

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.012

吴福飞, 宫经伟, 董双快, 等. 不同养护方式对水泥-锂渣浆体水化程度影响[J]. 水利水运工程学报, 2017(3): 86-92. (WU Fufei, GONG Jingwei, DONG Shuangkuai, et al. Influences of different curing methods on cement-lithium slag slurry hydration degree [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3): 86-92. (in Chinese))

不同养护方式对水泥-锂渣浆体水化程度影响

吴福飞¹, 宫经伟², 董双快¹, 陈昌礼¹, 赵振华¹

(1. 贵州师范大学 材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了分析水泥-锂渣浆体的水化程度, 采用高温煅烧法测试各龄期的化学结合水, 结果发现: 水泥-锂渣浆体的化学结合水量随龄期的延长而增加, 水化 3 d 和 7 d 时能达到水化 90 d 时的 60% 和 80%。高温养护、碱激发、高温和碱激发均能提高锂渣复合水泥基材料早期的化学结合水量, 最高可达 3~4 倍, 提高的幅度依次为碱激发和高温养护>碱激发>高温养护>标准养护。高温和复合环境养护也能提高水泥的水化程度, 1~28 d 内, 锂渣掺量在 40% 以内时, 水泥水化程度相对指数 (ψ 值) 均大于 1; 掺量为 60% 时, ψ 值均小于 1。综上, 高温养护、碱激发、高温和碱激发均能提高锂渣和水泥的水化程度, 高温和碱激发复合作用时较为显著。

关 键 词: 养护方式; 水泥; 锂渣; 水化程度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)03-0086-07

锂渣是一种具有潜在火山灰活性的矿物掺合料, 适量锂渣 (20%~30%) 等质量替代水泥后, 混凝土的力学性能、抗裂性能、干燥收缩、氯离子渗透性和抗冻性能等指标^[1-4]能得到改善, 故锂渣混凝土已在一些工程中得到了推广使用: 如新疆乌苏布尔增水库面板和基础、新疆乌市新民路高架桥、新疆乌苏西海子水库面板, 新疆呼图壁县青年渠首和四川金华电航桥等工程。对新疆呼图壁县青年渠首运行 6 年的观测发现, 锂渣混凝土面板的表面均未出现小孔洞、开裂、局部表面浆体脱落等现象, 同一水库的粉煤灰混凝土面板表面已有部分剥落现象, 且在混凝土硬化的整个龄期, 锂渣混凝土的强度均高于粉煤灰混凝土^[5]。锂渣掺量超过 30% 时对上述性能有劣化作用, 因此不能大量使用锂渣。为了提高矿物掺合料在砂浆及混凝土中的利用率, 许多学者研究发现, 磨细、高温或化学激发等方式^[6-8]都能提高矿物掺合料的活性。目前, 表征复合水泥基材料水化过程的方法有未水化百分率法^[9], K 值法^[10], Rietveld 法^[11], $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量法和化学结合水量法^[12-13]等。化学结合水量法的操作、测试简单、成本低廉。另外, 水泥浆体中的化学结合水通常以水分子或 OH^- 的形式存在。因此, 本文采用高温、碱激发等养护方式, 探讨养护条件对锂渣复合水泥基材料化学结合水量以及水泥水化程度的影响, 以期在锂渣在砂浆及混凝土中的利用提供试验基础。

1 材料与方法

1.1 材料

水泥采用中国联合水泥集团有限公司生产的 P·I 42.5 基准水泥, 标准稠度用水量为 26.8%, 比表面积为 $380 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。锂渣采用锂盐厂的烘干锂渣, 需水量为 110%, 原渣比表面积为 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$, 外观呈乳白色。锂渣和水泥化学成分的测定结果见表 1。

收稿日期: 2016-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51541909); 贵州师范大学 2016 年博士科研启动项目 (2016)

作者简介: 吴福飞 (1985—), 男, 贵州兴义人, 讲师, 博士, 主要从事水工混凝土材料和农业水土工程的教学和科研工作。

E-mail: 392429521@qq.com

表 1 基准水泥和锂渣化学成分

Tab. 1 Chemical composition of cement and lithium slag

%

样品名称	Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O _{eq}
基准水泥	2.18	25.10	6.38	4.19	54.87	2.61	2.66	0.56
锂渣	7.01	58.54	19.34	1.44	7.34	0.73	6.28	0.43

注: $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$

1.2 试样制备与测试方法

试验时按照表 2 所示配合比,成型基准水泥-锂渣净浆试样于 10 mL 的离心管中,将盖拧紧后置于标养室(温度为 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度大于 95%)中养护,养护至规定龄期(1,3,7,28,60 和 90 d)后通过马弗炉高温煅烧测试其水化结合水量(具体参照文献[4]进行)。另外,对于掺锂渣的部分试样(LB1, LB3 和 LD1, LD3)同时还采用高温养护、碱激发、碱激发和高温复合作用的模式。高温养护为:将成型后的基准水泥-锂渣净浆试样直接放入 50°C 和 100°C 的恒温水浴中养护至规定龄期。碱激发、碱激发和高温复合养护为:采用 NaOH 配制成 $\text{pH} = 13.5$ 的碱溶液(每升水需 12.65 g NaOH),将其作为浆体的拌合用水成型试样,再将部分试样置于标准养护室养护至规定龄期,部分试样放入 100°C 的恒温水浴中养护至规定龄期。

表 2 锂渣复合水泥基材料配合比

Tab. 2 Mix proportion of lithium slag composite binder

试样编号	水胶比	锂渣复合水泥基材料的组成/%		试样编号	水胶比	锂渣复合水泥基材料的组成/%	
		基准水泥	锂渣			基准水泥	锂渣
LB0	0.40	100	0	LD0	0.30	100	0
LB1		80	20	LD1		80	20
LB2		60	40	LD2		60	40
LB3		40	60	LD3		40	60

注:标准养护时编号为 LB0~LB3 和 LD0~LD3;高温(50°C 和 100°C)养护时,在 LB1~LB3 和 LD1~LD3 后加上“5”和“10”;碱激发时,在 LB1~LB3 和 LD1~LD3 后加上“p”;复合激发时,在 LB1~LB3 和 LD1~LD3 后加上“5p”。下同。

2 结果与分析

2.1 锂渣复合水泥基材料的化学结合水

2.1.1 标准养护下的化学结合水量 标准养护下锂渣复合水泥基材料的化学结合水量随龄期的变化规律如图 1 所示。

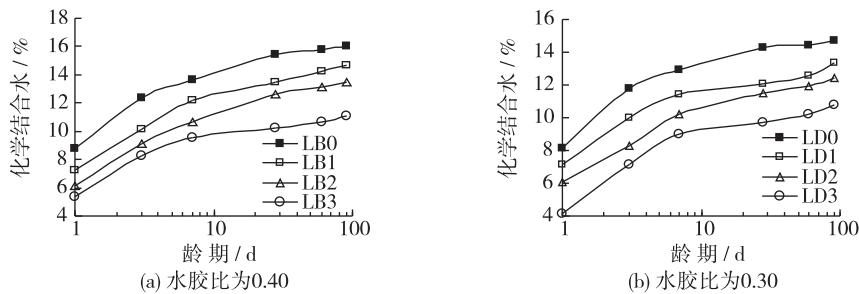


图 1 标养下锂渣复合水泥基材料的化学结合水量

Fig. 1 Combined water content of lithium slag composite binder under standard curing

由图 1 可见,锂渣复合水泥基材料的化学结合水量随龄期的延长而增大,但均低于同龄期下纯水泥浆

体。在水化早期,特别是水化 7 d 前,各组试样化学结合水量的增幅较大,水化 3 和 7 d 时基本上能达到水化 90 d 时的 60% 和 80% 以上,之后的增幅变得较为缓慢。锂渣掺入后降低了胶凝材料中水泥用量,使参与反应的颗粒变少,进一步降低了各龄期下化学结合水的总量。锂渣掺量越大,这种稀释作用就越明显,其化学结合水量的降低幅度就越大。在同掺量下,水胶比增大时,浆体的化学结合水量有增大趋势,但增幅基本上都小于锂渣掺量的影响。虽然较大水胶比相对能提供更多的水分和水化反应需要的水化空间,使其反应更加充分进而增大锂渣复合水泥基材料的化学结合水量,但是锂渣的吸水率较大,掺入后,除稀释了水泥颗粒外,还增加了胶凝体系中的水量。因此,锂渣掺量对复合水泥基材料的化学结合水量的影响高于水胶比。

2.1.2 高温下的化学结合水量 高温(50 和 100 °C)养护环境下锂渣复合胶凝材料的化学结合水量随龄期的变化规律如图 2 所示。高温养护能提高各水胶比试样的化学结合水量,尤其在水化早期(1~7 d)。当水胶比为 0.40 且养护温度为 50 °C 时,锂渣复合水泥基材料水化 1 d 的化学结合水量比标养时提高了 21.5% (掺量为 20%) 和 31.8% (掺量为 60%),水胶比降低至 0.30 时,分别提高了 21.6% 和 60.5%。当水胶比为 0.40 且养护温度为 100 °C 时,锂渣复合水泥基材料水化 1 d 的化学结合水量比标养时提高了 33.1% 和 47.6%,水胶比降低至 0.30 时,分别提高了 29.7% 和 83.1%。可见高温能提高胶凝材料的水化程度,锂渣掺量越大,其化学结合水的增量就越大。这主要是高温能够加速锂渣中以玻璃体网络结构形成的—O—Si—O—键、—Al—O—Si—O—键发生断裂,即高温有利于玻璃体网络结构的解聚,提高锂渣在水泥基中的水化反应速率,增大其水化反应程度,使锂渣活性得以激发,反应产物生成迅速,化学结合水量的增加趋势就较大。随着养护龄期的延长,各水胶比试样化学结合水量的增长幅度变得缓慢,但均超过标准养护时试样的化学结合水量。有关文献研究表明:在高温(45~100 °C)养护时,水泥水化速度较快,生成的水化产物较多并沉积在水泥或锂渣颗粒表面,阻碍了胶凝材料的化学结合水量的提高。

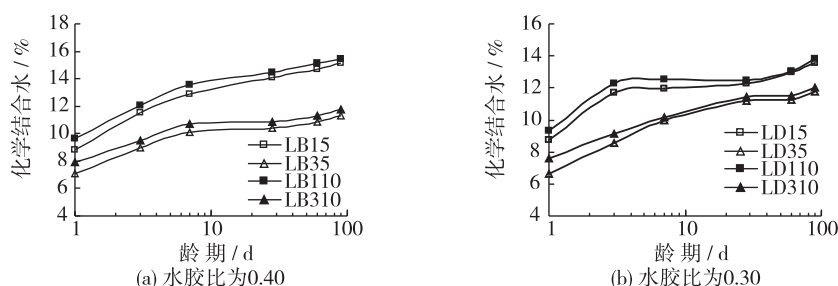


图 2 高温(50 °C 和 100 °C)养护下锂渣复合水泥基材料的化学结合水量

Fig. 2 Combined water content of lithium slag composite binder under 50 °C and 100 °C curing conditions

对比标准养护发现,高温养护有利于浆体化学结合水量的提高。水化龄期越短增幅就越大。可见适当提高早期养护温度有利于胶凝材料的水化。水化 7 d 后,各组试样的增长率都在 15% 以下,水化 90 d 时,个别试样的增长率已低于 5%。这进一步说明高温有利于浆体早期水化,但对后期影响较小,甚至可以忽略。

2.1.3 碱激发下的化学结合水量 碱激发下锂渣复合胶凝材料的化学结合水量见图 3。可见,碱对锂渣复合胶凝材料的早期(1~7 d)化学结合水量有显著影响。水胶比为 0.40 时,碱激发下锂渣复合水泥基浆体龄期 1 d 的化学结合水量高达 8.76% (掺量 20%) 和 7.26% (掺量 60%),相比于标准养护时分别提高了 20.1% 和 34.8%,相比于高温(50 °C)养护时分别提高了 23.5% 和 9.1%。低水胶比时,低掺量下浆体的化学结合水较大。在碱性环境的激发中,锂渣中以四面体形式存在的 $[\text{SiO}_4]$ 和 $[\text{AlO}_4]$ 解聚生成 $\text{H}_3\text{AlO}_4^{2-}$ 和 H_3SiO_4^- ,并与 Na^+ 和 Ca^{2+} 反应生成沸石类水化产物。因此,在早期其水化结合水量较高,同条件下高于高温(50 °C)养护。随着养护龄期延长,特别是 60~90 d 时,锂渣复合胶凝材料的化学结合水量增长趋势与标准养护几乎相同,略低于高温(50 °C)养护,即使不同水胶比的试样也存在相同趋势。这可能与浆体的水化产物有关,在水化后期,试样的水化产物含量也基本稳定,换言之,锂渣只有部分参与了二次水化反应,过多的锂渣只起到微集料填充效应。

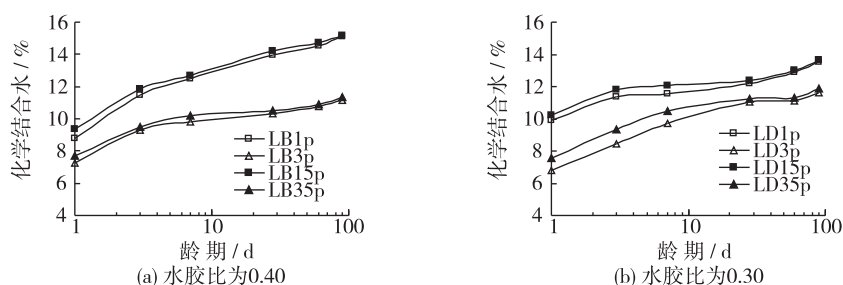


图3 碱环境激发和碱与高温(50℃)养护下锂渣复合胶凝材料的化学结合水量

Fig. 3 Combined water content of lithium slag composite binder under alkali activation and high temperature curing

2.1.4 碱激发与高温作用下的化学结合水量 碱激发与高温作用下锂渣复合胶凝材料的化学结合水量如图3。碱激发与高温作用下, LB15p 和 LB35p 的化学结合水量比标准养护 1 d 时提高了 29.1% 和 43.3%; LD15p 和 LD35p 的化学结合水量比标准养护 1 d 时提高了 28.5% 和 82.2%。可见碱激发与高温作用也能提高浆体早期的化学结合水量, 但对后期的影响较小(2% 以内)。对比单独碱激发或高温(50℃)养护发现, 复合作用下的化学结合水量较高, 但相差幅度并不是很大(3% 以内)。随着养护龄期延长, 特别是 7 d 以后, 3 种养护方式下的化学结合水量基本相同。因此, 在实际生产应用中, 为了提高混凝土早期性能, 可以考虑选择单独碱激发或高温养护或复合养护。

结合前述的试验结果发现, 养护方式对复合水泥浆体化学结合水量的影响大小顺序分别为: 高温和碱激发环境养护 > 碱激发 > 高温养护 > 标准养护。当掺量增大时, 锂渣的反应程度都有一定的提高^[4]。水胶比较高时, 复合作用的效果较高。原因在于, 水胶比高时, 水泥颗粒与水接触的机率增大, 促使锂渣的反应程度增大, 此时锂渣作为辅助胶凝材料有促进水泥水化的作用; 当其替代率低于 30% 时, 通常表现出延缓作用^[14]。

2.2 锂渣复合胶凝材料中水泥的水化程度

水泥是混凝土中主要的胶凝材料, 其水化程度能表征其水化机理。锂渣掺入后, 其水化机理变得复杂, 下面采用等效化学结合水量法来表征其锂渣复合水泥基材料中水泥的水化程度, 并计算其相对指数。

2.2.1 等效化学结合水量法 从前述研究不难发现, 掺锂渣后, 浆体的化学结合水量与纯水泥浆体不同, 因此, 采用掺锂渣浆体的化学结合水量评价水泥水化程度就不再适用。现采用等效化学结合水(式(1))和考虑锂渣反应程度的等效化学结合水(式(2))来计算。

$$\omega_{ne,C} = \omega_{ne} / (1 - f_{Li}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\omega_{ne,C} = \omega_{ne} / (1 - \alpha_{Li} f_{Li}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\omega_{ne,C}$ 为单位质量水泥所对应的化学结合水量(%); f_{Li} 为锂渣掺量(%); ω_{ne} 为锂渣复合胶凝材料的化学结合水量(%). α_{Li} 为锂渣反应程度(%). 经 HCl 溶解法测试出锂渣反应程度, 代入式(2)可得考虑锂渣反应程度的等效化学结合水, 如图4所示(编号为 LB1-1~LD3-1 为考虑锂渣反应程度的等效化学结合水)。

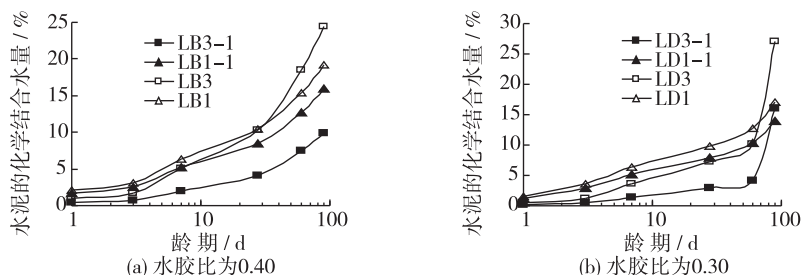


图4 考虑锂渣反应程度后水泥的化学结合水量

Fig. 4 Combined water content of cement considering reaction degree of lithium slag

从图4可见: 考虑锂渣的反应程度后, 各水胶比下复合胶凝材料中水泥的化学结合水量均比未考虑时要

小。水化 1 d 且水胶比为 0.40 和 0.30 时,掺 20% 和 60% 锂渣的复合胶凝材料中水泥的化学结合水量分别为未考虑锂渣反应程度时的 80% 和 40%,锂渣掺量越大,这种降低幅度就越大。

2.2.2 水泥水化程度的相对指数 定义锂渣复合胶凝材料中水泥水化程度的相对指数为单位质量水泥的化学结合水量与纯水泥浆体化学结合水量的比值,如式(3)所示。

$$\psi = \omega_{\text{ne,C}} / \omega_{\text{C}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ω_{C} 为纯水泥浆体的化学结合水量(%). 纯水泥浆体时 $\psi = 1$; $\psi > 1$ 时表示锂渣复合胶凝材料的化学结合水量较纯水泥浆体的化学结合水量高;反之, $\psi < 1$ 。

经式(3)计算,标准养护下不同锂渣掺量的 ψ 值如图 5 所示,从图 5 中可以看出:在 1~28 d, ψ 基本小于 1,锂渣掺量越大, ψ 值基本上就越小;水胶比变化时, ψ 值的增减趋势也不明显。这主要因为锂渣在早期就参与反应,进而降低了水泥的水化程度相对指数;白建飞等^[14]研究发现,锂渣掺量越大,水化放热温峰逐渐推后,在水化过程中可能存在“热催化作用”,使水胶比为 0.4, 14~28 d 时的 ψ 值出现了异常。养护 28 d 后, ψ 值基本大于或等于 1,掺量越大其水化程度相对指数越高,这是因为锂渣掺入起到稀释水泥的作用,锂渣掺量越大,其作用就越明显,而锂渣的反应程度有限,因此在后期水泥的水化程度就凸显出来。

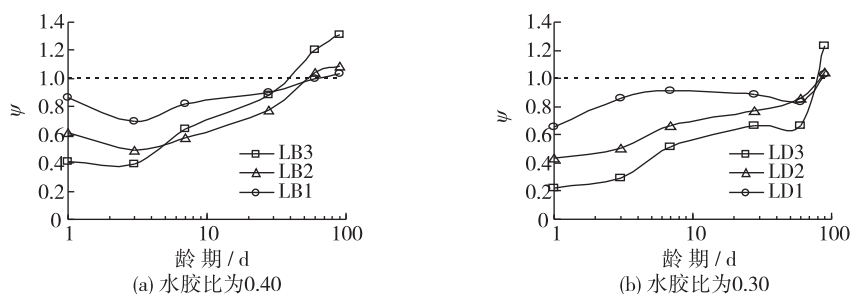


图 5 标准养护下水泥水化程度相对指数

Fig. 5 Reaction degree relative index of cement under standard curing

2.2.3 高温和复合环境养护下水泥水化程度相对指数 水泥水化程度相对指数在高温和复合环境养护下的试验结果如图 6 和 7 所示。高温和复合环境养护对水泥水化程度的影响较为显著,特别是 1~28 d 内,掺量在 40% 以内时, ψ 值均大于 1,且随养护龄期的延长呈降低的趋势,在高水胶比下掺量为 20% 时 ψ 值高达 3.6,但水胶比降低时,其值要小些,但其降低幅度较小(8% 以内),说明水胶比对其影响并不明显。锂渣掺量高达 60% 时,高温养护下水泥水化程度相对指数随养护龄期的延长逐渐增大,在 28 d 以内时, ψ 值均小于 1。但当采用高温和碱环境养护时,水胶比为 0.40 时的 ψ 值在 7 d 以后就超过 1,水胶比降低至 0.30 时 ψ 值的增长趋势有延后趋势。因此,若要提高水泥水化程度,可采用高温水浴养护或高温与碱环境复合养护。

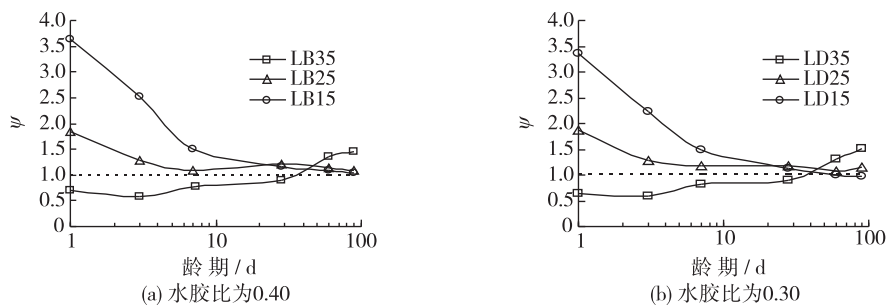


图 6 高温养护下水泥水化程度相对指数

Fig. 6 Reaction degree relative index of cement under high temperature curing

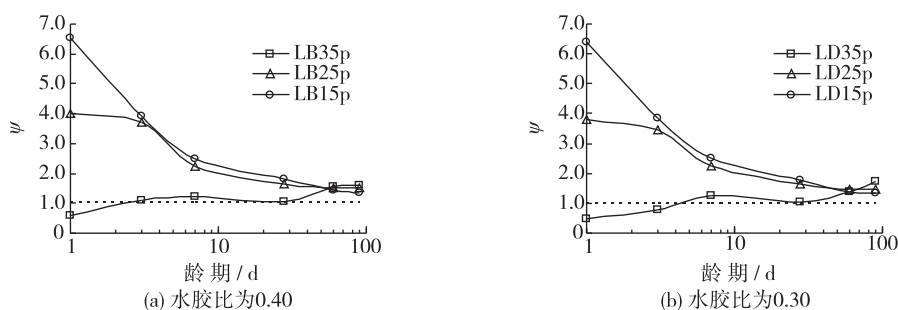


图7 复合养护下水泥水化程度相对指数

Fig. 7 Reaction degree relative index of cement under alkali activation and high temperature curing

3 结 语

锂渣复合胶凝材料的化学结合水量随龄期的延长而增大。在水化早期,特别是7 d前,各组试样化学结合水量的增幅较大,水化3和7 d时基本能达到水化90 d时的60%和80%以上,之后的增幅较为缓慢。

高温养护、碱激发、高温和碱激发均能提高锂渣复合水泥基材料早期的化学结合水量,最高可达3~4倍,但对后期影响较小(5%以内)。

用等效化学结合水量法计算低掺量下锂渣复合胶凝材料浆体中单位质量水泥的化学结合水量,结果表明,早期(1~28 d)时单位质量水泥的化学结合水量较小,随龄期的延长而增大,特别是60~90 d后,单位质量水泥的化学结合水量较大。

高温和复合环境养护对水泥水化程度的影响较为显著,特别是1~28 d内,锂渣掺量在40%以内时,ψ值均大于1,且随养护龄期的延长呈降低趋势。锂渣掺量为60%时,高温养护下水泥水化程度的相对指数随养护龄期的延长逐渐增大,在28 d以内时,ψ值均小于1。

参 考 文 献:

- [1] WU Fufei, SHI Kebin, DONG Shuangkuai. Influence of concrete with lithium-slag and steel slag by early curing conditions[J]. Key Engineering Materials, 2014, 599: 52-55.
- [2] 张兰芳. 高性能锂渣混凝土的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 877-880. (ZHANG Lanfang. Experiment study on high-performance lithium-slag concrete[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(6): 877-880. (in Chinese))
- [3] 吴福飞, 侍克斌, 董双快, 等. 掺合料和水胶比对水泥基材料水化产物和力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 119-126. (WU Fufei, SHI Kebin, DONG Shuangkuai, et al. Influence of admixture and water-cement ratio on hydration products and mechanical properties of cement-based materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(4): 119-126. (in Chinese))
- [4] 吴福飞, 董双快, 宫经伟, 等. 含掺合料胶凝材料水化产物体积分数计算及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 48-54. (WU Fufei, DONG Shuangkuai, GONG Jingwei, et al. Calculation of concrete with mineral admixture hydration products volume fraction and its influential factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 48-54. (in Chinese))
- [5] 张善德. 锂渣高性能混凝土强度预测及圆环法早期抗裂性试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011. (ZHANG Shande. Forecasting of lithium-slag high-performance concrete strength and ring method test on its early-age anti-crack capability[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011. (in Chinese))
- [6] 史才军. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 38-43. (SHI Caijun. Alkali activated cement concrete[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2008: 38-43. (in Chinese))
- [7] 阎培渝, 王强. 高温养护对钢渣复合胶凝材料早期水化性能的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6):

- 790-793. (YAN Peiyu, WANG Qiang. Effect of high temperature curing on the early hydration characteristics of a complex binder containing steel slag[J]. J Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2009, 49(6): 790-793. (in Chinese))
- [8] LIU Rengguang, DING Shidong, YAN Peiyu. The microstructure of hardened Portland cement-slag complex binder pastes cured under two different curing conditions[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(5): 610-618.
- [9] POON C S, QIAO X C, LIN Z S. Pozzolan properties of reject fly ash in blended cement pastes[J]. Cem Concr Res, 2003(33): 1857-1865.
- [10] GUIRADO F, GALI S, CHINCHON S. Quantitative rietveld analysis of aluminous cement clinker phases[J]. Cem Concr Res, 2000(30): 1023-1029.
- [11] ANGELES G, RUTH N, ANTONIO J M, et al. Crystal structure of low magnesium-content alite: application to rietveld quantitative phase analysis[J]. Cem Concr Res, 2008(38): 1261-1269.
- [12] 李响. 复合水泥基材料水化性能与浆体微观结构稳定性[D]. 北京: 清华大学, 2010. (LI Xiang. Hydration performance and microstructural stability of complex cementitious materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [13] 王强. 钢渣的胶凝性能及在复合胶凝材料水化硬化过程中的作用[D]. 北京: 清华大学, 2010. (WANG Qiang. Cementitious properties of steel slag and its role in the hydration and hardening process of complex binder[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [14] 白建飞, 李海桥, 李军全, 等. 锂渣粉在抹灰砂浆中的水化机理研究[C]//商品砂浆的科学与技术(第三部分固体废弃物资源化利用), 2009(9): 239-243. (BAI Jianfei, LI Haiqiao, LI Junquan, et al. Research on hydration mechanism of plasterer mortar with lithium residue power[C]//Science and Technical of Mortar (Third Part: Resource Utilize of Solid Waste), 2009(9): 239-243. (in Chinese))

Influences of different curing methods on cement-lithium slag slurry hydration degree

WU Fufei¹, GONG Jingwei², DONG Shuangkuai¹, CHEN Changli¹, ZHAO Zhenhua¹

(1. School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to analyze the hydration degree of the cement-lithium slag slurry, the chemically combined water is tested by high-temperature calcination at different ages. The testing results show that the chemically combined water of the cement-lithium slag slurry increases with prolongation of the age that can be able to achieve more than 60% and 80% for 90 d at 3 d and 7 d hydration degree, after then this increase becomes slower. The chemically combined water at 1 d is up to 3 to 4 times under the conditions of high temperature curing, alkali activation, high temperature and alkali activation (composite curing), which is better than standard curing. Relatively speaking, the effect of the 4 kinds of curing is in the order of composite curing > alkali activation > high temperature curing > standard curing. The chemically combined water of unit cement at 1 ~ 28 d is small by an equivalent chemically combined water method, the relative index (ψ value) of the cement hydration degree at 1 ~ 28 d is greater than 1 when the content of the lithium slag is less than 40%, and ψ value is less than 1 when the content of the lithium slag is 60% under high temperature curing and composite curing. In summary, the hydration degree of the cement and lithium slag can be improved by high temperature curing, alkali-activation and composite curing, and it is more significant in the composite curing period.

Key words: curing method; cement; lithium slag; hydration degree