

陆 平 编著

水泥材料科学导论



同济大学出版社

水泥材料科学导论

陆 平 编著

同济大学出版社

内 容 简 介

本书用材料科学观点系统地阐述了硅酸盐水泥熟料形成过程、水泥及各矿物水化反应过程、硬化水泥浆体微结构的形成和浆体的力学行为等。特别强调材料的结构和性能的关系以及相应的一系列当前最新的超高强水泥材料。全书概述了当今国内外在水泥科学领域的最新发展,着重叙述按材料的指定性能(如高强、低脆、节能等)对水泥材料形成各阶段的设计及各指定性能之间的相互联系。内容翔实,层次丰富。

本书可作为高等学校无机非金属材料、硅酸盐工程、建筑材料等专业高年级和研究生的教材,也可供科研、设计及生产单位的科技人员参考。

责任编辑 冯时庆

封面设计 李志云

水泥材料科学导论

陆 平 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路1239号)

新华书店上海发行所发行

常熟市文化印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.625 字数: 250千字

1991年1月第1版 1991年1月第1次印刷

印数: 1—1,400 定价: 5.50元

ISBN 7-5638-0677-5/O·21

前 言

本世纪 80 年代以来,水泥混凝土科学工作者提出了一个极为重要的课题,就是如何用材料科学的最新观点,用系统论的方法深入研究水泥混凝土材料的各个形成过程、在不同结构层次上的组分、结构、界面及各种性能的关系,进而为制备具有指定结构及指定性能的新型水泥基复合材料,为材料设计打下坚实的基础。最近 20 年中,无机非金属材料科学取得了极大的发展,特别在陶瓷科学等领域,研制出许多具备特殊的优异性能的材料,它们无疑地推动了尚处于较为落后状态的水泥混凝土科学的发展。

过去几十年中,对水泥混凝土材料从水泥熟料(主要是波特兰水泥)的烧成、水泥浆体的水化硬化过程乃至混凝土结构的形成曾经进行了详细的、然而也较多的是各别的研究,取得了大量有价值的研究成果。正是在这些所取得的成果的基础上,使我们有可能对水泥基材料进行系统的研究及综合设计。其结果,必然导致水泥混凝土科学的一次突破,使之不仅能更有效地服务于大宗的建筑工程,而且由于性能上的突跃,例如超高强、低脆性等力学性能而进入非建筑材料的高技术领域。近十年来,笔者在深入学习材料科学理论的基础上,逐渐对水泥基材料在各个层次上的微观结构,特别是对分子级层次上的微观结构研究感兴趣,强烈地感到水泥基材料的固相本征性质在制备具有超级的力学及其他宏观性能的材料设计过程中所具有的越来越重要的作用,无疑是水泥科学学科领域中值得重视的新方向。笔者密切注视着在这一领域研究中国际及国内的新进展,努力吸取各种不同的学术观点、研究方法和各种新的思维,并在自己的科研及教学工作中得到消化及完善。尔后,将这些内容整理改编成一本教材,并进行过多次讲授。拙著正是在这一基础上加以充实而成的。

F A 692/68

在本书中,采用 erg、Å 等计量单位,按照我国规定,从 1991 年开始废止不用,但国际上,在建筑材料的研究领域中,常常采用,兹为引述方便,避免曲折的换算和繁冗的数字表述,悉照原状,敬希读者鉴察。

在本书写作过程中,笔者得到不少学术界前辈及同志们的热诚关怀和鼓励、支持和帮助,特别受益于沈威教授、吴科如教授和唐明述教授的热情指导、推荐和评阅。我的导师黄蕴元教授在百忙中亲自为本书作序、审稿,在此一并致以最深切的谢意。

由于本人才疏学浅,书中缺点和错误在所难免,谨请指正。

陆 平

1989 年 4 月

代 序

材料科学,更完整地说是材料科学与工程,它的任务在于研究材料的组分、结构、界面及其性能之间的关系,从而对材料达到下列三个预报的目的:

- 1) 按组成材料、工艺过程,预报不同层次的组分结构及界面状态。
- 2) 按不同层次的组分、结构及界面,预报力学行为或其他功能。
- 3) 按使用条件、环境及自身的化学物理变化,预报使用寿命。

实际上就是按使用要求设计材料、研制材料及预报使用寿命,其基础就是材料不同层次的组分、结构、界面与性能的关系。

材料科学是在近30年来逐步形成的新兴学科,首先在金属材料上起步,发展速度惊人,以“爆炸性”来喻之确不为过,遥遥领先。在非金属材料方面,陶瓷、玻璃的研究相继纳入材料科学的轨道,近年来亦颇可观,气势甚好。它们均已独立成为材料科学的一个分支:金属材料科学、陶瓷材料科学和玻璃材料科学(或简称金属科学、陶瓷科学和玻璃科学)等。水泥,包括其他无机胶凝材料的研究,长期以来由于历史原因而习惯于单纯水泥化学观点与方法,徘徊了若干年,进步滞缓。对水泥化学基础研究具有权威性的国际水泥化学会议,每6年举行一次,在1980年第七届会议上,一些著名学者首次呼吁要把水泥的研究纳入材料科学的轨道,否则很难想象有重大突破。近年来对水泥研究必须更新观点的认识逐渐趋于一致,成绩亦是可观的,在不少点上有所突破,虽尚未连成一片,但“水泥材料科学”(或简称水泥科学)这个名词已为大部分人所接受,成为材料科学的又一分支。由于从单纯水泥化学的研

究方法转入多学科性质现代化测试方法的材料科学研究的轨道需要时间,重要的问题在于培养人才。学校以什么样的教学计划来建设专业,教师以什么观点来教授课程内容,都是问题的实质,亦涉及学校行政与教师本人接受多学科的再教育和观点上的不断刷新与开拓。水泥科学的进展,无疑地会带动混凝土科学的进展。

“水泥材料科学导论”,作为一门无机非金属材料专业硅酸盐方向的专业课,应该跳出旧水泥化学的框框,让学生入水泥科学之门。水泥科学较之金属、陶瓷等科学落后好几十年,极待加速发展与开拓,入门知识至关重要,切勿等闲视之。

陆平是我国自己培养的无机非金属材料专业学科领域的第一位博士。他的这本教材,写得简明扼要,从历史到现状,从原子分子层次到宏观层次,从组分、结构到性能,亦注意了广度,以照顾全局。全书材料科学的观点很明朗,新发展的东西得到了重视,对前人的重大贡献亦无疏漏,且分析的方法已加以更新。特别对显示材料科学在水泥领域内涉及的多学科性,作了恰当的安排,使读者得到启迪。

在此书出版之际,我乐为之序,以志他为深化教材改革作出的努力,表示祝贺。

黄蕴元

1989·4·20

目 录

1. 绪论	(1)
1.1 硅酸盐材料的分类与发展.....	(1)
1.2 水泥化学的新进展.....	(4)
2. 熟料形成科学	(7)
2.1 概述.....	(7)
2.2 熟料形成反应.....	(11)
2.3 熟料形成过程参数的影响.....	(33)
2.4 矿化剂及微量组分的影响.....	(43)
2.5 熟料的微结构.....	(61)
2.6 低能耗熟料.....	(74)
3. 水泥水化物理化学反应过程	(90)
3.1 引言.....	(90)
3.2 C_3S 和 C_2S 水化.....	(91)
3.3 C_3A 和 C_4AF 的水化.....	(107)
3.4 波特兰水泥水化.....	(117)
3.5 水泥水化产物.....	(140)
4. 硬化水泥浆体的微结构及性能	(164)
4.1 硬化水泥浆体的微结构元.....	(164)
4.2 孔结构及其对浆体力学性能的影响.....	(179)
4.3 浆体微结构的建立.....	(198)
4.4 微结构与浆体力学性能的关系.....	(213)
5. 超高强水泥	(235)
5.1 超高强水泥的微结构特征.....	(235)
5.2 MDF 水泥.....	(246)
5.3 DSP 材料.....	(257)

1. 绪论

1.1 硅酸盐材料的分类与发展

硅酸盐是地球上最丰富的自然资源之一，硅酸盐材料也是分布最广的无机材料。通常，人们把硅酸盐材料按其矿物组成和产品种类不同分成陶瓷、玻璃、耐火材料和水泥这四大类。虽然这四类材料随着科学发展而出现许多非硅酸盐新品种，但是硅酸盐仍是这些材料中最主要组分。

我国是一个陶瓷古国，陶瓷生产有着极其悠久的历史 and 辉煌的成就。距今 3000 多年前。我们的祖先就学会烧制陶器(当时的烧成温度为 1000°C 左右)，到殷、周时代已经有釉陶出现，其特征已接近瓷器(烧成温度提高到 1200°C)。东汉时期出现的瓷器是我国的一大发明；之后，唐朝发展出的唐三彩系一种用低温烧制的铅釉，并用 Cu^{2+} (绿色)、 Fe^{3+} (黄褐色)、 CoO_4^{2-} (蓝色)和 MnO_4^- (紫色)等进行调色。成为我国的艺术珍品，到宋代则是我国瓷器蓬勃发展的时期。瓷都景德镇在当时已驰名中外。

传统的陶瓷产品是用粘土类(硅铝化合物)和其他天然矿物原料经过粉碎、成型和煅烧等过程而获得的。在古代，陶瓷只是指传统的粘土质产品。而在国际上，“陶瓷”一词长期以来始终具有较为广泛的含义。例如在美国和日本，直至现在，陶瓷(Ceramics)仍是硅酸盐和几乎所有窑业产品的同义词，所以把硅酸盐玻璃、水泥均包括在内。今天，在许多国家仍习惯于把传统的生产方式制成的无机多晶产品归于陶瓷之列。

随着生产的不断发展和科学的不断进步。陶瓷的一系列珍贵的物理化学性质被发掘出来，导致陶瓷从古老的工艺和艺术领域中进入到现代科技行列之中，成为当今无机非金属材料中的一大支柱。近 30 年来，陶瓷不仅作为结构材料获得发展，陶瓷的许多

新品种已涉足于航天、核工业等高新技术和日常生活用品的各个领域中,而且逐渐发展成为新的功能材料,使用在电子技术、空间技术和计算机技术等方面。特别是从80年代开始,材料科学突飞猛进,新一代的陶瓷材料,例如 ZrO_2 相变韧化陶瓷的出现,使得陶瓷科学在改性研究上前进了一大步。

玻璃是另一类无机硅酸盐材料,是将一定配比的物料经熔融、冷却而固化的非晶态物质。玻璃的生产如同陶瓷一样,也具有漫长的历史。在古代埃及,人们就学会用泥罐来熔制最简单的玻璃器皿。早在公元前一世纪,古罗马人就学会用铁管来吹制玻璃。一般认为,意大利是最早生产玻璃的国家,在11~15世纪整整几百年,威尼斯是世界玻璃制造中心。直到16世纪,这一被保密的玻璃制造技术才传到欧洲其他国家。17世纪人们开始用煤代替木柴做燃料来熔制玻璃,并研制出第一块光学玻璃。19世纪,阿贝(Abbe)对光学玻璃进行了系统的研究,奠定了玻璃科学的基础。

今天,玻璃科学已经取得了极大的进步,适用于各种需要的特种玻璃制品不断问世。本世纪50年代,在感光玻璃的基础上加入成核剂,在一定温度下进行热处理后,成为具有玻璃相和微晶体均匀分布的玻璃复合材料,称作微晶玻璃。由于它集中了玻璃和陶瓷的优点。故又称玻璃陶瓷。现在,微晶玻璃已经发展出几千个品种。其中氟云母系列的微晶玻璃甚至可以用来切削加工,大大改变了玻璃材料的脆性。

耐火材料是随着陶瓷、玻璃以及冶炼工业的发展而一起发展的。并且,随着人们对化学力学和各种相图的基础研究的深入,耐温范围在 $1580^{\circ}C\sim 1770^{\circ}C$ 的普通硅酸盐耐火材料,逐渐发展到耐火度为 $2000^{\circ}C$ 的高级铝质耐火材料和耐火度为 $3000^{\circ}C$ 以下的镁质特级耐火材料,甚至到耐火度超过 $3000^{\circ}C$ 的超级耐火材料。

在所有硅酸盐材料中。最大宗的是硅酸盐类的胶凝材料,即水泥混凝土建筑材料。根据定义:凡能把碎片或固体材料胶结成一个整体的粘接材料都可称为水泥。但硅酸盐水泥的生产至今只

有 200 年左右的历史，它是人类社会的不断实践而逐步演变过来的水硬性胶结材料。我国的古长城、古埃及的金字塔等宏伟的建筑物中，使用的只是烧粘土、烧石灰或烧石膏等早期的气硬性胶结材料。显然，由于缺乏合理的烧成制度，这些材料的质量是很低劣的，通常是“欠烧”和“死烧”材料的混合物。古希腊人和古罗马人所使用的石灰砂浆也许是当时最为科学的建筑材料。他们发现了产于普泽里(Pozzuoli)的火山灰、石灰和碎石混合后，能建成坚固的普通建筑乃至水中建筑。“天然火山灰”一词(Pozzolana)因此而得名。而“水泥”一词(Cement)在拉丁语中指的只是今天我们使用的人工火山灰质材料，既使到了中世纪，也只是意味着石灰砂浆，只有在最近的 100 多年中，才具有当今的含义。

1756 年，英国人斯米顿(J·Smeaton)奉命在海上建造一个灯塔，这种恶劣的使用条件导致他第一个研制出水硬性石灰砂浆，该材料定量地由二份消石灰干粉与一份凝灰岩混合。拌以尽量少的水所组成。同时，他还发现，只有石灰石中含有一定量的粘土物质时，砂浆的质量才得以提高。这是第一次揭露了该材料作为“水泥”的前身的水硬性本质。然而，该材料没有得到推广，直到半个世纪后，维卡(L·J·Vicat)才首先用石灰石和粘土来烧制水泥，但由于烧成温度太低。更不了解在煅烧过程中的物理化学变化，故产品质量低劣。甚至比天然的波特兰(Portland)石的胶凝性能更差。1824 年，英国的建筑工人阿斯普丁(J·Aspdin)用煅烧使石灰石粉碎后，再同粘土混合，重新放入窑中煅烧制成水泥，他因此而第一个获得制造水泥的专利权。此后，直至阿斯普丁将生产技术传授给儿子，水泥生料的配方始终是保密的。与此同时。苏联人切利耶夫(Чернев)于 1825 年也单独发明了水泥。水硬性材料(包括波特兰水泥)的应用，使得 19 世纪后混凝土发展成为一种最有用的建筑材料。以下便是 19 世纪中叶以来水泥混凝土的发展情形：

1850 年德国开始生产水泥；

1871 年美国开始生产水泥；

1877 年德国制定第一个水泥标准；
1898 年日本、中国开始生产水泥；
1903 年世界上第一座 64m 高层建筑在美国建成；
1906 年混凝土搅拌机问世；
1927 年飞机跑道开始使用混凝土；
1930 年开始生产大坝水泥；
1958 年开始有高强混凝土(抗压强度大于 500 kg/cm^2) 出现；
1965 年电子计算机进入水泥混凝土行业；
70 年代, 各种新品种水泥混凝土出现。

1.2 水泥化学的新进展

水硬性胶结材料的出现, 引起了人们极大的重视, 早期的学者们也试图解释一些理论问题, 但都没有足够的依据, 甚至把一些偶然的发现(例如石灰中发现了 Mn 的存在)作为具有水硬性质的原因, 直至上一个世纪中叶, 才认识到粘土中的 SiO_2 是硬化过程中的主要成分。波特兰水泥问世以来, 人们积累了不少生产水泥的经验。随着各基础学科特别是化学理论的发展, 水泥的生产逐渐由经验上升到专门的知识, 人们开始掌握水泥生产及使用过程中所发生的一系列物理、化学变化, 掌握水泥浆体结构中发生的变化。1906 年开始, 美国华盛顿一个地球物理研究室首先采用了热方法及岩相分析方法来研究波特兰水泥的成分, 标志着将水泥化学的理论研究提高到新的水平。

但是, 水泥作为最大宗的硅酸盐材料。在过去几十年中始终只属于普通建筑材料。尽管由于基础学科的迅速发展, 由于测试手段的不断更新, 人们对水泥及水泥浆体的认识不断完善和深化, 却始终仍没有出现新的突破。在整个硅酸盐科学领域中, 无疑水泥科学是比较落后的一个方面。

进入 80 年代以来, 材料科学已经异军突起, 成为新的一次产业革命中的强大支柱。在无机非金属材料领域中, 陶瓷、玻璃等科

学的急速发展，大大地影响了水泥工业和水泥研究。水泥化学的传统研究方法和许多经典的理论受到了极大的冲击，例如，关于波特兰水泥的凝结和硬化的两个最经典的理论，即雷·霞特利 (H·Le·Chatelier) 于 1882 年提出的结晶理论和米契阿里斯 (W·Michaelis) 于 1893 年提出的胶体理论，近 100 年来，该两理论均得到不断发展。并形成各自的学派，争论不休。只有当把水泥水化的研究纳入到了材料科学研究的轨道中时，这两种理论才开始趋于统一：硬化水泥浆体中的 C-S-H 凝胶如同一般胶体一样。其性质在很大程度上取决于物质的分散状态。但尽管它具有极大的比表面积，其基本结构依然保持近程有序状态，即可以这样认为：凝胶仍由晶体的基本成分构成，它并不是真正的近程无序结构的无定形物质。在这一概念上，结晶理论和胶体理论均只是强调了水泥这一复杂体系在水化不同阶段的某个主要方面。对水泥的研究已经不再停留在水化的机理问题上，而更重要的是整个水化、硬化乃至结构形成的全过程。同时，对水泥的研究也已经由宏观深入到细观、微观，直到分子级层次上。十余年前，著名的水泥科学家戴蒙德 (S·Diamond) 还告诫水泥研究者：对水泥混凝土材料，在微观级层次上研究已经足够。继续深入到分子级层次研究是没有意义的。而今天，一系列在分子级层次上对高强水泥石性质的报导层出不穷，材料科学的研究正在把硬化水泥浆体这一大宗材料的潜在能量发掘出来。人们不仅要了解水泥在生料制备、烧成、水化和硬化等各个阶段的一系列物理化学变化规律，而且要控制这些规律，使这些规律能被用来按人们所预先指定或综合设计的结果而起作用。显然，水泥化学的真实涵义已经大大超越了纯化学的范围，而迅速成长为一门综合化学、物理等各基础学科的水泥科学。

今天，水泥科学已经发展到了一个新的转折点，人们开始认识到：在了解一个复杂体系的行为时不能再采用几十年来所习惯的科学简化论态度。按照简化论，任何一个体系均可理解成各组成部分的总和，因而只要把该体系简化到各单独的组成部分，研究每

一部分的性质,然后将结果累加即可。在水泥科学领域也是如此,正如著名学者曼塔(P·K·Mehta)指出的那样,从事水泥科学研究的人们应该注意其他科学领域中那怕是细小的变化,以便能帮助本领域的进一步发展。水泥科学家正在改变那种简化论的研究方法。代之以把水泥整个生产过程,把水泥熟料中各矿物以及把水泥水化硬化后的各水化产物都看成是相互联系的复杂的体系这样一个系统论的方法。系统论是按照关系和整体来看待世界的,系统是综合的整体,它的性质不能简化成每个小单元的性质,与基本的建筑块的集合不同,系统论处理更强调组织的基本原则。系统论的实例遍布于整个自然界,每一个组织——从最小的细菌到大范围的植物和动物乃至人类,都是一个整体。当体系在物质上或理论上被分割成孤立的单元时,其性质便遭到破坏。虽然我们可能了解任何体系中的每一单独部分,但整个体系的性质总是与单个部分性质的“加和”有所区别。

比新的研究手段更重要的是新的思维方法,有了系统论这样一个新的思维方法,水泥科学才会出现突破,水泥才能被进一步发掘其许多潜在的优点,才会进一步摆脱仅仅作为大宗的建筑材料而被使用。当今,用水泥制造的第一个弹簧、第一张唱片已经问世。我们深信,新一代水泥产品必将脱颖而出。

2. 熟料形成科学

2.1 概述

一般来讲,除了水泥的细度、石膏的掺入量等一些物理或外界因素的影响以外,水泥的各种性质主要取决于熟料的各种物理化学特性。硅酸盐材料的形成均需经过高温下的化学反应,水泥熟料的形成同样也经历了各磨细固体颗粒在高温下进行的一系列固相反应及烧结的过程。

水泥生料和熟料在相组成和结构等诸方面有很大的区别,而优质的水泥熟料首先取决于水泥生料的化学组成、生料的易烧性和活性,恰如具备优良性能的水泥在很大程度上取决于熟料的特性一样。因此,在熟料形成科学中,首先要探讨由熟料的性质对生料提出的要求。所谓熟料的性质,指的是熟料的化学组成及矿物组成、熟料中各相的晶粒尺寸及形成浆体良好的微结构的能力。有关水泥生料在窑中逐渐升温煅烧成熟料的一般工艺过程和原理,已经在有关的专业参考书中叙述,在这儿不再重复。这一章我们主要从材料科学的原理讨论水泥熟料形成过程中的一些平衡态和非平衡态热力学和动力学问题。讨论煅烧过程中一些参数包括微量组分的影响,以及对熟料活性的一些研究。水泥科学发展到今天,我们还只能从定性的意义上提高熟料的活性,人们尚未能定量地控制水泥熟料活性的大小。最后,我们还要讨论节能熟料的形成。

熟料形成过程中早期进行的主要是分解反应,其中最重要的则是碳酸盐的分解。还可能发生一系列形成亚稳的中间相的反应。例如碳硅酸盐、硫硅酸盐等,这些化合物虽然不稳定,在高温区分解,但在形成 C_2S 和 C_3S 等主要硅酸盐矿物的过程中所起作用是十分重要的,至今仍是人们所关心的研究课题。在水泥煅烧过程

中，物料的温度、热力学状态以及反应活性之间存在着一定的联系。

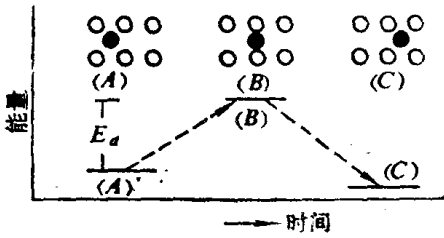


图 2-1 活化态概念示意图

为了使某一反应（包括固相反应）得以进行，按热力学概念，通常用反应自由能变化 ΔG 来定义该反应的进行趋势。然而，如同一般的化学反应一样，水泥熟料形成过程中的反应并非是直接进行的，而必须经历一个活化态，如图 2-1 所示。显然，图中状态 A 到状态 C 必须越过某一状态 B， ϵ_a 即为活化势垒，根据统计物理学概念，在原子层次上活化势垒的确切性质是未知的。我们知道，越过该活化势垒的原子必须具备足够的能量，各种原子或离子的能态符合波尔兹曼分布 (Boltzmann Distribution)；

$$N_i = \frac{N}{Z} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$$

式中 N 为系统中原子总数， Z 是分布函数。 N_i 为大于平均能量 E_i 的原子数， $k = 1.38 \times 10^{-16}$ ，即玻尔兹曼常数。由上式可见， N_i 是随温度 T 升高而增多的。

如果取 $E_i = E_a$ 为反应活化能，则反应速度常数 K 可用下式表示

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

式中 A 为常数。

图 2-1 中只表示了一个原子在晶格中的运动。在实际的熟料形成反应中，情形要复杂得多。至少可能发生晶体相的转变。晶格中的粒子可能转移至表面，甚至穿越界面，此时，反应活化能将变得更为复杂，可用下式表示

$$E_a = \sum_{i=1}^n E_{a_i}$$

式中各项 E_{a_i} 一般不可能进行测量或定量计算。因此，我们通常将用实验方法测定并假定一些条件后获得的 E_a 称作表观活化能。

在煅烧的最终阶段,物料之间开始出现液相,我们知道,液相的出现对熟料烧成有极其重要的作用。从冷却至室温的熟料的微结构分析可知,在烧成阶段液相有很好的流动性以及对固相的湿润性。40余年前,李(Lea)和派克(Parker)就报导了CaO-Al₂O₃-SiO₂-Fe₂O₃四元系统这一极其有用的相图。其低共熔点为1338°C。并且,在熟料烧结温度下生成的液相量可按下式计算:

$$1338^{\circ}\text{C} \quad P = 3.03A + 1.75F$$

$$1400^{\circ}\text{C} \quad P = 2.95A + 2.20F$$

$$1500^{\circ}\text{C} \quad P = 3.00A + 2.25F$$

式中A、F分别为熟料中Al₂O₃和Fe₂O₃的含量,P即为液相百分含量,通常在15~25%之间。最近,格拉瑟(Glasser)等人用图解法研究煅烧过程中温度、化学组成和液相量之间的定量关系,即在1338°C和1400°C下Al₂O₃对Fe₂O₃的所谓“烧结相图”,如图2-2所示,图中1338°C用实线表示,1400°C则用虚线表示。由此图可见,当A/F=1.38时,铝和铁共同存在时能提供最多的液相(指同一温度下)。利用这张烧结相图有助于推广到其他微量组分存在时的情形。在实际的窑中,由于其他组分如MgO、Na₂O、K₂O和TiO₂等存在,改变了最低共熔点的温度及组成。同时,

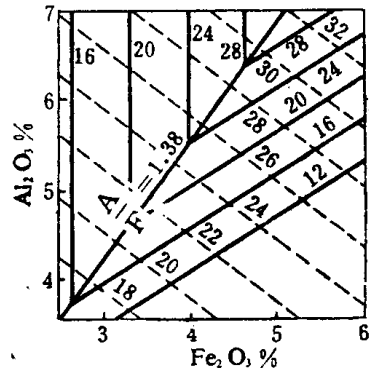


图2-2 熟料烧结相图

当熟料开始熔融时,其组成远不是处于平衡态,即熔融是在亚稳条件下出现的,亚稳相的存在,降低了液相出现的温度。纳根(Nachen)曾报导低共熔点降至1280°C左右,但至今尚未确切地测得这一温度,通常仍认为在1300°C左右出现液相。然而,有一点结论比较趋于一致,即由于液相的出现,大大加速了反应的进行,以致可能使液相参与的反应比较接近于平衡态,即液相的组成与平