

混凝土可持续发展:应对碳排放引起气候变化危机

王欣悦¹, 丁思齐², 董素芬³, 李晓民⁴, 韩宝国^{1,*}

(1. 大连理工大学土木工程学院, 大连 116024; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳 518055;
3. 大连理工大学交通运输学院, 大连 116024; 4. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 兰州 730010)

摘要:混凝土是人类文明在地球上有形足迹的最明显表现之一,其应用量大面广,已成为世界上用量最大的人造工程材料。混凝土改变了世界并塑造了人类文明,在未来仍然不可或缺。但大量混凝土的生产和使用对资源、能源和环境影响巨大,是全球碳排放重要来源之一。基于大气中二氧化碳浓度导致气候快速变化而威胁人类生存条件的预测,为推动人类社会和文明的永续发展,混凝土发展面临严峻挑战。本文首先简要介绍了混凝土的基本知识,其次总结了混凝土的发展历程,再次分析了混凝土发展目前面临的挑战,最后提出了混凝土可持续发展的策略与路线。

关键词:混凝土;气候变化;碳排放;可持续发展;策略与路线

DOI:10.48014/ems.20220728001

引用格式:王欣悦,丁思齐,董素芬,等. 混凝土可持续发展:应对碳排放引起气候变化危机[J]. 工程材料与结构, 2022, 1(1): 1-14.

0 引言

混凝土起源可以追溯到公元前 7000 年,其被用于建造各种基础设施,包括建筑物、道路、桥梁、大坝、核电站等。有些基础设施至今还存在,甚至长于建造它们的文明。因此,混凝土是人类在地球上有形足迹的最明显表现之一^[1-3]。混凝土是采用胶凝材料和骨料(也称集料)混合制成的一种人工复合材料。用于制备混凝土的胶凝材料可以是无机胶凝材料(包括水硬性胶凝材料 and 气硬性胶凝材料),也可以是有机胶凝材料(如聚合物、沥青等),其中水硬性胶凝材料主要是水泥(包括硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、地聚物水泥等)、气硬性胶凝材料主要是石灰和石膏等;骨料主要包括砂(也称为细骨料或细集料)和石(也称为粗骨料或粗集料)^[4,5]。由于采用硅酸盐水泥制备的混凝土应用最为量大面广,所以本文以下如不特殊强调,

水泥皆指硅酸盐水泥,而混凝土都指硅酸盐水泥混凝土^[1,2]。

自 1824 年波特兰水泥(即硅酸盐水泥)发明至今近 200 年,混凝土已成为世界上用量最大的人造工程材料(占人造物的 40%,年用量约 14 亿立方米、折合超 300 亿吨,见图 1)^[6]。由于混凝土具有优异的力学性能(主要是抗压强度高和弹性模量大)、耐水性好、易于成型不同形状和尺寸、便宜易得等优点,其世界基础设施中的用量是所有其他工程建筑材料(包括木材、钢材、高分子等)的两倍^[7]。虽然制备混凝土所需的水泥需要消耗大量的原材料和能量,混凝土生产消耗的材料和能源最少、排放的有害副产品最少、造成的环境污染最少,具有良好的生态、能源、经济效益。而且混凝土相比于其他工程建筑材料(如金属材料或高分子材料)耐久性好,服役寿命可达几十年甚至上百年^[8,9]。因此,混凝土是人类社会可持续发展的可靠选择。

* 通讯作者 Corresponding author: 韩宝国, haobaoguo@dlut.edu.cn

收稿日期: 2022-07-28; 录用日期: 2022-08-05; 发表日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目号: 51978127; 52178188; 51908103)、中国博士后基金(项目号: 2022M710973)

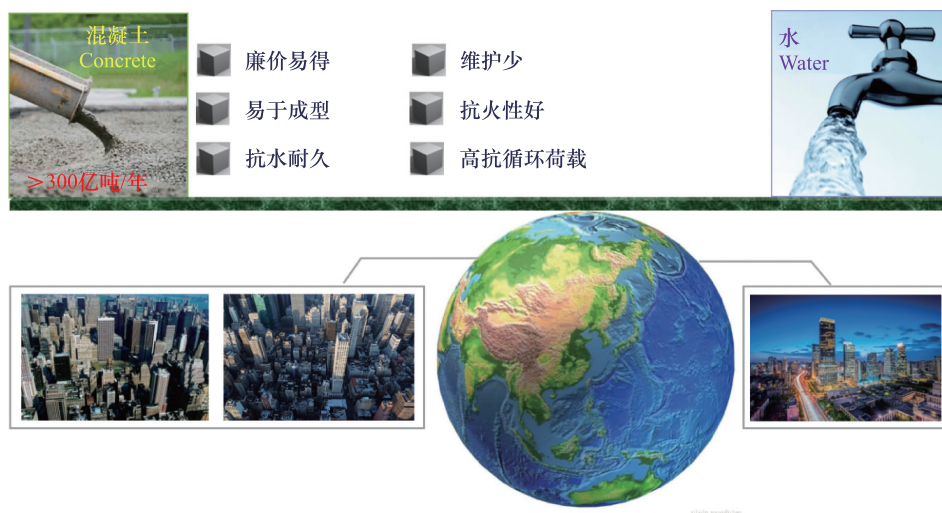


图1 混凝土用量及其优点

Fig. 1 Concrete consumption and its advantages

随着人类社会的不断发展,有限的地球资源消耗引发了资源危机并伴生了一系列能源和环境问题。混凝土作为用量最大的工程建筑材料,其生产和使用对资源、能源和环境产生了巨大的影响,特别是在目前全球整体气温持续升高、极端天气(高温高湿、严寒等)非常频繁,基于大气中二氧化碳浓度导致气候快速变化而威胁人类生存条件的预测,减少二氧化碳排放变得异常紧迫^[10-11]。如 Lucy Rodgers 在 BBC News 中提及“在全球二氧化碳总排放量中,来源于混凝土的二氧化碳大约为 8%,远高于航天燃料 2.5% 的碳排放,甚至接近全球农业 12% 的碳排放量。如果混凝土工业是一个国家,它将成为世界第三大二氧化碳排放国,仅次于中国和美国。”。二氧化碳排放引起的气候变化危机实质是环境问题,引起此环境问题的本质原因在于资源和能源的消耗。混凝土的原材料(主要是水泥)生产消耗钙质资源而产生二氧化碳排放,混凝土及其原材料的生产需要消耗能源,能源主要采用化石燃料燃烧获得但同时生成二氧化碳。所以从源头上有三条途径降低混凝土生产的碳足迹:(1)不采用钙质资源制备混凝土。只是从地球上主要元素含量(氧(48.6%)、硅(26.3%)、铝(8.3%)、铁(4.75%)、钙(3.45%)、钠(2.74%)、钾(2.47%)、镁(2.0%))来看,同时由于水化硅酸钙胶凝体系(即钙-硅体系)的优异胶结性能和水硬特征(即耐水而耐久),硅酸盐水泥混凝土是很难取代的,因为

其是完美遵循自然规律的一个精妙设计;(2)不采用化石燃料提供能源。但是近 30 年来,世界一次能源供应体系中化石能源的比重没有明显变化,始终保持在 80% 左右;(3)如果能源问题有合适的解决途径且足够丰富,资源问题可以通过能源解决,一方面可通过消耗能量提高混凝土及其原材料的品质和可用性,另一方面也可以对排放的具有低能级特征的二氧化碳进行收集并转化或利用。但这依赖能源供给的重大变革。所以,在可预见的未来,混凝土将继续在人类生产和生活中发挥重要作用,但其也面临着严峻的可持续发展问题^[7]。

因此,本文在介绍混凝土基本知识和发展历程的基础上,分析了混凝土发展目前面临的挑战,进而提出了混凝土可持续发展的策略与路线。

1 混凝土概述

由图 2 可知,混凝土的性能与其组成、工艺以及结构密切相关。因此,以下将从这几方面简要地介绍混凝土。

1.1 性能

作为一种工程材料,硬化后混凝土的性能(主要包括力学性能、耐久性和尺寸稳定性)对于其工程应用特别重要,其中力学性能主要包括强度、变形性能(特征点指标、泊松比、线膨胀系数等)和本构关系等,耐久性主要包括抗渗性、抗冻性、抗碳化

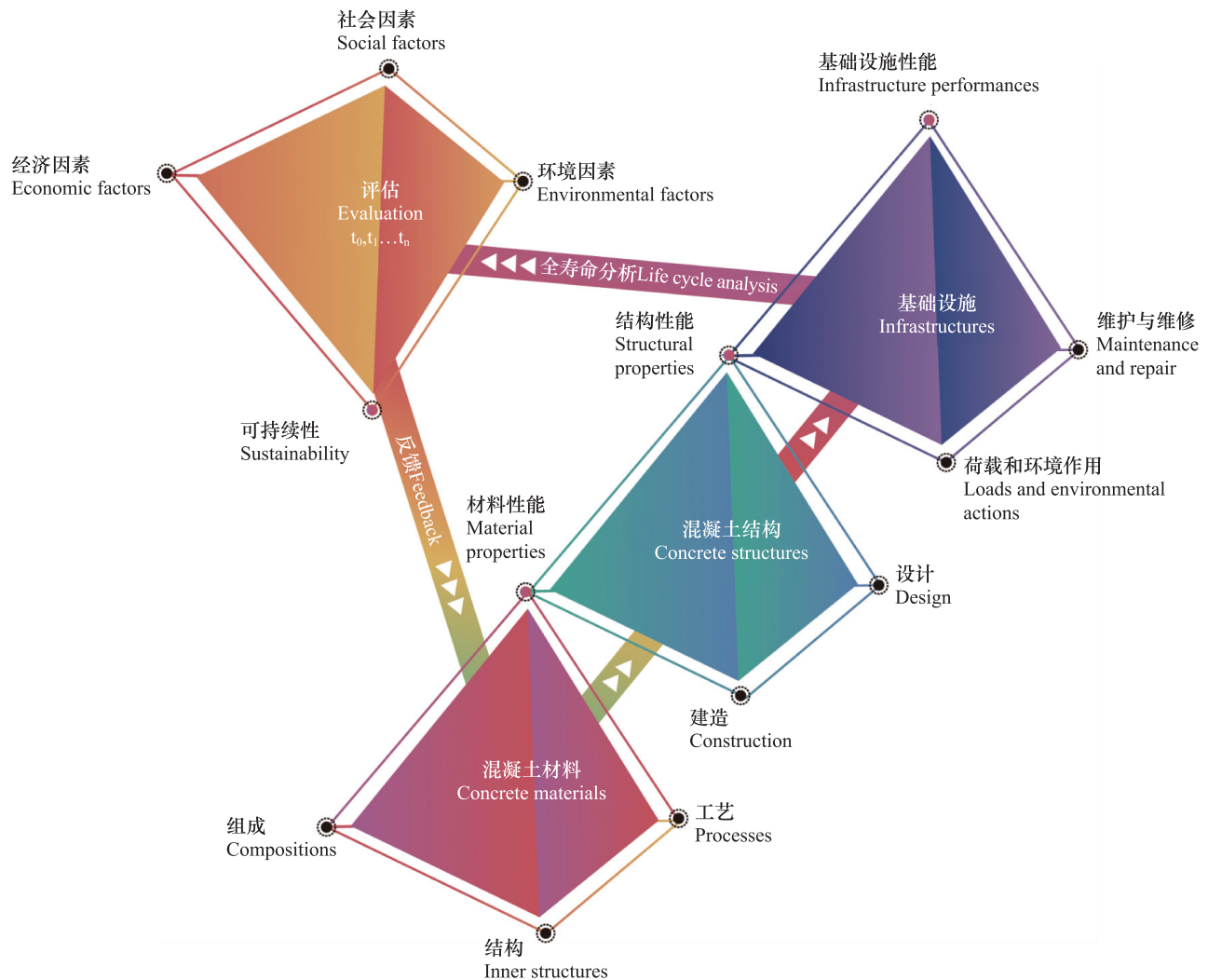


图2 混凝土材料—结构—基础设施及其可持续性评价

Fig. 2 Concrete materials-structures-infrastructures and their sustainability evaluation

性能、抗化学侵蚀性、耐磨性等,尺寸稳定性包括膨胀、收缩、徐变等;硬化混凝土的性能与其制备工艺密切相关,所以新拌混凝土早期性能也非常重要,比如流变性和工作性、凝结硬化性能、早期强度和早期变形性能等^[12,13]。

1.2 组成

如图3所示,混凝土核心组成材料包括三种:水泥、水、骨料(包括细骨料和粗骨料)。为改善混凝土拌合物和硬化混凝土的性能,外加剂包括化学外加剂(如减水剂、塑化剂、引气剂、早强剂、缓凝剂等)和矿物外加剂(也称矿物掺和料)也成为两种重要组分,特别是后者有助于一些大宗工业废弃物(如粉煤灰、矿渣、硅灰等)的资源化利用而减少对

自然资源的使用并降低因其大量堆放而产生的环境和经济问题^[2]。

1.2.1 水泥

水泥是混凝土最核心的组成材料,其占混凝土体积的7%~15%、质量的9%~19%^[14]。水泥是一种由水泥熟料、石膏(避免水泥闪凝,应用其是水泥发展史中一个里程碑)和混合材(如火山灰、粉煤灰、矿渣、黏土等)的混合磨制的细粉状水硬性胶凝材料,其主要采用石灰质原材料(提供氧化钙并分解产生二氧化碳)、粘土质原材料(提供氧化硅)以及矿化剂等通过“两磨(磨生料、磨熟料)一烧(烧生料)”工艺而制成^[15,16]。为促进水泥熟料所需矿物的形成,原材料需经过破碎、粉磨和混合等工艺对生料进行均化,所以需要大量的能量,该能量主要采

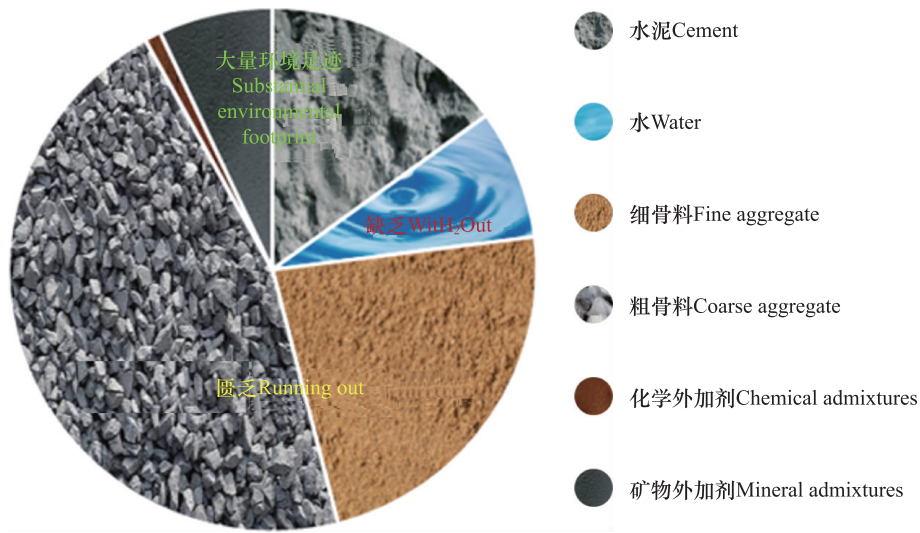


图3 混凝土组成及其对资源和环境的影响

Fig. 3 Concrete compositions and their impacts on resources and environment

用化石燃料燃烧提供同时也生成二氧化碳；另外，熟料烧成的最高温度大约在 1450°C ，热耗约 800 kcal/kg 熟料（干法，湿法可达 1400 kcal/kg 熟料），同样也有很高的能耗并伴生二氧化碳释放^[17,18]。

水泥熟料主要化学组成包括： CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等，其大致组成比例见表 1。这些氧

化物通过烧结形成了四种主要矿物：硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙，在水泥中四者的大致比例见表 1，其中前两者总含量一般在 70% 以上，这也是被称为硅酸盐水泥的原因。这些矿物在高温和不平衡条件下形成，其晶体结构不完整而遇水不稳定可以发生反应^[17]。

表 1 硅酸盐水泥典型化学组成与矿物组成

Table 1 Typical chemical and mineral composition of Portland cement

化学组成/%					矿物组成/%			
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙
62~68	20~24	4~7	2.5~6.5	<5	44~62	18~30	5~12	10~18

水泥本身不能胶结骨料，只有与水拌和才能获得胶凝能力。水泥与水的化学反应即水化所形成产物具有凝结和硬化的特性^[19]。水泥四种熟料的水化特征见表 2。水泥的性能除主要与矿物组成有关，也与其细度密切相关。典型水泥颗粒的尺寸范围为 $1\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ ，平均尺寸约为 $10\mu\text{m}$ 。已有研究表明，大于 $45\mu\text{m}$ 的水泥颗粒水化缓慢，而大于 $75\mu\text{m}$ 的水泥颗粒很难完全水化^[20]。这也是水泥需要通过粉磨而制得的原因。

此外，将水泥颗粒磨细，除为保证水化外，也因此具有大的比表面积而可以和水形成絮凝的团聚

浆体结构。

1.2.2 水

水与水泥拌和形成水泥浆（占混凝土体积比例大致为 20%~30%）赋予混凝土早期的成型性能（如拌制、运输、浇筑和压实），同时与水泥进行水化反应，赋予硬化水泥石胶凝能力。通常情况下，当水在混凝土内部的体积占比为 15%~25% 时，将使新拌混凝土具有良好的工作性，并使硬化混凝土具有足够的耐久性和强度。此外，根据水泥水化理论，水泥完全水化所需水分是其质量的 26% 左右^[21]。

表 2 硅酸盐水泥熟料水化特征

Table 2 Hydration characteristics of Portland cement clinker

熟料	水化速率	水化热	收缩量	与混凝土性能的相关性	
				强度	水化热
硅酸三钙	中等	中等	中等	高	高
硅酸二钙	缓慢	低	中等	早期低 后期高	低
铝酸三钙	快速	非常高	非常高	低	非常高
铁铝酸四钙	中等	中等	低	低	中等

1. 2. 3 骨料

骨料根据颗粒大小可分为两类:细骨料(即砂)和粗骨料(即石)。通常情况下,细骨料颗粒粒径为 0. 075~4. 75mm,粗骨料颗粒粒径范围为 4. 75~50mm。骨料占据混凝土体积的 60%~80%,因此其对混凝土性能有重要影响:一方面可减少水泥用量,降低混凝土的能源、环境、经济成本;另一方面,因其是一种惰性填料(即不会参与或影响水化反应),骨料可以在水泥漫长的水化反应过程中作为内部骨架,保证了混凝土的体积稳定性。此外,骨料还有助于提高混凝土的耐磨性和弹性模量^[22,23]。

除骨料掺量外,骨料的集配与表面特征也会显著影响混凝土的性能^[24]。骨料的良好的集配可增加其在混凝土内部的堆积密度,使其在混凝土内部形成更完善的内部骨架,使混凝土微观结构更致密,从而提高混凝土性能。此外,骨料(特别是粗骨料)的表面形状和纹理也会显著影响混凝土的性能。例如,天然砾石具有圆形形状和光滑的表面纹理,与硬化水泥的黏结性能较差。碎石质地粗糙,与硬化水泥的黏结强度高,但可能含有相当比例的针片状颗粒,可能对混凝土的力学和耐久性能产生不利影响^[25]。

1. 2. 4 外加剂

外加剂是指除混凝土基本成分(水泥、水和骨料)外的添加材料。外加剂已成为现代混凝土必不可少的第四种成分,对混凝土性能提供了高效的调控作用。外加剂种类繁多复杂,表面活性剂、可溶性盐、聚合物、不溶性矿物等均可作为不同功效的外加剂来调控混凝土性能。通常情况下,外加剂在混凝土混合过程之前或期间添加,以改善新拌混凝土

的工作性,加速或延迟水泥凝结,控制力学性能发展,提高抗冻性、抗热开裂性、抑制碱骨料反应、硫酸盐侵蚀和腐蚀等耐久性能。外加剂包括化学外加剂和矿物外加剂^[3]。

化学外加剂掺量一般不大于水泥质量的 5%,其一般在很小掺量即可发挥显著的作用。例如,常用的高性能减水剂(即超塑化剂)掺量一般在 1%左右时即可达到 30%~40%的减水率^[26]。

矿物掺和料一般是具有潜在火山灰活性的细粉硅质材料,其细度与水泥接近并可替换部分水泥,通常占水泥总质量的 20%~70%。在混凝土中使用矿物掺和料可以与水泥水化产物氢氧化钙发生二次水化反应,同时具有填充和稀释水泥的作用,从而有助于改善混凝土中水泥石相与界相的微观结构,使其更加致密,从而提高其的力学与耐久性能^[27]。原始状态或热活化后的天然火山灰常作为矿物掺和料;出于经济和环境考虑,许多工业副产品已成为混凝土中矿物掺和料的主要来源^[6]。

此外,为改善混凝土的脆性和易裂性、提高混凝土的抗拉强度和韧性,应降低混凝土中共价键的百分比,同时增加离子键、二次(或物理)键和金属键的百分比。因此使用增强纤维(如金属纤维、无机纤维和有机纤维等)和聚合物改性剂(如橡胶、树脂)可有效转变混凝土抗拉能力差、脆性等缺点^[28,29]。

特别值得注意的是,上述各种组成材料的比例可以在一定范围内变化,合适配合比使粗骨料、细骨料、矿物外加剂以及水泥等不同粒径固体颗粒形成优异的级配,从而具有低的比表面积,进而有益于形成均匀密实的混凝土。

1.3 结构

根据 1.1 小节中介绍,混凝土是一个多组成的复合材料,其在结构上具有多相和多尺度的特征。

混凝土内部同时存在固相、液相和气相。固相主要包括骨料和水泥石中水化产物(包括水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、氢氧化钙(CH)、三硫型硫铝酸钙(AFt)和单硫型硫铝酸钙(AFm)等)、未水化水泥颗粒(如果掺加矿物外加剂,也包括未水化的矿物外

加剂)^[30],具体特征见表 3。气相主要存在于水泥石内部孔隙中。水泥石内部孔隙的孔径差别多达几个数量级,根据其孔径可分为:宏观孔、毛细孔和凝胶孔^[31],这些孔的具体特征见表 4。液相主要存在于水泥石内部。水泥石内部孔隙可容纳大量的水,其内部水受环境湿度和水泥石内部孔隙结构的共同影响。与气相类似,水可以以多种形式存在于水泥石中,主要包括:毛细水、凝胶水、层间水和化学结合水^[32],它们的具体特征见表 5。

表 3 典型硬化水泥石内部固相

Table 3 Internal solid phase of typical hardened cement stone

固相	C-S-H	CH	AFt	AFm	未水化水泥颗粒
密度/(g/cm ³)	1.9~2.1	2.25	~1.75	1.95	3.15
几何尺寸/ μm	<1(直径) ~0.01(厚度)	100(直径) 10(厚度)	10(直径) 0.5~1(厚度)	~1(直径) 0.1(厚度)	~1
比表面积/(m ² /g)	100~700	~0.5	—	~2	0.1
微观特征	不规则薄片,无定形, 含有微孔	易分裂且结晶的 厚六角板	细长棱形 针状晶体	非常薄的不规则花形板, 结晶度高	原始水泥颗粒的 残余物
体积占比/%	50~65	20~25	—	10~20	5

表 4 水泥石内部孔隙

Table 4 Internal pore space of cement stone

分类	宏观孔	毛细孔		凝胶孔		
描述	也被称为气孔,可能降低力学性能	未被硬化水泥浆固体填充的空间,其体积和大小由水灰比和水化程度决定		为 C-S-H 中的层间空间,在 C-S-H 凝胶中约含 28% 孔隙。层间空间宽度变化 5~25Å,因此凝胶孔径太小,不会影响硬化水泥石的强度和渗透性		
孔径	>10 μm	10~0.05 μm	50~10nm	10~2.5nm	2.5~0.5nm	<0.5nm
类型	大孔	大毛细孔	中毛细孔	孤立的小毛细孔	微晶层间的较大孔隙	微晶层间的超细孔隙
形状	球形	不规则				
来源	混合过程中残留的空气	水化反应后水遗留的空间	水化反应后水遗留的空间	C-S-H 凝胶间的空间	C-S-H 凝胶内的空间	C-S-H 凝胶内的空间
孔内水形态	液态	液态	承受中等表面张力的水	承受强大表面张力的水	强吸附水	结构水

表 5 水泥石内部液相
Table 5 Liquid phase inside cement stone

类型		毛细水		吸附水	层间水	化学结合水
定义		出现在大于孔径 10nm 的孔隙中		接近固相表面。在分子间相互作用力的吸引下,水分子被吸附在固体表面。通常,多达 6 个水分子层(15Å)通过氢键物理固定。因为单个水分子的键能随着与固体表面的距离而降低。	与 C-S-H 结构有关,C-S-H 层之间的单分子水层由氢键固定。	水化产物的组成部分
		位于大于 50 nm 的大空隙中,也称为“游离”水	由小毛细管(10~50nm)中的毛细管张力保持			
			水分子处于可定向压缩状态,因此其密度高于>50nm 量级的孔隙中的密度			
温湿度性能	失水的湿度或温度范围	100%~30%		30%~1%RH	<1%RH 和 200℃	200~525℃
	累积失水量/%	14.5%		16.3%	17.3%	18.7%
	影响	失去不会引起任何体积变化	失去可能导致收缩	失去显著影响收缩	失去后 C-S-H 会显著收缩	不会在干燥时失去,并随着水合物在加热时分解而变化
相变温度		0℃	冰点低于 0℃	-43℃(60%~90% RH)	<-160℃	—

注:RH 为相对湿度。

混凝土的结构尺寸跨度超过十个数量级,从纳米(如水化产物)到微米(如水泥和矿物添加剂),然后从毫米(如砂浆和混凝土)到几十米(最终结构),具有高度的不均匀性与复杂性^[33]。在宏观层面(>100μm),混凝土可被视为两相材料,即由分散在水泥石基体相中的骨料相组成^[34]。在微观层面(0.1~100μm),混凝土的结构更为复杂,微观尺度的两相自身是非均匀的,其空间分布也是不均匀的。此外,骨料相附近水泥石的微观结构与远离骨料的水泥石显著不同。水泥石—骨料界面过渡区的局部水灰比高,具有水化程度高、结晶产物(比如 CH)粗大,CH 形成取向(C 轴垂直骨料)、孔隙率高、硬度低、强度低等特点,界面过渡区的平均厚度为 5~100μm,通常是混凝土内部的最薄弱区域^[35]。因此,只有将水泥石—骨料界面视为第三相时,才能解释混凝土的许多性能。在纳米层面(1~100nm),混凝土中水泥水化产物是由不同类型的 C-S-H 凝胶组成,C-S-H 可被视为粒子的聚集体,每个粒子包含 30000~50000 个分子。这些粒子是片状的,只有三到四个分子(3~4nm)的厚度,但在其他两个尺寸

为厚度的 100 倍或更多倍,可以达到 1 微米或几微米。C-S-H 片间由金属离子填充,金属离子的正电荷和 C-S-H 片层上的残余负电荷之间相对较弱的静电吸引将片层固定在一起。C-S-H 片层是扭曲且随机排列的,所以不是规则地组合在一起,是无定型相,而非晶体。另外,C-S-H 片层之间的空间是不规则的且差别很大。即形成不同形状与大小的孔,孔内也存在水分子。水分子作为片层之间的填充,由于其与表面的强烈相互作用和较小的分子尺寸,在 C-S-H 的结构和行为中起着非常重要的作用,具体如表 5 所示^[36,37]。

此外,因为水泥水化是一个长期的发展过程,水化产物热力学不稳定,混凝土微观结构三相中的两相:水泥浆/石和骨料与水泥浆/石之间的界面过渡区都会随时间而变化,因此混凝土性能具有显著的时变特性^[31]。

1.4 工艺

混凝土的制备工艺包括搅拌、输送、振捣、成型和养护等。混凝土是通过细粉状水泥与水拌和形

成水泥浆,再包裹骨料形成具有流体特性的混合物,再经过凝结硬化形成固化体。上述工艺决定着混凝土需要的结构的形成,需要消耗大量能量并可能造成噪声和粉尘污染等。值得注意的是,广义的制备工艺还应包括混凝土原材料的生产或制备工艺,比如水泥的生产工艺,骨料的制备工艺、外加剂的制备工艺等,也都对混凝土的各方面有很大影响^[2,3]。

2 混凝土发展历程

1824年,英国 J. Aspdin 发明波特兰水泥,其相比黏土、石膏、气硬性石灰、火山灰、火山灰+气硬性石灰、水硬性石灰等胶凝材料有了质的飞跃,混凝土开始迅速发展,用量急剧增加、使用范围不断扩大。

为弥补混凝土抗拉强度及抗折强度低的缺陷,法国 L. Lambot 和 J. Monier 分别于 1850 年和 1867 年在水泥石中加入钢筋网和细铁丝改善其性能。随后 1887 年,德国 M. Koenen 提出了钢筋混凝土计算方法,标志着钢筋混凝土理论的诞生,并极大地促进了混凝土的工程应用。钢筋和混凝土两种材料优势互补,且二者导热系数接近而能够协同工作,同时水泥石内部碱环境可以使钢筋表面形成钝化膜而防止其锈蚀,因而这种巧妙的设计使钢筋混凝土结构仍是目前应用最广泛的结构形式之一。

1918 年,美国 D. A. Abrams 提出了混凝土强度的水灰比定则:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} \quad (1)$$

式中, f_c 为混凝土抗压强度, k_1 为经验常数,取值一般为 925 kg/m^3 , k_2 取决于水泥种类,可取 4 左右, w/c 为混凝土的水灰比。

1925 年, D. A. Abrams 进一步提出了恒定用水量法则,即混凝土的流动性仅与用水量有关。水灰比定则与恒定用水量法则奠定了混凝土设计的理论基础。同年,瑞士 J. Bolomy 提出了鲍罗米强度公式:

$$f_{cu} = a_a f_b (c/w - a_b) \quad (2)$$

式中, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, a_a 、 a_b 为回归系数,与骨料品种有关, f_b 为胶凝材料 28 天抗压强度实测值, c/w 为混凝土灰水比。该公式方便实

用,而且把影响混凝土强度的主要因素都包括进来;与灰水比呈线性关系、与水泥强度成正比,同时考虑骨料的影响。

1928 年,法国 E. Freyssinet 提出混凝土收缩与徐变会导致钢筋预应力的损失,并采用高强钢丝发明了预应力锚具,为预应力技术在混凝土工程的应用奠定了基础。预应力技术的出现,是混凝土技术的一次飞跃,通过外部条件对混凝土改性解决其易开裂的问题。1937 年,德国 F. Dischinger 建立了混凝土收缩、徐变与结构应力、内力重分布的关系,并给出了微分方程解。1967 年和 1972 年 H. Trost 和 Z. B. Bazant 将松弛系数概念引入钢混设计中,提出了混凝土收缩徐变与应力-应变关系的代数表达式。上述概念与理论的出现与发展刺激了收缩补偿混凝土和自应力混凝土的产生与发展,即是变混凝土收缩本性为膨胀本性以克服混凝土收缩裂纹并应用膨胀性能来张拉钢筋,从而内外相结合的改性混凝土。

20 世纪中叶,混凝土减水剂等外加剂的出现使混凝土得到了重大发展。减水剂的使用工作性与力学性能(主要是强度)之间不再对立而得到统一,可大幅降低混凝土水灰比(降至 $0.25 \sim 0.30$)和提高强度,并急剧提高了新拌混凝土的流动性(坍落度可达 20 cm 以上),高流态、高强度混凝土开始迅速发展。之后,聚合物浸渍、聚合物及聚合物胶结混凝土将无机胶凝材料与高分子有机胶凝材料结合意味着混凝土发展进入了新阶段,可使混凝土的抗压和抗拉强度提高 $2 \sim 4$ 倍(最高抗压强度可达 $250 \sim 280 \text{ MPa}$),并赋予混凝土耐腐蚀性(不吸/渗水,抗渗压力可达 5 MPa ,抗冻融循环 > 1100 次)^[38]。

尽管混凝土可以达到很高的抗压强度,但其抗拉强度只是抗压强度的十分之一左右。混凝土破坏表现出典型的脆性破坏特征。为降低混凝土的脆性提高延性,短纤维增强即纤维混凝土应运而生。通过纤维复合可实现非金属与金属结合、无机与有机结合,以减少混凝土微观结构中共价键的比重、增加离子键、次价键,甚至范德华力的比重^[39,40]。

至 20 世纪 90 年代,高性能混凝土概念与技术的提出,工作性、体积稳定性、力学性能和耐久性要整体兼顾,使混凝土理论发展与技术完善得到了高

度统一。

21 世纪末,混凝土领域一些新理论、新工艺、新材料不断涌现,不仅出现了新型混凝土(如活性粉末混凝土(RPC)、可工程化水泥基材料(ECC)、超高性能混凝土(UHPC)等),而且出现了混凝土智能(自感知、自修复、自调节、自养护等)、(多)功能(电、热、声、光、疏水等)化的发展新方向^[41-46]。

除上述具有里程碑意义的发展之外,混凝土领域还有一些重要进展,比如,在混凝土科学方面:混凝土性能改善的层次观的形成,配合比设计新内涵和新思路的不断提出,混凝土及其原材料化学组成和微观结构观察与分析方法和设备的不断出现和丰富、混凝土性能的数值模拟方法及软件的不断出现和更新、混凝土(无损)检测或(原位)监测方法和设备不断涌现和发展等^[47-49]。此外还包括各种特种混凝土技术的出现,如轻骨料混凝土、加气混凝土、防水混凝土、透水混凝土、重混凝土(或防射线混凝土)、防静电混凝土、水下不分散混凝土、杀菌混凝土、膨胀混凝土、自流平混凝土、泵送混凝土、喷射混凝土、碾压混凝土等^[50,51]。

3 混凝土可持续发展面临挑战

虽然不到 200 年,混凝土领域取得丰硕成果和高速发展,并被广泛应用而成为用量最大的工程材料。但混凝土的可持续发展仍面临一些关键挑战:(1)水泥的大量生产和使用带来了严重的环境问题。2021 年全球的水泥产量为 43.1 亿吨,即全球每秒约消耗 150t 的水泥用于制造混凝土。生产 1t 水泥,需要 2t 原材料,消耗 4GJ 的能源,产生近 1t 的二氧化碳(其占混凝土生产总碳排放的 90%)、大约 3kg 的氮化物和大约 0.4kg 的 PM₁₀。另外,为获得良好的工作性,目前的混凝土是骨料悬浮而非堆积在水泥浆中,水泥用量大。(2)过度使用自然资源。全球每年要消耗超过 400 亿吨砂石骨料用于制备混凝土(包括所有种类混凝土,其中水泥混凝土用骨料最多但数据不详)。近些年,世界一些国家或地区出现天然骨料(如河砂)或淡水资源匮乏,与混凝土的大量生产和使用密切相关。(3)混凝土在生产和使用过程中能耗高,产生严重的粉尘和噪音污染。(4)混凝土的抗拉强度低、脆性大、易开裂,

而且由于水泥石收缩和骨料约束作用、水泥石和骨料热膨胀系数不一致内外湿度和温度差别产生内应力,导致混凝土在承受荷载前已存在原生微裂纹,特别是水泥石与骨料界面处。另外,混凝土制备过程中还会引入孔。这些天生的缺陷和荷载作用会引起混凝土开裂而耐久性的下降,从而导致性能劣化。(5)混凝土在热力学上具有亚稳特性(水泥主要水化产物 C-S-H 凝胶是介稳相),而且混凝土可能受到恶劣、极端(如极热、极寒、极干燥等)以及多因素耦合环境作用,所以性能易发生退化/劣化而老化。(6)缺乏(多)功能和智能性能(如电、热、电磁、自感知、自修复等)。人类生存与活动空间的条件改善对混凝土提出了更智能、更舒适、更安全、更耐久、更韧性等新的要求。(7)人类活动与生存空间拓展。如进行地外(月球或火星)活动或太空移民,需要结合地外的环境特点和资源状况发展相应的混凝土^[1,41]。

4 混凝土的可持续发展策略与路线

为了解决上述问题,混凝土可持续发展的技术途径可能包括:(1)改善水泥性能。由 1.2 小节可知,水泥是混凝土最核心的组分,解决混凝土的问题最重要的一个方面就是水泥,水泥性能的改善还是有很多空间,比如原材料组成的优化、矿物组成的优化、工艺优化等。(2)开发新型水泥以及矿物和化学外加剂(例如,低能耗和低二氧化碳排放)。发展低能耗和低碳足迹水泥、合理使用矿物外加剂,或发展高性能化学外加剂也是有效的间接或辅助方法。(3)利用辅助胶凝材料。针对具体的应用,合理地应用辅助胶凝材料应用替代或部分替代水泥,以减少水泥的应用。(4)使用工业固体废弃物(比如工业废渣)、再生材料(比如建筑垃圾)和地域性天然材料(比如海砂、海水)。在水泥的生产或者混凝土的制备中合理地使用工业固体废弃物、再生材料和地域性天然材料,以降低混凝土生产对资源和能源的过度消耗,而且还可以实现工业废弃物和再生材料的资源化利用以及地域性天然材料有效利用而降低对环境的破坏。(5)采用先进的混凝土及其原材料制造技术。发展混凝土及原材料制备的新原理、新方法、新工艺和新设备,减少能耗或

者采用清洁能源降低对环境的影响(特别是碳排放),提升混凝土原材料及其性能。(6)调整混凝土内部结构并提高其性能。混凝土的性能强烈依赖其内部结构,且其每一尺度结构主要取决于下一层次结构,通过优化混凝土内部结构,可使其更强、更坚韧、更耐用、更容易加工制备。(7)开发(多)功能、智能混凝土。混凝土组成复杂且在一定范围内变化,同时其由流体硬化为固体的特性,为其(多)功能和智能化的实现提供了可能。因此,可拓展混凝土的功能(如电、热、声、光、杀菌/病毒等)、实现混凝土的智能特性(如自感知、自修复、自调节等),使混凝土兼具结构—功能/智能而多功能化。这一方面可满足基础设施建设的功能性需求,一方面使混凝土服役过程中引入负熵(包括信息、物质和能量),避免或减缓熵增,从而提升基础设施的安全性、寿命与韧性^[52]。

由 1.3 小节可知,混凝土是用最简单的原材料和工艺制造的最复杂(具有多相、多尺度、非均质和时变等特征)的工程材料。混凝土内部的物理和化学反应复杂,对时间和环境具有十分敏感的依赖性,以至于混凝土水化产物组成和微结构的形成与发展非常复杂,具有不确定性和不确知性,这也可能与目前认知水平和研究方法或手段有限有关。为了实现上述技术途径,如图 2 可见,不仅需要明晰混凝土材的组成、工艺、结构和性能之间的关系,而且要对其进行全寿命分析(包括经济、社会、环境等方面)以评价其可持续性。针对此,需要通过多学科(如化学、物理、数学、材料、力学、土木、机械、化工、测试等)深入研究相关基础理论(如水泥的胶凝性能及机理、混凝土组成—结构—工艺—性能之间的定量关系、混凝土的碳汇作用等),融合先进技术(如纳米技术、生物技术、仿生技术、数字制造/智能建造、3D/4D 打印/增材制造、材料基因组技术、超材料技术、人工智能、数字孪生技术、多尺度/多物理场模拟等),丰富并发展混凝土研究(表征、测试、(无损)检测、(原位)监测和模拟等)与设计加工方法及相关设备/软件,完善/制定严格的混凝土从“出生”到再生(包括设计—制备—使用—维护—循环利用等)全过程标准/规范,以科学地设计混凝土、精准地调控混凝土的性能、精细地制备混凝土,从而合理地使用和维护混凝土,最大限度地发挥混

凝土的作用,实现材尽其用^[3,6,41]。

混凝土经过近 200 年的使用的检验,而且从前述混凝土的发展历程可知自其出现至今也在通过不断地进化发展适应人类社会发展的需要,已被充分证明是一种较强可持续性的材料。所以混凝土的发展策略是否具有持续性,需要严格的评价和工程应用的检验,而不能只是在某一环节上具有可持续性的特征就认为是可持续的,而要从材料—结构—基础设施全链条考虑、从整体指标考虑、从源头考虑,如图 2 所示。比如水泥制备需要钙质材料而有高的碳迹,但是正是钙质和硅质材料使水泥具有水硬性;另外,水泥虽然制备需要大量能源,但是正是由于反复磨和高温烧的工艺使应用其制备的混凝土具有优异的性能,这也符合能量守恒和熵定律(能量品质高,熵值低,避免熵增的能力强,可用性高并下降慢)等基本原理^[2,52]。

5 结语

混凝土除了具有优异的力学性能(特别是高抗压和抗循环荷载性能)外,还具有防水(即耐腐蚀)和防火性能,使用混凝土构筑的基础设施具有高安全性和耐用性,且需要很少的维护。再加之混凝土相对便宜、制作简单且随处易于获得,因而成为基础设施建设的主要工程材料。然而,混凝土的巨大消耗对资源、能源和环境的韧性带来极大冲击,但是从价格、消耗产能以及地球上元素和物质构成等方面来看,混凝土在未来仍将是基础设施建设不可替代的工程材料。

混凝土改变了世界,也将继续塑造未来。根据熵定律,资源、能源和环境最终要从有序走向无序,即可用性降低。此外,无论是混凝土及其原材料生产中会释放出二氧化碳还是所用燃料燃烧会产生的二氧化碳,都是由于二氧化碳的能级低、状态比较稳定,因而二氧化碳一旦释放至大气,再将其转化、封存或固定需要更高的能量消耗。所以,从长远和源头上来看,无论是应对二氧化碳排放引起的气候变化危机,还是减小对资源、能源和环境的巨大影响,都要尽量减少混凝土的消耗。而目前混凝土可持续发展之路在于进一步深入对混凝土的科学认知并发展有效的调控原理和技术,持续提升混

凝土品质(提高性能和延长使用寿命,如提高承载能力可减小构件/结构尺寸即混凝土用量、混凝土服役寿命一般几十年甚至百年如提高一倍可显著降低碳足迹)、加强管理和维护,减少混凝土消耗数量和速度,有助于提高人类生存气候条件的韧性并推动人类社会和文明的可持续发展。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] Han B, Zhang L, Ou J. Smart and Multifunctional Concrete toward Sustainable Infrastructures [M]. Berlin: Springer, 2017.
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>.
- [2] Han B, Ding S, Wang J, et al. Nano-Engineered Cementitious Composites: Principles and Practices [M]. Berlin: Springer, 2019.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-7078-6>.
- [3] Mehta P K, Monteiro P J M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials [M]. Los Angeles: McGraw-Hill, 2006.
- [4] Newman J B, Choo B S. Advanced Concrete Technology Set [M]. Amsterdam: Elsevier, 2003.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-5686-3.X5246-X>.
- [5] 袁润章. 水泥胶凝过程的本质和基本规律[J]. 科学通报, 1961 (7): 25-28.
<https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1674-7011.2011.10.005>.
- [6] Gjorv O E, Sakai K. Concrete technology for a sustainable development in the 21st century [M]. Oxford: Taylor and Francis, 2007.
<https://doi.org/10.1201/9781482272215>.
- [7] Boyd A J, Mindess S. Cement and concrete: Trends and challenges [C]. In: Proceedings of the Anna Maria 2001 Workshop, Florida, 2001.
- [8] 冯乃谦, 邢峰. 混凝土与混凝土结构的耐久性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] Malier Y. High Performance Concrete: From Material to Structure [M]. Oxford: Taylor and Francis, 1992.
<https://doi.org/10.1201/9780203752005>.
- [10] Schneider E D, Kay J J. Order from Disorder: The Thermodynamics of Complexity in Biology, in P. M. Michael, A. J. O. Luke (edited), What is Life: The Next Fifty Years. Reflections on the Future of Biology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 161-172.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511623295>.
- [11] Xi F, Davis S J, Ciais P, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation [J]. Nature Geoscience, 2016, 9(12): 880-883.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.
- [12] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [13] 陈惠发, 萨里普 A F. 土木工程材料的本构方程 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [14] Lea F M. The Chemistry of Cement and Concrete (2nd edition) [M]. London: Edward Arnold Ltd, 1956.
- [15] Mindess S, Young J F, Darwin D. Concrete (2nd edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [16] Bye G C. Portland Cement: Composition, Production and Properties (2nd edition) [M]. New York: Thomas Telford Publishing, 1999.
- [17] Kurdowski W. Cement and Concrete Chemistry [M]. Berlin: Springer, 2014.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>.
- [18] Shen W, Liu Y, Yan B, et al. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 75: 618-628.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.033>.
- [19] Bensted J, Barnes P. Structure and Performance of Cements (2nd edition) [M]. Oxford: Taylor and Francis, 2008.
<https://doi.org/10.1201/9781482295016>.
- [20] Viehland D, Li J F, Yuan L J, et al. Mesostructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel in Portland cement paste: short-range ordering, nanocrystallinity, and local compositional order [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(7): 1731-1744.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb07990.x>.
- [21] Michopolulos J G, Farhat C, Fish J. Modeling and simulation of multiphysics systems [J]. ASME-Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2005, 5: 198-213.
<https://doi.org/10.1115/1.2031269>.
- [22] Hewlett P C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete (4th edition) [M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3>.
- [23] Shetty M S. Concrete technology: Theory and Practice

- [M]. New Delhi: S. Chand and Company, 2005.
- [24] Jones R M. *Mechanics of Composites Materials*[M]. Oxford: Taylor and Francis, 2015.
<https://doi.org/10.1115/1.3423688>.
- [25] Young J F, Mindess S, Gragy R J, et al. *The Science and Technology of Civil Engineering* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
<https://doi.org/10.5860/choice.35-5678>.
- [26] Ovrutsky A M, Prokhoda A S, Rasshchupkyna M S. *Computational Materials Science: Surfaces, Interfaces, Crystallization*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420143-9.00001-6>.
- [27] Schaffer J P, Saxena A, Antolovich S D, et al. *The Science and Design of Engineering Materials*[M]. New York: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- [28] 杨南如. C-S-H 凝胶结构模型研究新进展[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 1998, 20(2): 78-85.
- [29] 沈荣熹, 崔琪, 李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [30] Bentur A, Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 2nd edition[M]. Oxford: Taylor and Francis, 2006.
<https://doi.org/10.1201/9781482267747>.
- [31] 袁润章. 胶凝材料学(第2版)[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [32] Wang J, Dong S, Pang S D, et al. Pore structure characteristics of concrete composites with surface-modified carbon nanotubes[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 128: 104453.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104453>.
- [33] Wang J, Han B, Li Z, et al. Effect investigation of nano-fillers on C-S-H gel structure with Si NMR spectra[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(1): 04018352.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002559](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002559).
- [34] Borst R, Ramm E. *Multiscale Methods in Computational Mechanics*[M]. Berlin: Springer, 2011.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-9809-2>.
- [35] Gibson R F. *Principles of Composite Material Mechanics*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
<https://doi.org/10.1201/b14889>.
- [36] Wang X, Dong S, Ashour A, et al. Effect and mechanisms of nanomaterials on interface between aggregates and cement mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117942.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117942>.
- [37] Wang X, Dong S, Li Z, et al. Nanomechanical characteristics of interfacial transition zone in nano-engineered concrete[J]. *Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.025>.
- [38] 杨南如. C-S-H 凝胶及其研究方法[J]. 硅酸盐通报, 2003, (2): 46-52.
<https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1625.2003.02.011>
- [39] 沈卫国, 甘戈金, 连春明, 等. C-S-H 纳米尺度结构模型研究与收缩机理研究进展[J]. 材料科学, 2012, 2: 1-11.
<http://dx.doi.org/10.12677/ms.2012.21001>.
- [40] Han B, Dong S, Ou J, et al. Microstructure related mechanical behaviors of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. *Materials and Design*, 2016, 96: 16-26.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.004>.
- [41] 韩宝国, 董素芬, 张立卿, 等. 第六篇: 土木工程功能材料. 书名: 中国战略新兴产业研究与发展——功能材料. 北京: 机械工业出版社, 2016: 195-298.
- [42] Han B, Yu X, Ou J. *Self-sensing Concrete in Smart Structures* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2014.
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-14456-X>.
- [43] Carpinteri A, Ingrassia A. *Material Characterization and Testing*[M]. Amsterdam: D. Reidel Publishing, 1984.
<https://doi.org/10.1115/1.3171793>.
- [44] Dong S, Han B, Ou J, et al. Electrically conductive behaviors and mechanisms of short-cut super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 72: 48-65.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.022>.
- [45] Han B, Zhang L, Zeng S, et al. Nano-core effect in nano-engineered cementitious composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 95: 100-109.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.01.008>.
- [46] A. Grumezescu. *Fabrication and Self-Assembly of Nanobiomaterials*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.
<https://doi.org/10.1016/C2015-0-00353-7>.
- [47] Zhang S, Li L, Kumar A. *Materials Characterization Techniques*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
<https://doi.org/10.1201/9781420042955>.
- [48] Ding S, Xiang Y, Ni Y Q, et al. In-situ synthesizing carbon nanotubes on cement to develop self-sensing cementitious composites for smart high-speed rail infrastructures[J]. *Nano Today*, 2022, 43: 101438.

- <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101438>.
- [49] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [50] American Concrete Institute. ACI committee report 548. 3R-03: Polymer-modified concrete[R]. 2003.
- [51] 周济. 超材料与自然材料的融合[M]. 北京:科学出版社, 2017.
- [52] Kondepudi D, Prigogine I. Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures [M]. New Jersey: Wiley, 1998.
- <https://doi.org/10.1002/9781118698723>.

Sustainable Development of Concrete: Tackling the Climate Change Crisis Caused by Carbon Emissions

WANG Xinyue¹, DING Siqu², DONG Sufen³, LI Xiaomin⁴, HAN Baoguo^{1*}

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

3. School of Transportation and Logistics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

4. Gansu Province Transportation Planning, Survey and Design Institute Co. LTD, Lanzhou 730050, China)

Abstract: As one of the most visible manifestations of the tangible footprint of human civilisation on the planet, concrete is largely and widely applied, and has become the most widely used man-made engineering material in the world. Concrete has changed the world and shaped human civilization, and will remain indispensable in the future. However, as one of the major sources of global carbon emissions, the production and application of large quantities of concrete has a huge impact on resource, energy and the environment. Based on the prediction that the rapid climate change, caused by the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, will threaten the living conditions of human beings. Thus, the development of concrete is facing serious challenges in order to promote the perpetual development of human society and civilization. This paper firstly introduces the basic knowledge of concrete briefly, then summarizes the development history of concrete, analyzes the challenges of concrete development at present, and finally puts forward strategies and routes for the sustainable development of concrete.

Keywords: Concrete; climate change; carbon emissions; sustainable development; strategy and route

DOI: 10. 48014/ems. 20220728001

Citation: WANG Xinyue, DING Siqu, DONG Sufen, et al. Sustainable development of concrete: Tackling the climate change crisis caused by carbon emissions[J]. Engineering Materials and Structures, 2022, 1(1): 1-14.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

