

碱式硫酸镁水泥的生命周期评价

李莹江^{1a}, 徐 迅^{1a,2a}, 胡海龙^{1b}, 李 丹^{1a}, 余 波^{2a,2b,2c}

(1.西南科技大学 a.土木工程与建筑学院; b.分析测试中心, 四川 绵阳 621010; 2.广西大学 a.广西
防灾减灾与工程安全重点实验室; b.工程防灾与结构安全教育重点实验室; c.土木建筑工程学院,
广西南宁 530001)

摘 要:为了评估碱式硫酸镁水泥对环境的影响,采用生命周期评价(LCA)方法,定量分析了碱式硫酸镁水泥的 3 种原材料在 15 项中点类别(致癌物质、非致癌物质、可吸入无机物等)和 4 项终点类别(人类健康、生态系统质量、气候变化、资源消耗)上的影响,并对比分析了不同镁质水泥的环境影响。结果表明:碱式硫酸镁水泥在水生生态毒性上的影响值最高,在臭氧层破坏上的影响值最低;氧化镁在致癌物质、非致癌物质和水生生态毒性上的影响占比较大,均超过 85.00%;七水硫酸镁在电离辐射上的影响占比(53.67%)较大;柠檬酸在土地占有上的影响占比(68.80%)较大;在 4 项终点类别上,氧化镁的环境影响最大,七水硫酸镁次之,柠檬酸最小;与活性氧化镁水泥、磷酸镁水泥、氯氧镁水泥相比,碱式硫酸镁水泥在 9 项中点类别(致癌物质、非致癌物质、可吸入无机物等)和 2 项终点类别(气候变化、资源消耗)上优势明显。

关键词:碱式硫酸镁水泥;生命周期评价;环境影响;镁质水泥

中图分类号:TV42+1 文献标识码:A doi:10.19761/j.1000-4637.2023.03.078.05

Life Cycle Evaluation of Basic Magnesium Sulfate Cement

LI Ying-jiang^{1a}, XU Xun^{1a,2a}, HU Hai-long^{1b}, LI Dan^{1a}, YU Bo^{2a,2b,2c}

(1.Southwest University of Science and Technology, a.School of Civil Engineering and Architecture; b.Analysis and Testing Center, Mianyang 621010, China; 2.Guangxi University, a.Key Laboratory of Ministry of Education for Engineering Disaster Prevention and Structural Safety; b.Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety; c.College of Civil Engineering, Nanning 530001, China)

Abstract: In order to evaluate the impact of basic magnesium sulfate cement on the environment, life cycle assessment (LCA) method was used to quantitatively analyze the impact of three raw materials of basic magnesium sulfate cement on fifteen midpoint categories (carcinogens, non-carcinogens, inhalable inorganic substances, etc.) and four endpoint categories (human health, ecosystem quality, climate change, resource consumption). The environmental impact of different types of magnesium cement was discussed. The results show that basic magnesium sulfate cement has the highest impact value on aquatic ecotoxicity and the lowest impact value on ozone depletion. Magnesium oxide has a relatively large impact on carcinogens, non-carcinogens and aquatic ecotoxicity, with the impact ratio exceeding 85.00%. The influence of magnesium sulfate heptahydrate on ionizing radiation is relatively large, with the impact ratio of 53.67%. The influence of citric acid on land possession is relatively large, with the impact ratio of 68.80%. In the four endpoint categories, magnesium oxide has the largest environmental impact, followed by magnesium sulfate heptahydrate, and citric acid is the smallest. Compared with the active magnesium oxide cement, magnesium phosphate cement and magnesium oxychloride cement, the basic magnesium sulfate cement has obvious advantages in the nine midpoint categories (carcinogens, non-carcinogens, inhalable inorganic substances, etc.) and two endpoint categories (climate change and resource consumption).

Key words: Basic magnesium sulfate cement; Life cycle assessment; Environmental impact; Magnesia cement

0 前言

碱式硫酸镁水泥是在硫氧镁水泥的基础上,采用现代外加剂技术,使 $\text{MgO}-\text{MgSO}_4-\text{H}_2\text{O}$ 胶凝体系

中形成以碱式硫酸镁晶须 $[\text{5Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}, 5 \cdot 1 \cdot 7 \text{ 相}]$ 为主要水化产物的一种新型生态胶凝材料^[1-5],具有耐火性好、质量轻、凝结时间短、强度高、耐久性能好等特点^[6-11],在新型节能型建筑材料、特种混凝土材料等方面具有良好的应用前景。

碱式硫酸镁水泥主要由氧化镁、硫酸镁和改性剂组成,其中,氧化镁主要由含碳酸镁的菱镁矿经不同煅烧工艺制得。我国菱镁矿的储量较高,达

基金项目:四川省重点研发计划项目(2023YFSY0019);广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放课题项目(2020ZDK006);西南科技大学实验技术研究项目(21syjs-32);广西壮族自治区杰出青年科学基金项目(2019GXNSFFA245004);广西壮族自治区自然科学基金项目(2018GXNSFAA281344)。

69.23%,但菱镁矿的开采、煅烧会对环境造成较大污染。在双碳背景下,如何降低镁质水泥的生产能耗是当前我国水泥企业面临的挑战之一。

生命周期评价(以下简称 LCA)方法是评估材料在其生命周期内对环境的影响,包括资源开采、生产、运输、使用和折旧的过程。近年来,LCA 方法已被广泛用于评价水泥行业对环境的影响方面。LI 等^[12]基于 LCA 方法研究发现,氧化镁生产阶段相对于其他阶段而言对环境的影响贡献最大,主要是因为氧化镁生产阶段的能耗较高。ZHANG 等^[13]采用 LCA 方法对比了普通硅酸盐水泥、活性氧化镁水泥和普通硅酸盐-活性氧化镁复合水泥(以下简称复合水泥)的 CO₂ 排放,发现复合水泥的 CO₂ 排放最低。SHEN 等^[14]采用 LCA 方法评价了生产氧化镁水泥的 CO₂ 排放,并与普通硅酸盐水泥进行了对比,发现氧化镁水泥生产过程中的 CO₂ 排放量较多,其比普通硅酸盐水泥具有更大的生命周期碳足迹。

本文采用 LCA 方法定量分析碱式硫酸镁水泥对环境的影响,可为相关研究提供参考。

1 碱式硫酸镁水泥的 LCA 模型

1.1 目标、范围、功能单元与研究方法

(1)目标:评估碱式硫酸镁水泥对环境的影响,并与活性氧化镁水泥、磷酸镁水泥和氯氧镁水泥进

行对比,明确镁质水泥对多项环境类别的影响程度,为镁质水泥的 LCA 研究提供参考。

(2)范围:对 4 种镁质水泥(碱式硫酸镁水泥、活性氧化镁水泥、磷酸镁水泥和氯氧镁水泥)的原材料种类及用量进行研究。其中,不同镁质水泥的配合比根据力学强度进行设计。

(3)功能单元:作为分析系统的参考单元,本文镁质水泥的环境影响根据 1 t 功能单元进行计算。

(4)研究方法:本文采用的 LCA 方法为 IMPACT 2002+,分析软件为 Simapro 9.0。

1.2 生命周期清单分析

根据前期研究成果^[15-16],确定了碱式硫酸镁水泥的配比,见表 1。碱式硫酸镁水泥的分析数据来源于 Ecoinvent 3 数据库。

表 1 碱式硫酸镁水泥的配比 %		
氧化镁	七水硫酸镁	柠檬酸
66.47	32.70	0.83

2 碱式硫酸镁水泥的生命周期影响评估结果与分析

采用 Simapro 9.0 软件中的 IMPACT 2002+特征化模型对碱式硫酸镁水泥进行环境影响的特征化分析。碱式硫酸镁水泥在 15 项中点类别上的特征化分析结果见表 2。

表 2 碱式硫酸镁水泥在 15 项中点类别上的特征化分析结果

项目序号	中点类别	单位	碱式硫酸镁水泥			总计
			氧化镁	七水硫酸镁	柠檬酸	
1	致癌物质	kg C ₂ H ₃ Cl eq	14.01	1.53	0.77	16.31
2	非致癌物质	kg C ₂ H ₃ Cl eq	173.39	2.27	1.30	176.96
3	可吸入无机物	kg PM _{2.5} eq	0.59	0.31	0.08	0.98
4	电离辐射	Bq C-14 eq	2.08×10 ³	2.69×10 ³	0.24×10 ³	5.02×10 ³
5	臭氧层破坏	kg CFC-11 eq	1.41×10 ⁻⁵	1.07×10 ⁻⁵	6.04×10 ⁻⁶	3.08×10 ⁻⁵
6	可吸入有机物	kg C ₂ H ₄ eq	0.08	0.03	0.01	0.12
7	水生生态毒性	kg TEG water	1.81×10 ⁶	2.39×10 ⁴	1.48×10 ⁴	1.84×10 ⁶
8	陆生生态毒性	kg TEG soil	1.28×10 ⁴	5.95×10 ³	3.07×10 ³	2.18×10 ⁴
9	陆地酸化/营养化	kg SO ₂ eq	7.48	3.58	1.47	12.53
10	土地占用	m ² org.arable	3.31	2.17	12.07	17.55
11	水体酸化	kg SO ₂ eq	1.69	0.87	0.43	2.99
12	水体富营养化	kg PO ₄ P-lim	0.11	0.03	0.02	0.16
13	温室效应	kg CO ₂ eq	779.69	141.33	57.48	978.49
14	不可再生能源	MJ primary	2.45×10 ³	2.21×10 ³	0.64×10 ³	5.30×10 ³
15	矿物开采	MJ surplus	2.52	1.54	2.81	6.87

从表 2 可以看出,碱式硫酸镁水泥在水生生态毒性上的影响值最高,为 1.84×10⁶ kg TEG water;在可吸入无机物、可吸入有机物和 水体富营养化上的影响值较小;在臭氧层破坏上的影响值最小,为 3.08×10⁻⁵ kg CFC-11 eq。

根据表 2 计算出碱式硫酸镁水泥在 15 项中点

类别上的影响占比,结果见图 1。

由图 1 可知,氧化镁在致癌物质、非致癌物质、水生生态毒性上的影响占比很大,分别为 85.90%、97.98%、97.90%,且在可吸入无机物、可吸入有机物等 7 项中点类别上的影响占比均超过 50%,说明相对其他组分,氧化镁对中点类别的影响最大。七水

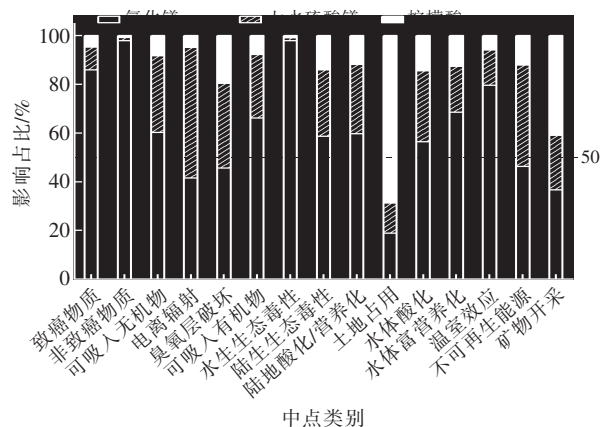


图1 碱式硫酸镁水泥在 15 项中点类别上的影响占比

硫酸镁在电离辐射上的影响占比较大，为 53.67%，在可吸入无机物、臭氧层破坏等 8 项中点类别上的影响占比超过 20.00%，说明七水硫酸镁对中点类别有一定的影响。柠檬酸在土地占用、矿物开采上的影响占比较高，分别为 68.80%、40.90%，在其余各项中点类别

上的影响占比均低于 20.00%，在非致癌物质上的影响占比仅为 0.73%，说明柠檬酸对中点类别的影响较低。

碱式硫酸镁水泥在 4 项终点类别上的评估结果见表 3，影响占比计算结果见图 2。

结合表 3 和图 2 可知，在人类健康上，碱式硫酸镁水泥的环境影响值为 1.23×10^{-3} DALY，各原材料的影响占比大小顺序为：氧化镁(76.37%)>七水硫酸镁(18.54%)>柠檬酸(5.08%)。在生态系统质量上，碱式硫酸镁水泥的环境影响值为 297.43 PDF·m²·yr，各原材料的影响占比大小顺序为：氧化镁(68.38%)>七水硫酸镁(18.27%)>柠檬酸(13.35%)。在气候变化上，碱式硫酸镁水泥的环境影响值为 978.49 kg CO₂eq，氧化镁、七水硫酸镁、柠檬酸的影响占比分别为 79.68%、14.44%、5.87%，说明氧化镁在 CO₂ 排放上占据主导地位。在资源消耗上，碱式硫酸镁水泥的环境影响值为 5.31×10^3 MJ primary，氧化镁、七水硫酸镁、柠檬酸的影响占比分别为 46.27%、41.62%、12.11%。

表 3 碱式硫酸镁水泥在 4 项终点类别上的评估结果

终点类别	单位	总计	氧化镁	七水硫酸镁	柠檬酸
人类健康	DALY	1.23×10^{-3}	9.40×10^{-4}	2.28×10^{-4}	6.26×10^{-5}
生态系统质量	PDF·m ² ·yr	297.43	203.38	54.35	39.69
气候变化	kg CO ₂ eq	978.49	779.69	141.33	57.48
资源消耗	MJ primary	5.31×10^3	2.46×10^3	2.21×10^3	0.64×10^3

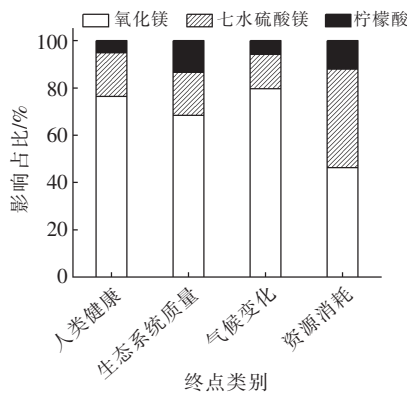


图2 碱式硫酸镁水泥在 4 项终点类别上的影响占比

对比 3 种原材料在 4 项终点类别上的影响占比可知，氧化镁在 4 项终点类别上的影响占比均最大；七水硫酸镁在资源消耗上的影响占比与氧化镁相当；柠檬酸在生态系统质量上的影响占比与七水硫酸镁相比差距不大，但在其余 3 项终点类别上的影响占比明显小于氧化镁和七水硫酸镁。

为了更好地比较碱式硫酸镁水泥在不同环境类别上的影响程度，需对环境类别影响值进行归一化处理，结果见表 4。根据表 4 绘制出的碱式硫酸镁水泥在 4 项终点类别上的归一化结果见图 3。

表 4 碱式硫酸镁水泥环境类别影响值的归一化结果

终点类别	总计	氧化镁	七水硫酸镁	柠檬酸
人类健康	0.17	0.13	3.22×10^{-2}	8.82×10^{-3}
生态系统质量	2.17×10^{-2}	1.48×10^{-2}	3.97×10^{-3}	2.90×10^{-3}
气候变化	9.88×10^{-2}	7.87×10^{-2}	1.43×10^{-2}	5.81×10^{-3}
资源消耗	3.49×10^{-2}	1.62×10^{-2}	1.45×10^{-2}	4.23×10^{-3}

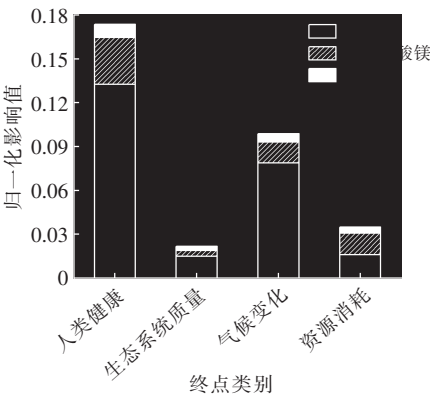


图3 碱式硫酸镁水泥在 4 项终点类别上的归一化结果

结合表 4 和图 3 可知，碱式硫酸镁水泥在 4 项终点类别上的影响值大小顺序为：人类健康(0.17)>气候变化(9.88×10^{-2})>资源消耗(3.49×10^{-2})>生态系统质量(2.17×10^{-2})。可见，碱式硫酸镁水泥对人类健

康的影响最大,其制备过程中对人体健康产生的影响不可忽视,需采取有效措施进行控制。碱式硫酸镁水泥的3种原材料在4项终点类别上的影响值大小顺序为:氧化镁>七水硫酸镁>柠檬酸,氧化镁对4项终点类别的影响最大。

3 不同镁质水泥的生命周期影响评估结果与分析

为了探索不同镁质水泥对环境的影响程度,本文进一步对活性氧化镁水泥、磷酸镁水泥和氯氧镁水泥进行了LCA分析,可为镁质水泥生产过程中的环境影响因素控制提供参考。

活性氧化镁水泥、磷酸镁水泥和氯氧镁水泥的配比见表5。

表5 镁质水泥的配比				%
种类	氧化镁	磷酸二氢铵	硼砂	氯化镁
活性氧化镁水泥 ^[17-18]	100	—	—	—
磷酸镁水泥 ^[19-22]	52.63	43.42	3.95	—
氯氧镁水泥 ^[23-25]	74.67	—	—	25.33

表6为4种镁质水泥在15项中点类别上的特征化分析结果。

表6 4种镁质水泥在15项中点类别上的特征化分析结果

项目序号	中点类别	单位	碱式硫酸镁水泥	活性氧化镁水泥	磷酸镁水泥	氯氧镁水泥
1	致癌物质	kg C ₂ H ₃ Cl eq	16.31	21.07	18.72	16.96
2	非致癌物质	kg C ₂ H ₃ Cl eq	176.96	260.87	139.28	198.15
3	可吸入无机物	kg PM _{2.5} eq	0.98	0.89	0.79	0.78
4	电离辐射	Bq C-14 eq	5.02×10 ³	3.13×10 ³	2.71×10 ³	3.22×10 ³
5	臭氧层破坏	kg CFC-11 eq	3.08×10 ⁻⁵	2.11×10 ⁻⁵	2.16×10 ⁻⁵	2.15×10 ⁻⁵
6	可吸入有机物	kg C ₂ H ₄ eq	0.12	0.12	0.15	0.11
7	水生生态毒性	kg TEG water	1.84×10 ⁶	2.72×10 ⁶	1.44×10 ⁶	2.05×10 ⁶
8	陆生生态毒性	kg TEG soil	2.18×10 ⁴	1.93×10 ⁴	1.32×10 ⁴	1.91×10 ⁴
9	陆地酸化/营养化	kg SO ₂ eq	12.53	11.25	13.87	9.98
10	土地占用	m ² org.arable	17.55	4.98	3.47	5.61
11	水体酸化	kg SO ₂ eq	2.99	2.54	2.88	2.33
12	水体富营养化	kg PO ₄ P-lim	0.159 2	0.164 1	0.570 3	0.162 4
13	温室效应	kg CO ₂ eq	978.49	1 173.04	1 045.31	944.25
14	不可再生能源	MJ primary	5.30×10 ³	3.69×10 ³	9.62×10 ³	3.71×10 ³
15	矿物开采	MJ surplus	6.87	3.78	3.28	15.47

从表6可以看出,整体上碱式硫酸镁水泥较其他3种镁质水泥对环境的污染相对较小。其中,碱式硫酸镁水泥在可吸入无机物、电离辐射、臭氧层破坏、陆生生态毒性、土地占用和水体酸化上的影响值相对较高;在致癌物质、非致癌物质、水生生态毒性、水体富营养化、温室效应上的影响值分别较活性氧化镁水泥降低了22.59%、32.17%、32.35%、2.99%、16.59%;在致癌物质、可吸入有机

物、陆地酸化/营养化、水体富营养化、温室效应、不可再生能源上的影响值较磷酸镁水泥分别降低了12.87%、20.00%、9.66%、72.08%、6.39%、44.91%;在致癌物质、非致癌物质、水生生态毒性、矿物开采上的影响值较氯氧镁水泥分别降低了3.83%、10.69%、10.24%、55.59%。

表7为4种镁质水泥在4项终点类别上的评估结果。

表7 4种镁质水泥在4项终点类别上的评估结果

终点类别	单位	碱式硫酸镁水泥	活性氧化镁水泥	磷酸镁水泥	氯氧镁水泥
人类健康	DALY	1.23×10 ⁻³	1.41×10 ⁻³	9.98×10 ⁻⁴	1.15×10 ⁻³
生态系统质量	PDF·m ² ·yr	297.43	305.99	194.46	270.58
气候变化	kg CO ₂ eq	0.98×10 ³	1.17×10 ³	1.05×10 ³	0.94×10 ³
资源消耗	MJ primary	5.31×10 ³	3.69×10 ³	9.63×10 ³	3.72×10 ³

由表7可知,与其他3种镁质水泥相比,总体上碱式硫酸镁水泥在4项终点类别上有一定的优势。在人类健康、生态系统质量、气候变化上,碱式

硫酸镁水泥的影响值较活性氧化镁水泥的影响值分别降低了12.77%、2.80%、16.24%;在气候变化、资源消耗类别上,碱式硫酸镁水泥的影响值较磷酸

镁水泥的影响值分别降低了6.67%、44.86%。

4 结论

(1)LCA结果表明,碱式硫酸镁水泥在水生生态毒性上的影响值最高,在臭氧层破坏上的影响值最低。在15项中点类别上,氧化镁的环境影响较大,柠檬酸的环境影响较低。在4项终点类别上,氧化镁的环境影响最大,七水硫酸镁次之,柠檬酸最小。

(2)对比4种镁质水泥的环境影响可知,在15项中点类别上,碱式硫酸镁水泥在致癌物质、非致癌物质、可吸入有机物、水生生态毒性、陆地酸化/营养化、水体富营养化、温室效应、不可再生能源和矿物开采上的环境影响相对较低。在4项终点类别上,碱式硫酸镁水泥总体上较其他3种镁质水泥具有一定的环境优势。

参考文献:

- [1] DEMEDIUK T.A Method for Overcoming Unsoundness in Magnesian Limes[J].Nature,1952,170(4332):799.
- [2] 朱会荣.硫氧镁胶凝材料性能的研究[D].沈阳:沈阳建筑工程学院,2010.
- [3] 陆建兵,朱晓华,张童童,等.改性硫氧镁水泥的性能研究[J].混凝土与水泥制品,2016(9):24-28.
- [4] BEAUDION J J, RAMACHANDRAN V S. Strength Development in Magnesium Oxysulfate Cement [J]. Cement and Concrete Research, 1977, 8(1): 103-112.
- [5] WU C Y, YU H F, ZHANG H F. Extraction of Aluminum by Pressure Acid-leaching Method from Coal Fly Ash [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(9): 2282-2288.
- [6] MATHURI R, SHARMA S K, CHANDRAWAT M P S. Effect of Formaldehyde as an Additive on Some Properties of Magnesium Oxysulphate Cement [J]. Material Science Research India, 2008, 5(2): 313-320.
- [7] 庄森,郑秋飞,郑山锁.碱式硫酸镁水泥混凝土耐水性评价研究[J].混凝土与水泥制品,2021(9):19-34.
- [8] XU X, XU Y Y, DUAN L L. Effect of Fineness and Components of CFBC Ash on Performance of Basic Magnesium Sulfate Cement[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 801-811.
- [9] 李振国,余四文,王仕坤,等.稻草纤维碱萃取物对碱式硫酸镁水泥性能的影响[J].硅酸盐通报,2018,37(3):868-872.
- [10] 邢赛男,吴成友,陈柏昆,等.玻璃纤维增强碱式硫酸镁水泥制备工艺研究[J].硅酸盐通报,2017,36(6):2072-2078.
- [11] WU C Y, YU H F, DONG J M, et al. Effectes of Material Ratio, Fly Ash and Citric Acid on Magnesium Oxysulfate Cement[J]. ACI Materials Journal, 2014, 111(3): 291-297.
- [12] LI J H, ZHANG Y, SHAO S, et al. Comparative Life Cycle Assessment of Conventional and New Fused Magnesia

Production[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 91: 170-179.

- [13] ZHANG R X, ARRIGONI A, PANESAR D K. Could Reactive MgO Cement Be a Green Solution? The Effect of CO₂ Mineralization and Manufacturing Route on the Potential Global Warming Impact[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 124: 104263.
- [14] SHEN W G, CAO L, LI Q, et al. Is Magnesia Cement Low Carbon? Life Cycle Carbon Footprint Comparing with Portland Cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 20-27.
- [15] 徐迅,李莹江,王宗浩,等.基于高树脂掺量的透光混凝土的砂浆性能研究[J].武汉理工大学学报,2021,43(7):13-21.
- [16] XU X, LI Y J, YU B, et al. A Novelty Method of Multi-scale Toughening Cement-based Materials: Reactive Powder Concrete with Endogenous Whwaskers[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104142.
- [17] RUAN S, UNLUER C. Comparative Life Cycle Assessment of Reactive MgO and Portland Cement Production [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 258-273.
- [18] HAY R, CELIK K. Hydration, Carbonation, Strength Development and Corrosion Resistance of Reactive MgO Cement-based Composites [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 128: 105941.
- [19] LI Y, SUN J, CHEN B. Experimental Study of Magnesia and M/P Ratio Influencing Properties of Magnesium Phosphate Cement [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 177-183.
- [20] MA C, CHEN G G, JIANG Z W, et al. Rheological Properties of Magnesium Phosphate Cement with Different M/P Ratios[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122657.
- [21] WANG M M, LIANG L R, LIU Q, et al. Influence of Dipotassium Hydrogen Phosphate on Properties of Magnesium Potassium Phosphate Cement [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126283.
- [22] 杨建明,钱春香,焦宝祥,等.缓凝剂硼砂对磷酸镁水泥水硬化特性的影响[J].材料科学与工程学报,2010,28(1):31-35,75.
- [23] BA H J, GUAN H. Influence of MgO/MgCl₂ Molar Ratio on Phase Stability of Magnesium Oxychloride Cement [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2009, 24(3): 476-481.
- [24] 汤婷,张俊计,周慧,等. MgO 的活性及原料配比对氯氧镁水泥结构的影响[J].大连交通大学学报,2014,35(5):69-73.
- [25] 余海燕,胡林童.轻质碱渣-氯氧镁水泥基材料性能研究及孔结构特征分析[J].混凝土与水泥制品,2022(4):78-83.

收稿日期:2022-05-16

作者简介:李莹江(1997—),男,硕士研究生。

E-mail: 1617947990@qq.com

通讯作者:徐迅(1977—),男,博士,副研究员。

E-mail: 15550045@qq.com