



# 矿渣粉作为水泥混合材及混凝土掺合料的减碳功能分析

韩冰,曹黎颖,康明

(上海宝钢新型建材科技有限公司,上海 201999)

**摘要:**为助力建材行业早日实现“碳达峰、碳中和”目标,详细介绍了混凝土全生命周期内CO<sub>2</sub>排放情况,指出混凝土全生命周期内CO<sub>2</sub>排放的主要来源是水泥生产过程中排放的CO<sub>2</sub>。分析矿渣粉替代部分水泥熟料作为水泥混合材和混凝土掺合料在减碳、节能和降耗方面的作用。分析结果发现,得出矿渣粉具有显著的绿色减碳功能,应积极推广其在水泥和混凝土中的应用。

**关键词:**矿渣粉;减碳;水泥;混凝土;生命周期清单

中图分类号:TU528 文献标识码:A 文章编号:1006-1177(2023)02-25-28

doi:10.3969/j.issn.1006-1177.2023.02.003

Analysis of Carbon Reduction Function of Slag Powder as Cement Mixture and Concrete Admixture

HAN Bing, CAO Liying, KANG Ming

(Shanghai Baosteel New Building Materials Technology Co.,Ltd, Shanghai 201999, China)

**Abstract:** To facilitate the building materials industry to "achieve carbon peak, carbon neutral goal" as soon as possible, this paper has introduced the concrete life cycle of carbon dioxide emissions, pointing out that the life cycle source of CO<sub>2</sub> emissions of concrete is generated during cement production. The contribution of utilizing slag powder to reduce carbon emission, energy saving and consumption reduction by replacing part of cement clinker as cement mixture or the concrete admixture has been analyzed. It is concluded that slag powder has a significant carbon reduction effect, and its application in cement and concrete should be encouraged.

**Keywords:** slag powder; carbon reduction; cement; concrete; life-cycle inventory

## 0 引言

近年来,全球气候变暖、环境污染和能源消耗已成为全球共同关注的话题,节能减排的理念已被全世界认可<sup>[1]</sup>。我国已将应对气候变化上升为国家战略,中央经济工作会议将做好“碳达峰、碳中和”工作作为八项重点任务之一,这意味着各行各业必须走绿色低碳发展道路。建材行业的CO<sub>2</sub>排放量约占全国排放总量的18%<sup>[2]</sup>,是实现我国“碳达峰、碳中和”目标需要重点关注的产业之一。混凝土和水泥作为主要建筑材料,减少其生命周期排碳量对我国节能减排具有重要意义。

## 1 混凝土的碳排放

### 1.1 混凝土应用现状

随着我国经济的飞速发展和现代化进程的加快,人们对房屋和基础设施的需求越来越多,根据我国2020年国民经济和社会发展统计公报,近5年我国建筑业增加值逐年递增,2020年在新冠疫情的冲击下,建筑业增加值仍高达72 996亿元。混凝土作为当今世界使用量最大、使用面最广的建筑材料之一,其需求随着建设规模的日益扩大呈不断增长的趋势,2019年我国商品混凝土产量达25.54亿m<sup>3</sup>。

### 1.2 生命周期清单

生命周期清单(Life-Cycle Inventory, LCI)记录了相

关产品在其生命周期所有阶段(如原材料生产、产品制造、运输、使用等)的能源消耗、资源消耗、污染物排放和对自然环境的影响等相关情况,产品可通过在生命周期清单中的输入和输出值来定量评估其环境负荷<sup>[3-5]</sup>。

目前,有学者针对硅酸盐水泥混凝土、预制混凝土和混凝土砌块等进行了生命周期清单调查<sup>[6-7]</sup>。Ma等<sup>[8]</sup>以我国西部地区水泥混凝土路面建设为例,采用生命周期清单法对混凝土生命周期3个阶段:原料生产、混凝土制造和路面施工的温室气体排放情况进行了分析。结果表明,每铺设1 km 硅酸盐水泥混凝土路面排放CO<sub>2</sub>总量为8 215.31 t,其中原材料生产阶段排放CO<sub>2</sub>量为7 617.27 t,占温室气体排放总量的92.7%;混凝土制造阶段排放CO<sub>2</sub>量为598.03 t,占总排放量的7.2%;路面施工阶段排放CO<sub>2</sub>量为8.40 t,仅占总排放量的0.1%。同时,研究发现在排放的温室气体中,CO<sub>2</sub>占总排放量的98%以上,N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放量相对较小。Flower等<sup>[9]</sup>分别核算了粗集料、细集料、水泥和外加剂等混凝土原材料的生产,混凝土配制,物料运输和施工过程等阶段CO<sub>2</sub>的排放量。结果表明,当硅酸盐水泥作为唯一胶凝材料时,每生产一立方商用混凝土CO<sub>2</sub>的排放量为0.29~0.32 t,水泥生产阶段排放的CO<sub>2</sub>是商用混凝土生命周期CO<sub>2</sub>排放的主要来源,约占CO<sub>2</sub>排放总量的74%~81%;其次是粗集料生产,约占CO<sub>2</sub>排放总量的13%~20%;细集料和外加剂生产、混凝土配制、物料运输和施工过程等阶段排放的CO<sub>2</sub>相对较少。

### 1.3 绿色混凝土

在节能减排的大环境下,绿色建筑材料(简称:绿色建材)成为未来建材发展的必然趋势,绿色建材在生产和应用过程中,能够有效利用废弃物并减少对自然资源和能源的使用,在产品性能符合建筑施工要求的基础上,实现建筑材料全生命周期内最大限度地减少对生态环境的破坏,并对人类健康无害<sup>[10]</sup>。

绿色混凝土是目前绿色建材的研究热点,通过调整混凝土原料配方,如添加矿物掺合料、再生骨料和外加剂等,减少其生产过程中对污染物和温室气体的排放,同时使其具有高性能和高耐久性的优点<sup>[11-12]</sup>。绿色混凝土对生态环境友好、资源利用率高,符合可持续发展的原则,是混凝土未来主要的发展方向。

### 2 水泥的碳排放

水泥作为胶凝材料是混凝土的重要组成部分,其生产过程包括生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨,产生CO<sub>2</sub>的环节主要有:化石燃料燃烧、石灰石煅烧分解、电

力和热力消耗。根据国家统计局的数据,我国2018年、2019年和2020年水泥产量分别为22.1亿t、23.5亿t和24.0亿t,呈逐年递增趋势。在我国,每生产1 t水泥熟料排放CO<sub>2</sub>约0.85 t,其中生料煅烧过程中石灰石分解产生的CO<sub>2</sub>占水泥熟料生产过程产生CO<sub>2</sub>总量的50%~60%<sup>[13]</sup>。2020年我国水泥生产产生的碳排放量达12.3亿t,占建材行业碳排总量的84.3%、占全国碳排总量的13.5%。

Monteiro等<sup>[14]</sup>的研究结果显示,2017年水泥生产排放的CO<sub>2</sub>占全球人为CO<sub>2</sub>排放量的8.9%,预计到2050年,水泥年产量将增长50%,根据目前的排放因子和能源结构,在未来的33年内水泥生产将排放85 105 Gt的CO<sub>2</sub>(相当于2009年和2010年世界温室气体排放总量)。Monteiro认为减少CO<sub>2</sub>的排放是实现水泥行业可持续发展的前提,可通过碳捕集、存储和再利用(Carbon Capture Utilization Storage, CCUS)技术减少CO<sub>2</sub>的排放,但此方法成本较高,更加经济可行的方法是采用矿物掺合料替代混凝土中的部分硅酸盐水泥。根据Flower等<sup>[9]</sup>的分析,混凝土生命周期各环节CO<sub>2</sub>排放因子如表1所示。

表1 混凝土生命周期各环节CO<sub>2</sub>排放因子

(Tab.1 CO<sub>2</sub> emission factors of each link of concrete life cycle)

排碳环节	排放因子
硅酸盐水泥生产	0.820 tCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup>
矿渣粉生产	0.143 tCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup>
粗集料生产	0.036 tCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup>
细集料生产	0.014 tCO <sub>2</sub> ·t <sup>-1</sup>
混凝土配制	0.003 tCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup>
物料运输	0.009 tCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup>
现场施工(泵送、振动等)	0.009 tCO <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup>

由表1可知,在混凝土生命周期各排碳环节中,硅酸盐水泥生产环节排放的CO<sub>2</sub>占比最大,矿渣粉生产排放的CO<sub>2</sub>量仅为水泥生产碳排放量的17%。因此,采用矿渣粉替代水泥作为混凝土胶凝组分可提高工业固废资源化利用效率,减少混凝土生产碳排放,促进建材行业绿色低碳发展。

### 3 矿渣粉的减排功能

#### 3.1 矿渣粉的生产

钢铁行业在高炉冶炼生铁时会排出熔融态硅酸盐和铝酸盐矿物,即高炉矿渣,经水淬法脱水处理后粒径一般小于5 mm,矿渣量通常为生铁产量的30%~35%<sup>[16]</sup>,其化学成分见表2。

表2 高炉矿渣的主要化学成分

(Tab.2 Main chemical composition of blast furnace slag)

化学成分	质量分数 /%
SiO <sub>2</sub>	30.00~35.00
CaO	37.00~42.00
MgO	6.00~9.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.00~15.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.00~2.00
SO <sub>3</sub>	0.09~0.20
MnO	0.20~0.50
TiO <sub>2</sub>	0.20~0.60

由表2可知,矿渣粉的化学成分和矿物组成与水泥相似,通常用作水泥混合材和混凝土掺合料。矿渣粉可以等质量替代水泥熟料用于水泥生产,也可以等质量替代水泥用于混凝土生产,以降低水泥和混凝土的生产成本,同时改善混凝土拌合物的工作性能、后期力学性能和耐久性能等,降低混凝土的水化热<sup>[6]</sup>。矿渣粉对水泥熟料的替代率根据工程需求一般为25%~80%,美国许多州的交通管理部门允许使用高达50%的矿渣粉掺量的水泥用于路面铺装和结构混凝土,许多大体积混凝土结构使用矿渣掺量为65%~80%的矿渣水泥以降低混凝土的水化热<sup>[7]</sup>。《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)中规定矿渣硅酸盐水泥(P·S·B)中矿渣掺量可达70%。在实际生产中,矿渣粉通常可替代混凝土中胶凝材料掺量的40%。

### 3.2 降低碳排放

矿渣粉是高炉矿渣经粉磨制成的具有一定细度和胶凝活性的粉体材料,其生产工序主要是物理粉磨。以上海某家矿渣粉生产企业为例,其生产工艺流程如图1所示。

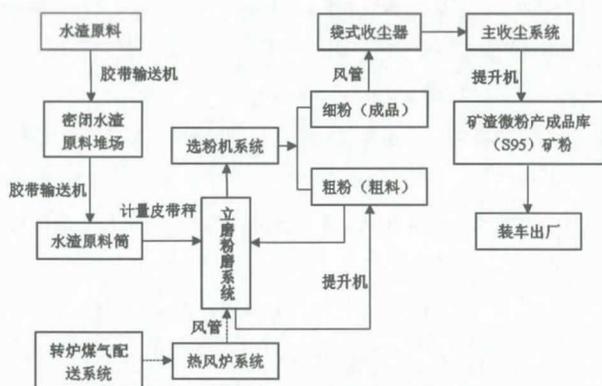


图1 高炉矿渣粉磨工艺流程

(Fig.1 Process flow of blast furnace slag grinding)

由图1可知,高炉矿渣磨制成矿渣粉的过程仅在燃料燃烧和电力消耗方面会产生并排放CO<sub>2</sub>。根据该企业矿渣粉生产的实际情况,生产1t矿渣粉耗电

40 kW·h,转炉消耗煤气燃料27 Nm<sup>3</sup>。采用《温室气体排放核算与报告要求第8部分:水泥生产企业》(GB/T 32151.8—2015)核算生产1t矿渣粉所排放的CO<sub>2</sub>仅为65.3 kgCO<sub>2</sub>/t矿粉。因此,生产1t矿渣粉比生产1t水泥熟料减排CO<sub>2</sub>约0.8t。根据华神智能数据中心统计,2016年至2020年,我国矿渣粉产量基本维持在1亿t左右,如全部用于替代水泥熟料则可减少CO<sub>2</sub>排放量约0.8亿t。

秦于茜等<sup>[8]</sup>分别对六大通用硅酸盐水泥的生产过程进行了碳足迹核算。结果表明,掺混材料的硅酸盐水泥碳排放相对较小,且掺混材料占比越多碳排放量越少。其中,掺混材料占比最大的矿渣硅酸盐水泥(P·S·B)碳排放量仅为硅酸盐水泥(P·I)的30%~50%。所以,在达到施工技术要求的情况下,需优先使用掺混材料占比更大的通用硅酸盐水泥,以最大限度地减小水泥生产过程的碳排放量。

Mohan等<sup>[9]</sup>分别利用硅酸盐水泥和碱活性矿渣制造相同尺寸的混凝土/砂浆构件,并进行生命周期清单调查。结果表明,同硅酸盐水泥混凝土相比,碱活性矿渣混凝土(利用碱活性矿渣替代全部硅酸盐水泥)减少了73%的温室气体排放和43%的能源消耗。因此,在混凝土和砂浆中使用碱活性矿渣替代硅酸盐水泥,可以显著减少水泥基产品的碳排放,降低环境的温室效应。

### 3.3 节约能源

同水泥生产相比,矿渣粉生产减少了水泥生产中的生料粉磨和熟料煅烧工序(此环节需燃煤量约150 kg/t水泥),降低了电耗和煤耗。据报道<sup>[10]</sup>,生产1t矿渣粉的电耗比生产1t水泥节省约30 kW·h,节省标准煤约120 kg。Chen等<sup>[9]</sup>采用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法对分别采用硅酸盐水泥(P·I)和矿渣掺量为25%的矿渣硅酸盐水泥(P·S·A)生产制作的透水混凝土的温室气体排放和能耗进行了定量分析,结果表明,与硅酸盐水泥相比,采用矿渣硅酸盐水泥生产透水混凝土可减少6%~9%的能源消耗和11%~19%的温室气体排放。

### 3.4 减少资源消耗

据统计<sup>[20]</sup>,生产1t水泥熟料需消耗1t以上的石灰石、0.2t的黏土和0.04t的铁粉原料,利用矿渣粉代替部分水泥熟料用于水泥生产可以减少对天然矿物资源的消耗。按目前每年矿渣粉替代1亿t水泥熟料计算,可减少1亿t以上的石灰石、0.2亿t黏土和0.04亿t

铁粉原料的消耗。此外,骨料通常占混凝土质量的80%左右<sup>[21]</sup>,全球的混凝土生产会消耗大量的碎骨料和沙子,使用矿渣作集料可减少天然集料的开采,减少对生态环境的影响。Prusinski等<sup>[17]</sup>采用矿渣粉分别替代35%和50%的硅酸盐水泥制备硅酸盐水泥预拌混凝土、预制混凝土和混凝土砌块,并进行生命周期清单调查。结果表明,在构件强度等级相同条件下,与100%的硅酸盐水泥混凝土相比,矿渣水泥混凝土的矿物原材料节省了4.3%~14.6%,能源消耗降低了21.1%~48.4%,CO<sub>2</sub>排放量减少了29.2%~46.1%。

#### 4 结语

推进“碳达峰、碳中和”行动是我国积极应对气候变化的重要举措。传统水泥和混凝土作为高碳建材,不符合绿色低碳发展的原则,而矿渣粉以大宗工业固废为原材料,采用其替代部分水泥熟料用于混凝土中具有明显的减碳、节能、降耗功能,应积极推广其在混凝土中的应用。

#### 参考文献

- [1]米靖文.中国低碳经济发展浅议[J].合作经济与科技,2021,(5):36-37.
- [2]王志敏,王林.建材企业开展碳达峰及碳中和探讨[J].建材发展导向,2021,19(8):9-11.
- [3]ARRIGONI A,POSEN I D,MACLEAN H L, et al. Optimizing the use of a constrained resource to minimize regional greenhouse gas emissions: the case study of slag in Ontario's concrete[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(20):10-44.
- [4]GURSEL A P, OSTERTAG C P. Impact of Singapore's importers on life-cycle assessment of concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 118(1):140-150.
- [5]李畅.江西省某铜尾矿资源化过程生命周期评价研究[D].赣州:江西理工大学,2020.
- [6]TEH S H, WIEDMANN T, CASTEL A, et al. Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 312-320.
- [7]CROSSIN E. The greenhouse gas implications of using ground granulated blast furnace slag as a cement substitute[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 95: 101-108.
- [8]MA F, SHA A, YANG P, et al. The greenhouse gas emission from portland cement concrete pavement construction in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(7):632-644.
- [9]FLOWER D, SANJAYAN J G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(5):282-288.
- [10]周耀旭,梁丽敏.绿色混凝土的发展与创新[J].建材发展导向(下),2019,17(4):77-84.
- [11]刘海波,殷付通,杨易鹏,等.绿色混凝土的发展与应用[J].科技创新与应用,2020,(27):176-177.
- [12]樊小帅,沈乾洲.混凝土材料的研究现状和发展应用[J].砖瓦,2021(2):32-33.
- [13]MOHAN J, XIAOJU C, FARSHAD R, et al. Comparative life cycle assessment of conventional, glass powder, and alkali-activated slag concrete and mortar[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014, 20(4): 04014020.
- [14]李晋梅,尹靖宇,武庆涛,等.水泥行业碳排放计算依据对比及实例分析[J].中国水泥,2017,8:83-86.
- [15]MONTEIRO P, MILLER S A, HORVATH A. Towards sustainable concrete[J]. Nature Materials, 2017, 16(7): 698-699.
- [16]赵继玲.赤泥和高炉矿渣制备硅酸盐耐碱玻璃结构及性能的研究[D].济南:济南大学,2020.
- [17]张国忠,李广军,司有宝,等.浅析高炉矿渣的综合利用[J].价值工程,2014,33(15):145-146.
- [18]PRUSINSKI J R, MARCEAU M L, VANGHEEM M G. Life cycle inventory of slag cement concrete[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2004, 47(4): 379-384.
- [19]ULUBEYLI G C, ARTIR R. Sustainability for blast furnace slag: use of some construction wastes[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015, 195: 2191-2198.
- [20]秦于茜.水泥产品碳足迹核算研究[D].西安:西安理工大学,2020.
- [21]徐庆.矿粉基地聚合物透水混凝土的设计、制备与性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [22]CHEN X, WANG H, NAJM H, et al. Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237: 117714.
- [23]徐从战,罗帆.我国水泥生料的配料特点及其易磨性探讨[J].水泥,2019,(6):17-21.

作者简介:韩冰(1993—),硕士,助理工程师,研究方向为冶金渣资源化利用。