

中國工程院 院士文集

唐明述文集



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



中國工程院 院士文集

Collections from Members of the
Chinese Academy of Engineering

唐明述文集

A Collection from Tang Mingshu



北 京

冶金工业出版社

2014

内 容 提 要

《唐明述文集》收录了唐明述院士团队自 1962 年至 2010 年间发表的 54 篇中文学术论文和 45 篇英文学术论文,内容主要涉及混凝土碱集料反应、氧化镁延迟性膨胀混凝土、碳硫硅钙石破坏、水泥浆体-集料界面改性、低孔隙率水泥基材料、碱矿渣水泥、钢渣微观结构和吸波材料等。本书对我国从事水泥混凝土行业研究的科研工作者有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

唐明述文集 / 唐明述著. —北京:冶金工业出版社,
2014.5

(中国工程院院士文集)

ISBN 978-7-5024-6611-4

I. ①唐… II. ①唐… III. ①混凝土工程—文集
IV. ①TU755—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 096675 号

出 版 人 谭学余

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

策 划 任静波 责任编辑 李 臻 任静波 美术编辑 彭子赫

版式设计 孙跃红 责任校对 王永欣 刘 倩 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6611-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2014 年 5 月第 1 版,2014 年 5 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;51.25 印张;2 彩页;1244 千字;808 页

298.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

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)



唐明述 院士



第 12 届混凝土碱集料反应国际会议于 2004 年在北京召开, 唐明述院士任大会主席



唐明述院士八十华诞合影



中国工程院 院士文集

《中国工程院院士文集》总序

2012年暮秋，中国工程院开始组织并陆续出版《中国工程院院士文集》系列丛书。《中国工程院院士文集》收录了院士的传略、学术论著、中外论文及其目录、讲话文稿与科普作品等。其中，既有院士们早年初涉工程科技领域的学术论文，亦有其成为学科领军人物后，学术观点日趋成熟的思想硕果。卷卷文集在手，众多院士数十载辛勤耕耘的学术人生跃然纸上，透过严谨的工程科技论文，院士笑谈宏论的生动形象历历在目。

中国工程院是中国工程科学技术界的最高荣誉性、咨询性学术机构，由院士组成，致力于促进工程科学技术事业的发展。作为工程科学技术方面的领军人物，院士们在各自的研究领域具有极高的学术造诣，为我国工程科技事业发展做出了重大的、创造性的成就和贡献。《中国工程院院士文集》既是院士们一生事业成果的凝炼，也是他们高尚人格情操的写照。工程院出版史上能够留下这样丰富深刻的一笔，余有荣焉。

我向来认为，为中国工程院院士们组织出版院士文集之意义，贵在“真、善、美”三字。他们脚踏实地，放眼未来，自朴实的工程技术升华至引领学术前沿的至高境界，此谓其“真”；他们热爱祖国，提携后进，具有坚定的理想信念和高尚的人格魅力，此谓其“善”；他们治学严谨，著作等身，求真务实，科学创新，此谓其“美”。《中国工程院院士文集》集真、善、美于一体，辩而不华，质而不俚，既有“居高声自远”之澹泊意蕴，又有“大济于苍生”之战略胸怀，斯人斯事，斯情斯志，令人阅后难忘。

读一本文集，犹如阅读一段院士的“攀登”高峰的人生。让我们翻开《中国工程院院士文集》，进入院士们的学术世界。愿后之览者，亦有感于斯文，体味院士们的学术历程。

徐匡迪

2012年7月



前言

这本论文集是由师生的共同成果选编而成的。时间从 20 世纪 60 年代初至今, 跨过半个多世纪。在此期间共发表论文 380 篇, 其中中文论文 241 篇、英文论文 139 篇, 本书选编近百篇, 主要研究内容为水泥混凝土, 包括碱集料反应、钢渣的微观结构和氧化镁延迟性膨胀混凝土等。在长期的科研实践中, 形成如下的一些体会, 供青年学者参考。

1. 面向生产, 背靠基础

我们的研究始于 20 世纪 60 年代初, 当时拟修建三峡大坝, 我们参与了大坝用集料的碱活性, 以确保工程的百年大计。这之后又参与了一大批大型工程的建设, 如长江三峡水利枢纽、金沙江向家坝水电站、雅砻江锦屏一级水电站、青海黄河拉西瓦水电站、广西龙滩水电站、澜沧江小湾水电站和福建闽江水口水电站等, 岭澳、阳江、三门、田湾、宁德、红沿河、海阳等核电站, 西郊、沧州、郑州、鼎新、日喀则等机场, 江阴长江公路大桥、润扬长江公路大桥、安庆长江公路大桥、杭州湾跨海大桥、长江大胜关铁路桥等, 京沪高速铁路、沪宁高速铁路、宁杭城际铁路等, 深圳盐田国际集装箱码头、巴基斯坦瓜达尔港等, 基本上做到了科研工作面向国民经济的主战场。我们创建的快速法, 在 20 世纪 90 年代初被定为法国的国家标准 (AFNOR NF P18-588), 世界最长的瑞士 Gotthard 隧道 (长 57km) 将此方法作为全程 (1996 ~ 2013 年) 控制集料碱活性的手段。我们的研究工作不仅着眼于在工程中的应用, 还特别重视从实践中提炼出必须深入研究的科学规律, 从而在理论上取得一定成就。关于 ASR 动力学的研究文章, 著名混凝土专家 G. M. Idorn 评价为: “This paper was a landmark introduction of realistic hydration kinetics in the chemistry of ASR”。加拿大 Calgary 大学 J. E. Gillott 教

授对有关文章的评价是：“Your paper is significant milestone on the road leading to a clear understanding of the nature of alkali-aggregate reaction”。我们深感科学研究必须提高到理论层面，从基础学科进行研究，才能避免停留在经验总结和现象学的水平上。

2. 针对难点，突破禁区，突破极限

在集料碱活性的鉴定方法上，我们突破常温的试验规则，采用高温、高压、高碱浓度的加速方法使耗时一年的试验结果可以在2~3天之内完成。在20世纪70年代研究钢渣时，人们常把钢渣当矿渣，认为需要水淬急冷才能提高活性，当时基于前苏联、德、美等国钢铁工业的资料，我们着重研究了钢渣的微观结构，得出钢渣的活性主要取决于矿物成分。与钢渣不同，矿渣的活性取决于其玻璃体含量，故必须水淬急冷，这就避免了高温钢渣水淬的危险作业。钢渣中的RO相（MgO、FeO、MnO固溶体）是否稳定是建筑业必须准确回答的问题。我们采用近300℃、超过100大气压的条件，证明了它的稳定性，这为钢渣制作建筑材料奠定了科学基础。几十年来的实践证明这一结论基本上是正确的。敢于突破禁区，可能是科研创新的重要途径。

3. 坚持不懈，锲而不舍

有人不理解一个反应（碱集料反应）为什么需要反复研究达数十年之久，是的，碱集料反应从1940年被发现以后，对它的研究已超过半个世纪，国际会议开过14届，论文发表达数千篇之多。原因是集料种类繁多，包括火成岩、沉积岩和变质岩，成分复杂，化学成分、地质成因、历史长河中众多的变质作用均会影响集料的碱活性，加之建筑物、构筑物所处环境不同，混凝土组成材料的成分不同，配合比不同等，造成反应十分复杂。到现在为止，方法仍不完善，机理尚有争论。我们的很多研究都是在争论中走过来的，这也为青年科技工作者留下广阔的发展空间。科研的道路不会是一帆风顺的，愿青年们坚持不懈、锲而不舍，攀登科学的顶峰。

唐明述

2014年4月



目 录

中文学术论文

科技篇

» 水泥与骨料中活性二氧化硅的膨胀反应	3
» 关于碱-骨料反应的几个问题	13
» 石膏矿渣水泥与活性骨料的膨胀反应	22
» 碱对水泥生产和性能的一些影响	31
» 钢渣中 MgO、FeO、MnO 的结晶状态与钢渣的体积安定性	41
» 对彼特洛辛《水泥的热力学和热化学》一文的一点质疑	54
» 关于火成岩骨料的碱活性及其与水泥浆的界面反应	58
» 吉林白山大坝混凝土自生体积膨胀机理的研究	73
» 高温、高压、高碱下的碱-集料反应	81
» 水泥浆体-集料界面特性与砂浆电导率的关系	92
» 水泥浆体与集料界面的黏结强度	99
» 水泥浆体-集料界面的结构特性与砂浆抗蚀性的关系	107
» 高强度碱矿渣水泥	112
» 混凝土耐久性研究应成为最活跃的研究领域	118
» 关于碱-集料反应的几个理论问题	123
» 掺氧化镁水泥的膨胀规律及其影响因素	131
» 低孔隙率胶凝材料的孔结构测定方法	136
» 石英的显微结构与碱活性	141
» T. C. Powers 模型若干问题的研究	144
» 氧化镁在不同水泥基中的水化和膨胀	152
» 碱矿渣水泥砂浆抗酸腐蚀性	157
» 碱-集料反应的分类	162

» 处理刚玉集料对砂浆界面结构的改进	169
» 低孔隙率砂浆的强度性能和孔结构	175
» 放射性废物水泥固化的理论基础、研究现状及对水泥化学研究的思考	181
» 碱-白云石反应及碱-碳酸盐岩反应的膨胀机理	190
» MDF 水泥抗弯强度与大孔尺寸和孔隙率的关系	200
» 混凝土中碱骨料反应与冻融破坏的特征判据	205
» 去冰盐与碱-集料反应的协同效应及其防治研究	209
» 界面区结构对水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀性能的影响	214
» 油井水泥石 CO_2 腐蚀的热力学条件	221
» 提高重大混凝土工程耐久性对节约资源能源、保护环境意义重大	227
» 我国混凝土中的碱集料反应	236
» 集料 ASR 碱活性检测方法评述	243
» 碱硅酸反应与碱碳酸盐反应	252
» 关于水泥混凝土发展方向的几点认识	261
» 不同结构构造硅质集料的碱硅酸反应模型	268
» 碱集料反应研究的新进展	276
» 碱集料反应中当量碱计算问题探讨	285
» 道面水泥混凝土高性能化和放大道面板尺寸问题初探	297
» 碳硫硅钙石型硫酸盐腐蚀研究综述	306
» 硅质碳酸盐 Spratt 岩在 LiOH 溶液中的膨胀行为	313
» 水泥基复合材料的吸波性能	319
» 掺杂 TiO_2 水泥的吸波性能与力学性能研究	324
» LiOH 抑制碱硅酸反应膨胀及其应用研究	330
» 提高基建工程寿命是最大的节约	339
» 长石类矿物析碱对碱-硅酸反应的影响	346
» 集料碱活性快速检测法对比研究	357
» 节能减排工作应重视提高基建工程寿命	366
» 裂缝对于混凝土耐久性的影响	374
» 轻烧 MgO 膨胀剂对水泥浆体变形行为的影响	382
» 石墨-碳纤维水泥基复合材料的电磁屏蔽效能	388

教学篇

» 讲授“水泥化学进展”课程的一些体会（研究生班）	394
» 碱集料反应——实践-理论-实践	398

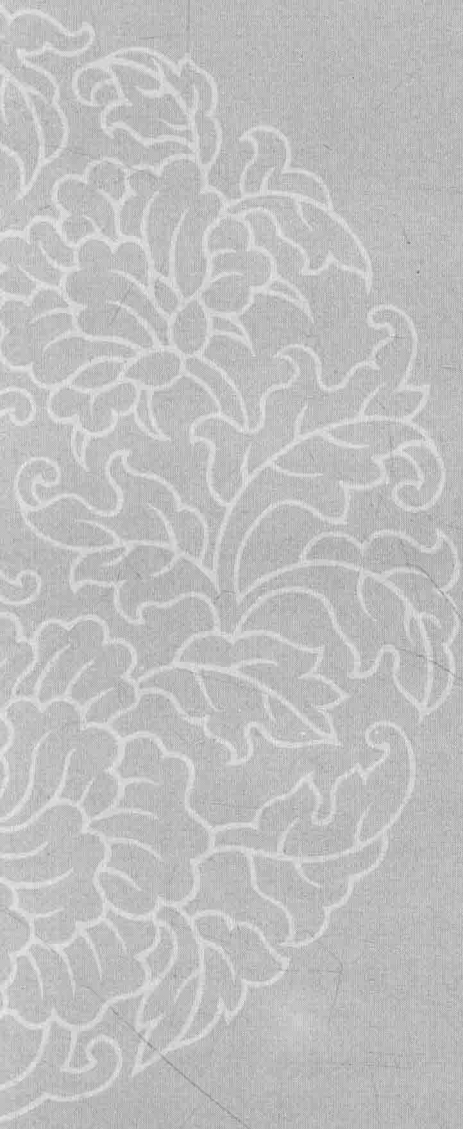
英文学术论文

» Effect of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on Alkali-silica Reaction	403
--	-----

>> Some Remarks about Alkali-silica Reactions	410
>> Effect of Alkali on the Interface Reaction between Cement and Aggregate	412
>> The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-silica Reaction and Its Mechanism	419
>> A Rapid Method for Identification of Alkali Reactivity of Aggregate	425
>> Kinetics of Alkali-silica Reaction	432
>> Rapid Method for Determining the Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-silica Reaction	439
>> Alkali Reactivity of Glass Aggregate	443
>> Mechanism of Alkali-carbonate Reaction	449
>> Expansive Mechanism of Magnesia as Additive of Cements	454
>> Studies of Alkali-aggregate Reaction from Petrography and Mineralogy	467
>> Alkali-carbonate Reaction and pH Value	473
>> Hydration of Alkali-slag Cements at 150°C	482
>> Mg-type Delayed Expansive Cement	489
>> A New Method of Enhancing Cement-aggregate Interfaces, I. Ideal Aggregate and Its Effects on Interfacial Microstructures	498
>> A New Method of Enhancing Cement-aggregate Interfaces, II. Mechanical Properties and Sulphate Attack Resistances of Mortars	506
>> Deterioration of Concrete Structures Due to Alkali-dolomite Reaction in China	510
>> Mechanism of Dedolomitization and Expansion of Dolomitic Rocks	517
>> Formation and Expansion of Ettringite Crystals	529
>> Studies on Alkali-Carbonate Reaction	537
>> Autoclave Method for Identification of Alkali-Reactive Carbonate Rocks	544
>> Mechanism of Mineral Admixture Suppressing Alkali-silica Reaction: Part I. Corrosion Degree of Reactive Aggregate in Blended Cement Pastes and Its Correlations with Expansion Value and Electric Resistance Change	550
>> Mechanism of Mineral Admixture Suppressing Alkali-silica Reaction: Part II. Retardation of the Transport of Na, K and OH Ions in Pore Structure Caused by Acidic Action of Mineral Admixture Particles in Matrix	560
>> Correlation between Reaction and Expansion of Alkali-carbonate Reaction	567
>> Application of Expansive Cement with Magnesia in Dams	575
>> The Process of Sulfate Attack on Cement Mortars	581
>> Expandability of Solid-volume-reducing Reactions of Alkali-magnesite and Alkali-dolomite	588
>> Improving the Structure of the Interfacial Zone and Its Influence on the Long-term Behavior of Mortars	599
>> Influence of Dimension of Test Specimen on Alkali-aggregate Reactive Expansion	607

>> Expansion Mechanism of Alkali-dolomite and Alkali-magnesite Reaction	614
>> Influence of Aggregate Size and Aggregate Size Grading on ASR Expansion ...	629
>> ACR Expansion of Dolomites with Mosaic Textures	634
>> Expansion of Siliceous and Dolomitic Aggregates in Lithium Hydroxide Solution	647
>> A New Accelerated Method for Determining the Potential Alkali-carbonate Reactivity	656
>> Alkali Carbonate Reaction Expansion of Dolomitic Limestone Aggregates with Porphyrotopic Texture	666
>> Development and Inter-laboratory Trial of the RILEM AAR-5 Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregates	680
>> Use of Fuzzy Neural Network to Evaluate Effect of Composition of Fly Ash in Suppressing AAR	689
>> Alteration of Alkali Reactive Aggregates Autoclaved in Different Alkali Solutions and Application to Alkali-aggregate Reaction in Concrete (I) Alteration of Alkali Reactive Aggregates in Alkali Solutions	706
>> Alteration of Alkali Reactive Aggregates Autoclaved in Different Alkali Solutions and Application to Alkali-aggregate Reaction in Concrete (II) Expansion and Microstructure of Concrete Microbar	726
>> The Thaumasite Form of Sulfate Attack in Concrete of Yongan Dam	740
>> Alkali Release from Aggregate and the Effect on AAR expansion	744
>> The Use of Thermodynamic Analysis in Assessing Alkali Contribution by Alkaline Minerals in Concrete	759
>> Development of a Universal Accelerated Test for Alkali-silica and Alkali-carbonate Reactivity of Concrete Aggregates	771
>> Potential Approach to Evaluating Soundness of Concrete Containing MgO-based Expansive Agent	785
>> Investigation of Alkali-silica Reaction Inhibited by New Lithium Compound	799

中文学术论文



水泥与骨料中活性二氧化硅的膨胀反应*

摘要 本文分成两部分:第一部分讨论 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与膨胀的关系,根据对试件结果和国外已发表的资料的分析,证实 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会促进水泥与骨料中活性二氧化硅的膨胀反应,从而对 T. C. Powers 和 G. Verbeck 的竞争反应理论提出了相反的观点。按照竞争反应理论, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会导致石灰-碱-硅配合物的生成,使膨胀减小或不产生膨胀。文中第二部分讨论膨胀反应的机理,在这一部分中,首先分析了 W. C. Hansen 的渗透压理论,发现该理论与很多事实不相符合。同时根据我们对反应产物的组成和性能的测定结果,证实其化学组成为碱-硅配合物,而其物理性能与硅胶相似,从而认为膨胀主要是由生成的似硅胶的产物吸水肿胀而引起的。

1 前言

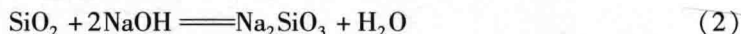
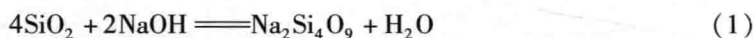
1940 年 T. E. Stanton^[1,2] 发现了美国加利福尼亚州一混凝土工程的破坏是由水泥中的碱与骨料中活性的二氧化硅起化学作用而引起的。在这之后相继在加拿大、澳大利亚等地均出现了因这种反应而使混凝土工程破坏的事例。因而这一课题引起了广泛的注意。在最近 20 年中,世界各国学者在这方面进行了大量的研究工作,对膨胀反应的现象、原因、机理、试验方法、影响因素以及防止措施等方面的研究已发表论文 100 多篇。然而有关反应机理的理论并未彻底解决,到目前为止也尚无绝对可靠的方法来抑制这种膨胀。关于抑制机理的文章更不多见。就我国而言,目前虽尚未见到这种破坏事故的报道,但我国幅员广大,随着社会主义建设事业的飞跃发展,要修建的水利工程、道路工程和其他混凝土工程将不胜枚举,在这些工程中难免不遇到含活性组分的骨料。因此深入而广泛地研究这一课题,对国民经济的发展、保证混凝土工程的耐久性以及发展水泥和混凝土工艺学学科均具有极其重大的意义。

对这一课题,我们曾系统研究过骨料碱活性的试验方法、影响膨胀反应的因素、抑制膨胀的措施以及膨胀反应的机理,前三方面的研究已总结在专门的研究报告中,本文的讨论主要分成两部分:第一部分是讨论 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与膨胀反应的关系,第二部分是讨论膨胀反应的机理。

水泥与骨料的膨胀反应系指水泥中的碱与骨料中活性二氧化硅之间发生的反应。所谓活性二氧化硅系指玻璃质、隐晶质和无定形的二氧化硅。它们与结晶型的普通石英砂的差别,在于其空间结构的排列是无秩序的,因而具有较高的反应能力。

膨胀反应的机理,首先是 1944 年 W. C. Hansen 提出的渗透压理论^[3]。他认为水泥中的碱与骨料中的活性二氧化硅发生下列反应:

* 本文合作者:薛万荣。原发表于《硅酸盐学报》,1962,1(1):20~29。参加工作的有孙国匡、张延年、董德隶、奚树槐、唐福英等同学。



反应产物可离解为硅酸根离子和碱金属离子。W. C. Hansen 设想骨料周围的水泥浆体是一个半透膜, 由于硅酸根离子发生配合作用, 不能透过这层半透膜, 而碱金属离子和水可以自由通过, 从而就产生了渗透压力, 使混凝土发生膨胀而开裂。

H. E. Vivian 反对渗透压理论^[4], 认为碱移动到骨料周围并不是靠渗透过骨料周围的水泥浆体半透膜来实现的, 而是通过充填在水泥石毛细管中的液体扩散到骨料的周围。他认为活性骨料与碱作用生成碱的硅酸盐胶体, 这种胶体像硅胶一样具有强烈的吸水性能, 吸水之后就发生肿胀。

T. C. Powers 和 H. H. Steinour^[5,6] 认为肿胀压力与渗透压均存在, 当生成的硅酸碱为固体或胶体时, 则此时吸水而产生的压力为肿胀压力, 当硅酸碱变成水溶液时, 此时吸水而产生的压力则为渗透压力。总之都是由水被吸入反应区而引起的。但是 T. C. Powers 等认为膨胀开裂的主要原因是吸水肿胀。

T. C. Powers^[5,6] 和 G. Verbeck^[7] 还特别提出竞争反应理论。

T. C. Powers 引用 G. L. Kalauskis^[8] 的研究, 在 $\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系统中, 当平衡时会形成石灰-碱-硅配合物 ($\text{CaO} \cdot x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{SiO}_2$), 平衡产物的组成取决于溶液中 Na_2O 与 CaO 浓度之比。T. C. Powers 认为若是生成石灰-碱-硅配合物则为无害反应, 但若是生成碱-硅配合物则为有害反应, 能吸水而膨胀。当混凝土中含有活性骨料时是否会产生膨胀, 就取决于这两类反应的竞争。

我们都知道硅酸盐水泥水化时, 其中主要的矿物组成 C_3S 会水解而析出大量氢氧化钙, 因此水泥石的液相中实际上是被氢氧化钙所饱和的, 在这种情况下为什么会生成有害的碱-硅配合物呢? T. C. Powers 的解释是这样的: 当活性骨料的表面与含 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和氢氧化钠的水泥浸出液接触时, 最初生成的是石灰-碱-硅配合物, 这种配合物覆盖在骨料表面上, 将骨料与溶液隔离开来, 这以后要继续作用, 就只有当 NaOH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 透过这层生成物时才行。当外层溶液中 NaOH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度之比较高时, 前者的透过速度大于后者, 就继续生成有害的碱-硅配合物而导致膨胀; 反之, 当 NaOH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度之比较小时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的透过速度大, 就有利于无害的石灰-碱-硅配合物的生成, 这时就不会产生膨胀。用这一理论似乎合理地解释了低碱水泥不膨胀的原因。

概言之, T. C. Powers 和 G. Verbeck 认为膨胀反应是否会发生, 取决于水泥石液相中 NaOH 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度之比。照这个理论推理, 当碱含量相同时, 水泥石中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度越低, 越易产生膨胀, 反之, 则越不易发生膨胀反应。然而通过我们多方面的试验和对资料的分析, 证实这样的理论是不能成立的。研究证明, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的存在不仅不妨碍膨胀反应的发生, 反而有利于膨胀反应的发生, 下面我们就论述 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对膨胀反应的影响。

2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与膨胀反应的关系

以下多方面的事实证实 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的存在是会促进膨胀反应的。

2.1 硅酸盐水泥中加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 增加膨胀

W. J. McCoy 和 A. G. Caldwell^[9] 在寻找抑制膨胀的外加剂时, 在试条成型时加入

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，结果发现加有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的试条膨胀率反而较大，其试验结果示于表 1 中。

表 1 含活性骨料的砂浆试条的膨胀率

成型时加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2/\%$	膨胀率/%			
	2 周	4 周	6 周	8 周
2	0.263	0.372	0.413	0.408
未加	0.245	0.343	0.364	0.363

由表 1 可见，在 2~8 周的龄期中，加有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的试条，膨胀率均较大。虽然在硅酸盐水泥中加入固体 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，不一定能增加水泥石液相中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度，然而增多 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，总应该有利于石灰-碱-硅配合物的生成，但试条中加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，却增加膨胀，这用 T. C. Powers 和 G. Verbeck 的竞争反应理论是无法解释的。

2.2 矾土水泥膨胀率小

考虑到 T. C. Powers 的理论认为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度低，则会有利于膨胀反应的发生，为此我们选择了矾土水泥来进行试验。

大家知道，矾土水泥中 CaO 含量比硅酸盐水泥低得多，其主要矿物为低碱性铝酸盐，水化之后没有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 固体存在，其浸出液就不可能被 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 所饱和，水泥石液相中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度仅保持与低碱性水化铝酸盐相平衡。根据 J. Dans 和 H. Eick 的研究^[10]，矾土水泥水化四天之后，溶液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度以 CaO 计仅 0.4g/L，这比硅酸盐水泥石液相中所保持的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和浓度（ CaO 计仅 1.21g/L）低得多。假若 T. C. Powers 的理论是正确的，则当矾土水泥与硅酸盐水泥碱含量相同时，矾土水泥试条的膨胀率应较大。然而事实不然，我们反复试验的结果证实，矾土水泥与活性二氧化硅产生的膨胀比硅酸盐水泥小得多。试验系用软练法成型，水泥：砂为 1:2.25，标准砂重的 6% 用粒度为 0.15~0.30mm 的蛋白石代替，作为活性骨料，试验结果示于图 1 中。

由图 1 可见，水泥石液相中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度低的矾土水泥的膨胀率反而小，这再一次证明 T. C. Powers 和 G. Verbeck 的竞争反应理论是值得怀疑的。

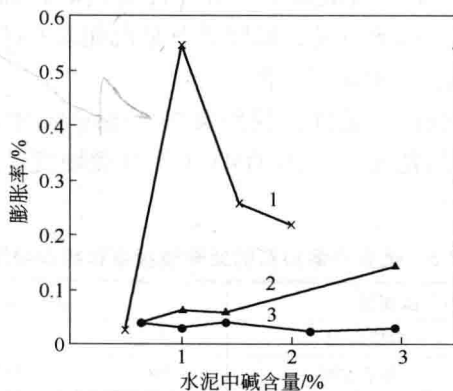


图 1 不同碱含量试条的膨胀率

1—硅酸盐水泥 6 周龄期的膨胀率；2—400 号高铝水泥 6 周龄期的膨胀率；

3—500 号高铝水泥 2 月龄期的膨胀率