

国家“973计划”项目成果专著

水泥低能耗制备与 高效应用

Energy-saving Manufacture and
High-efficient Application of Portland Cement

沈晓冬 等著

中国建材工业出版社

国家“973 计划”项目成果专著

水泥低能耗制备与 高效应用

Energy-saving Manufacture and
High-efficient Application of Portland Cement

沈晓冬 等著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥低能耗制备与高效应用/沈晓冬等著. —北京:
中国建材工业出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-5160-1237-6

I. ①水… II. ①沈… III. ①水泥-节能-制备-应用
IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 123224 号

内 容 简 介

本书针对水泥低能耗制备与高效应用这一重大产业需求, 重点围绕高介稳阿利特微结构调控及高胶凝性熟料相匹配、熟料分段形成动力学、离心力场中的粉磨动力学与能量传递和水泥优化复合与结构稳定性四个关键科学问题, 全面、系统地总结了我国水泥领域科学工作者近年来在高介稳阿利特微结构和熟料矿物相组成优化、熟料分段烧成动力学及过程控制、水泥粉磨动力学及过程控制、水泥熟料和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以及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工作和成果。

编辑出版该书, 旨在为水泥、混凝土行业和企业的发展提供理论指导和技术支持。本书可供无机非金属材料专业的学生以及从事水泥、混凝土生产的工程技术人员和有关科研人员阅读, 以及在实际工作中借鉴。

水泥低能耗制备与高效应用

沈晓冬 等著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 41

字 数: 798 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版

印 次: 2016 年 1 月第 1 次

定 价: 268.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

水泥混凝土面广量大，是人类社会发展的重要基础材料之一。水泥工业节能减排和混凝土长寿命使用是水泥混凝土基础材料可持续发展面临的重大关键问题。科技部于2008年批准立项国家重点基础研究发展计划（“973”计划）“水泥低能耗制备与高效应用的基础研究”项目（编号：2009CB623100），该项目针对水泥生产和应用过程的各个主要环节围绕关键科学问题开展以提高水泥性能和节能减排为主要目标的基础研究，实现水泥科学理论和技术的重大创新，促进水泥工业生产与产品结构调整、提高使用效能、提高能源与资源利用效率。该项目开展六个方面研究工作：（1）高介稳阿利特微结构和熟料矿物相组成与胶凝性的关系。（2）熟料分段形成动力学及过程控制。（3）离心力场中水泥粉磨动力学与颗粒特性。（4）水泥体系各组分优化匹配和胶凝性的发挥。（5）复合水泥浆体组成和结构的演变规律及其与性能的关系。（6）服役条件下水泥基材料的产物与结构稳定性及服役行为。预期在水泥低能耗制备的基础研究方面取得突破性进展，在水泥高效应用的基础研究方面取得重要进展，相关研究成果得到工业应用。

该“973”项目由南京工业大学沈晓冬教授担任首席科学家，中国建筑材料科学研究总院、南京工业大学、清华大学、华南理工大学、同济大学为项目主要参加单位，南京大学、济南大学、郑州大学、北京工业大学、浙江大学、湖南大学、韶关学院、重庆大学、安徽建筑工业学院、哈尔滨工业大学、沈阳建筑大学和河南理工大学为参与单位，共计160余名水泥混凝土领域学者参加。五年研究工作取得了重要进展，于2013年11月通过科技部验收。该项目已发表学术论文406篇，申请发明专利38项、授权专利28项，其中2项分别获得美国、日本和欧洲发明专利，出版7本专著；获国家技术发明奖二等奖1项、国家科技进步二等奖2项、省部级二等奖5项和三等奖3项；组织召开4次国际学术会议、8次国内学术会议；培养21名博士后、69名博士研究生、243名硕士研究生；既有具有自主知识产权的专利成果，也有具有较高研究深度及学术水平的理论性成果。

研究成果中与水泥低能耗制备相关的成果包括：（1）建立了 C_3S 基本结构

单元 9R 模型和原子尺度上晶体结构的表征方法,发现了离子调控规律,发明了阿利特晶体结构的离子调控和热调控方法,实现了阿利特由 M3 型向 M1 型转变,大幅度提高了熟料胶凝性。对 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ 五元熟料体系,发明了硫铝酸钙二次合成方法,实现了高含量阿利特和硫铝酸钙矿物的共存。

(2) 研究了熟料分段烧成动力学,开发了一套适合测试和表征微量碳酸盐分解新生物相反应活性的装置,建立了产物活性与煅烧制度的关系,建立了以收缩未反应芯为基础的硅酸二钙固相反应模型,建立了碱、氯、硫的挥发循环及控制机理。

(3) 建立了离心力作用下熟料粉磨动力学方程,掌握了节能效率的影响规律。与水泥高效应用相关的成果包括:

(1) 建立了硅酸盐水泥熟料和辅助性胶凝材料复合水泥中水泥熟料和辅助性胶凝材料优化匹配的基本理论,实现使用 25% 水泥熟料和 75% 矿渣、粉煤灰、钢渣等辅助性胶凝材料制备了 42.5 强度等级复合水泥。

(2) 阐明了复合水泥浆体孔结构特征,建立了复合水泥浆体组成和结构的演变规律,提出了低收缩、较高强、较低熟料用量的复合水泥制备技术,阐明了其作用机理。

(3) 提出了低钙体系水化结构稳定性的掺合料掺量限值和基于耐久性的低钙水泥体系稳定性判据,基于由力学损伤引起的裂纹密度与连通度的相关性建立了基于有效介质理论的带微裂纹材料的渗透性理论模型,研发了多因素耦合作用下混凝土耐久性评价试验设备和试验方法,建立了混凝土损伤和寿命预测模型,指导了国家重大工程的设计与评估验收。

本书对“973”计划项目“水泥低能耗制备与高效应用的基础研究”的主要研究成果进行了论著,按照项目所安排的六个课题顺序编章。全书由参加项目研究的课题负责人和部分学术骨干撰写。第一章由沈晓冬、张文生、吕忆农和马素花撰写,第二章由汪澜和考洪涛撰写,第三章由叶旭初撰写,第四章由余其俊、马一平和韦江雄撰写,第五章由邓敏和姚武撰写,第六章由姚燕、王玲和吴浩撰写。每章的第一撰写人为各课题负责人。全书由沈晓冬、马素花负责统稿,沈晓冬负责审核。

由于作者水平有限,书中内容难免有疏漏之处,敬请读者指正。

沈晓冬

2015.8

目 录

第一章 高介稳阿利特微结构和熟料矿物相组成优化	1
1.1 C_3S 晶体结构演变规律与理论模型	1
1.1.1 C_3S 晶体结构原子尺度表征	1
1.1.2 C_3S 晶体结构多型性演化规律	43
1.1.3 C_3S 晶体结构表征技术的应用	83
1.1.4 C_3S 晶体结构相变动力学	83
1.2 不同结构 C_3S 的水化活性	87
1.3 阿利特晶体结构调控技术的应用	88
1.3.1 熟料中阿利特晶体结构的热调控	88
1.3.2 SO_3 对高镁硅酸盐水泥熟料胶凝性调控	98
1.4 水泥熟料矿相组成优化及应用	101
1.4.1 高阿利特硅酸盐水泥熟料中阿利特含量的优化	102
1.4.2 高阿利特含量硅酸盐水泥熟料中中间相含量的优化	104
1.4.3 硅酸盐水泥熟料形成热力学及动力学研究	108
1.4.4 阿利特-硫铝酸盐体系水泥熟料	119
1.4.5 相组成优化技术应用	151
第二章 熟料分段烧成动力学及过程控制	153
2.1 熟料形成过程的热力学与动力学理论	153
2.1.1 生料矿物分解热力学与动力学理论	154
2.1.2 生料矿物分解新生物相反应活性	158
2.1.3 固相反应热力学与动力学过程	165
2.1.4 固相反应模型及高温自维持机理	171
2.1.5 液相烧结反应动力学	175
2.1.6 碱、氯、硫的挥发循环及控制	180
2.2 熟料煅烧窑炉技术模拟分析	186
2.2.1 预分解窑技术理论研究分析	186
2.2.2 回转窑模拟分析	190
2.2.3 新型 RSP 分解炉技术研究和模拟设计	192
2.3 多功能耐高温材料的研制	206
2.4 新型 RSP 分解炉的工程设计及示范应用	217
第三章 水泥粉磨动力学及过程控制	224

3.1 离心力场中粉磨过程的节能机理分析	224
3.1.1 研磨体相对运动的基本方程	224
3.1.2 磨筒内研磨体相对运动的抛落轨迹	225
3.1.3 撞击时间	226
3.1.4 等冲击能作用等粉磨效果	227
3.1.5 粉磨过程动力学相似与节能分析	235
3.2 粉磨过程中研磨体运动规律的模拟研究	237
3.2.1 衬板尺度影响钢球运动规律	237
3.2.2 衬板数量对钢球运动规律的影响	245
3.3 影响能量传递的粉磨效率试验与数模回归研究	249
3.3.1 粉磨过程试验研究	249
3.3.2 衬板对水泥熟料粉磨的影响	250
3.3.3 数学模型回归研究	257
3.3.4 行星磨中水泥熟料的粉磨动力学研究	264
3.4 粉磨水泥颗粒特性对水泥性能的影响规律	279
3.4.1 闭路粉磨的试验模拟	279
3.4.2 难磨、易磨物料在粗细粉中的两极分化对颗粒分布的影响	280
3.5 酰胺多胺聚羧酸水泥助磨剂的制备和性能研究	300
3.5.1 酰胺多胺聚羧酸水泥助磨剂的制备及表征	300
3.5.2 酰胺多胺聚羧酸水泥助磨剂对水泥粉磨的影响	301
3.5.3 酰胺多胺聚羧酸水泥助磨剂对水泥强度的影响	302
3.5.4 三乙醇胺和三异丙醇胺对水泥粉磨效率和水化性能的影响	302
3.5.5 酰胺多胺聚羧酸复合水泥增强助磨剂的制备和性能研究	305
第四章 水泥熟料和辅助性胶凝材料优化复合的化学和物理基础	308
4.1 水泥熟料与辅助性胶凝材料粒度区间与组成、性能的关系	308
4.1.1 原材料与试验方法	308
4.1.2 硅酸盐水泥粒度区间与组成、性能的关系	309
4.1.3 矿渣粒度区间与组成、性能的关系	315
4.1.4 粉煤灰粒度区间与组成、性能的关系	320
4.1.5 钢渣粒度区间与组成、性能的关系	325
4.2 复合水泥颗粒群的优化匹配	330
4.2.1 水泥基材料(粉体)常用颗粒级配模型	330
4.2.2 “区间窄分布,整体宽分布”颗粒级配模型	335
4.2.3 “区间窄分布,整体宽分布”模型的修正	336
4.2.4 “区间窄分布,整体宽分布”模型的验证	343

4.3	水泥熟料与辅助性胶凝材料的优化匹配原则	348
4.3.1	水泥熟料与辅助性胶凝材料的需水量	349
4.3.2	水泥熟料与辅助性胶凝材料的水化动力学匹配	349
4.3.3	水泥熟料与辅助性胶凝材料的填充能力	363
4.3.4	水泥熟料与辅助性胶凝材料的强度贡献	367
4.3.5	水泥熟料与辅助性胶凝材料的优化匹配原则	374
4.4	低熟料用量、高性能复合水泥的制备	376
4.4.1	五区间复合水泥的性能	376
4.4.2	三区间复合水泥的性能	381
4.4.3	低熟料用量、高性能复合水泥的模拟工业化生产	388
4.4.4	复合水泥浆体结构的形成与演变过程	391
4.5	复合水泥浆体结构稳定性研究	401
4.5.1	水泥基材料塑性收缩开裂研究方法的建立	401
4.5.2	复合水泥浆体的体积变形及其作用机理	416
4.5.3	复合水泥浆体体积变形的影响因素	419
4.5.4	低熟料用量、高性能复合水泥的耐久性	423
4.5.5	低熟料用量、高性能复合水泥体积稳定性改善机理	425
4.6	复合水泥工业化推广及混凝土试验研究	425
4.6.1	试验原料	425
4.6.2	混凝土配合比设计	428
4.6.3	新拌混凝土性能	428
4.6.4	混凝土的力学性能	429
4.6.5	混凝土的体积稳定性	431
4.6.6	混凝土的耐久性能	432
第五章	复合水泥浆体组成和结构的演变规律	436
5.1	C-S-H 凝胶分子结构和团簇结构的理论计算	436
5.1.1	水合硅氧四面体骨架结构的确认	436
5.1.2	C-S-H 分子几何结构和稳定性的量子化学计算	440
5.1.3	C-S-H 凝胶团簇的设计与模拟	444
5.2	复合水泥浆体中熟料和辅助性胶凝材料水化的 NMR 表征	452
5.2.1	波特兰水泥熟料的早期水化	452
5.2.2	模拟孔溶液中硅灰的水化	453
5.2.3	复合水泥中硅灰的水化	456
5.2.4	模拟孔溶液中粉煤灰的水化	460
5.2.5	复合水泥中粉煤灰的水化	461

5.3	复合水泥浆体中 C-S-H 凝胶的纳微米表征	463
5.3.1	高分辨场发射扫描电镜和 AFM 分析	464
5.3.2	纳米压痕下 C-S-H (LD 低密度 C-S-H 和 HD C-S-H) 分布情况表征	464
5.3.3	C-S-H 凝胶的弹塑性及蠕变	467
5.3.4	C-S-H 凝胶纳米硬度的尺寸效应	470
5.3.5	纳米划痕技术研究未水化水泥颗粒与 C-S-H 凝胶的界面结构	470
5.3.6	采用 DMA 方法测试了未水化水泥颗粒/C-S-H 凝胶的界面	473
5.4	复合水泥浆体中水的状态和孔隙结构表征	474
5.4.1	低场核磁共振技术检测水的状态	474
5.4.2	低场核磁共振技术研究复合水泥浆体孔结构	478
5.4.3	基于平衡干燥法孔结构研究	481
5.4.4	水泥基材料的干燥收缩模型	483
5.5	复合水泥浆体的结构模型	484
5.5.1	测试方法	484
5.5.2	原材料与配合比	484
5.5.3	胶空比与抗压强度的关系	485
5.5.4	复合胶凝体系胶空比与孔隙率的关系	487
5.5.5	复合胶凝体系水化程度与孔隙率的关系	487
5.6	低水胶比下各种辅助性胶凝材料对水泥浆体干缩性能的影响 规律	488
5.7	复合水泥浆体性能的调控	498
5.7.1	初始堆积结构的调控	498
5.7.2	熟料和辅助性胶凝材料颗粒尺寸匹配	507
5.7.3	低活性辅助性胶凝材料表面改性	513
5.7.4	掺加偏高岭土调控	519
第六章	水泥基材料的产物与结构稳定性及服役行为	522
6.1	水泥基材料水化产物和浆体微观结构稳定性	522
6.1.1	水泥-粉煤灰复合胶凝材料水化性能与浆体微观结构	522
6.1.2	水泥-矿渣复合胶凝材料水化性能与浆体微观结构	543
6.1.3	软水溶蚀作用下复合胶凝材料浆体微观结构变化	554
6.1.4	复合胶凝材料浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量与稳定性	565
6.1.5	超高层建筑大体积底板高层中固体工业废渣的利用	571
6.2	水泥基材料孔结构表征与传输机制	572
6.2.1	水泥基材料孔隙(裂隙)结构研究	572
6.2.2	水泥基孔隙材料基本传输机制研究	589
6.2.3	港珠海澳大桥工程现场质量检验和质量验收	604
6.3	环境条件作用下混凝土的服役性能及寿命预测研究	605

6.3.1	多因素耦合作用下混凝土耐久性评价试验设备和试验方法的研究	605
6.3.2	多因素耦合作用下路用低坍落度混凝土性能衰减规律研究	608
6.3.3	多因素耦合作用下泵送大坍落度混凝土性能衰减规律研究	619
6.3.4	建立基于经验的混凝土结构寿命预测模型	627

第一章 高介稳阿利特微结构和熟料矿物相组成优化

围绕“高介稳阿利特微结构调控及高胶凝性熟料相匹配”的关键科学问题，建立高介稳阿利特微结构的表征方法，阐明掺杂效应和冷却速度对高介稳阿利特微结构的影响规律，建立阿利特微结构介稳程度和缺陷形态与其活性的关系，揭示阿利特微结构对其水化活性的影响规律，提出阿利特微结构调控技术。提出高胶凝性熟料相组成匹配优化机理，掺杂物质作用规律和存在状态。

1.1 C₃S 晶体结构演变规律与理论模型

1.1.1 C₃S 晶体结构原子尺度表征

C₃S 具有三种晶系 7 种晶型，在加热过程中，C₃S 将按照方程式 (1-1) 进行晶型转变。在室温条件下，纯 C₃S 以 T1 型形式存在。在工业生产水泥熟料中，由于 C₃S 中固溶了来自原料或燃料的外来离子，通常被称为阿利特，在室温条件下，其晶型接近于 M1 型或 M3 型，或者两者共存。对于 C₃S (或阿利特) 结构研究已有 80 年左右的历史，最早可上溯至布拉格对硅酸盐矿物的拓扑结构研究。C₃S 晶型结构具有多样性和复杂性，有近百种阿利特结构 (主要是点阵结构) 见诸各种文献报道，采取的分析手段主要借助于 XRD、DTA-TG、光学衍射等技术 (单晶衍射方法：R 型、M3 型、T1 型；粉末衍射方法：M1 型、T2 型、T3 型；无 M2 参数)。本研究则采用 XRD 粉末衍射法表征了 C₃S 的晶型，利用高分辨透射电镜在原子尺度上进一步验证了 C₃S 的晶型，建立了不同晶型 C₃S 原子尺度上的判据。通过第一性原理计算，利用几何晶体学，构建出 C₃S 基本结构和多晶型相变的演化规律。



1.1.1.1 C₃S 晶体结构的 XRD 表征

本研究对 C₃S 晶型的 XRD 表征，则采用了粉末衍射法，对样品在 2θ 为 32°~33°和 51°~52°两个窗口区进行了慢扫，分析结果如图 1.1 所示。纯 C₃S 在两个窗口区的衍射图谱显示：在 32°~33°之间是由三个分裂峰组成，在 51°~52°范围内也存在三个明显的分裂峰。两个窗口区衍射峰均是由三斜晶胞产生的三个衍射峰引起的，因此纯 C₃S 属于三斜结构。对纯 C₃S 进行全谱慢扫，用 T1 型的

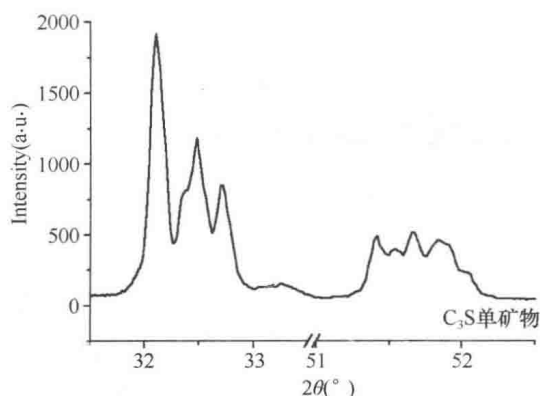


图 1.1 纯 C_3S 在特征窗口区的 XRD 谱

XRD 图谱进行 Le Bail 全谱拟合, 结果如图 1.2 所示。纯 C_3S 的 XRD 图谱与 T1 型的 XRD 图谱拟合差值较小, 因此实验室合成的纯 C_3S 与 T1 型的 C_3S 很吻合, 说明实验室合成的纯 C_3S 是 T1 型。

为了阐明外掺离子对 C_3S 晶型的调控规律, 本项目研究了单掺 ZnO 、 CuO 、 Li_2O 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 、 BaO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 、 $CaHPO_4$ 、 SrO 、

$SrSO_4$ 及 CaF_2 等化学试剂以及复掺的作用, 结果见表 1.1。

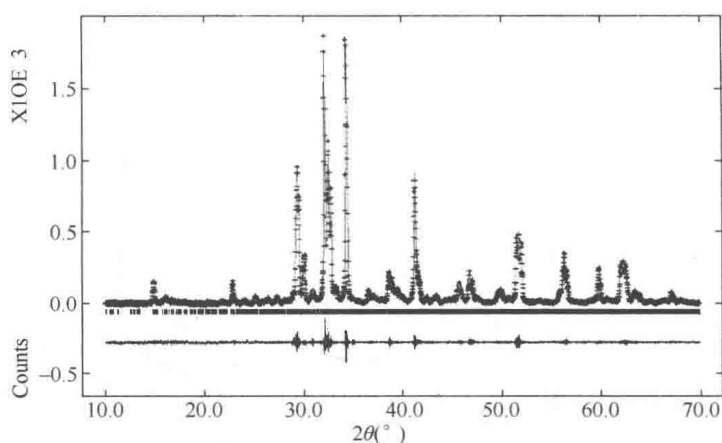


图 1.2 纯 C_3S Le Bail 拟合

根据不同 C_3S 特征窗口区的衍射图谱分析 (图 1.3, 部分图谱省略), 单掺化学试剂制备的 C_3S 晶型与外掺离子种类与掺量的关系为: 随着 ZnO 或 CuO 掺入量的增加, C_3S 由对称性较低的 T1 型向对称性较高的 M 型演变, ZnO 掺量较高时能稳定 M1 型的 C_3S 。当 Fe_2O_3 掺杂时, 随着 Fe_2O_3 掺量的增加, C_3S 逐渐向 T3 型转化, C_3S 中 Fe_2O_3 的掺量为 0.5% 时为 T1 型和 T3 型的混合物; 掺量在 1.0%~2.0% Fe_2O_3 时, 能使 C_3S 在常温下呈现 T3 型。当 Al_2O_3 掺杂, 较低掺量掺杂不改变 C_3S 的晶型结构, 仅对晶胞参数产生影响, 当掺杂掺量达到 1% 时, 晶型转变为 T3 型。掺加 CaF_2 、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 和 $CaHPO_4$ 时, 在 0%~2.0% 的掺量范围内, 并不引起 C_3S 晶型的变化, C_3S 仍为 T1 型。 SrO 和 $SrSO_4$ 掺量为 1.5% 时稳定 M 型 C_3S , 提高 C_3S 的对称性。当 MgO 掺杂时, 随着 MgO

掺量的增加, 晶体由 T1 型逐渐转变为 M3 型, 高掺量 MgO 易稳定 M3 型, 但是 MgO 含量低于 0.5% 时, 在两个窗口区呈现了非典型的图谱, $32^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 之间的衍射图谱呈现 M 型特征衍射峰, 然而在 $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 之间衍射峰仍分裂为三个峰, 呈现 T 型特征的衍射峰, 可能由于多种晶型共存, 导致 XRD 不能准确判断其晶型。

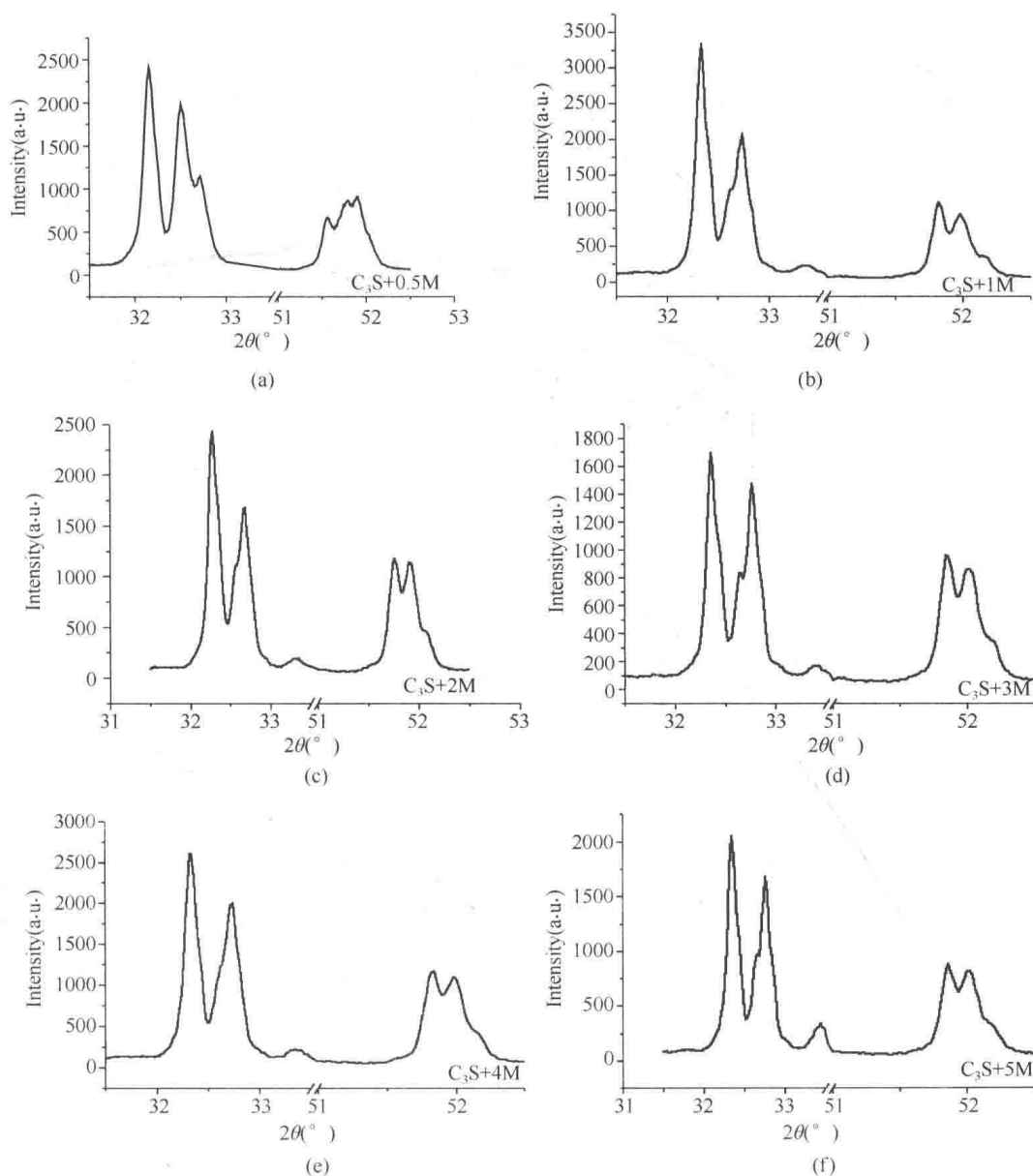


图 1.3 单掺 MgO C_3S 的特征窗口区的 XRD 衍射图谱

(a) 0.5% MgO (质量分数); (b) 1.0% MgO (质量分数); (c) 2.0% MgO (质量分数);
(d) 3.0% MgO (质量分数); (e) 4.0% MgO (质量分数); (f) 5.0% MgO (质量分数)

对于复掺制备的 C_3S 晶型, 图 1.4 表明 MgO 掺量为 0.5%, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 掺量为 1.0% 时, 在两个窗口区均呈现 3 个独立的衍射峰, 然而在 $32^\circ \sim 33^\circ$ 窗口区 ($\bar{2}04$) 的衍射峰比较弱, 有和 (024) 衍射峰合并的趋势, 该样品主要以 T 型阿利特为主, 其中夹杂着少量 M 型。当 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 掺量为 2.0% 时, 在 $32^\circ \sim 33^\circ$ 范围内由原来的三峰合并为双峰, 而在 $51^\circ \sim 52^\circ$ 范围内仍呈现三峰, 表明样品的对称性有所提高, 此时 T 型和 M 型阿利特共存。当 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 掺量为 3.0%~4.0% 时, 在两个窗口区分别呈现双峰和三峰, 表明此时仍然是 T 型和 M 型阿利特共存, 但是 ($\bar{4}20$) 衍射峰向 ($2\bar{4}0$) 靠近呈现合并的趋势, 因此该样品中 M 型 C_3S 的含量有所增加。

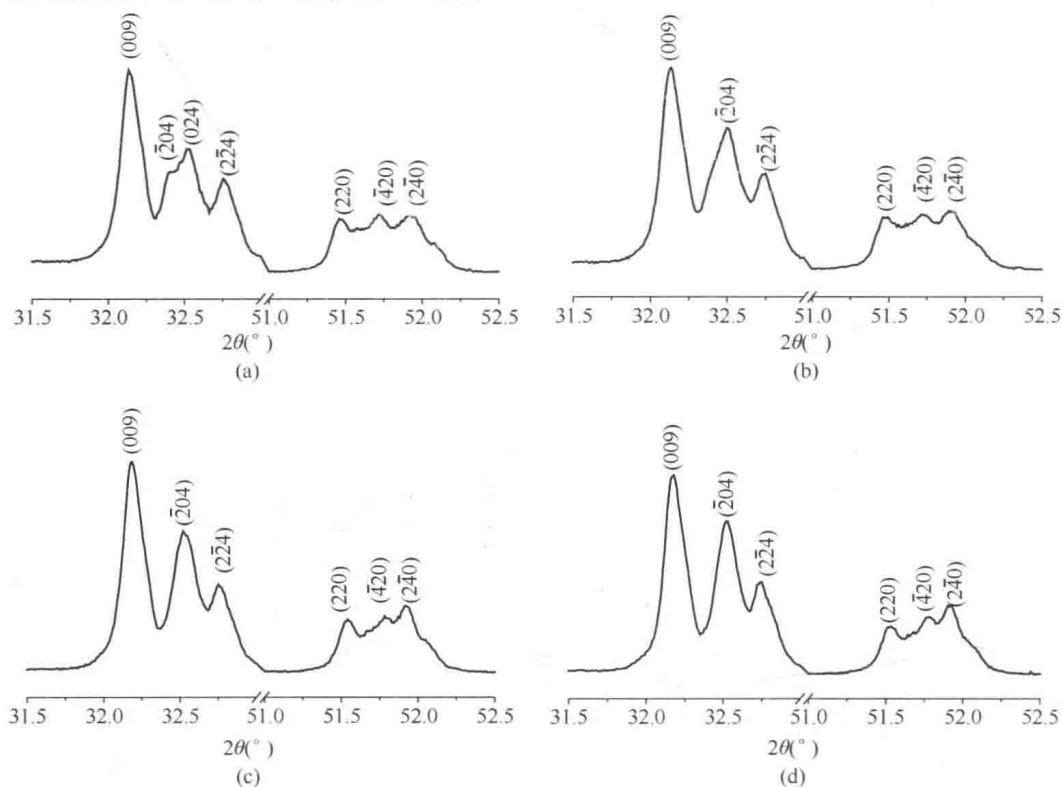


图 1.4 MgO 掺量为 0.5%, 掺不同含量 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 的阿利特指纹区 XRD 图谱

(a) 1.0%; (b) 2.0%; (c) 3.0%; (d) 4.0%

当 MgO 掺量为 1.0% 时, 随着 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 掺量的增加, 在 $32^\circ \sim 33^\circ$ 范围内的峰形呈现双峰, 在 $51^\circ \sim 52^\circ$ 范围内呈现三峰 (图 1.5), 但 ($\bar{4}20$) 和 ($2\bar{4}0$) 两个衍射峰已经逐渐靠近。主要以 M 晶型为主, 其中夹杂着少量 T 型。当 MgO 掺量为 1.5% 时, 随着 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 掺量的增加, $32^\circ \sim 33^\circ$ 窗口区衍射峰的均为双峰。但当 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 掺量在 1.0%~2.0% 时, $51^\circ \sim 52^\circ$ 窗口区衍射峰呈现三峰, 但 ($\bar{4}20$) 和 ($2\bar{4}0$) 两个衍射峰已经非常接近, 因此样品主要以 M 型为

主, 其中夹杂着少量 T 型。当 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 掺量在 3.0%~4.0% 时, $(\bar{4}20)$ 和

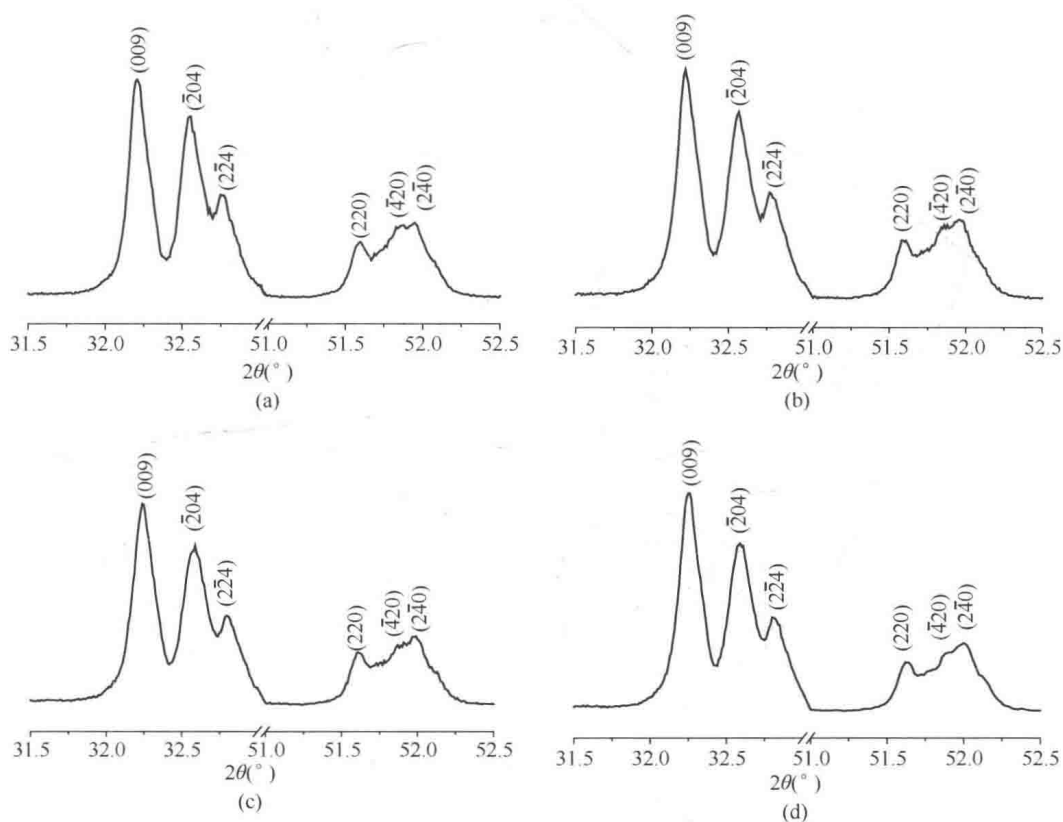


图 1.5 MgO 掺量为 1.0%, 掺不同含量 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的阿利特指纹区 XRD 图谱

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的掺量分别为: (a) 1.0%; (b) 2.0%; (c) 3.0%; (d) 4.0%

$(\bar{4}20)$ 两个衍射峰合并为单峰, 衍射峰呈现 M1 型结构特征 (图 1.6)。以上实验结果表明: 当 MgO 掺量为 0.5% 时, S^{6+} 离子的引入对 C_3S 晶型的影响并不明显; 当 MgO 掺量为 1.0%, 并引入 S^{6+} 离子时, 阿利特以 M 型为主。

图 1.7 反映了共掺 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 对 C_3S 晶型的影响。当 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的掺量在 0.2%~0.8% 时, 在 $32^\circ\sim 33^\circ$ 窗口区衍射峰未发生变化, 均呈现双峰, 在 $51^\circ\sim 52^\circ$ 窗口区衍射峰呈现三个峰, 表明 T 型和 M 型共存。但是, $51^\circ\sim 52^\circ$ 窗口区衍射峰随着 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 掺量的增加越来越接近, 对称性越来越高。当 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的掺量达 1.2%, $32^\circ\sim 33^\circ$ 窗口区衍射峰合并为单峰, $51^\circ\sim 52^\circ$ 窗口区衍射峰仍呈现三峰, 但 (220) 和 $(\bar{4}20)$ 衍射峰强度降低, 并具有合并的趋势, 样品中还是 T 型和 M 型共存, 但 M 型占主导。

图 1.8 反映了复掺 MgO 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 对 C_3S 晶型的作用。 MgO 掺量为 0.5%, Fe_2O_3 和 Al_2O_3 掺量均在 0.2%~0.4% 时, $32^\circ\sim 33^\circ$ 窗口区衍射峰未发生

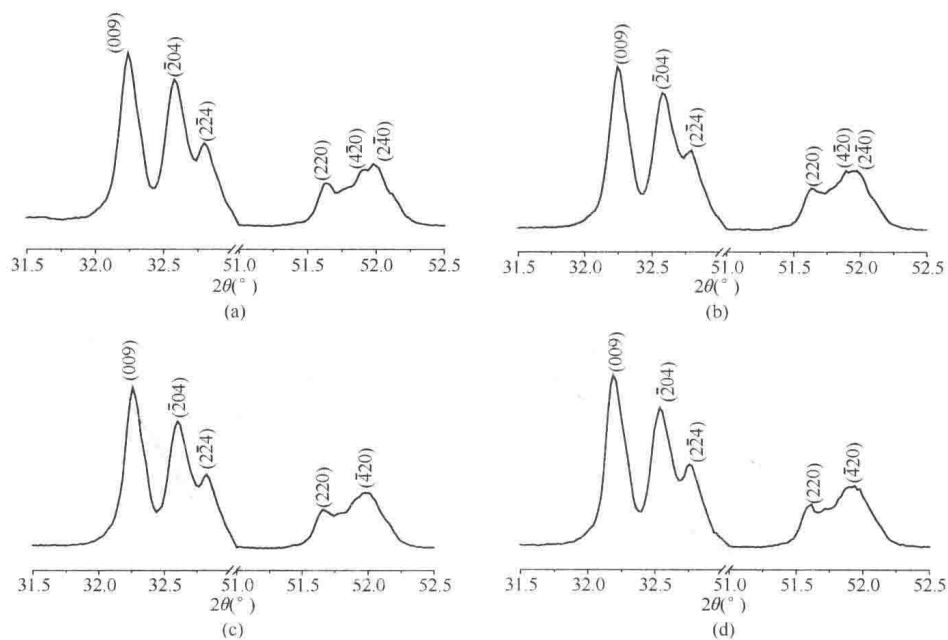


图 1.6 MgO 掺量为 1.5%，掺不同含量 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的阿利特指纹区 XRD 图谱
 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的掺量分别为：(a) 1.0%；(b) 2.0%；(c) 3.0%；(d) 4.0%

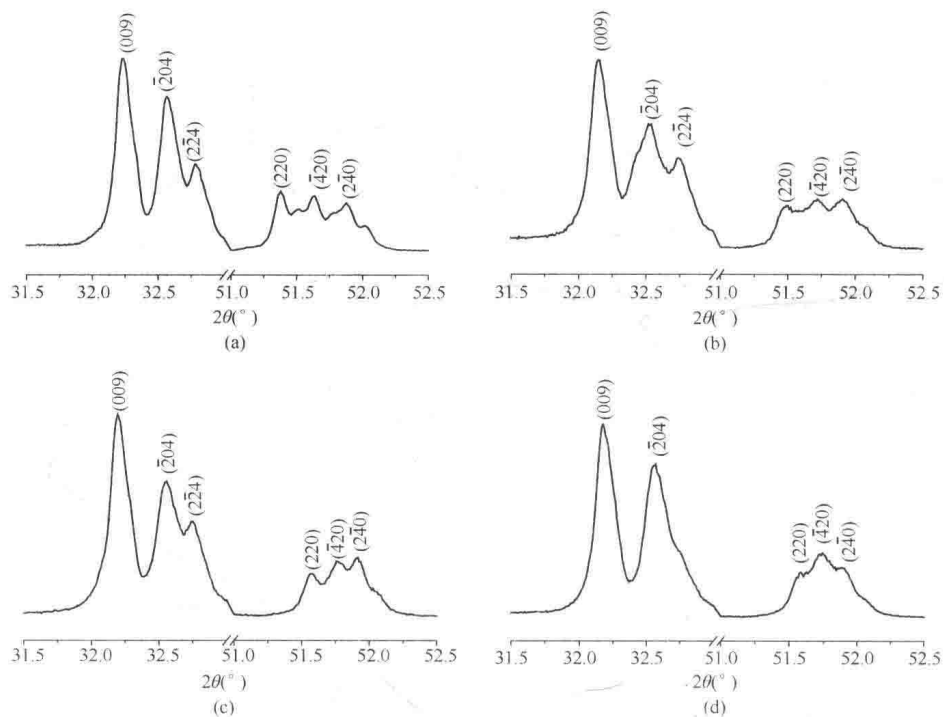


图 1.7 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 掺杂阿利特的指纹区 XRD 图谱
 (a) 0.2% Al_2O_3 + 0.2% Fe_2O_3 ；(b) 0.4% Al_2O_3 + 0.4% Fe_2O_3 ；
 (c) 0.8% Al_2O_3 + 0.8% Fe_2O_3 ；(d) 1.2% Al_2O_3 + 1.2% Fe_2O_3

变化,均呈现双峰, $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 窗口区衍射峰均呈现三个峰, T型和M型共存; Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的掺量增加至0.8%, $32^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 和 $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 两个窗口区衍射峰均发生了明显变化。前者合并为单峰, 后者由三个峰合并为两个峰, 对称性提高, 其特征与M3型一致。 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 掺量为1.2%时, $32^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 窗口区衍射峰没有变化, 仍为单峰, $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 之间的衍射峰也仍为双峰, 但(220)衍射峰强度明显下降, 其特征与M1型一致。

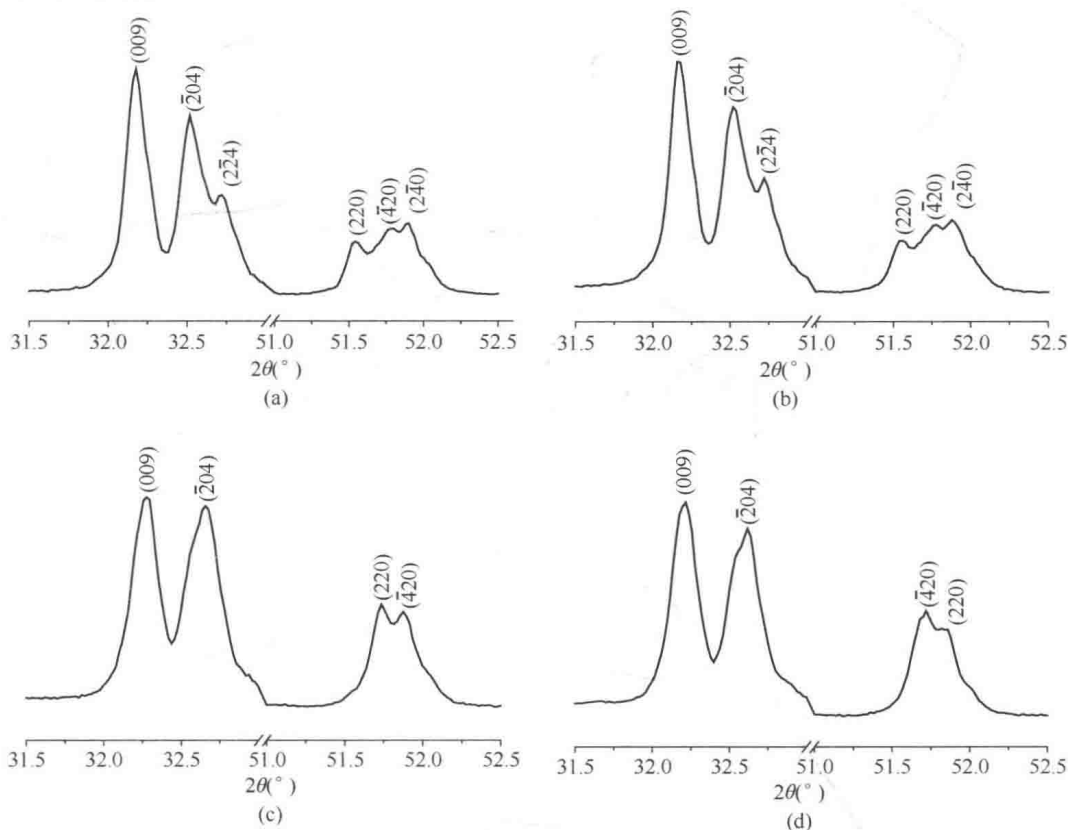


图 1.8 MgO 掺量为 0.5%, 掺杂不同含量 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的阿利特指纹区 XRD 图谱
 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 掺量分别为: (a) 0.2% Al_2O_3 + 0.2% Fe_2O_3 ; (b) 0.4% Al_2O_3 + 0.4% Fe_2O_3 ;
 (c) 0.8% Al_2O_3 + 0.8% Fe_2O_3 ; (d) 1.2% Al_2O_3 + 1.2% Fe_2O_3

图 1.9 为 MgO 掺量 1.0% 时, Fe_2O_3 和 Al_2O_3 掺量变化对 C_3S 晶型的影响。当 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的掺量均在 0.2%~0.4% 之间时, $32^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 的衍射峰未发生改变, 但是, 在 $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 的衍射峰由双峰分裂成三峰, 呈现向 T 晶型转换的趋势, M 型和 T 型共存。当 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的掺量为 0.8% 时, $32.5^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 窗口区衍射峰的强度产生反转, 并有合并的趋势, $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 窗口区衍射峰由三峰合并为双峰, 其特征与 M3 型一致。当 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的掺量为 1.2% 时, $32^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 窗口区的衍射峰由双峰合并为单峰, $51^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 窗口区的衍射峰未发生变化, 此时阿利