

# 基于水泥碳汇的建筑碳汇研究进展

石铁矛<sup>1</sup>,王梓通<sup>2,3</sup>,李沛颖<sup>2,3</sup>

(1. 沈阳建筑大学,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168;  
3. 沈阳建筑大学生态城镇化与绿色建筑研究中心,辽宁 沈阳,110168)

**摘要** 目的 研究建筑碳汇的相关进展,为核算建筑碳汇总量提供依据,为弥补城市碳失汇提供参考。方法 以建筑的主要材料混凝土为研究对象,对建筑碳汇原理、研究方法进行论述。结果 研究表明建筑碳汇的基本原理是基于水泥碳化的菲克第二定律,建筑碳汇的研究方法以实验验证法、全生命周期分析法等为主。结论 建筑碳汇的研究方法多数在理论模型层面集中于水泥或混凝土材料本身,缺少实际建设过程中建筑碳汇量化等相关研究。因此,对建筑碳汇的研究应从单一的材料研究转向复杂的建筑个体研究。建立以建筑碳汇单体为依托的城市碳汇空间容量,探索低碳导向下的城市空间布局优化方法将成为低碳城市发展研究的新趋势。

**关键词** 建筑碳汇;水泥碳汇;固碳原理;碳化速率;碳失汇

中图分类号 TU18

文献标志码 A

## Research Progress of Building Carbon Sinks Based on Cement Carbon Sinks

SHI Tiemao<sup>1</sup>, WANG Zitong<sup>2,3</sup>, LI Peiying<sup>2,3</sup>

(1. Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Architecture and Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Research Center of Ecological Urbanization and Green Building, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The research progress of building carbon sinks provides the basis for calculating the total amount of carbon sinks in building, and provides a reference theory for making up the missing carbon sinks in urban. This paper discusses the principle and research methods of building carbon sinks using the main concrete of building as the research object. The research shows that the basic principle of building carbon sink is based on Fick's second law of cement carbonization, and the research method of building carbon sink is mainly based on experimental verification and life cycle analysis. The research methods of building carbon sinks mostly focus on cement or concrete materials in the theoretical model level, and lack of quantitative research on building carbon sinks in the actual construction process. Therefore, the study of building carbon sinks should shift from a single material study to a complex study of individual buildings. The establishment of urban carbon sinks

收稿日期:2016-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51578344)

作者简介:石铁矛(1957—),男,教授,博士研究生导师,主要从事生态城市规划与绿色建筑研究。

space based on building carbon sinks and exploring the optimization of urban spatial layout will become the new trend of low carbon urban development.

**Key words:** building carbon sink; cement carbon sink; carbon sequestration principle; carbonization rate; missing carbon sinks

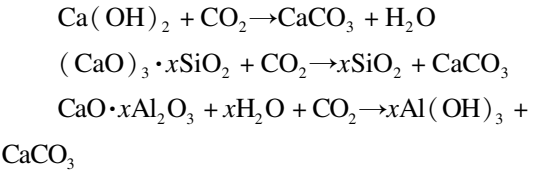
随着地球环境恶化愈演愈烈,全球的碳排放与碳吸收的研究成为当今核心的环境问题之一.据相关理论研究,增加碳吸收和减少碳排放一样是有效减少城市温室气体的主要途径.CO<sub>2</sub>在全球系统中的吸收即为碳汇,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)将其定义为“从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体和气溶胶前体的任何过程、活动或机制”.国内外有关碳汇的主要研究集中于水体、土壤、植被、岩石等自然系统方面,大量学者就自然系统的碳汇理论、碳汇机制与碳汇核算等方面进行了深入研究.但是,在碳循环的角度下,全球碳循环处于不平衡的状态,即人类生产生活所排放的部分CO<sub>2</sub>不知去向,这被称为“碳失汇”<sup>[1]</sup>.美国综合性科学研究机构伍兹霍尔研究中心(Woods Hole Research Center)多年的研究表明:在20世纪80年代,平均每年的排放碳7.1Pg(71亿t)的总和大于每年大气中和海洋积累吸收的碳,碳失汇量为1.8Pg/a(18亿t/a);在2000—2008年,全球碳汇量增加到2.8(±0.9)Pg/a(28亿t/a).除了生态系统,还有哪些因素导致这些碳的吸收,他们究竟都去了哪里,一直是科学家探索的问题.然而随着相关研究成果揭示水泥不断吸收环境中的CO<sub>2</sub>的发现,陆地系统的其他可能碳汇的探索也将成为科学研究的热点问题.基于此,笔者以建筑碳汇为研究对象,针对其固碳原理和研究进展及方法进行了述评,结论指出,建筑碳汇应从单一的材料研究转到复杂的建筑个体研究,建立以建筑碳汇单体为依托的城市碳汇空间容量对低碳城市具有重要意义.

已有研究表明,在水泥产物的混凝土使用过程中,其自身16.1%的碳排放量在其使

用寿命期间就被吸收,中国地区水泥碳汇总吸收量约14亿t碳<sup>[2]</sup>.水泥产量和消耗量均占全球的60%左右,中国是水泥产量大国,2011年至2013年期间中国消耗了66亿t水泥,超过美国在二十世纪的消耗总量的21亿t.仅2013年中国水泥年产量就已经达到24.14亿t.其中70%的水泥用于制作混凝土,用于建筑的年混凝土使用量达到60~70亿m<sup>3</sup>.而水泥碳汇中的主要贡献者是混凝土,因此以混凝土为主要材料的建筑也具有一定吸收二氧化碳的碳汇作用.

1 水泥碳汇及研究进展

水泥主要的化学成分是CaO、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等,其中CaO约占水泥成分65%.其在使用过程中,易发生水化反应生成不稳定的水化产物.这些水化产物会不断与空气、土壤和水中的CO<sub>2</sub>发生反应生成稳定物质,即土木工程学科中的碳化问题.其化学反应式如下:



$(\text{MgO})_3 \cdot x\text{SiO}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow x\text{SiO}_2 + \text{MgCO}_3$

土木工程中的碳化反应已有百年的深入研究,自前苏联至今已有不少学者就其碳化机理、影响因素、碳化模型及其预防处理措施进行了研究<sup>[3]</sup>,但是受单一学科研究领域的局限性,很少有土木工程的科学家研究水泥碳汇功能究竟有多大,其吸收二氧化碳的多少鲜有相关领域的科学家进行系统的深入.

2011年Uliaszczyk A等<sup>[4]</sup>筛选了12种不同强度的水泥材料,对其进行了纯CO<sub>2</sub>气体和混合气体两种气体的烟气密

封实验,并用范德瓦尔斯方程对其  $\text{CO}_2$  吸收量进行计算. 结论指出,水泥中水的总含量对其碳汇的能力成反比,水泥砂浆同时也具有相当的固碳能力. 2009 年李树勇<sup>[5]</sup>指出水泥使用过程中具有固碳作用,混凝土会逐渐吸收空气中的  $\text{CO}_2$  发生碳化反应,研究阐述了水泥水化和碳化的过程及原理,并提出了混凝土碳化的理论模型,对混凝土碳化的  $\text{CO}_2$  吸收量以公路为例进行了定量计算. 2015 年郝凤明等<sup>[6]</sup>对水泥材料碳汇发生原理、碳化影响因素进行分析,从混凝土水泥碳汇、砂浆水泥碳汇与水泥窑灰碳汇等方面,综述了水泥材料全生命周期碳汇的研究进展,并为未来水泥研究的发展趋势提出了展望. 2016 年 Xi F 等在《Nature Geoscience》上的研究阐明和量化了水泥材料全生命周期的碳吸收,发现水泥材料是全球重要的碳汇之一,对全球碳失汇问题研究提供了新的独特的视角. 研究指出,城市非生态系统碳汇主要由水泥产物的混凝土、水泥砂浆、水泥窑灰组成,1930 年到 2013 年全球范围内水泥材料的碳汇量,累计达 4.5GtC(45 亿吨碳)隐藏在水泥材料中,相当于同期生产水泥二氧化碳排放量的 43%(见图 1). 这一研究的发现表明 IPCC 的

国家温室气体清单指南中,对  $\text{CO}_2$  的排放存在一定的误差,忽略了水泥吸收  $\text{CO}_2$  的影响因素<sup>[2]</sup>.

## 2 建筑碳汇的固碳原理及研究进展

### 2.1 建筑碳汇固碳原理

建筑碳汇基于水泥碳汇的基本原理,即混凝土碳化反应的非克第二定律. 近年来,土木工程领域的国内外学者提出了不同的碳化深度理论模型. 目前,一致认可混凝土碳化的深度与碳化时间的二次方根成正比:

$$d = k \cdot \sqrt{t}. \tag{1}$$

式中: $d$  为混凝土碳化深度,cm; $k$  为影响碳化速度的系数; $t$  为碳化时间,a. 相关研究对碳化系数  $k$  进行了深入分析. 其中,材料影响因素包括水灰比、水泥品种与用量、掺合料、外加剂、骨料品种与级配、混凝土表面覆盖层等,通过影响混凝土的碱度和密实性来影响混凝土碳化系数;环境影响因素包括相对湿度、温度以及二氧化碳浓度等,通过影响二氧化碳扩散速度及碳化反应速率来影响混凝土碳化系数.

建筑碳汇量的核算,主要是建筑或结构建造完成之后,混凝土在硬化过程中与空气中的  $\text{CO}_2$  反应所吸收的碳量<sup>[7]</sup>,即单位体积碳吸收量在混凝土碳化体积中的总合:

$$U_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot a_{\text{CO}_2}, \tag{2}$$

$$V_i = d \cdot A_{sf}, \tag{3}$$

式中: $U_{\text{CO}_2}$  为建筑碳汇总量,g; $V_i$  为建筑混凝土碳化体积, $\text{cm}^3$ ; $a_{\text{CO}_2}$  为建筑单位体积混凝土碳汇量, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $A_{sf}$  为建筑混凝土的总暴露面积, $\text{cm}^2$ ; $d$  为混凝土的碳化深度,cm.

### 2.2 建筑碳汇研究进展

截止 2015 年,我国既有建筑面积已超过 560 亿  $\text{m}^2$ . 2011—2015 年,每年建成的房屋面积均超过 30 亿  $\text{m}^2$ (见图 2). 我国的建筑行业发展较快,建筑更新的速度较快,建筑的

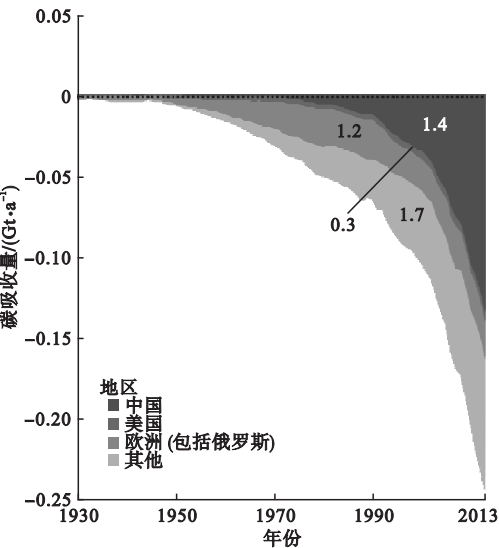


图 1 全球水泥碳汇量

Fig. 1 Global carbon sinks by cement

寿命短,平均建筑寿命只有 30 a,短于美国和欧洲的平均 65 ~ 70 a. “混凝土森林”建筑的迭代

更新也在不断加快. 因此,基于水泥碳汇的建筑碳汇对城市 CO<sub>2</sub> 的吸收作用不容忽视.

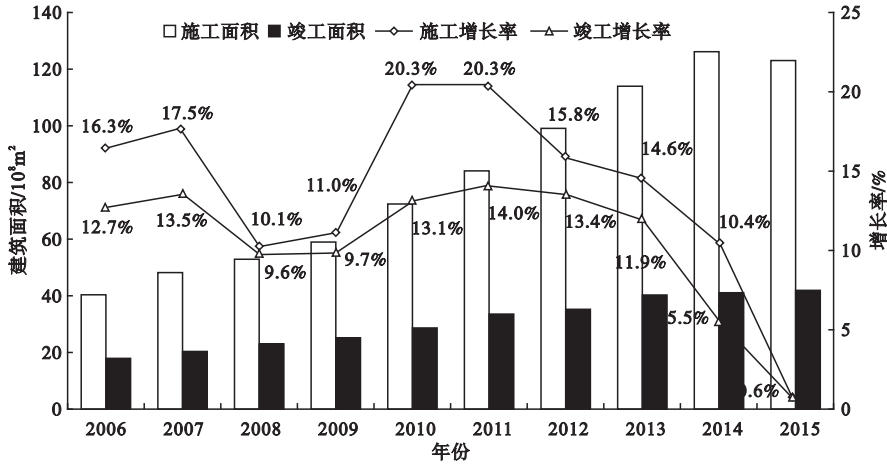


图 2 中国建筑建设量

Fig. 2 China building construction volume

建筑碳汇主要表现在混凝土碳汇中,其最早研究出现在美国硅酸盐水泥协会(Portland Cement Association, PCA)对混凝土的两个报告中. Gajda J 等<sup>[8-9]</sup>从环境对混凝土碳化的影响、水泥成分对碳吸收的影响以及碳汇量测试和核算的方法等方面做了全面的论述,研究表明混凝土碳汇满足碳化反应的菲克第二定律,并对美国现有使用中的建筑碳汇量进行估算,发现在建筑建成后的第一年,碳汇总量可达 20 万 t. 在北欧创新中心(Nordic Innovation Centre, NICE)的项目 - 混凝土全生命周期的 CO<sub>2</sub> 吸收(CO<sub>2</sub> Uptake During the Concrete Life Cycle)中,2011 年 Kikuchi 等<sup>[10]</sup>根据北欧(除冰岛以外)的废弃混凝土回收数据,通过实验证实了粉碎混凝土在其二次回收使用中 CO<sub>2</sub> 吸收的可能性,实验表明在北欧各国中挪威的混凝土总量具有显著的碳汇功能. 2006 年该项目的 Pommer 等<sup>[11]</sup>从碳平衡角度建立了混凝土产品全生命周期碳汇的估算模型,包括其使用服务周期和回收二次利用周期,通过模型计算得出服务周期为 50 年的混凝土屋瓦面碳汇量占其自身碳排放的 39%. 2013 年 Andersson 等<sup>[12]</sup>提出一种可计算结构中的混凝土碳汇量的计量模

型,包含其使用周期之后的 CO<sub>2</sub> 吸收量. 该模型基于理论和实地测量两种评估方式计算瑞典的混凝土碳汇量,结果显示瑞典 2011 年所有现有结构中的 CO<sub>2</sub> 吸收量约为 30 万 t,相当于其自身在同年燃烧和燃料产生的总排放量的约 17%. 2007 年 Pade 等<sup>[13]</sup>研究发现建筑混凝土在 100 年的生命周期里,丹麦、挪威、瑞士、冰岛混凝土的碳汇总量分别达 34 万 t、22 万 t、24 万 t、2.1 万 t,相当于混凝土生产年份产生 CO<sub>2</sub> 排放量的 57%、33%、33%、36%. 2014 年 García - Segura 等<sup>[14]</sup>通过三种不同水泥材料制成的混凝土分析,计算并估计了三种水泥的碳汇量和碳排放量,考虑混凝土粉碎后的循环和碳化,并通过案例的研究给出了相应的优化. 2013 年 Yang 等<sup>[15]</sup>依据菲克第二定律,考虑了建筑混凝土的表面材料,深化了碳汇数学模型,对韩国框架结构体系的办公楼和住宅进行了比较分析,最后计算得出建筑碳汇在 100 年生命周期内,其 CO<sub>2</sub> 吸收量估计为其生产碳排放量的 15.5% ~ 17.0%.

2010 年邵一心等<sup>[16]</sup>研究了混凝土 3 个基本组分:水泥、细沙和骨料的固碳性. 研究发现波特兰水泥 2 h 内碳化吸收了 14% 的



CO<sub>2</sub>,其碳化后的材料强度与7 d 传统养护的强度相当.指出二氧化碳在混凝土中的储存是一项经济可行、直接减排的有效技术.2014年孙楠楠<sup>[17]</sup>深入分析了运输及碳化对再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)全生命周期碳排放的影响.提出了其碳吸收估算方法的不足,对原有的碳吸收估算模型进行补充和修正,建立了碳排放再生粗骨料运距关系模型及碳化-碳吸收模型,模拟案例全生命周期内的碳排放并进行了系统地分析及评价.2015年张涑贤等<sup>[18]</sup>从碳平衡理论角度,建立了建筑生命周期碳平衡概念的模型并计算,以实际案例估算并分析了碳平衡的影响因素.结果表明,碳吸收量同碳排放量一样不能被忽略,废弃混凝土的回收利用是增加建筑碳汇的一种有效途径.

建筑碳汇的研究多数基于土木工程的混凝土碳化反应原理,通过对混凝土的碳化实验,测量了混凝土在时间影响下碳化深度对CO<sub>2</sub>的吸收量.在考虑建筑全生命周期的前提下,对建筑混凝土的使用阶段和拆除、二次利用阶段进行了研究和探讨.然而,对于建筑混凝土使用阶段的测量和估算,目前国内外研究还不够准确.建筑碳汇自身碳汇能力的大小、固碳功能的影响机制、碳汇空间的分布规律等尚需更加明确、系统的研究及深入.

### 3 建筑碳汇研究方法

关于建筑碳汇,国内外研究均刚刚起步,其研究的方法和计量模型尚需斟酌,大部分都局限在建筑的混凝土材料本身.2014年Atsushi Ueno 等对建筑碳汇中建筑拆除阶段的废弃混凝土碳汇进行分析,研究指出在一般情况下水化产物碳化率远高于预期,尽管废弃混凝土所有类型的水化产物都能吸收CO<sub>2</sub>,但最主要的是Ca(OH)<sub>2</sub>与CO<sub>2</sub>反应产生碳酸钙.并对混凝土碳汇提出了可视化的视觉评价方法,通过水化产物吸收CO<sub>2</sub>的可视化能快速的认识废弃混凝土的固碳效

应.因此,设计了四个可视化的评价方法.①结晶可视化:废弃混凝土CO<sub>2</sub>吸收的表现为Ca(OH)<sub>2</sub>形成饱和的结晶CaCO<sub>3</sub>.通过热分解废弃混凝土,已碳化的CaCO<sub>3</sub>会产生CO<sub>2</sub>再次与Ca(OH)<sub>2</sub>反应,形成白色饱和的结晶;②浓度可视化:在充满定量CO<sub>2</sub>气体的密封瓶内放置废弃混凝土的样本,混凝土会直接反应吸收CO<sub>2</sub>,使CO<sub>2</sub>浓度会有直接的明显变化;③质量可视化:同质量的废弃混凝土块和普通混凝土在CO<sub>2</sub>的和空气的接触下,废弃混凝土会吸收更多CO<sub>2</sub>产生质量变化;④气体采样袋可视化:在密封气体采样袋中的废弃混凝土和CO<sub>2</sub>气体反应会产生明显的H<sub>2</sub>O水汽.最后,通过比较选用气体采集袋作为其可视化的视觉评估方法.结论指出,在30 s的气体采样袋的可视化实验中,直观的演示了混凝土碳汇的反应<sup>[19]</sup>.

2015年徐东旭<sup>[20]</sup>通过混凝土的碳汇原理与碳汇价值,采用全生命周期的分析方法,分析了混凝土碳汇过程的影响因素.将建筑全生命在周期划分为建筑建设、建筑使用、建筑拆除、建筑垃圾处理与二次使用四个阶段,并分别建立不同阶段的碳汇核算方法,计算不同类型建筑的单位面积碳汇量,最后提出通过建筑实例的设计优化增加建筑的碳汇量的方法与评价.2010年Galan I等<sup>[21]</sup>采用热重和差热分析法以及酚酞指示剂,通过实验选取不同熟料比、添加剂、产地、产商的混凝土,根据建筑室内外不同环境条件因素、建筑的使用类型,分析了不同时间段、不同水灰比的混凝土碳汇率.同时指出单位体积混凝土碳汇量、混凝土暴露面积和混凝土的碳化深度是建筑碳汇的主要影响因素.

#### 3.1 单位体积混凝土碳汇量研究方法

Xi F<sup>[2]</sup>、Gajda J<sup>[8]</sup>、Pade C<sup>[11]</sup>在构建混凝土碳汇计算量时,根据化学反应式的质量守恒定律,建立了单位体积混凝土的碳汇量的构算公式:

$$a_{\text{CO}_2} = \lambda \cdot m_c \cdot f_{\text{CaO}} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}}.$$

(4)

式中: $m_c$  为单位体积混凝土中水泥的质量,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $f_{\text{CaO}}$  为水泥中氧化钙的质量分数;  $M$  为摩尔质量, 其中  $M_{\text{CO}_2}$  为  $44 \text{ g}/\text{mol}$ ,  $M_{\text{CaO}}$  为  $56.1 \text{ g}/\text{mol}$ ;  $\lambda$  为混凝土中  $\text{CaO}$  碳化的百分比,  $\text{Xi F}$  取为  $80\%$ 、 $\text{Gajda J}$  取为  $32\% \sim 37\%$ 、 $\text{Pade C}$  取为  $75\%$ 。

2014 年 Yang K H 等<sup>[22]</sup> 利用 Papadakis 等人计算的单位体积混凝土已碳化物质成分的质量(见图 3), 对韩国 40 年内混凝土单位体积碳化浓度进行回归分析, 得出相关的系数, 并确定了水泥水化的程度系数。

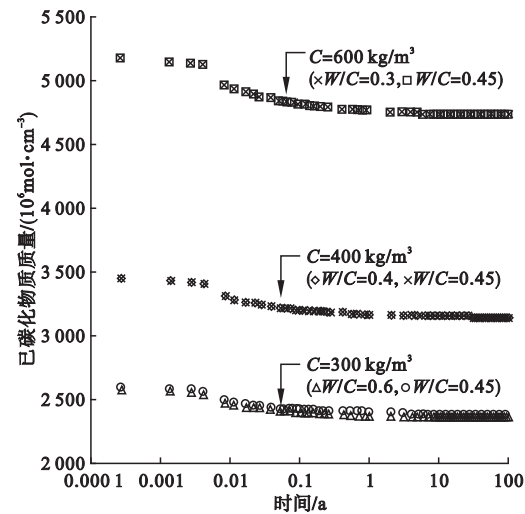


图3 单位混凝土已碳化物质的质量

Fig. 3 Quality of carbonized units concrete

由此, 根据实验测定法和质量守恒定律给出单位体积混凝土的碳汇量:

$$\alpha_{\text{CO}_2}(t) = \alpha_h(t) \cdot M_{ct}(t) \cdot M_{\text{CO}_2} \times 10^{-6}.$$

(5)

式中: $\alpha_{\text{CO}_2}(t)$  为时间作用下单位体积混凝土的碳汇量,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\alpha_h(t)$  为水泥的水化程度;  $M_{ct}(t)$  为单位体积混凝土已碳化物质成分的质量,  $\text{mol}/\text{cm}^3$ ;  $M_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  的摩尔质量,  $\text{g}/\text{mol}$ . 研究表明,  $M_{ct}(t)$  的量与混凝土中的单位体积的水泥质量 ( $C$ ) 成线性相关, 即  $M_{ct}(t) = 8.06 C$ . 水泥的水化程度  $\alpha_h(t)$  随时间变化表现为抛物线型的上升趋势, 最终趋近于定值, 其斜率受水灰质量比 ( $W/C$ ) 的影

响<sup>[23]</sup>, 在韩国建筑使用周期的 40 a 内, 水泥的水化反应在 100 d 内就接近停止(见图

4), 因此, 
$$\alpha_h(t) = \frac{t}{t + 2.0} \cdot \frac{1.031 \cdot W/C}{0.194 + W/C}.$$

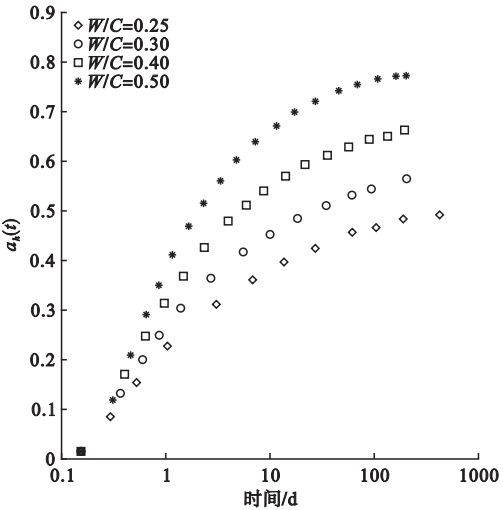


图4 水泥的水化程度

Fig. 4 Degree of hydration of cement

以上两种公式在计算  $\text{CO}_2$  的吸收量时存在着一定的不足,  $\text{Pade C}$  等<sup>[13]</sup> 构建的公式中,  $\lambda$  的取值具有很大的偏差性, 并且只计算了  $\text{CaO}$  与  $\text{CO}_2$  的反应, 未考虑其他可碳化的有机产物, 这对同一评价的结果将会产生不同的影响. Yang K H<sup>[15]</sup> 虽然通过实验参数建立了基于时间的动态模型, 但其根据回归方法建立的水泥水化程度系数具有一定的局限性, 并不适用于其他国家或地区的估算。

3.2 建筑碳汇中暴露面积的研究方法

建筑碳汇的暴露面积即混凝土在空气中的暴露面积, 包括建筑使用阶段以及拆除回收阶段. Gajda J<sup>[8-9]</sup> 指出建筑使用阶段的混凝土暴露面积既是建筑混凝土各个结构暴露面积的总和, 包括室内空间和室外空间以及地下空间, 即

$$A_{sf} = \sum_{i=1}^n A_i.$$

(6)

式中:  $A_i$  为建筑各个结构体系, 例如墙体、楼板、楼梯、屋顶、柱、梁等。

拆除回收阶段随着混凝土体块的粉碎, 其体积变小而表面积加大, 混凝土块的表面积大小几乎约为原来的 100 倍. 拆除后碎混

凝土块的大小、暴露的环境条件以及暴露的时间则决定了混凝土的碳化速率及碳汇量. Yang K H<sup>[22]</sup> 假设混凝土废墟很分散, 导致所有个体面积暴露在空气中, 则混凝土块最大最小表面积如下:

$$(A_{sf\_re})_{\max} = \frac{\pi \cdot H \cdot L \cdot (D - 2d)}{d_a}, \quad (7)$$

$$(A_{sf\_re})_{\min} = \frac{\pi \cdot H \cdot L \cdot (D - 2d)}{L_u \cdot V_{\text{solid}}}. \quad (8)$$

式中:  $H$ 、 $L$ 、 $D$  分别为原始混凝土块的高、长、

深, cm;  $d$  为碳化深度, cm;  $d_a$  为混凝土粉碎时的平均直径, cm;  $L_u$  为单位宽度;  $V_{\text{solid}}$  为混凝土粉碎时的相对体积比. 粉碎混凝土表面积介于  $(A_{sf\_re})_{\max}$  和  $(A_{sf\_re})_{\min}$  之间, Yang K H 对建筑梁结构混凝土瓦砾进行快速碳化反应, 其粉碎后的混凝土平均直径为 27 cm, 结论表明最底层混凝土瓦砾与最外层混凝土瓦砾碳化的程度相近 (见图 5). 因此, 对于粉碎混凝土的表面积  $A_{sf}$  可以用  $(A_{sf\_re})_{\max}$  代替.

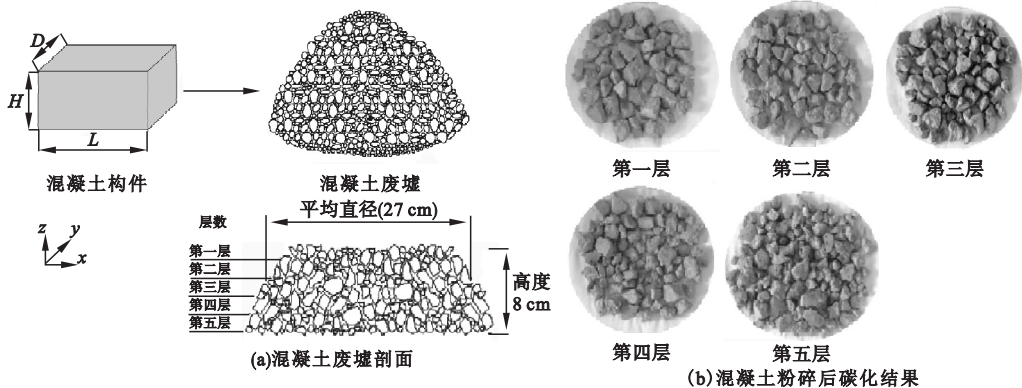


图 5 破碎混凝土快速碳化反应

Fig. 5 Fast carbonation reaction of cracked concrete

### 3.3 建筑碳汇中碳化深度的研究方法

对于建筑碳化深度方面, 国内外学者对影响混凝土碳化的因素, 开展了大量快速碳化试验、室外暴露试验及实际工程碳化调查, 研究者根据各自对影响碳化因素的理解不同, 提出了多种碳化深度计算模型<sup>[24]</sup>. 苏联学者阿列克谢耶夫以菲克第一定律及二氧化碳的扩散性质提出菲克第二定律:  $d = k \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_e \cdot C_0}{m_0}} \cdot \sqrt{t}$ . 式中  $d$  为凝土碳化深度, cm;  $k$  为影响碳化速度的系数;  $t$  为碳化时间, a.  $D_e$  为  $\text{CO}_2$  在混凝土中的有效扩散系数;  $C_0$  为环境中的  $\text{CO}_2$  的浓度;  $m_0$  为单位混凝土的  $\text{CO}_2$  吸收量. 影响  $k$  碳化速率的因素众多, 因此国内外学者对其提出了多样的计算模型, 其中包括经验模型和复合模型. 经验模型中, 较典型的有基于水灰比的日本岸谷孝一模型<sup>[25]</sup>:  $W/C > 0.6$  时:  $d = r_c \cdot r_a \cdot r_s$ ,

$$\sqrt{\frac{W/C - 0.25}{0.3(1.15 + 3W/C)}} \cdot \sqrt{t}; W/C \leq 0.6 \text{ 时: } d = r_c \cdot r_a \cdot r_s \cdot \frac{4.6W/C - 1.76}{\sqrt{7.2}} \cdot \sqrt{t}. \text{ 式中: } W/C \text{ 为}$$

水灰质量比;  $r_c$  为水泥品种影响系数;  $r_a$  为料品种影响系数;  $r_s$  为混凝土掺加剂影响系数. 基于混凝土抗压强度的中国科学院模型<sup>[26]</sup>:  $d = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \left( \frac{60.0}{f} - 1.0 \right) \sqrt{t}$ , 其中  $f$  为混凝土抗压强度标准值, MPa;  $\alpha_1$  为养护条件、 $\alpha_2$  为水泥种类、 $\alpha_3$  为环境条件修正系数. 多系数的龚洛书模型<sup>[27]</sup>:  $d = K_w K_c K_g K_{FA} K_b K_a \sqrt{t}$ , 其中  $a$  为碳化系数, 普通混凝土取 2.32, 轻集料混凝土取 4.18;  $t$  为碳化时间, a;  $K_w$ 、 $K_c$ 、 $K_g$ 、 $K_{FA}$ 、 $K_b$ 、 $K_r$  分别为水灰质量比、水泥用量、集料种类、粉煤灰占水泥量比、养护方法和水泥品种的影响系数. 复合模型以基于扩散理论和试验结果为主, 张誉模型<sup>[28]</sup>:  $d =$

$839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/(\gamma_c C) - 0.34}{\gamma_{HD} \gamma_c C}} C_0 \sqrt{t}$ , 其中:  $RH$  为环境相对湿度, % , 当  $RH > 55\%$  时适用;  $W/C$  为混凝土的水灰比;  $C$  为水泥用量,  $kg/m^3$ .

以扩散理论为依据的理论模型, 其物理意义明确, 理论依据充分, 但应用性差, 模型参数较难确定. 以碳化实验为依据的经验模型, 模型应用性好, 参数易确定, 但理论依据不足, 实际应用具有一定误差. 以扩散理论和实验结果相结合的复合模型, 有较充分的理论依据和实际可操作性, 但其涉及影响参数较多不适合单体建筑碳汇的核算.

4 建筑碳汇的发展趋势

建筑碳汇的研究已经得到国际社会的相关关注, 目前已从基于混凝土碳化基本原理的混凝土材料研究逐步转向建筑碳汇的方法研究, 通过建筑全生命周期评价体系探讨建筑碳汇自身碳汇能力的大小, 定性分析其固碳功能的影响机制, 并核算了部分国家和地区的建筑碳汇总量. 大多数学者都已完成了建筑碳汇理论上的定性和定量分析, 但在实际建设过程中建筑碳汇在受到材料 and 环境因素的同时, 还会受到其自身建筑个体的设计手段、建造模式、使用方式等因素的影响. 因此, 在考虑材料 and 环境影响的同时, 将建筑碳汇从单一的材料研究转向到复杂的建筑个体研究, 再到系统的建筑群体研究将是未来建筑碳汇不可或缺的重要步骤. 以建筑单体的建筑碳汇固碳系数为基础, 建立群体建筑空间网络模块的城市碳汇空间容量, 耦合城市空间布局, 探索低碳导向下的城市空间布局优化方法将成为低碳城市发展研究的新趋势.

参考文献

[1] 方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇[J]. 自然杂志, 2007, 29(1): 1-6.  
(FANG Jingyun, GUO Zhao Di. Looking for missing carbon sinks from terrestrial ecosystems[J].

Chinese journal of nature, 2007, 29(1): 1-6.)  
[2] XI F, DAVIS S J, CIAIS P, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation [J]. Nature geoscience, 2016, 9(12): 880-883.  
[3] 肖佳, 勾成福. 混凝土碳化研究综述[J]. 混凝土, 2010(1): 40-44.  
(XIAO Jia, GOU Chengfu. Overview of the research for concrete carbonation [J]. Concrete, 2010(1): 40-44.)  
[4] ULIASZ-BOCHE NCZYK A, POMYKAŁA R. Mineral sequestration of CO<sub>2</sub> with the use of cement waste [J]. Energy procedia, 2011, 4: 2855-2860.  
[5] 李树勇, 王树文. 水泥作为潜在碳汇对 CO<sub>2</sub> 吸收潜力的估算研究[C]//中国气象学会年会气候变化分会场. 杭州: [出版者不详], 2009.  
(LI Shuyong, WANG Shuwen. Cement as potential carbon sinks on CO<sub>2</sub> absorption study on estimation of potential [C]// China Meteorological Society Annual Meeting on Climate Change. Hangzhou: [s. n.], 2009.)  
[6] 郝凤明, 石铁矛, 王娇月, 等. 水泥材料碳汇研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(4): 288-296.  
(XI Fengming, SHI Tiemao, WANG Jiaoyue, et al. Review of cement materials carbon sink [J]. Advances in climate change research, 2015, 11(4): 288-296.)  
[7] 石铁矛, 周诗文, 李绥, 等. 建筑混凝土全生命周期固碳能力计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015(5): 829-837.  
(SHI Tiemao, ZHOU Shiwen, LI Sui, et al. A computational method for the carbon sequestration capability of building concrete in the whole life cycle [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2015(5): 829-837.)  
[8] GAJDA J, MILLER F M G, ASSOCIATION P C. Concrete as a sink for atmospheric carbon dioxide: A literature review and estimation of CO<sub>2</sub> absorption by portland cement concrete [M]. Washington: Portland Cement Association, 2000.  
[9] GAJDA J. Absorption of atmospheric carbon dioxide by portland cement concrete [R]. Washington: PCA R & D Serial(2255a), 2001.  
[10] KIKUCHI T, KURODA Y. Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete [J]. ACT, 2011, 9(1): 115-124.  
[11] POMMER K, PADE C. Guidelines: uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory of concrete [R]. Stuckholm: Nordic Innovation Centre, 2006.  
[12] ANDERSSON R, FRIDH K, STRIPPLE H, et al. Calculating CO<sub>2</sub> uptake for existing con-



- crete structures during and after service life [J]. Environmental science & technology, 2013, 47(20): 11625 – 11633.
- [13] PADE C, GUIMARAES M. The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective [J]. Cement & concrete research, 2007, 37(9): 1348 – 1356.
- [14] GARCÍA-SEGURA T, YEPES V, ALCALÁ J. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability [J]. International journal of life cycle assessment, 2014, 19(1): 3 – 12.
- [15] YANG K H, KIM S C, YANG K H, et al. A case study on CO<sub>2</sub> uptake of concrete owing to carbonation [J]. Transactions of the Korean hydrogen & new energy society, 2013, 1(1): 111 – 116.
- [16] 邵一心, MONKMAN S, TRAN S, 等. 混凝土基本组分吸收二氧化碳的能力 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9): 1645 – 1651.  
(SHAO Yixin, MONKMAN S, TRAN S, et al. CO<sub>2</sub> uptake capacity of concrete primary ingredients [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2010, 38(9): 1645 – 1651.)
- [17] 孙楠楠. 运输及碳化对 RAC 生命周期碳排放的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
(SUN Nannan. The study on effect of transport and carbonation for carbon-emission of RAC during its lifecycle [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [18] 张涑贤, 孙永乐. 钢筋混凝土结构建筑生命周期碳平衡研究 [J]. 生态经济, 2015, 31(5): 78 – 82.  
(ZHANG Suxian, SUN Yongle. Research on life cycle carbon balance of concrete structure buildings [J]. Ecological economy, 2015, 31(5): 78 – 82.)
- [19] UENO A, KAWAI K, KOBAYASHI K, et al. Evaluation of visual methods for CO<sub>2</sub> uptake by demolished concrete; Research activities by JSCE subcommittee 219 [J]. Construction & building materials, 2014, 67: 393 – 398.
- [20] 徐东旭. 基于混凝土碳汇的建筑设计优化研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.  
(XU Dongxu. The optimization strategies study of architectural design based on the carbon sink of concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [21] GALAN I, ANDRADE C, MORA P, et al. Sequestration of CO<sub>2</sub> by concrete carbonation. [J]. Environmental science & technology, 2010, 44(8): 3181 – 3186.
- [22] YANG K H, SEO E A, TAE S H. Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake of concrete [J]. Environmental impact assessment review, 2014, 46(4): 43 – 52.
- [23] CHA S W. Modeling of hydration process and analysis of thermal and hygral stresses in hardening concrete [D]. South Korea Seoul: Seoul National University, 1999.
- [24] 李桂州, 周新刚. 混凝土碳化深度的贝叶斯自回归预测分析 [J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2013, 26(4): 282 – 286.  
(LI Guizhou, ZHOU Xingang. Prediction and analysis of carbonation depth of concrete with bayesian auto-regressive method [J]. Journal of Yantai university (natural science and engineering edition), 2013, 26(4): 282 – 286.)
- [25] 朱安民. 混凝土碳化与钢筋混凝土耐久性 [J]. 混凝土, 1992(6): 18 – 22.  
(ZHU Anmin. Concrete carbonation and durability of reinforced concrete [J]. Concrete, 1992(6): 18 – 22.)
- [26] CONTENAY C. Deterioration and repair [J]. Bahrain Proc, 1995(6): 467 – 483.
- [27] 龚洛书, 苏曼青, 王洪琳. 混凝土多系数碳化方程及其应用 [J]. 混凝土, 1985(6): 12 – 18.  
(GONG Luoshu, SU Manqing, WANG Honglin. Multi-coefficient carbonization equation of concrete and its application [J]. Concrete, 1985(6): 12 – 18.)
- [28] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型 [J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16 – 19.  
(ZHANG Yu, JIANG Lixue. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism [J]. Industrial construction, 1998, 28(1): 16 – 19.)