大型编钟，共 65 枚，总重达 2.5t，其中形状极其复杂的甬钟，铸

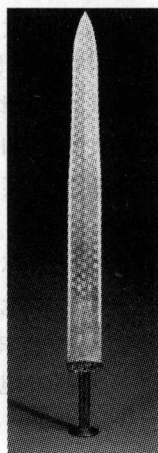
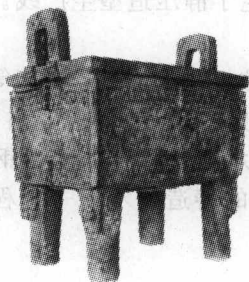


图 0-1 司母戊大方鼎（商，河南安阳出土）

图 0-2 越王勾践剑（春秋，湖北江陵出土）

型分为两段四个层次，由百余块范芯组成。湖北江陵出土的越王勾践剑（如图 0-2），至今光亮无锈，锋利如新，剑首呈同心圆薄壁结构（厚度仅 0.4mm）。

到西周、东周之交，为了更复杂的器形和纹饰的铸造需要，我国发明了熔模（失蜡）铸造工艺。先秦时期，制作的典型器物如青铜尊和盘（如图 0-3）。西汉的“鎏金长信宫灯”、明代的浑仪（如图 0-4）以及清乾隆时期的朝钟等国宝级文物都是前人利用熔模铸造工艺制得的。在古代典籍《天工开物》中还详细记载了失蜡法的工艺过程。

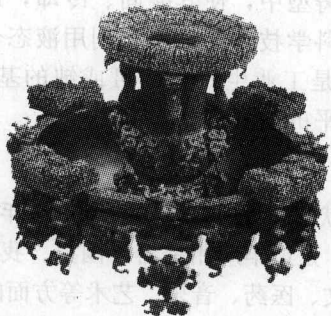


图 0-3 曾侯乙尊盘（春秋，湖北随州出土）

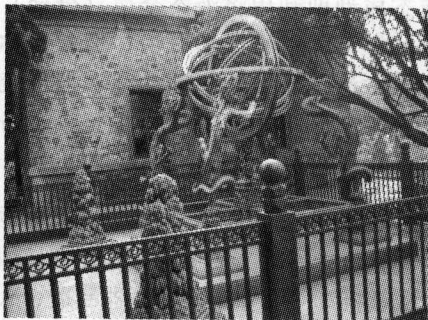


图 0-4 浑仪（明，南京紫金山天文台）

随着熔炼技术的发展，我国在公元前 6 世纪左右就发明了生铁和铸铁技术，战国时期开始有了铁制工具的使用，大大提高了农业生产效率，并出现铁范（金属型）工艺。我国的铸铁技术与西方社会的锻铁技术形成了古代钢铁技术的两大流派。隋唐以后，随着社会经济的进一步发展，铸造技术向大型和特大型铸件发展。铸造于公元 10 世纪五代十国时期的河北沧州大铁狮，高约 5m，长近 6m，重约 50t；北宋时期铸造的当阳铁塔，由 13 层叠成，重 50t 左右等都是这一时期的代表。

另外，我国在春秋时期就发明了叠铸工艺，能批量生产诸如青铜刀币等小型铸件，不仅大大提高了生产效率，也能改善铸件质量、减少作业面积。到汉代以后，此项工艺被广泛用于钱币、车马器的制作，生产的规范化程度更高。经过几千年的发展和演变，此工艺方法一直沿用到现代。

总之，我国古代铸造技术，在从商代中、晚期直到产业革命前，可以说一直是处于世界领先的水平。大大促进了当时生产力的发展，为人类文明做出了巨大的贡献。

新中国成立之后，现代意义上的铸造工业在我国逐步建立和完善，并不断地向世界先进水平靠近。20 世纪 50 年代开始，我国开始自主研发开发铸造工艺和引进国外生产线，实现了机械化铸造生产方式；20 世纪 60 年代以后，对于大批量铸件生产广泛采用高压造型技术，主要以高压多触头造型和射压造型为主；1982 年瑞士 GF 公司率先开发出气冲造型生产线；而后为提高铸型的紧实效果，改善工作环境，又产生了静压造型生产线。目前国内也能独立制造出相应成套高压、静压生产线。

当然，自动化造型（制芯）生产线还仅限于汽车、拖拉机、内燃机、机床等行业铸件的大批量生产。对于单件、小批量铸件，多采用黏土干型、水玻璃砂以及树脂自硬砂等工艺。特别对于重型装备的特大型铸件，已经成功铸出 315t 的大型厚板轧机的铸钢机架、重达 260t 的铸钢锭模以及大型发电机组的转子等，标志着我国的铸造技术在一定程度上已经接近或赶上了世界的先进水平。

二、液态成型工艺的种类及其特点

液态成型（铸造）工艺种类繁多，除了应用最普遍的砂型工艺外，还有金属型铸造、陶

瓷型铸造、石膏型铸造、水泥型铸造、低压铸造、压力铸造、离心铸造、挤压铸造、半固态铸造、连续铸造、真空吸铸、壳型铸造、消失模铸造、电渣熔铸等。分类也较多，可以按使用铸型的类别分为砂型、金属型、陶瓷型等；又可按成型时的力场分为重力铸造、压铸、低压铸造、离心铸造等。在实际情况中，同一名称也会产生重叠或歧义的，如在不同场合中压铸、熔模铸造、陶瓷型铸造等，称为精密铸造；对于熔模铸造一般情况下采用重力浇注，但也可采用离心浇注、低压浇注等工艺。

与塑性成型、连接成型以及切削成型等其他成型工艺相比，液态成型工艺具有不可替代的特点，主要体现在以下两方面。

(1) 适应性最广 这体现在液态成型的零件结构类型和材质两方面。

液态成型工艺几乎不受零件大小、厚薄以及复杂程度的限制。可以通过液态成型工艺生产厚度从小到零点几毫米到几米，长度从几毫米到十几米，质量从几克到几百吨的零件。铸件的形状可以很复杂，如汽车发动机的缸体件，通过铸造工艺获得毛坯，然后局部机加工后进行装配是唯一经济可行的制造方案。

其次，液态成型工艺可以获得任何合金的铸件。铸铁、铸钢、铝合金、镁合金、锌合金、铜合金、钛合金、锂合金等都可通过相应的液态成型工艺获得制品。对于脆性金属或合金（如铸铁），液态成型技术是获得其毛坯的唯一可行的加工方法。

(2) 成本低 铸件在一般机器中所占总质量的40%~80%，成本仅占机器总成本的25%~30%。其成本低廉的主要原因是：易于实现机械化，获得较高的生产效率；可大量利用废、旧金属料，降低原料成本；与锻件相比，动力消耗小；能获得较高的尺寸精度，以减少后续加工量。

液态成型（铸造）在工业中处于基础性的地位，是各类机器、装置最主要的毛坯生产途径。有数据表明，铸件在机床、内燃机及重型机器中约占70%~90%，在风机、压缩机中占60%~80%，在拖拉机中占50%~70%，农业机械中占40%~70%，在汽车中占20%~30%。随着工业化进程的深入，对液态成型工艺也提出了更高的要求，对零件的近精确或精确成型已经成为液态成型工艺发展的一个重要方向。同时，利用计算机模拟及仿真技术对工艺进行优化及精确控制也是今后研究、应用中需要解决的重大课题。

三、液态成型工艺课程的内容及要求

液态成型工艺是材料成型及控制专业的主干课程之一，其目的是为今后从事该领域研究及工程实践奠定重要基础。本课程应在成型原理课程之后开设，之后应通过液态成型工艺课程设计以及相关的生产实习等实践性环节强化工程意识，逐步培养解决实际工程技术问题的能力。

本书以砂型铸造工艺为重点，从其造型材料、工艺方案制订、浇冒口系统设计以及工装设计等方面较全面地进行了阐述，而对其他铸造工艺方法，则着重阐述与砂型工艺所不同的特点及相应的装备，以突出重点，而使读者对液态成型工艺有较完整、清晰的认识。对于液态成型工艺领域的CAD/CAE方面内容，则是通过其他专门课程进行阐述，本书就不再涉及此方面内容。

第一章 造型材料

广义而言，所有用于制造铸型的材料都是造型材料，如制造砂型用的原砂、涂料、各类黏结剂、添加物等，制造金属型的钢、铸铁或铜合金等合金材料，以及诸如石墨、石膏、陶瓷浆料等用于特种铸型的材料。但一般意义上，造型材料又特指制造砂型用的材料，如原砂、黏结剂以及各类添加剂等，即为本章所阐述的主要内容。

第一节 砂型铸造用原材料

一、原砂

原砂指铸造生产配制型砂用的砂子，是型砂中最基本的组成部分。原砂的性能直接影响着混合后的型砂性能，从而对铸件的质量起到决定性的影响。

原砂按其主要的化学成分，一般分为硅砂及特种砂。硅砂又称石英砂，是矿相为石英的氧化硅颗粒，通常含有一定的杂质相；特种砂是不以 SiO_2 为主要成分的各种原砂的总称，主要有锆英砂、铬铁矿砂、橄榄石砂及硅酸铝砂等。

1. 硅砂

硅砂是铸造生产中的主要原砂，因其价格低廉、资源丰富、性能能满足一般铸件的要求，而成为用量最大的原砂，其用量约占全世界消耗原砂总量的 98%。

硅砂根据其来源和加工方式不同分为天然硅砂和人工硅砂两大类。天然硅砂是由石英岩、花岗岩等经过风化或变质作用成为颗粒，在水力或风力作用下运动、迁徙，与长石、云母等共生矿物分离，最终沉积成相对稳定的矿床。因为促进沉积作用的动力不同，可以分为河砂、湖砂、海砂及风积砂等。人工硅砂是将石英岩或硅砂岩经过采矿、清洗、粗碎、细碎、筛选等工序加工而成的。

我国内蒙古通辽一带的风积砂，黄河故道以及其他河流的河砂，鄱阳湖、洞庭湖等周围的湖砂，其 SiO_2 的质量分数都在 85%~93%，是我国主要的铸铁用砂产地。福建闽江口以南和海南文昌、东部沿海以及广东珠江三角洲新会等地的天然硅砂的二氧化硅的质量分数在 97% 以上，主要用于铸钢件生产。

(1) 石英的结构及转变特性 石英的化学成分为 SiO_2 ，纯石英为无色透明或半透明固体，其晶体是硅氧四面体结构，由于 Si、O 原子间以强共价键相连，因此具有很高的熔点 (1173℃) 及硬度、耐磨性，基本能满足铸型耐火度、强度等要求。

自然界中的石英多为 β 石英，随着温度的变化和冷却速度的不同，石英可以以多种同质异晶的形态存在，并且其体积和密度产生相应的变化。结晶二氧化硅有石英、鳞石英和方石英三种不同的晶型，其转变关系如图 1-1 所示。

石英同一结构各变体，如 α 、 β 、 γ 晶型之间的变化 (图 1-1 中的纵向转变) 属于位移转变，硅氧四面体之间的排列方式相同，只是键角略有改变，相变需要能量小、速度快；从 α 石英到 α 鳞石英、方石英的不同结构之间的转变属于重建转变 (图 1-1 中的横向转变)，在相互转变过程中必须破坏原有的 Si-O 键，所需能量大，转变速度较前者慢。

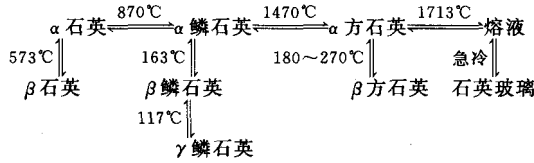


图 1-1 石英各种变体之间的转变关系

铸造用的硅砂为β石英，它在573℃时会转变为α石英，同时伴随着体积膨胀（其体积膨胀量达0.82%），由于转变速度快，使铸型产生较大应力 and 变形，容易使铸件产生夹砂、结疤等缺陷。

(2) 硅砂的矿物组成及其影响 硅砂中的杂质一般有长石、云母、铁氧化物、碳酸盐（石灰石、镁石、白云石等）、硫化物等矿物，其中以长石、云母为主。硅砂的矿物组成和化学成分直接影响原砂的耐火度、热化学稳定性和复用性，以及铸件质量。其主要矿物组成及性能见表 1-1。

表 1-1 石英、长石、云母等矿物主要矿物组成及性能

矿物名称	化学式	密度 ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	莫氏硬度	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
石英	SiO_2	2.65	7	1713
长石	钾长石 $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	2.5~2.6	6	1170~1200
	钠长石 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	2.62~2.65	6~6.5	1100
	钙长石 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	2.74~2.76	6~6.5	1160~1250
云母	白云母 $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.75~3.0	2~2.5	1270~1275
	黑云母 $\text{K}_2\text{O} \cdot 6(\text{Mg} \cdot \text{Fe})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.7~3.1	2.5~3.0	1145~1150

注：莫氏硬度是用标准矿物和待定矿物互相刻划的方法测出的矿物硬度。此法所用十种标准矿物名称及莫氏硬度依次为滑石 1、石膏 2、方解石 3、萤石 4、磷灰石 5、长石 6、石英 8、黄玉 9、金刚石 10。

铸造生产上对硅砂一般只按其化学成分进行控制，国家标准《铸造用硅砂》（GB/T 9442—1998）根据二氧化硅含量的多少，在80%~98%范围内分成6个等级，分别是80、85、90、93、96、98（代号表示SiO₂含量的最低值）。

铝的氧化物是硅砂中的主要杂质成分，它主要存在于长石和云母之中。硅砂中氧化铝的含量在10%以内，但对硅砂的熔点影响较大，在1585~1713℃范围变动（如图 1-2）。硅砂中的铁杂质一般以氧化铁（Fe₂O₃）形式存在，少量的氧化铁对铸造用硅砂的耐火度影响不大。硅砂中根据长石等夹杂矿物种类不同，一般还含有K₂O、Na₂O、CaO、MgO等碱金属或碱土金属的氧化物，其含量一般低于硅砂中Al₂O₃的含量，其对耐火度影响也较Al₂O₃小。

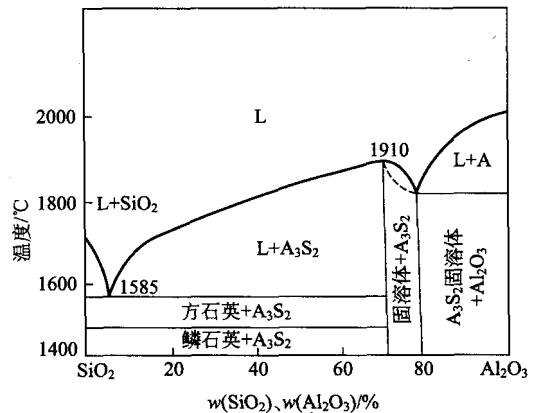


图 1-2 SiO₂-Al₂O₃ 相图

2. 特种砂

特种砂指的是矿物组成中不含或只含少量游离 SiO₂ 的非石英质原砂。虽然硅砂来源广，

能适用于一般铸铁、铸钢及非铁合金零件的生产，但由于热膨胀系数较大、热扩散率较低、蓄热系数小、易与铁的氧化物发生化学反应等缺点，在生产某些铸件（如高合金钢或大型铸钢件）时，易发生粘砂等缺陷，造成清砂困难。另外，在清理及砂处理过程中若产生扬尘，会导致矽肺病。因此为提高铸件质量，在合金钢及大型铸钢件等的生产中，需要耐火度更高、导热性更好、热膨胀系数小、热化学稳定性强的原砂，以制造砂型或砂芯涂料等，通常要用到非石英质的特种砂。常见的特种砂有镁砂、橄榄石砂、锆砂等。

(1) 镁砂 镁砂的主要成分为 MgO ，是天然菱镁矿 ($MgCO_3$) 经过高温煅烧形成的烧结块，再经过破碎、筛选而成的。在 $700\sim 950^\circ C$ 下低温煅烧得到氧化镁的化学活性很大，呈软质多孔疏松状，也称苛性镁砂，是不能用于铸造生产的。而经过 $1550\sim 1600^\circ C$ 高温煅烧的菱镁矿石，使其分解产生的 MgO 重结晶成方镁石，形成的镁砂颗粒致密坚硬，才可用于铸造生产。

镁砂外观呈深褐色，密度为 $(2.9\sim 3.1)\times 10^3 kg/m^3$ ，莫氏硬度 $4\sim 4.5$ 。纯氧化镁的熔点为 $2800^\circ C$ ，由于镁砂中常含有 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 等杂质，其熔点一般低于 $2000^\circ C$ 。镁砂的蓄热系数约为硅砂的 1.5 倍，热膨胀系数较硅砂小，没有因固态相变而引起的体积变化。镁砂属于碱性耐火材料，不与氧化铁、氧化锰等金属氧化物反应，因而常常用于高锰钢型砂或涂料，对于铸造过程中热应力很大的型（芯）也可以采用镁砂。

我国菱镁矿资源丰富、质地优良，储量居全球首位。我国辽宁的大石桥市、山东莱州是我国主要的菱镁矿产地。表 1-2 给出了国内铸造用镁砂的技术指标。

表 1-2 国内镁砂的技术指标

单位：%(质量)

名称	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	灼烧减量
大石桥镁砂	>90	<5	<2.5	<2.0	<1.0	<0.3
	>87	<6	<4	<2.5	<1.5	<0.5
莱州镁砂	>87	≤7	≤2	—	—	<0.5
	>85	≤8	≤2	—	—	<0.5

(2) 橄榄石砂 铸造用橄榄石砂主要是指镁橄榄石 (Mg_2SiO_4) 与铁橄榄石 (Fe_2SiO_4) 的固溶矿物 $(Mg, Fe)_2SiO_4$ 。纯镁橄榄石的熔点为 $1870^\circ C$ ，而铁橄榄石的熔点仅为 $1205^\circ C$ ，铸造用橄榄石砂熔点随其中铁橄榄石含量增加而降低（如图 1-3 所示），一般在 $1600\sim 1760^\circ C$ 区间。

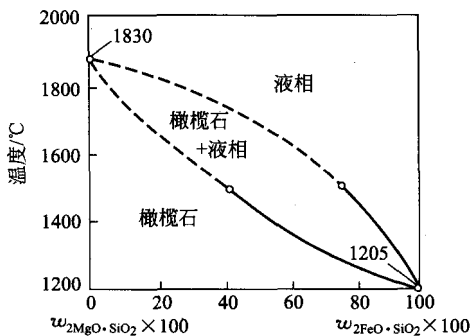


图 1-3 $2MgO \cdot SiO_2 - 2FeO \cdot SiO_2$ 系状态图

橄榄石砂外观呈灰绿色或淡绿色，密度为 $(3.2\sim 3.6)\times 10^3 kg/m^3$ ，莫氏硬度 $6.5\sim 7.5$ ，其热膨胀系数较硅砂小。橄榄石砂不含 SiO_2 ，因此可以避免硅尘危害，并且不与铁、锰氧化物反应，具有抗金属氧化物侵蚀的能力，可用于中型铸钢件，特别是高锰钢铸件的面砂、“V”法高锰钢件（如炉算、道叉等）的生产。

但橄榄石岩层通常含有蛇纹石 [含水硅酸镁， $3Mg_6 \cdot (Si_4O_{10}) \cdot (OH)_8$]、绿泥石、蛭石等杂质矿物，直接影响其使用性能。橄榄石砂随蛇纹石化的程度增加，其灼烧减量和发气量增大，容易使铸件产生针孔、麻点缺陷。橄榄石原砂生产中必须经过破碎、细磨和分级以得到所需要的粒度，在加工过程中可用水洗重

选方法去除蛇纹石，或用 1100℃ 煅烧方法脱水。水洗后的镁橄榄石一般其 MgO 含量大于 44%（质量分数）。我国湖北宜昌、河北张家口、陕西商南、河南南阳西峡等地都有橄榄石矿产。铸造用橄榄石砂根据其物理化学性能（化学成分、灼烧减量、耐火度、泥分、水分等）及粒度对其进行质量控制。

(3) 铬铁矿砂 铬铁矿砂属于铬尖晶石类，产于盐基性岩或富镁的超基性岩或由其演变的蛇纹岩中，主要矿物组成为铬铁矿 (FeCr_2O_4)、镁铬铁矿 $[(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4]$ 和铝镁铬铁矿 $[(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4]$ ，其中主要化学成分是 Cr_2O_3 ，一般可用 $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O} \cdot (\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe})_2\text{O}_3$ 的化学式表示。

铬铁矿砂的密度为 $(4.0 \sim 4.8) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，莫氏硬度为 5.5~6 级，耐火度大于 1900℃，但含有杂质时会降低其耐火度。铬铁矿砂中最有害的杂质是碳酸盐 (CaCO_3 , MgCO_3)，它能与高温金属液反应分解出 CO_2 气体，造成铸件的气孔类缺陷。因此铸造用铬铁矿石应经过 900~950℃ 高温焙烧，将其中的碳酸盐进行分解，而后再加工成一定粒度的原砂供生产使用。

铬铁矿砂的化学性质较稳定，有很好的抗碱性渣的作用，不与氧化铁等发生化学反应。铬铁矿砂的热导率比硅砂大数倍，能起到较好的激冷作用。在液态金属凝固过程中，能产生固相烧结，有助于防止液态金属的渗透，其抵抗钢液渗透的能力大大高于锆砂、镁橄榄石砂或细硅砂。但铬铁矿砂也存在热膨胀系数高（热膨胀系数约为锆砂的 2 倍）、粒形不如锆砂圆整、呈碱性（在混配酸硬化树脂砂时对硬化剂的消耗量大）等缺点。铬铁矿砂主要用于大型铸钢件和各种合金钢铸件的型、芯面砂和抗粘砂涂料等，也可用于覆膜砂。

我国仅有陕西商南等地生产铬铁矿砂，且产量不大，国内铸造业用铬铁矿砂主要依靠南非等国的进口。

(4) 锆砂 锆砂是一种以锆英石 (ZrSiO_4) 为主要组成的矿物，外观呈无色锥柱形细颗粒，主要存在于海砂中，常与硅砂、金红石、钛铁矿、独居石等伴生。锆砂常因含有铁的化合物，呈棕色、黄褐色或淡黄色。锆砂一般由海砂经过重力选矿除去硅砂及脉石矿物，磁力选矿去除含铁杂质（钛铁矿、石榴石、独居石等），电力选矿除去金红石等工艺精选出来。因此，出品率低，成本较高，价格较贵。

锆砂的密度为 $4.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，莫氏硬度为 7~8 级，熔点为 2430℃，但它在 1540℃ 开始分解为 ZrO_2 和 SiO_2 ，因此锆砂的烧结温度与熔化温度之间有一个较宽的温度区间。在含有少量杂质（如 Fe_2O_3 、 CaO 等）时，耐火度会有所降低。热膨胀比硅砂、橄榄石砂、铬铁矿砂等都小，仅为硅砂的 1/6~1/3，能有效避免铸件夹砂结疤类缺陷的产生。另外，其热导率、蓄热系数及密度都超过硅砂，因此能提高铸件的凝固速度，细化组织，改善其力学性能。锆砂的热化学稳定性高，几乎不被熔融金属或金属氧化物浸润，有利于阻止金属液浸入铸型孔隙，可防止或减轻化学粘砂及机械粘砂等缺陷。锆砂通常用于大型铸钢件厚壁处和各种合金钢铸件的面砂，以及抗粘砂的涂料、涂膏等。

我国的锆砂资源比较丰富，主要集中在海南、广东、山东、福建等沿海地区，尤以海南省的蕴藏最为丰富。

3. 原砂的质量要求

(1) 含泥量 含泥量指原砂或型砂中直径小于 0.02mm 的细小颗粒的质量百分比，其中既有黏土，也包括极细的沙砾及其他非黏土质点。

含泥量主要通过以下途径对湿型砂性能产生影响。

① 原砂中泥分增多，则型砂的孔隙直径减小，透气性下降。可以选择含泥量较低的原

砂以提高型砂的透气性。

② 原砂中含泥量的提高，有助于型砂湿压强度的提高，达到最适宜干湿状态的型砂含水量也提高。

③ 如果原砂的泥分中不含黏土矿物，则原砂中含泥量的提高会使型砂变脆，起模性能变坏。

含泥量的测定是利用不同颗粒尺寸的砂粒在水中的下降速度不同的原理，将原砂中颗粒直径大于 0.02mm 和小于 0.022mm 的颗粒分开。称量烘干的原砂置于烧杯中，加入水分及分散剂，煮沸及搅拌使其充分分散。然后经过反复按规定时间沉淀，虹吸排除浑水和冲入清水。直到水清后，由烘干的残留砂样的质量即可计算出原砂的含泥量。

(2) 原砂的颗粒组成 原砂的颗粒组成包括原砂的砂粒的粗细程度和砂粒粗细分布的集中程度两个主要概念。

原砂的颗粒组成通常采用筛分法进行，利用一套（11 个）筛孔尺寸自大而小的铸造用试验筛来筛分已经洗净泥分的干砂样。根据国家标准 GB 9442—1988 将筛分后所得到的各筛子上原砂的质量，选出余留量之和最大的相邻三筛，即可得该砂样的主要粒度组成，用相邻三筛的中间筛孔尺寸的毫米后的两位数作为粒度代号（参见表 1-3），在主要粒度组成部分中，如果前筛余留量大于后筛余留量，则在粒度代号后用 Q 表示，反之用 H 表示。

表 1-3 铸造用硅砂按粒度分组

分组代号	主要粒度组成部分筛孔尺寸/mm	分组代号	主要粒度组成部分筛孔尺寸/mm
85	1.70,0.850,0.600	15	0.212,0.150,0.106
60	0.850,0.600,0.425	10	0.150,0.106,0.075
42	0.600,0.425,0.300	07	0.106,0.075,0.053
30	0.425,0.300,0.212	05	0.075,0.053,底盘
21	0.300,0.212,0.150		

(3) 原砂的颗粒形状 原砂的颗粒形状可利用光学或电子显微镜可以直接进行观察。但实际中，则可依据我国制定的国家标准《铸造用硅砂》（GB 9442—1988），采用角形系数来反映硅砂的颗粒形貌（见表 1-4）。

表 1-4 铸造用砂角形因数分级

形状	圆形	椭圆形	钝角形	方角形	尖角形
分级代号	○	○-□	□	□-△	△
角形系数	≤1.15	≤1.30	≤1.45	≤1.63	>1.63

角形系数是铸造用硅砂的实际比表面积与理论比表面积的比值。其依据等体积的各种几何体中球形的表面积最小的基本原理，因而可以用砂粒的实测表面积与同体积假想圆球表面积比值来表示该砂粒形状偏离圆球形的程度。当其比值为 1 时，表明砂粒呈球形；当其比值大于 1 时，砂粒的形状呈非球状，并随偏离 1 的数值越大则越偏向尖角形。我们不可能逐一去测定每个砂粒的值，因此实际角形系数（E）的定义是单位质量原砂的实测表面积（即实际比表面积 S_w ）与单位质量同样粗细等直径假想圆球的表面积（即理论比表面积 S_{th} ）的比值。而实际比表面积的测定可通过通气法等实验方法测定，有兴趣的读者可参阅相关资料进一步了解其具体方法。

对湿型砂而言，在其他工艺条件相同的情况下，原砂的颗粒形状越圆，型砂越容易紧实，强度越高，但透气性也随之下降。对树脂砂来说，颗粒形状对强度的影响较湿型砂明显，在黏结剂加入量相同的情况下，圆粒砂的强度比尖角形砂的强度高；也就是说，获得相

同的型砂强度下，圆粒砂的树脂加入量要少于尖角形砂。

另外，原砂的表面形貌对黏结剂的消耗量也有关系。对于表面粗糙，存在侵蚀沟痕、裂缝和孔洞的原砂，黏结剂要填充其凹陷部分后才能起到连接作用，因此需要较大的黏结剂加入量。

二、黏土

造型用黏结材料包括黏土、水玻璃、油类黏结剂及合成树脂。为了便于讨论，将水玻璃、油类黏结剂及合成树脂等黏结剂放在后几节中分别介绍，本小节仅介绍黏土黏结材料。

黏土是湿型砂的主要黏结剂，由于其资源丰富，价格低廉，成为铸造生产中用量最大的一种黏结剂。黏土与水混合后，所含黏土矿物容易分散成细粒，具有黏结性和可塑性。烘干后硬结，具有一定干强度；在一定温度下，硬结的黏土重新被水润湿后又能恢复黏结性和可塑性，因此具有良好的重复使用性能。

1. 黏土的矿物组成结晶特性

黏土主要是由结晶质的黏土矿物组成的一种天然土状的细颗粒材料，其主要成分是水化硅酸铝 ($mAl_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot xH_2O$)。黏土是由铝硅酸盐矿物的岩石经过长期风化、热液蚀变或沉积变质作用形成的，一般呈白色或灰白色，随杂质的不同则呈现出土黄、淡红或黑灰色。黏土矿物的种类较多，按晶体结构可分为高岭石组（包括高岭石、珍珠陶土、地开石、埃洛石等）、蒙脱石组（包括蒙脱石、贝得石、绿脱石、皂石等）及伊利石组（包括伊利石、海绿石等）。

铸造生产上使用的黏土，根据黏土矿物种类将其分为铸造用黏土和铸造用膨润土两类。膨润土主要是由蒙脱石组矿物组成，主要用于湿型铸造的型砂黏结剂；铸造用黏土，又称白泥、陶土、瓷土、高岭土等，主要含有高岭石或伊利石类矿物，常用于干型砂和修炉、修包材料的黏结剂。我国淳化、宣化、信阳、潍坊、凌源、黑山、怀德、长春等地都有较丰富的膨润土矿藏，沈阳、唐山、宜兴、巩县等地出产高岭石为主的普通黏土，山东昌邑、湖北武汉等地则有以伊利石为主要矿物成分的黏土蕴藏。

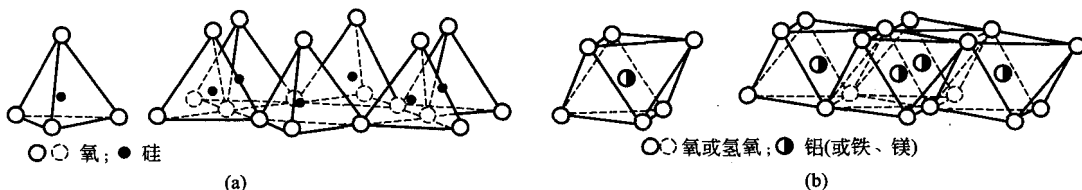


图 1-4 硅氧四面体、铝氧八面体结构示意图

(a) 硅氧四面体；(b) 铝氧八面体

黏土矿物的晶格中都包含硅氧四面体及铝氧八面体这两种基本结构。如图 1-4 所示，硅氧四面体是一个 Si^{4+} 等距离地配上 4 个 O^{2-} （或氢氧离子）构成的，铝氧八面体是一个铝（或铁、镁）离子居于中心，6 个氧或氢氧离子等距离排列成八面体状。通过 X 射线衍射可以得到黏土矿物的晶层排列有两层、三层等不同类型。

高岭石是 1:1 型两层结构的黏土矿物，它的每一个单位晶层是由一层硅氧四面体层和一层铝氧八面体层结合而成的。四面体层的顶端指向八面体，并共同占有一个氧，呈氢键联结（如图 1-5）。这种单位晶层在垂直方向（ c 向）层层叠起，在水平方向无限展开而构成高岭石的晶体。高岭石在 c 轴上单位晶层的厚度是 $0.72nm$ ($1nm=1 \times 10^{-9}m$)。由于高岭石晶层间以较紧密的氢键相联，在水分子不能进入晶层之间，因此水中不易分散，颗粒较粗，吸

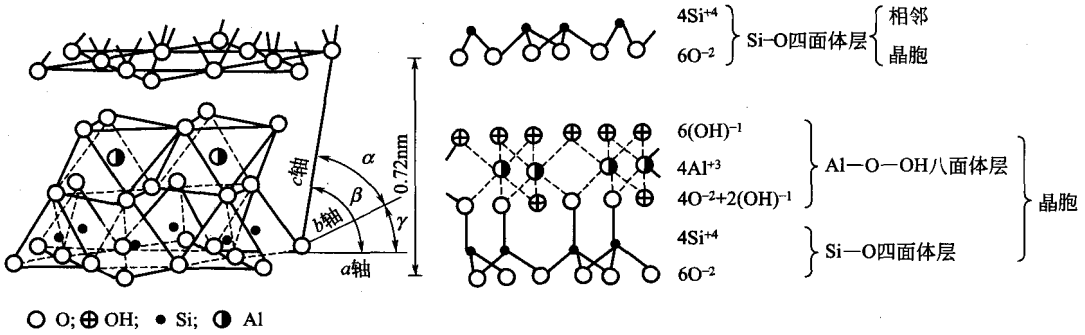


图 1-5 高岭石的晶层结构示意图

水膨润现象、吸水率较小。

蒙脱石则是典型的 2:1 型三层结构的黏土矿物。其单位晶层由两层硅氧四面体和中间一层铝氧八面体形成，晶层内四面体与八面体共同占有氧；但两相邻单位晶层之间是依靠由 O 层和 O 层间的分子力（范德华力）相连，其结合强度小于高岭石结构中的氢键（如图 1-6）。因此水分子和水溶液中的离子或其他极性分子容易进入单位晶层之间，使晶格沿 c 轴方向膨胀。如蒙脱石单位晶层厚度无水时为 0.96nm，而在含水时可以增大到 2.14nm。

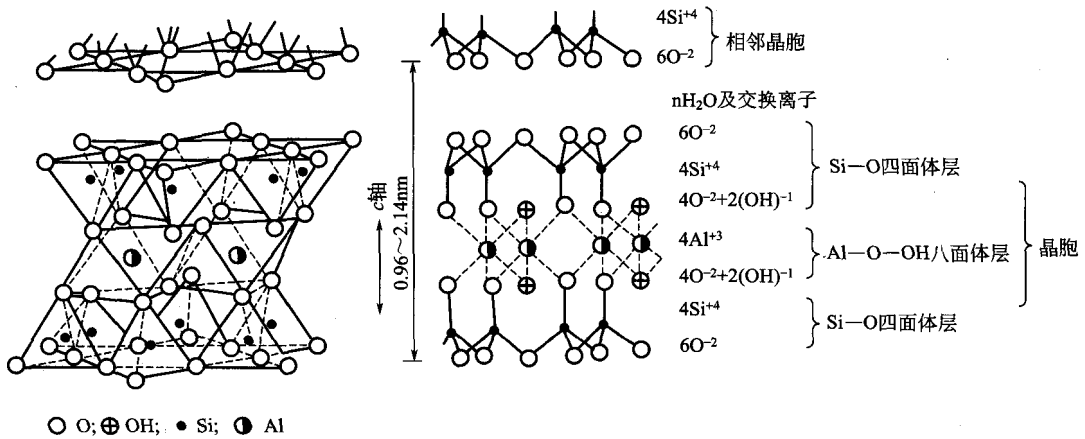


图 1-6 蒙脱石的晶层结构示意图

2. 黏土的交换性阳离子及活化处理

通常情况下，黏土颗粒表面带有负电荷。根据已有的研究，其主要原因可归纳为以下几方面。

(1) 破键 黏土片状结晶结构被破坏，边缘处的 Al-O、Si-O 离子键断裂形成不饱和键。这是高岭石类普通黏土颗粒带负电荷的主要原因。

(2) 晶体内部置换 在黏土矿物形成过程中，单位晶层内八面体的 Al^{3+} 部分地被 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 所置换，硅氧四面体的 Si^{4+} 被 Al^{3+} 所置换，破坏原先的电荷平衡而呈现较大的负电性。这是蒙脱石和伊利石类矿物带负电荷的主要原因。

(3) 黏土颗粒表面外露的氢氧基上氢的置换 为了使负电荷得到平衡，黏土矿物通常吸附一些阳离子，如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等。