

碱激发水泥混凝土的环境性能

张强

滁州市生态环境保护综合行政执法支队

摘要：利用碳足迹、生态-力学性能指标和环境协调性指标三种方法对不同类型配比混凝土的CO₂排放量进行分析，比较其对环境的影响程度。结果表明：碱激发混凝土的环境性能明显好于硅酸盐类水泥混凝土，和硅酸盐类混凝土相比，碱激发混凝土的CO₂排放量降低率达到了55%~65%；环境协调性指标平均降低60%，不用或少用水泥、水泥熟料的碱激发混凝土的环境负荷低，强度高，是实现水泥混凝土工业可持续发展的最有效途径。

关键词：碱激发水泥混凝土；碳足迹；生态-力学性能指标；环境协调性指标；环境性能

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.09.016

目前，建筑、水利、交通等各个行业广泛利用水泥作为胶凝材料，然而水泥开采、生产过程，严重破坏了生态环境，还会产生扬尘、污染大气等问题^[1-2]，据统计，每生产1t硅酸盐水泥耗能约3×10⁶ kJ，同时排放约0.85t的二氧化碳（CO₂），研究认为，全球的硅酸盐水泥工业中CO₂的排放量占全球大气中温室气体排放量的7%左右。随着社会经济的不断发展，硅酸盐水泥使用的比例还在逐年上升。在全球关注气候变化的背景下，降低

水泥行业中资源、能源的消耗，减轻并消除其对环境的影响，开发新型低碳水泥产品，使水泥工业走可持续发展道路具有十分重要的战略意义^[3]。

碱激发胶凝材料的主要原材料是工业废料，可通过碱激发制备。但激发剂的价格相对较高，且某些激发剂的生产过程在耗能的同时还会排放有害物质（包括CO₂）到环境中。本文主要从碳足迹、生态-力学性能指标和环境协调性指标三方面来讨论碱激发矿渣水泥混凝土的环境性能，对研究高性能碱矿渣水泥基材料具有重要的指导意义。

一、碳足迹研究

使用混凝土时，CO₂的排放量主要来自原材料、运输阶段、生产过程和养护阶段^[4]。对不同类型胶结材制备的混凝土中的碳足迹进行评价与研究，有利于比较各类混凝土的环境性能。

通过对普通硅酸盐水泥（OPC），普通硅酸盐水泥+掺合料（矿渣和粉煤灰）（OPC+SCM）、碱激发矿渣水泥（AAS）和碱激发粉煤灰水泥（AAFA）制备混凝土的全过程进行碳足迹统计（如表1），研究分析结果如图1所示。

表1 混凝土的配合

胶结材料	组分量 / (kg/m ³)									激发剂 (kg/m ³)			抗压强度/Mpa
	普通水泥	粉煤灰	矿渣	偏高岭土	细集料	粗集料	水	外加剂	水胶比	Ca(OH) ₂	NaSiO ₃	NaOH	
OPC	280				750	1231	168		0.60				25
	480				570	1106	192		0.40				45
	540				750	900	162	5.00	0.30				75
OPC+SCM	290	50			829	930	170	2.00	0.50				25
	360	20	70		805	918	158	3.00	0.35				45
	450	50	220		670	820	216	5.50	0.30				75
AAS			540		712	850	185	5.50	0.30	46.00	6.00		25
			648		620	820	162	9.50	0.25	55.00	7.50		45
			681		580	750	136	12.50	0.20	60.00	100.00		75
AAFA		350			845	1035	53		0.15			58.00	25
		469			632	951	112		0.20			75.00	45
		630			602	725	115		0.15			106.00	75

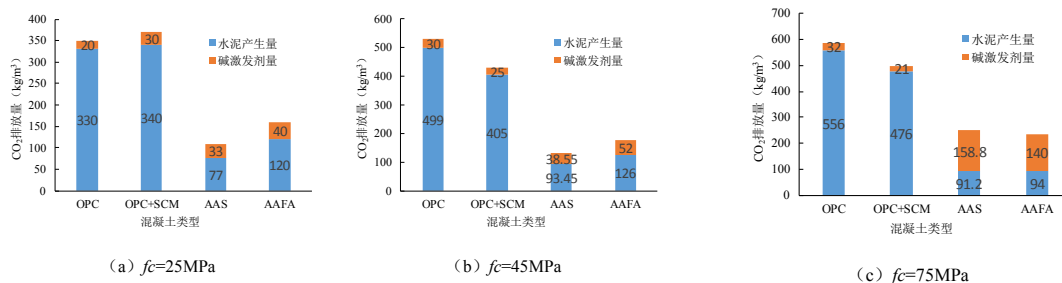


图1 不同类型混凝土的CO₂排放量

由图1可知，混凝土CO₂排放量随着其抗压强度的增加而增加，和胶凝材料的类型无关，当混凝土的抗压强度从25 MPa增大到75 MPa时，1m³OPC、OPC+SCM和AAS混凝土的CO₂排放量分别增加238kg、127kg和140 kg，增长率分别为68%、34%和127%；而当强度相同时，碱矿渣混凝土的碳排放量相比OPC混凝土、OPC+SCM有大幅降低。

在OPC和OPC+SCM混凝土中，水泥对碳排放量的贡献远远大于碱激发混凝土中的胶凝材料贡献，而碱激发混凝土中激发剂用量对CO₂排放量的贡献最大。以碱矿渣混凝土为例，当抗压强度为45MPa和75MPa时，碱激发剂对CO₂排放量的贡献分别达29.2%和63.5%。由此可见，碱激发混凝土中的碳排放量很大程度上取决于碱激发剂的用量和种类。

碱激发粉煤灰混凝土的养护条件为蒸汽养护（85℃/24h），相比于碱矿渣混凝土而言，25MPa和45MPa混凝土的CO₂排放量更高些。但当抗压强度为75 MPa时碱激发粉煤灰混凝土总的CO₂排放量较碱矿渣混凝土低，且其总的CO₂排放量比OPC+SCM混凝土减少53%。

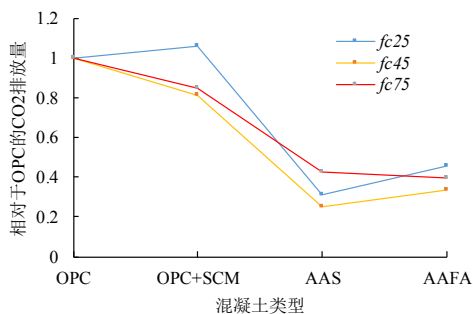


图2 不同强度混凝土的CO₂相对排放量
为了比较相同混凝土抗压强度时，不同类型混凝土

的生产与制备过程中CO₂排放的情况，将生产OPC混凝土时CO₂排放量设为1，计算OPC+SCM、AAS、AAFA混凝土相对于OPC混凝土排放的CO₂量，如图2所示。当抗压强度为45 MPa时，OPC+SCM混凝土的CO₂排放量比OPC混凝土的CO₂排放量低约20%，碱激发粉煤灰混凝土的CO₂排放量较OPC混凝土降低65%。当抗压强度为25MPa和75 MPa时，碱矿渣混凝土CO₂排放量较OPC混凝土分别降低55%、60%。研究结果也表明，尽管碱激发混凝土的CO₂排放量随激发剂的类型、浓度和用量而变，但和OPC混凝土相比，碱激发混凝土CO₂排放量的降低率达到了55%~65%。

二、生态-力学性能指标分析

生态-力学性能指标^[5]常被用于评价碱矿渣混凝土的环境性能，生态-力学性能指标（I）计算公式如（1-1）。研究普通硅酸盐水泥混凝土和碱矿渣混凝土的生态-力学性能指标的配合比及结果如表2所示。

$$I = \frac{CO_2 \text{排放量}}{\text{力学性能}} \quad (1-1)$$

I值反映了CO₂排放量和混凝土力学性能之间的关系，混凝土强度相同时，I值越小，表示混凝土向大气中排放的CO₂是越低，环境性能也越好。从表2可知，碱矿渣混凝土的CO₂排放量比普通硅酸盐水泥混凝土的低55.98%，可以看出碱矿渣混凝土的生态-力学性能优于普通硅酸盐水泥混凝土，其环境性能更好。

三、环境协调性指标分析

在材料的环境影响评价中，生命周期评价是一个应用非常广泛的环境影响评价方法。生命周期评价的理论框架包括研究目标及范围的确定、编目分析、环境影响评估和环境改善评估^[6-8]。根据环境影响指标进行分类，采用相对定量的方法，对每种指标选定一种参照物，将编目分析得到的污染物的环境影响作用以参照物

表2 碱矿渣混凝土和普通硅酸盐水泥混凝土的生态-力学性能指标

	组分量 / (kg/m ³)					28天抗压强度/MPa	CO ₂ 排放量/kg	I值 (kg/MPa)
	水泥	矿渣	NaOH	硅酸钠	骨料			
普通硅酸盐水泥混凝土	430.00				1870	55.06	410.00	7.45
碱矿渣混凝土		400.00	130.00	50.00	1958	63.05	180.5	2.86

表3 常见污染物的环境影响污染当量

环境影响	ADP/ (1/kg)	EDP/ (MJ/kg)	GWP/ (kg/kg)	POCP/ (kg/kg)	AP/ (kg/kg)	HD/ (kg/kg)	ECA/ (kg/kg)	ECT/ (kg/kg)	NP/ (kg/kg)	ODP / (kg/kg)
CH ₂ CHON						23				
NH ₃					1.9					
NH ₄ ⁺										
CO ₂			1							
CO						0.012				
COD									0.022	
C ₆ H ₅ Cl						5.7		1.0E ⁺⁶		
Cr ⁶⁺						4.7E ⁺⁴				
CFC ₁₂			7.1E ⁺³			0.022				1.0
N ₂ O			270							
CF ₃ Br										1.3
H ₂ S				0.377						

CH ₄			11	0.007					
NO ₃ ⁻						9.9E ⁻³		0.1	
NO ₂ ⁻						0.26		0.13	
NO _x						0.78		0.13	
PO ₄ ³⁻									1.0
SO ₂ , SO _x					1.0	1.2			
原油/kg		42.3							
天然气/m ³		35.7							
Cu	2.9E ⁻¹²								

的当量来表示，表3为一些常见污染物的环境影响污染当量数。

为了得到单一的环境协调性定量指标，常用层次分析法（AHP）确定各环境指标的权重系数，权重系数的确定一般由环境污染物排放量的规模和其危害作用的程度决定，权重按定性可以分为很重要、重要、中等、不太重要、不重要五个等级。

根据材料LCA环境影响评估方法，材料的环境协调性指标按式（2-1）计算。

$$E = \sum \text{环境污染相对指数} \times \text{权重系数} i \quad (2-1)$$

通过以上的办法，计算了不同类型的工业废渣做胶凝材料配制碱激发混凝土的环境综合指数，并与硅酸盐水泥混凝土进行对比。碱激发混凝土中的激发剂采用水玻璃，考虑到水玻璃寿命周期的不确定性，水玻璃的环境影响评价主要从原材料开采到水玻璃生产，进而以1m³混凝土的制备构成环境评价的寿命周期。各种混凝土的配合比如表4所示，按式（2-1）计算的环境综合指数，如图3所示。

表4 混凝土配合比

编号	水玻璃 (kg/m ³)	胶结材用量/ (kg/m ³)					集料/ (kg/m ³)	外加剂 (kg/ m ³)
		矿渣	粉煤灰	锂渣	石粉	水泥		
a	-					500	1 800	2.5
b		113	113			285	1 800	4.0
c	190	500					1 780	15.0
d	190	185	315				1780	15.0
e	193	254		254			1790	15.9
f	189	280			120		1790	14.0
g	197	155	145	145			1790	17.5

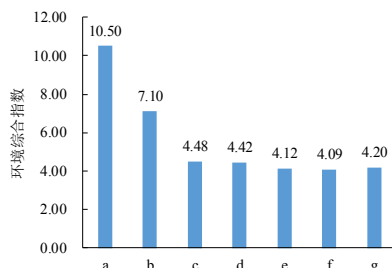


图3 几种混凝土的环境综合指数

由图3可知，水泥用量的减少是改善混凝土环境性能最重要的因素，当掺入矿渣和粉煤灰后，混凝土的强度提高，而且混凝土的环境性也有所改善。和硅酸盐水

泥混凝土相比，不用水泥或水泥熟料的碱激发混凝土的环境协调性指标明显降低，即对环境效益改善明显。

同时，掺入本身对环境负面影响小的工业废渣对混凝土的环境协调性的改善程度相对较大。当粉煤灰、锂渣、石粉取代一部分矿渣制备碱激发混凝土时，环境协调性指标降低不明显，即使复合掺入粉煤灰、锂渣的混凝土环境协调性指标也仅降低6.25%。但与硅酸盐水泥混凝土和掺入矿渣及粉煤灰的硅酸盐水泥混凝土相比，碱激发系列混凝土的环境协调性指标平均降低60%和40.8%。可见，碱激发混凝土的环境性能明显比硅酸盐类水泥混凝土好，对环境的负担小。

四、结论

(1) 相同强度等级的混凝土，硅酸盐水泥混凝土对环境的影响最大，碱激发混凝土的环境性能明显好于硅酸盐类水泥混凝土，和OPC混凝土相比，碱激发混凝土的CO₂排放量降低率达到了55%~65%。

(2) 碱激发混凝土的环境性能明显比硅酸盐类水泥混凝土好，不用或少用水泥、水泥熟料的碱激发混凝土的环境负荷低，强度高，是实现水泥混凝土工业可持续发展的最有效途径。

参考文献

- [1] 王郁涛. 中国水泥行业节能减排发展综述[J]. 中国设备工程, 2009 (07): 69.
- [2] 赵建安, 魏丹青. 中国水泥生产碳排放系数测算典型研究[J]. 资源科学, 2013, 35 (04): 800-808.
- [3] 高美平, 聂磊, 齐祥昭, 等. 关于《中华人民共和国环境保护税法》研究及对涂料行业的影响初探[J]. 中国涂料, 2018, 33 (01): 12-21.
- [4] YANG KH, SONGJK, SONG KI. CO₂ Reduction assessment of alkali-activated concrete based on Korean Life-Cycle Inventory Database [M] Handbook of Low Carbon Concrete, 2017, 139-157.
- [5] MOHEBI R, BEHFARNIA K, SHOJAEI M. Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method [J]. Constr Build Mater. 2015, 98, 792-798.
- [6] 张兰芳. 碱激发复合渣体 (AAW) 混凝土的性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [7] 张剑波. 环境材料导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.
- [8] 刘顺妮. 水泥-混凝土体系环境影响评价及其应用研究[D]. 武汉理工大学, 2002.