



移动扫码阅读

李彦明,郭小阳,李称心,等. 煤矿采空区煤层气钻井施工堵漏液研制[J]. 煤炭科学技术,2019,47(9):152-157.doi:10.13199/j.cnki.est.2019.09.017

LI Yanming, GUO Xiaoyang, LI Chenxin, et al. Study and develop on leak plugging fluid for CBM drilling in goaf of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 152-157. doi: 10.13199/j.cnki.est.2019.09.017

煤矿采空区煤层气钻井施工堵漏液研制

李彦明^{1,2,3}, 郭小阳^{1,2}, 李称心³, 刘璐^{1,2}

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学),四川成都 610500;2.西南石油大学 石油与天然气工程学院,四川成都 610500;

3.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400039)

摘要:为解决在煤矿采空区施工煤层气井时出现的钻井液恶性漏失、掉块卡钻、下套管遇阻等问题,以采空区覆岩特征为研究基础,通过对比激活剂、悬浮剂及降失水剂的不同添加量对堵漏液性能的影响,确定了各添加剂的最优添加量,形成了一种具有固化功能的无机胶凝材料钻井堵漏液,其配方为:100%水+5%激活剂+0.5%悬浮剂+3%降失水剂+54%矿渣。该堵漏液在30℃条件下流动度为21cm,稠化时间在61 min以内,1 d抗压强度大于6 MPa,其性能指标满足煤矿区煤层气浅井堵漏要求。为进一步分析该堵漏液的作用机理,采用扫描电镜、X-射线及热重分析等现代测试分析方法对形成的固化体进行测试,结果表明:堵漏液中的胶凝材料与水接触后发生水化反应生成C—S—H凝胶,随着时间的增加,C—S—H凝胶越来越多,最终水化产物的结构越来越致密形成了较高的抗压强度。宏观表征即:具有良好流动性的堵漏液通过泵送进入地层裂缝,浆液填充裂缝直至裂缝被充满,随着水化反应的进行堵漏液逐步失去流动性,最终原裂隙发育地层形成一个胶结具有承压能力的整体,实现了堵漏。

关键词:煤层气;采空区;堵漏;矿渣;固化体

中图分类号:TE254

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)09-0152-06

Study and develop on leak plugging fluid for CBM drilling in goaf of coal mine

LI Yanming^{1,2,3}, GUO Xiaoyang^{1,2}, LI Chenxin², LIU Lu¹

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corporation Ltd., Chongqing 400039, China)

Abstract: The leakage of drilling fluid, block stuck, and casing resistance is a severe problem when constructing coalbed methane wells in coal mine gob. Based on the characteristics of overburden of gob, the ideal adding amount of each additive is determined by comparing the effects of different amount of activator, suspension concentrate, and fluid loss additive on the performance of plugging fluid. An inorganic cement solidifying drilling plugging solution is developed, the formula of which is 100% water, 5% activator (JHQ), 0.5% suspending agent (CMC), 3% fluid loss agent (G33S), and 54% slag. This drilling plugging fluid has fluidity of 21 cm at 30℃, thickening time within 61 min, and 1 d compressive strength of over 6 MPa. The performance parameters meet the requirements for plugging fluid used in shallow well in coal mines. To further analyze the mechanism of the plugging solution, the formed solidified body was tested using modern testing methods such as SEM, XRD, and thermal analysis. The results show that when contacting with water, hydration reaction occurred on the cementation material of plugging solution, producing C-S-H gelation which increases with time. The structure of the final hydration product becomes denser gradually, resulting in higher compressive strength. The whole process that the plugging fluid realizes plugging can be described as three steps—the plugging fluid with good fluidity is first pumped into the formation crack, filling the crack until full, then the plugging fluid gradually loses fluidity as the hydration reaction proceeds, and finally forms a cementation in the original fissure to realize plugging.

Key words: coalbed methane; gob; leaking stoppage; slag; solidified body

收稿日期:2019-05-21;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-007)

作者简介:李彦明(1980—),男,河北保定人,副研究员,博士研究生。

通讯简介:郭小阳(1951—),男,北京人,教授,博士生导师。E-mail:guoxiaoyangswpi@126.com

0 引言

煤炭作为我国长期以来的能源消费主体,经过几十年的不断开采,形成了大量煤矿采空区。受保护煤柱、遗煤、围岩和邻近煤层的煤层气不断向采空区解吸释放影响,煤矿采空区内蕴藏了丰富的煤层气资源^[1-2]。据中国工程院重点咨询项目“我国煤炭资源高效回收及节能战略研究”预测,预计到2020年,我国废弃矿井数量将达到12 000处,2030年将达到15 000处,而废弃矿井中赋存的非常规天然气(煤层气)近5 000亿m³。因此开发煤矿采空区的煤层气资源,不仅能拓展清洁能源来源,还能够降低温室效应^[3-4],符合我国目前的能源政策方向。

针对煤矿采空区丰富的煤层气资源,近几年多个煤炭企业开展了相关研究和现场试验^[5-7],从试验结果来看,由于煤矿采空区顶板上覆岩层受采动影响,产生大量裂隙,当采用泥浆工艺施工时,极易发生钻井液恶性漏失和掉块卡钻等事故,影响钻井安全;当采用空气钻进工艺施工时,受钻头冲击碎岩摩擦生热和空气循环影响,易引起采空区煤层气发生燃烧等事故,安全风险高;当采用氮气钻进工艺施工时,受制氮工艺影响,需要配置大量制氮设备,增加了钻井成本^[8]。此外,常规钻井工艺受采空区地层井壁不稳定影响,容易出现下套管遇阻问题。因此,受采空区地层和现有钻井工艺技术特点限制,目前煤矿采空区的煤层气资源开发进度受钻井技术制约较大。

基于此,笔者在立足煤矿采空区顶板覆岩特征和安全钻井要求的基础上,研究一种具有固化功能的无机胶凝材料堵漏液,以满足钻井过程的随钻堵漏要求,并最终为煤矿采空区新型泥浆钻井工艺开发奠定试验基础。

1 固化堵漏液

固化堵漏液是将固井与堵漏技术相结合发展起来的一种新工艺技术工作液,其作用原理是在基液中加入满足各功能要求的外添加剂,并通过调整其加入量多少,最终在目的层段实现触变,形成凝胶并填充裂隙空间,达到堵漏的目的^[9]。目前对于油气井钻进过程中的恶性漏失堵漏、固井具有明显成效^[10]。

通过调研,目前固化堵漏液多用于油气井施工:孔卫开等^[11]针对恶性漏失和垮塌地层开发出一种可固化工作液,该工作液以常规钻井液为基

础,不仅具有钻井液的良好性能,还具有一定的堵漏、封固能力。密度在1.25~1.96 g/cm³,温度在50~90 ℃适用。张林海等^[12]针对恶性漏失造成水泥浆低返问题,开发出一种具有可控固化特性的工作液,密度1.3~2.1 g/cm³,温度30~90 ℃适用。李早元等^[13]研究出一种低密度(1.3 g/cm³)可固化防漏工作液,并分析了该体系固化体的强度及水化机理,解决了低压漏失井段固井难题。赵启阳等^[14]针对川东地区钻井易漏失问题,室内研制出一种可固化堵漏工作液,解决了传统桥塞堵漏技术承压能力低的缺点,弥补了水泥浆堵漏时的化学不相容的危险,密度在1.3~2.0 g/cm³,温度在50~70 ℃时适用。

通过分析可知,针对原生裂隙发育地层的油气井堵漏施工,现有固化堵漏液研究成果较多,但多数情况适用于较高的井温和钻井液密度^[15]。对于煤矿采空区这种井浅、普遍温度不高和次生裂隙极其发育的地层情况,有关固化堵漏液的开发尚未见报道。因此,笔者针对采空区地层特点,通过胶凝材料、外添加剂的选择以及实验室性能测试等手段,开发一种满足煤层气浅井、低温、低密度、早强的固化堵漏液体系。

2 试验

2.1 试验材料

1)基于煤层气井堵漏要求并兼顾材料成本,固化堵漏液的胶凝材料选择高炉矿渣^[16]。

2)通过对不同激活剂对矿渣的激活效果,选用的激活剂为碱金属氢氧化物(JHQ)^[17]。

3)通过对不同悬浮剂对矿渣的沉降性能,选用的悬浮剂为羧甲基纤维素钠(CMC)^[18]。

4)通过对不同降失水剂对矿渣的失水性能,选用的降失水剂为多元共聚物(G33S)^[19]。

5)实验室配置基浆直接选用自来水。

2.2 试验仪器及试验方法

为满足实验室固化堵漏液配置和性能测试需要,研究采用的试验仪器见表1。试验方法如下:

1)配制方法。针对煤矿采空区上覆岩层存在大量裂缝的情况,从钻井堵漏角度考虑,低密度堵漏液流动性好,在泵压和液柱压力双重作用下容易向井筒外大面积扩散,增大材料用量。而高密度堵漏液流动性差,不利于达到局部固化的要求。因此,综合考虑各方面影响因素,按1.4 g/cm³的堵漏液密度进行试验。

表1 试验仪器

Table 1 Experimental apparatus

仪器	型号
水泥浆恒速搅拌器	TG-3060
常压稠化仪	OWC-9350A
电子液压式压力实验机	YA-300
密度计	ZNB
恒温水浴锅	HH-8
X射线衍射仪	XPert MPD PRO
X射线荧光光谱分析仪	Zetium Cement editio
环境扫描电子显微镜	Quanta450型
傅里叶红外光谱仪	NICOLET 6700
热重分析仪	SDTA85型

首先根据试验设计配置基浆,配方:100%水+54%矿渣(本文所涉及配方均是按质量配比,水的质量设为100%,其他添加剂以水为基准参考值)。然后在此基础上通过调整激活剂、悬浮剂、降失水剂各单剂的添加量,并测试相关性能,获得各单剂的最佳加入量。最终再通过基浆与各添加剂的复配,得到满足堵漏要求的试验配方。

2)测试方法。将按要求配制好的固化堵漏液倒入抗压模具中进行养护。养护条件为:常压下,将模具置于温度 30 ± 1 ℃恒温水浴锅中养护。之后参照有关标准^[20-21]对养护1、3、7 d的固化体进行力学性能测试,主要包括:采用压力试验机测试抗压强度,采用X射线衍射仪、X射线荧光光谱分析仪配合环境扫描电子显微镜对固化体进行物相分析,采用热重分析仪进行热重变化分析。

3 试验结果与分析

3.1 添加剂单剂性能测试与分析

3.1.1 激活剂优选

在堵漏液基浆配方基础上,进行激活剂(JHQ)3种不同添加量试验,并测试其激活效果,结果如图1所示。

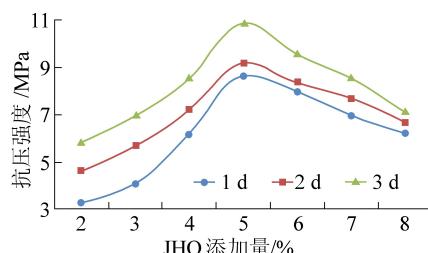


图1 JHQ不同添加量的激活效果

Fig.1 Activation effect of different dosage of HQ

由图1数据可知,随着激活剂添加量的增加,固化体抗压强度先增大后减少,当激活剂添加量为5%时其抗压强度最高,1 d和3 d分别达到8.64 MPa和10.87 MPa;随着养护时间增加,固化体抗压强度呈增大趋势,3 d养护比1 d养护普遍高2 MPa以上。

由此分析可知,激活剂添加量不同,其与矿渣的化学反应效果不同,在最优添加量时(5%),二者的化学反应最充分;同时激活剂与矿渣的化学反应较为缓慢,随着养护时间增加,二者的化学反应效果趋于更优。以上结果的宏观表现即固化体的抗压强度逐步增大。

3.1.2 悬浮剂优选

在堵漏液基浆配方基础上,进行悬浮稳定剂(CMC)4种不同添加量试验,并测试其悬浮稳定性效果,结果见表2。

表2 悬浮剂的悬浮稳定性效果

Table 2 Suspension stability effect of suspension agent

添加量/%	上层密度/ (g·cm ⁻³)	下层密度/ (g·cm ⁻³)	密度差/ (g·cm ⁻³)	沉降稳定性
0.2	1.36	1.44	0.08	差
0.3	1.38	1.43	0.05	差
0.4	1.39	1.42	0.03	一般
0.5	1.40	1.40	0	好

由表2可知,悬浮剂CMC添加量为0.2%、0.3%、0.4%时,在基浆静置2 h后,上层与下层浆体均存在密度差,当添加量增至0.5%时,基浆上下层密度均一,未出现沉降现象,由此确定CMC的最佳添加量为0.5%。

3.1.3 降失水剂优选

在堵漏液基浆配方基础上,进行降失水剂(G33S)4种不同添加量试验,并测试其悬浮稳定性效果。降失水剂添加量分别为1%、2%、3%、4%时,失水量分别为122、103、82、76 mL。

随着降失水剂添加量的增大,基浆的失水量逐渐降低,但综合考虑失水性能及药品成本,本研究选取添加量3%的G33S作为降失水剂,能够有效控制失水量在100 mL以内。

3.1.4 固化堵漏液复配测试

在进行添加剂单剂优选分析的基础上,最后进行基浆与各添加剂的复配,配方为:100%水+0.5%悬浮剂(CMC)+5%激活剂(JHQ)+3%降失水剂(G33S)+54%矿渣。通过试验仪器测试其流动性、稠化时间、抗压强度等指标,结果见表3。

由图3可知,矿渣被激活后经过1 d水化形成的固化体,其产物主要为C-S-H凝胶、沸石类矿物。而水化7 d后,除了C-S-H凝胶和沸石类矿物,水化产物还出现了莫来石成分。

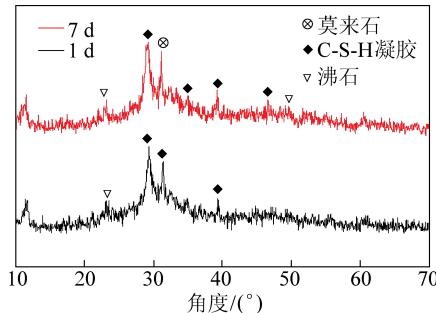


图3 不同养护时间固化体的成分测试

Fig.3 Solidified body composition test at different curing time

3.2.3 TG-DSC热分析

为进一步揭示固化体随时间推移水化反应时凝胶成分的变化规律,将养护1 d和7 d的固化体进行TG-DSC检测,结果如图4所示。

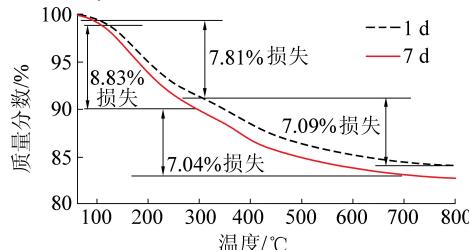


图4 固化体TG-DSC热分析

Fig.4 TG-DSC thermal analysis of solidified body

如图4所示,TG曲线主要对应C-S-H凝胶的脱水。对比发现,矿渣水化1 d和7 d形成的固化体,其失重率分别为7.81%、8.83%,说明水化7 d形成的固化体中C-S-H更多。同时在300~700 ℃区段,两曲线下降值几乎相等,说明固化体中沸石类矿物的结晶水脱水导致的质量损失相差不大,可以判断固化体水化1 d和7 d产生的沸石类矿物数量相近。由此可见,随着养护时间增加,矿渣水化反应更充分,固化体中C-S-H数量增加。

3.3 固化堵漏作用原理

碱激发矿渣胶凝材料具有水化热低、力学性能发展快等优异性能。矿渣与水接触后,其表面发生轻微的水化反应,生成C-S-H凝胶。矿渣玻璃体表面的保护膜阻止水进入玻璃体内部,而内部的离子又不能渗出,水化反应被阻止。矿渣玻璃体包括富钙相和少量的富硅相。富钙相中Ca—O、Mg—O键比Si—O键弱很多,且热力学稳定性差,故富钙相的水硬活性远高于富硅相。碱的加入提供了大量的OH⁻,故矿渣在水化反应初期以富钙相的迅速水化

和解体为主,矿渣富钙相中的Ca²⁺和Mg²⁺与OH⁻反应生成Ca(OH)₂和Mg(OH)₂,破坏了玻璃体表面结构,促进矿渣水化反应持续进行。激活剂中的阳离子Na⁺替换Ca²⁺、Mg²⁺,连接在Si—O键上,促使玻璃体结构的破坏、分解、溶解。部分富钙相脱离原结构,充填在水化产物的空隙中。随着富硅相的继续水化,其水化产物填充于富钙相水化产物间隙,使得水化产物结构愈来愈致密,宏观表现为矿渣固化体强度的不断增加^[22-24]。

本文固化堵漏液采用较高的水灰比,这是堵漏液初始浆体具有高流动度的主要原因^[25]。降失水剂具有一定的黏度,但添加量较低,对浆体流动度影响不大。水化反应的进行需要一定的时间,固化堵漏液在向地层裂缝流动过程中需保持良好的流动性,流到一定距离后,浆液填充裂缝直至裂缝被充满,浆体逐渐变稠直至形成固化体。随着静置时间的增加,裂缝中填充的固化体内部持续反应并不断生产凝胶,使得固化体组织越发致密,固化体抗压强度不断提高。

由此可见,固化堵漏液既能满足流动性,又能短时间起强度,钻井过程可以阻止堵漏液进一步向采空区地层深处流失,因此对于采空区裂隙地层,可以实现钻井过程中局部区域的固化堵漏,为后续的安全钻井奠定了基础。

4 结论与展望

1)通过调整激活剂、悬浮剂、降失水剂3种单剂的不同添加量,并根据性能测试结果可知,各单剂的最佳加入量分别为:5%激活剂(JHQ)、0.5%悬浮剂(CMC)、3%降失水剂(G33S),各种性能满足堵漏要求。

2)堵漏液实现堵漏的本质是:碱性环境为具有潜在活性的矿渣提供大量的OH⁻,促使玻璃体的分解重组从而形成具有较高强度的固化体。

3)通过在实验室进行配方试验和性能检测可知,开发的固化堵漏液在较低温度和密度条件下,能够实现一定范围内的流动并起强度,理论上满足裂隙地层的堵漏要求。但煤矿采空区的真实地层情况较为复杂,下一步需尽快到现场进行堵漏试验,以检验实际效果。如果该堵漏液能够实现采空区地层的堵漏,则必将为煤矿采空区煤层气资源的开发开创新的工艺途径。

参考文献(References):

- [1] 尹志胜,桑树勋,周效志.煤炭资源枯竭矿井煤层气运移及富集规律研究[J].特种油气藏,2014,21(5):48-51.

- YIN Zhisheng, SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi. Study on migration and enrichment regularities of CBM in exhausted coal [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(5): 48-51.
- [2] 李日富.煤矿采动稳定区煤层气资源量“间接扣减”评估方法及其应用[J].煤矿安全, 2018, 49(4): 160-164.
- LI Rifu. "Indirect Deduction" assessment method and application for CBM resources in coal mining stability area. [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(4): 160-164.
- [3] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 14-20.
- [4] 叶汝陵,苏文叔.煤矿煤层气排放对大气的污染及对策[J].矿业安全与环保, 1999, 26(1): 1-5.
- YE Ruling, SU Wenshu. Pollution of atmosphere by coalbed gas emitted from coal mines and the countermeasures [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 1999, 26(1): 1-5.
- [5] 李国君,刘长久.铁法矿区地面垂直采空区井技术[J].中国煤层气, 2005, 2(4): 7-10.
- LI Guojun, LIU Changjiu. Surface vertical goafwell technology in Tiefamining area [J]. China Coalbed Methane, 2005, 2(4): 7-10.
- [6] 李俊峰.晋城矿区过采空区钻井抽采煤层气可行性分析[J].能源技术与管理, 2014, 39(3): 4-6.
- LI Junfeng. Feasibility analysis of drilling and extracting coalbed methane from mined-out areas in Jincheng mining area [J]. Energy Technology and Management, 2014, 39(3): 4-6.
- [7] 王永东,徐岗,宋鹏军.子长油田煤炭采空区定向井钻井技术[J].石油钻采工艺, 2012, 34(5): 15-18.
- WANG Yongdong, XU Gang, SONG Pengjun. Directional well drilling technology in coal goaf of Zichang Oilfield [J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2012, 34(5): 15-18.
- [8] 王森.注氮过采空区钻井技术研究[J].煤, 2018, 27(6): 66-68.
- WANG Sen. Study on drilling technology of nitrogen injection over goaf [J]. Coal, 2018, 27(6): 66-68.
- [9] 吴奇兵.可固化堵漏工作液体系研究与应用[D].成都:西南石油大学, 2012.
- [10] 焦少卿,赵朝霞,周回生,等.一种新型超低密度堵漏液的室内研究[J].钻井液与完井液, 2009, 26(6): 31-36.
- JIAO Shaoqing, ZHAO Zhaoxia, ZHOU Huisheng, et al. In-house study of a new type of ultra-low density plugging fluid [J]. Drilling Fluids & Completion Fluids, 2009, 26(6): 31-36.
- [11] 孔卫开,徐可一,舒智.新型可固化工作液的室内研究[J].探矿工程, 2012, 39(7): 9-13.
- KONG Weikai, XU Keyi, SHU Zhi. Indoor research on a new curable working fluid [J]. Exploration Engineering, 2012, 39(7): 9-13.
- [12] 张林海,郭小阳,李早元,等.一种提高注水泥质量的可固化工作液体系研究[J].西南石油大学学报, 2007, 29(11): 85-88.
- ZHANG Linhai, GUO Xiaoyang, LI Zaoyuan, et al. A study of the solidified working liquid system for improving the quality of cement injection [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(11): 85-88.
- [13] 李早元,周靖东,邓智中,等.一种可固化防漏工作液水化机理研究[J].钻井液与完井液, 2017, 34(2): 93-98.
- LI Zaoyuan, ZHOU Jingdong, DENG Zhizhong, et al. Study on hydration mechanism of a curable leak proof working fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2017, 34(2): 93-98.
- [14] 赵启阳,邓慧,王伟,等.一种可固化堵漏工作液的室内研究[J].钻井液与完井液, 2013, 30(1): 41-44.
- ZHAO Qiyang, DENG Hui, WANG Wei, et al. An indoor research on solidified plugging fluid [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2013, 30(1): 41-44.
- [15] 徐同台,刘玉杰,申威,等.钻井工程防漏堵漏技术[M].北京:石油工业出版社, 1997.
- [16] 刘璐.以矿渣为胶凝材料的低密度固井液体系及其性能改善研究[D].成都:西南石油大学, 2017.
- [17] 邓智中.矿渣可固化堵漏液的碱激发硬化特性研究及应用[D].成都:西南石油大学, 2017.
- [18] 卢前明,王震,张瑞林,等.化学外添加剂对粉煤灰-矿渣-水泥胶凝体系的激发作用[J].硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2516-2521.
- LU Qianming, WANG Zhen, ZHANG Ruilin, et al. Excitation function of chemical admixture on fly ash-slag-cementitious system [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2516-2521.
- [19] 艾贵成,田群山,吴天师.抗盐降失水剂G33S在酒东深井固井中的应用[J].西部探矿工程, 2013(2): 78-79.
- AI Guicheng, TIAN Qunshan, WU Tianshi. Application of salt-resistant water loss agent G33S in cementing well of Jiudong well [J]. West-China Exploration Engineering, 2013(2): 78-79.
- [20] GB/T 19139—2012, 油井水泥试验方法[S].
- [21] GB/T 7897—2008, 钢丝网水泥用砂浆力学性能实验方法[S].
- [22] 孔祥文,王丹,隋智通.矿渣胶凝材料的活化机理及高效激发剂[J].中国资源综合利用, 2004(6): 22-26.
- KONG Xiangwen, WANG Dan, SUI Zhitong. The activated mechanism and the best activator of slag activated cement [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2004(6): 22-26.
- [23] 孙家瑛,诸培南,吴初航.矿渣在碱性溶液激发下的水化机理探讨[J].硅酸盐通报, 1988, 7(6): 20-29.
- SUN Jiaying, ZHU Peinan, WU Chuhang. Study on hydration mechanism of slag excited by alkaline solution [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1988, 7(6): 20-29.
- [24] 廖佳庆.碱矿渣水泥与混凝土化学收缩和干缩行为研究[D].重庆:重庆大学, 2007.
- [25] 余俊辉,詹镇峰,李兆恒,等.水灰比对无机聚合物胶凝材料浆体流变性能的影响[J].混凝土, 2017(8): 37-41.
- SHE Junhui, ZHAN Zhenfeng, LI Zhaocheng, et al. Effects of water to cement ratio on the rheological property of geopolymers [J]. Concrete, 2017(8): 37-41.