

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering



“十二五”国家重点图书

水泥材料研究进展

Research Progress of Cementitious Materials

沈晓冬 姚 燕 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

“十二五”国家重点图书

沈晓冬 姚燕 主编

水泥材料 研究进展

Research Progress of Cementitious Materials

SHUINI CAILIAO YANJIU JINZHAN

内容简介

本书围绕水泥低能耗制备与高效应用的基础研究,全面、系统地概述国内外对阿利特微结构和熟料矿物相组成优化、水泥生产预分解窑技术及研究进展、水泥粉磨动力学及粉磨性能控制、水泥熟料与辅助性胶凝材料优化复合的化学和物理基础、复合水泥浆体组成和结构的演变规律研究进展、水泥基材料的产物与结构稳定性及服役行为等方面的研究和探讨。同时,翻译了第十二届国际水泥化学大会的主题报告,补充了水泥在测试手段和发展方向等方面的论述。

本书可供无机非金属材料专业的学生以及从事水泥生产、科研、设计的有关科研人员和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

水泥材料研究进展 / 沈晓冬, 姚燕主编. —北京: 高等教育出版社, 2012.1

(材料科学与工程著作系列)

ISBN 978-7-04-033624-5

I. ①水… II. ①沈… ②姚… III. ①水泥-研究 IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第230113号

策划编辑 刘剑波
责任校对 金辉

责任编辑 焦建虹
责任印制 朱学忠

封面设计 王凌波

版式设计 杜微言

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	33	版 次	2012年1月第1版
字 数	620千字	印 次	2012年1月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	89.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究
物料号 33624-00

前 言

中国水泥工业发展迅速。2010年我国水泥产量达18.68亿t，占世界总量的50%以上，连续26年居世界第一；2001—2010年，我国水泥产量年平均增长率为13.19%，未来需求和产量仍将持续增长。预计到2020年发展中国家水泥需求增长是1990年的115%~180%。可持续发展和国际关系研究所(IDDRI)和Entreprises pour l'Environnement(EpE)预测2050年水泥需求量为近50亿t，世界自然基金会(WWF)/拉法基预测水泥需求量将超过55亿t。国际能源机构(IEA)预测高需求情景下2050年水泥产量为44亿t，低需求情景下为36.6亿t。水泥工业能源资源消耗大、产品质量偏低、环境负荷严重。据统计，2009年我国原煤产量为29.6亿t，燃烧排放CO₂为77.5亿t，其中水泥生产能耗约1.8亿t煤，占当年全国总能耗的6.6%，CO₂排放总量约13亿t。

另一方面，水泥能够利用工业废渣作为其辅助性胶凝组分。水泥工业目前利用废弃物的数量占废弃物排放总量的30%，为工业废渣的资源化利用发挥了重要作用。但是其利用方式是粗放式的，工业废渣高效资源化利用亟须科学性指导。此外，在水泥使用过程中，因其性能不良导致的混凝土工程质量低下，造成了混凝土结构服役寿命偏短。实现废弃物的合理利用，提高水泥的应用效率，延长工程的服役寿命，这其中仍然存在许多有待解决的问题。

水泥工业实现节能减排目标形势严峻。国家当前倡导的可持续发展既是水泥工业发展的压力，也是水泥工业跨越发展的重大机遇。提高水泥性能、降低能源和资源消耗、减少环境污染、提高水泥的应用效能是水泥工业技术进步的方向。

近几十年来，水泥科学技术的发展促进了水泥工业的一系列重大变革，如基于热动力学理论发明的水泥预分解窑煅烧技术、基于颗粒料层粉磨理论发明的高效粉磨技术、基于水泥水化理论产生的辅助性胶凝材料应用技术等，使水泥生产能耗降低了近40%，水泥混凝土服役寿命有所提高。但是，总体上来说，已有研究以材料强度性能为重点，水泥制备与应用相对脱节，缺乏系统性，研究成果无法全面指导解决当前水泥制备和应用过程中的一系列问题。

ii 前言

本书以节能减排和提高水泥性能为中心，围绕水泥组成和结构优化、制备过程节能与水泥高效应用等重大问题系统地展开，包括阿利特微结构和熟料矿物相组成优化、水泥生产预分解窑技术及研究进展、水泥粉磨动力学及粉磨性能控制、水泥熟料与辅助性胶凝材料优化复合的化学和物理基础、复合水泥浆体组成和结构的演变规律研究进展、水泥基材料的产物与结构稳定性及服役行为等方面的研究和探讨，并翻译介绍了第十二届国际水泥化学大会的主题报告。这对实现高胶凝性熟料性能的优化设计、实现熟料形成过程最佳能量配置、指导新型高效节能粉磨技术和装备的研发、提高水泥应用效能、显著促进水泥科学由经验描述或半定量描述向精确描述和预测方面发展以及发展水泥制备和应用的创新技术等，具有重大科学意义。

本书由沈晓冬和姚燕担任主编，具体分工如下：第一、七章由沈晓冬编写，第二章由汪澜编写，第三章由叶旭初编写，第四章由余其俊编写，第五章由邓敏编写，第六章由姚燕编写。马素花博士负责统稿工作。

由于编写时间仓促，书中不当之处在所难免，殷切希望读者给予批评指正。

编者

2011年11月

目 录

第一章 阿利特微结构和熟料矿物相组成优化	1
1.1 引言	1
1.2 阿利特高介稳微结构研究	3
1.2.1 C_3S 多晶型结构	3
1.2.2 C_3S 晶型的命名	5
1.2.3 介稳 C_3S 晶体结构模型	6
1.2.4 阿利特介稳结构的影响因素	11
1.3 掺杂对熟料形成过程的影响	16
1.3.1 掺杂对 C_3S 形成过程及性能的影响	16
1.3.2 阳离子对液相性质及熟料相形成的影响	17
1.3.3 阴离子(团)对液相性质及熟料相形成的影响	19
1.4 熟料矿物相组成优化	20
1.4.1 阿利特形成动力学	21
1.4.2 熟料矿物相组成的相互关系	23
1.4.3 熟料矿物相组成优化匹配	25
1.4.4 促进阿利特形成的措施及其控制	29
1.5 含 $C_4A_3\bar{S}$ 矿物硅酸盐水泥的工业示范	29
1.5.1 含 $C_4A_3\bar{S}$ 矿物硅酸盐水泥熟料的原料选择及工业配料	29
1.5.2 含 $C_4A_3\bar{S}$ 矿物硅酸盐水泥的工业试制	30
1.6 熟料矿物相定量分析	31
1.6.1 显微镜统计法	32
1.6.2 Bogue 法	32
1.6.3 X 射线衍射法	32
1.6.4 Rietveld 全谱拟合定量分析方法	33
1.7 结束语	35
参考文献	35
第二章 水泥生产预分解窑技术及研究进展	45
2.1 引言	45

2.2	熟料烧成热动力学过程	46
2.2.1	热力学研究	47
2.2.2	动力学研究	50
2.2.3	烧成过程研究	51
2.3	快速烧成的研究进展	52
2.4	预分解窑产量的研究进展	53
2.4.1	生料分解率测定的研究	53
2.4.2	预分解窑产量能力的研究	54
2.4.3	提高预分解窑产量的研究	54
2.5	结束语	56
	参考文献	56
第三章	水泥粉磨动力学及粉磨性能控制	61
3.1	引言	61
3.2	粉磨动力学方程	62
3.2.1	粉磨动力学方程的建立	62
3.2.2	实际粉磨动力学方程	63
3.2.3	方程中 m 和 K_1 值的确定	63
3.3	粉磨动力学方程研究进展	63
3.4	水泥粉磨动力学方程研究进展	65
3.5	离心力场中粉磨动力学研究进展	67
3.5.1	研究背景	67
3.5.2	行星球磨机的研究现状	68
3.5.3	行星球磨机的应用	69
3.5.4	行星球磨机的运动学研究	72
3.5.5	立式行星球磨机动力学研究	76
3.5.6	立式行星球磨机实验研究	79
3.5.7	粉碎机理与能量传递规律的研究	81
3.6	小能量破碎理论基础研究	87
3.7	粉磨过程对水泥颗粒组成及性能的影响	89
3.8	结束语	90
	参考文献	91
第四章	水泥熟料与辅助性胶凝材料优化复合的化学和物理基础	99
4.1	主要工业废渣在水泥中的利用及存在的问题	101

4.2	水泥熟料与辅助性胶凝材料的复合技术和理论	104
4.3	分析研究与测试方法进展	108
4.4	复合水泥颗粒级配优化理论	115
4.4.1	调整颗粒级配改善浆体性能的原理	116
4.4.2	最紧密堆积物理模型	118
4.5	高性能减水剂研究进展	129
4.5.1	聚羧酸系超塑化剂合成与性能研究	131
4.5.2	相关机理研究	134
4.5.3	超塑化剂对水化产物的影响	142
4.5.4	减水剂分子结构与性能关系研究	143
4.5.5	聚羧酸系减水剂与水泥间的相容性	145
4.6	水泥基复合材料的组成、环境参数等与塑性浆体性能以及硬化体收缩开裂的关系	147
	参考文献	153
第五章 复合水泥浆体组成和结构的演变规律研究进展		161
5.1	硬化水泥浆体的组成与结构	161
5.1.1	C-S-H	161
5.1.2	Ca(OH) ₂ 和 AFt (AFm)	169
5.1.3	未水化水泥颗粒和未反应辅助性胶凝材料	174
5.1.4	孔	177
5.1.5	孔溶液	179
5.1.6	水	183
5.2	NMR 在水泥浆体结构研究中的应用	186
5.3	复合水泥硬化浆体结构演化的计算机模拟	190
5.3.1	CEMHYD3D 研究进展	191
5.3.2	HYMOSTRUC 研究进展	192
5.3.3	水泥浆体微观结构三维模拟的新进展和软件操作	193
5.4	水泥浆体的组成、结构与性能的关系	194
5.4.1	微区力学性能	194
5.4.2	变形性能	196
5.4.3	离子固结或滞留作用	199
5.4.4	有害介质在水泥浆体中的扩散、迁移与渗透	199
5.4.5	性能调控	201
	参考文献	205

第六章 水泥基材料的产物与结构稳定性及服役行为	227
6.1 复合水泥基材料的水化产物和结构稳定性	227
6.1.1 概述	227
6.1.2 复合水泥基材料组成与混凝土耐久性之间的关系	230
6.1.3 复合水泥基材料水化反应研究	232
6.1.4 复合水泥基材料水化研究测试和表征方法	237
6.1.5 存在问题和研究方向	244
6.2 水泥基材料孔结构表征与传输机制	244
6.2.1 水泥基材料的孔隙结构	244
6.2.2 裂隙结构	247
6.2.3 传输性能和孔隙结构的关系	248
6.2.4 宏观传输性能的测试方法	249
6.3 侵蚀性介质在水泥基材料中的传输机制及其影响	250
6.3.1 水泥基材料浆体对有害离子的固化作用及其稳定性 研究	250
6.3.2 水泥基材料混沌分形特征与耐久性	254
6.3.3 混凝土渗透性研究现状及发展	264
6.3.4 侵蚀性介质在水泥基材料中的传输机制及其影响的 研究	268
6.4 环境条件作用下混凝土的服役性能及寿命预测	279
6.4.1 多因素耦合作用下混凝土性能劣化的评价	279
6.4.2 多因素耦合作用下水泥基材料耐久性劣化过程研究	287
6.4.3 水泥基材料 TSA 破坏机理及预防措施研究	296
参考文献	303
第七章 第十二届国际水泥化学大会 (ICCC 2007) 主题报告	331
7.1 水泥矿物、水泥及其反应产物在原子和纳米尺度的表征	331
7.2 可持续发展和气候变化计划	366
7.3 混凝土的耐久性——由有害化学反应引起的劣化现象	387
7.4 水泥基材料研究和应用中的创新	424
7.5 水泥系统的流变学和早期性能	438
7.6 水泥基材料的早期性能综述	477
7.7 材料性能试验	496

第一章

阿利特微结构和熟料 矿物相组成优化

1.1 引言

水泥是重要的建筑材料，具有悠久的历史，是世界上应用最广泛的人造石材，它对工程建设起着重要的作用。近些年水泥市场日益繁荣，各种通用水泥及特种水泥层出不穷，其品种已达一百余种，如快硬水泥、抗硫酸盐水泥、大坝水泥以及油井水泥。2010年我国水泥产量达 18.68 亿 t，与去年同比增长了 14.4%，占世界水泥总产量的 50% 以上，连续 26 年稳居世界之首。

众所周知，硅酸盐水泥主要包含四种矿物：硅酸盐矿物 C_3S (Alite) 和 C_2S (Belite)、铝酸盐矿物 C_3A 、铁铝酸盐固溶体 C_4AF 。这四种矿物在水泥熟料中的总量达到了 95% (质量分数)。通常， C_3S 固溶少量的氧化物称为阿利特。在水泥熟料的这四种矿物中阿利特是最主要的强度源，也是最难烧成或合成的矿物。阿利特的充分形成是硅酸盐水泥熟料烧成的表征。提高熟料中的阿利特含量可以提高熟料的强度，也可以增加水泥水化过程中产生的 $Ca(OH)_2$ ，从而加强对辅助胶凝组分的激发作用。阿利特的含量、晶体尺寸、晶型、晶貌和晶体结构等参数对水泥熟料的物理力学性能有很大影响。此外，硅酸二钙 (C_2S)^[1,2]、铝酸三钙 (C_3A)^[3,4] 和

铁铝酸四钙(C_4AF)^[5,6]的结构在其以往的研究中得到了全面而翔实的资料,但是硅酸三钙 C_3S 由于存在多种晶型,其结构至今还没有完全清楚,尤其是其介稳态结构模型的研究还需要进一步深入。在阿利特的7种晶型中,三方的R型是高温稳定的晶型,三斜的T1型是最低温稳定的晶型,常温下各种晶型的阿利特都是以介稳状态存在的,显然高温晶型阿利特的介稳化程度较高。含高温晶型阿利特的熟料的胶凝性高于含低温晶型阿利特的熟料的胶凝性。通常,熟料中的阿利特属较低温晶型的单斜晶系,因此,欲获得更高胶凝性的熟料,应就如何获得高介稳高对称的阿利特高温晶型,使其处于更高的跃迁能量状态展开研究。

目前大量使用的硅酸盐水泥尚存在一些缺点和不足,主要表现为:早期强度偏低,仅有20~30 MPa;烧成温度较高,一般需要1450℃甚至更高,导致能源消耗高;水泥熟料中阿利特含量高,通常为50%~60%(质量分数,下同),对石灰石原料品质要求高,消耗大量优质石灰石资源;由于大量使用石灰石,产生大量的 CO_2 等废气,环境污染日趋严重。此外,社会发展对水泥的性能也提出了更高的要求,如施工性能更好、水化热更低、强度更高、体积更稳定、耐腐蚀性和耐久性更好。因此,降低能耗、提高性能是水泥工业发展的方向,以较少量的高性能水泥达到较大量低质水泥的使用效果是水泥科学与技术研究的主要目标^[7]。

高 C_3S 含量的硅酸盐水泥熟料是制备高胶凝性水泥的关键。众所周知,水泥熟料的胶凝性主要取决于熟料中 C_3S 及其晶型晶貌特征。熟料中 C_3S 的含量高,则熟料的强度较高;如果熟料中 C_3S 发生晶格畸变,则可以降低生产水泥的烧成温度,降低能耗。通过掺杂技术、改变热历史、调整化学组成等手段实现高介稳阿利特微结构调控及高胶凝性熟料相匹配是降低水泥生产能耗、提高水泥性能的重要途径^[8]。

提高水泥熟料的胶凝性,一直是水泥生产和研究的目标,而熟料的胶凝性与熟料矿物的组成及微观结构有关。在水泥熟料矿物体系中, C_3S 是最主要的结晶相,也是综合物理性能最好的矿物相。 C_3S 的含量、晶体尺寸、晶型、晶貌和晶体结构等参数对水泥熟料的物理力学性能有很大影响。研究提高熟料中 C_3S 含量并提高其水化活性的理论和技术,是实现水泥高性能化的重要课题。

1.2 阿利特高介稳微结构研究

1.2.1 C₃S 多晶型结构

自脱奈波姆提出阿利特 (Alite) 的命名以来^[9], 世界各国学者针对这种水泥矿相分别通过相平衡研究、光学显微镜研究、X 射线研究和化学研究的方法进行了广泛的分析。已经知道, C₃S 有分属三方 (rhombohedral, R)、单斜 (monoclinic, M)、三斜 (triclinic, T) 3 个晶系的 7 种晶型, 而这 7 种晶型间很多具有相似的结构, 见表 1.1。C₃S 的晶体结构随着煅烧过程中温度和过程条

表 1.1 由 X 射线衍射 (XRD)、光学显微镜和差热分析 (DTA) 观察的 C₃S 的多种晶型

温度/℃	XRD	DTA		光学显微镜
		观察到的信号	强弱/ (cal · g ⁻¹)	
1 070	R 纯	M II b → R 无	—	R M3 → R; 孪晶以及不同的光属性
1 060	M II b ZnO 掺杂	M II a → M II b 无	—	M3 (M1, M2) → M3; 孪晶以及不同的光属性
990	M II a 纯	M I a → M II a 弱的可逆信号	0.05	M1, M2 无区别
980	M I a 纯	T III → M I a 强信号, 简单, 可逆, 弱的延迟 (10 ℃)	0.5	T3 → M1; 孪晶以及不同的光属性
920	T III 纯	T II → T III 强信号, 简单, 可逆, 弱的延迟 (10 ℃)	1	T2, T3 无区别
620	T II 纯	T I → T II 大信号, 可逆, 强延迟 (20 ~ 40 ℃), 冷却过程中	0.6	T1 → (T2, T3): 不同的光属性
20	T I 纯	无	—	T1

注: R—三方晶系, M—单斜晶系, T—三斜晶系。

件的变化而变化。纯 C_3S 的室温稳定相是 T1 型，M3 型只有通过光学显微镜才能观察到，在室温下 M3 型 C_3S 只在掺杂的组成中出现。在高温时纯 C_3S 的晶型为高对称高介稳的 R 型结构，在冷却过程中对称性降低，由 R 型向 M 型及 T 型结构转变。这种对称性降低在 XRD 粉末衍射图谱上表现为多组粉末衍射线分离，见图 1.1，可作为判断 C_3S 晶型转变的方法之一^[10-15]。有研究探讨了 C_3S 的 DTA 曲线，认为通过 DTA 区分 C_3S 的晶型转变是很精确的。但是对其中提及的一些 DTA 曲线的变形，仍然不能给以解释。2002 年，Urabe 等^[15]发现 M3 位于 M2 和 R 之间，M3-M2 之间的转换仅仅体现在光学特性方面。

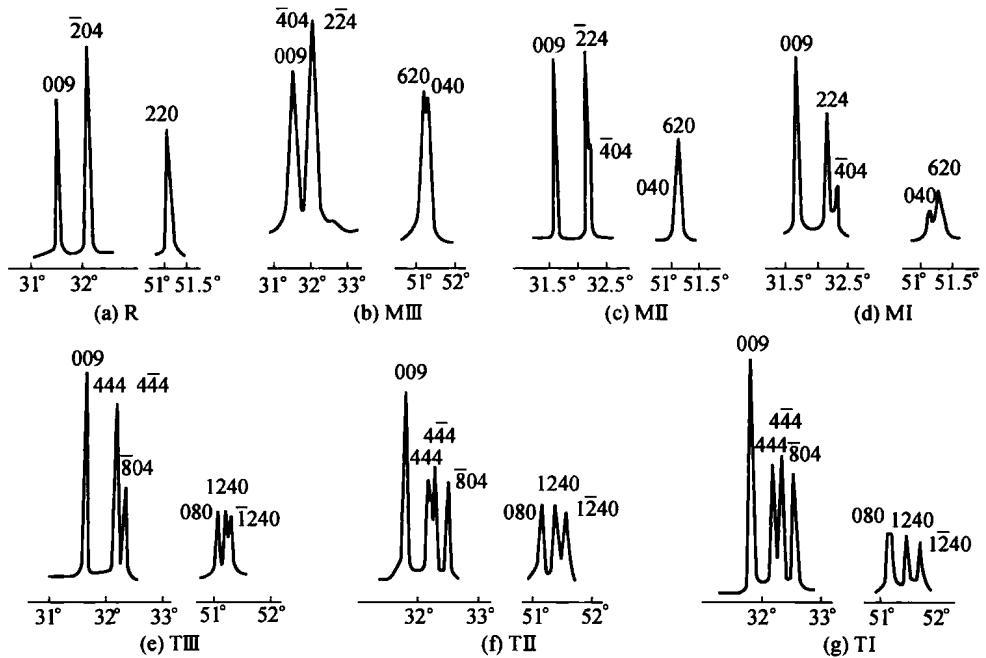
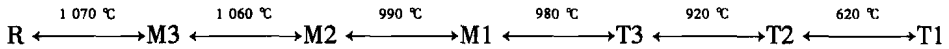


图 1.1 不同晶型 C_3S 的 XRD 特征谱线

由于 C_3S 的变体多并且相类似，且其转变焓很小，因而转变是复杂的，此外，差热分析、高温 X 射线衍射和光学显微镜所得的转变点并不总是相同的，见表 1.1。其原因可能是热振荡的作用，原子团的分布近似于较高对称性模型。但是当温度降低时，原子在一定晶格点阵上振动的振幅随温度降低而减小，引起晶格变形，而且此过程常常无任何明显的滞后。所以，对于纯 C_3S 来说，任何一种高温型变体都无法用急冷的方法在室温下稳定下来^[16]。而根据表 1.1 也不难看出，在温度从 20 °C 向 1 070 °C 转变的过程中，常温下的各种

晶型可以通过控制手段向高对称的 R 型转变。不同晶型之间的多晶转变和转变温度如下式所示：



在室温下，纯 C_3S 以 T1 型存在，掺杂使各种晶型可以在室温下稳定存在。M1 和 M3 是工业熟料中最常见的晶型。Staněk 和 Sulovsky^[17] 阐述了 C_3S 晶型与水泥强度之间的关系， SO_3 是 M1 晶型的稳定剂， MgO 是 M3 晶型的稳定剂，发现以 M1 晶型为主的水泥比以 M3 为主的水泥强度高 10%。 ZnO 可稳定 C_3S 的所有变体形式^[18]，可从低对称性的三斜型(T)和单斜型(M)晶系到高对称性的三方型(R)晶系。在各变体中 ZnO 的含量如下：在 T1 中的含量小于 1.0%，在 T2、T3 中的含量为 1.0% ~ 2.0%，在 M1 中为 2.0% ~ 2.5%，在 M2 中为 2.5% ~ 4.0%，在 R 中为 4.0% ~ 5.0%。利用选区电子衍射对系列掺杂 ZnO 的 C_3S 固溶体进行研究，发现掺杂 3.2% 以下 ZnO 的 C_3S 呈现 T2 晶型、掺杂 4.8% ZnO 呈现 M1 晶型、掺杂 6.4% ZnO 可同时具有 M1 和 M2 晶型、掺杂大于 6.4% ZnO 呈现 M3 晶型。然而，研究者^[19] 研究 Al、Fe、Mg 进入 C_3S 晶格引起晶型变化，均得到 T1 晶型，其强度有着明显的区别，影响抗压强度的主要因素是 Al、Fe、Mg 进入固溶体取代本来固有的元素。汪浩明等研究了氧化铜、氧化亚铜对 C_3S 水化性能的影响，认为：掺杂物的性质、水化产物和晶格缺陷决定了 C_3S 的水化活性和水化机理，而不是由于晶体晶型的改变引起的。熟料矿相晶型与水化性能的关系仍存在争议。因此， C_3S 和阿利特的介稳程度和晶型变化与水化性能的关系有待进一步研究。

1.2.2 C_3S 晶型的命名

自 20 世纪 50 年代以来，对于 C_3S 晶体结构的研究的报道屡见不鲜，对于 C_3S 晶型的命名也略有不同^[20] (表 1.2)。

表 1.2 C_3S 不同的命名

T1	T2	T3	M1	M2	M3	R
三斜： Jeffery			单斜 pseudo-orthorhombic； Yamaguchi		单斜： Jeffery	三方： Jeffery
H' inets						H' inets Nishi

续表

T1	T2	T3	M1	M2	M3	R
T I :	T II :	T III :	M I :	M II :	M III :	R = R(a, c) :
Bigaré	Bigaré	Bigaré	Bigaré	Bigaré		Bigaré
Eysel	Eysel	Eysel	Guinier	Guinier	Guinier	Bigaré
Golovastikov	Guinier	Guinier	Hahn	Hahn	Il' inets	Eysel
Guinier	Hahn	Hahn	Regourd	Regourd	Sinclair	Urabe
Hahn	Il' inets	Il' inets	Sinclair	Sinclair	Urabe	Hahn Maki
Il' inets	Regourd	Regourd	Urabe	Urabe		Nishi
Regourd	Sinclair	Sinclair	Woermann	Woermann		Regourd
Sinclair	Urabe	Urabe				Taylor
Urabe	Woermann	Woermann				Urabe
Woermann						Woermann
			M I a:	M II a:	M II b:	R = R(2a, c)
			Eysel	Eysel		Il' inets
			Regourd	Regourd	Regourd	
					MIIb: Eysel	
T1:	T2:	T3:	M1:	M2:	M3:	
Maki	Maki	Maki	Maki			
Regourd	Taylor	Taylor	Taylor	Maki	Maki	
Taylor				Regourd	Nishi	
				Taylor	Regourd	
					Taylor	
T: Nishi						

1.2.3 介稳 C₃S 晶体结构模型

目前, 已经分别确定了 R、M3 和 T1 型 C₃S 的晶体结构^[21-26]。但是, 对于 M1、M2、T2、T3 这些多型体的结构仍然没有完全解释清楚^[22](表 1.3)。

表 1.3 C_3S 晶体学参数

样品	参考文献	空间群	a/Å	b/Å	c/Å	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	V(23)	Z
R, pseudo-structure	Jeffery, 1952	$R3m$	7	7	25	90	90	120	1 061	9
C_3S : $T = 1\ 100\ \circ C$	Bigaré 等, 1967 Guintier 和 Regourd, 1969	$R3m$	OH	7	25	90	90	90	2 122	9
			H	7.15	25.560	90	90	120	1 132	
$Ca_{2.98}Si_{0.98}Al_{0.04}O_5$: $T = 1\ 200\ \circ C$	Nishi 和 Takéuchi, 1984	$R3m$	OH	12.384	25.560	90	90	90	2 263	9
			H	7.135	25.586	90	90	120	1 128	
C_3S , SrO-doped: $T = 1\ 400\ \circ C$	Il'inets 和 Malinovskii, 1985	$R3m$	OH	12.358	25.586	90	90	90	2 256	9
			H	7.056 7	24.974	90	90	120	1 078	
$M3, C_3S +$ (MgO, Al_2O_3)	Jeffery, 1952	Cm	OH	12.222	24.974	90	90	90	2 256	36
				33.08	18.56	90	94.17	90	4 330	
$C_3S + 0.5\% ZnO$: $T = 1\ 020 \sim 1\ 090\ \circ C$	Regourd, 1979	Cm	OH	12.372	25.440	90	90	90	2 242	?
				33.083	18.499	90	94.12	90	4 289	
$Ca_{2.89}SiMg_{0.11}O_5$	Nishi 等, 1985	Cm	OH	7.027	24.932	90	90.14	90	2 145	36

续表

样品	参考文献	空间群	$a/\text{Å}$	$b/\text{Å}$	$c/\text{Å}$	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\gamma/(\text{°})$	$V(23)$	Z
从熟料中获得的 阿利特	Mumme, 1995 de Noirfontaine 等	Cm	12.235	7.073	9.298	90	116.31	90	721	6
			12.235	7.073	25.005	90	89.71	90	2 164	6
M2, C_3S : $T = 1\ 000\text{°C}$	Bigaré 等, 1967	Cm	12.231 3	7.033	24.957 3	90	90.09	90	2 147	?
			12.342	7.143	25.434	90	90	90	2 242	?
$C_3S + 0.5\% \text{ZnO}$: $T = 990\text{°C}$	Regourd, 1979	?	12.333	7.137	25.442	90	90	90	2 239	?
			12.332	7.142	25.420	90	89.95	90	2 239	?
M1, C_3S : $T = 980\text{°C}$	Bigaré 等, 1967 Taylor, 1964	Cm	12.426	7.045	24.985	90	90.07	90	2 155	?
			12.257 5	7.059	25.046 2	90	90.06	90	2 167	?
T3, C_3S : $T = 940\text{°C}$	Bigaré 等, 1967	$C1$	24.633	14.29	25.412	90.06	89.86	89.91	8 945	?
T2, C_3S : $T = 680\text{°C}$	Bigaré 等, 1967	$C1$	24.528	14.27	25.298	89.98	89.75	89.82	8 854	?
T1, C_3S : $T = 20\text{°C}$	Bigaré 等, 1967 Golovastikov 等, 1975	$C1$	24.398	14.212	25.103	89.91	89.69	89.69	8 704	?
			11.67	14.24	13.72	105.5	94.33	90	2 190	18
P	de Noirfontaine 等	$P\bar{1}$	12.32	7.05	25.21	89.95	90.41	89.66	2 190	?
			12.307	7.041	25.097	89.74	90.23	89.7	2 175	?