

高温下水泥基注浆材料性能试验研究*

史志杰¹, 范利丹¹, 宋妍², 余永强¹, 李开放¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中铁隧道勘测设计研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对近年来不断出现的高地温条件下注浆堵水加固问题, 在室内模拟高温环境, 测试减水剂比例一定时, 不同水灰比和膨润土掺量的浆液在不同温度下的凝结时间、黏度、析水率和抗压强度。结果表明: 温度升高和膨润土掺量增加都使浆液凝结时间缩短、析水率降低, 并使水灰比 0.8 的浆液黏度呈升高趋势, 但对 1.0 和 1.2 的较高水灰比浆液影响不大; 在 20 ℃ 和 40 ℃ 下, 浆液随温度升高和龄期增长, 结石体抗压强度不断增大, 而在 60 ℃ 和 80 ℃ 的较高温度下, 后期结石体强度会降低, 且掺加膨润土会进一步降低强度。综合考虑浆液各方面性能, 认为水灰比 0.8 时, 在低于 40 ℃ 环境下, 膨润土掺量为 6% 较好, 温度升高, 则掺量为 3% 比较适宜; 对于水灰比 1.0 和 1.2 的浆液, 膨润土掺量为 9% 较为合适。

关键词: 水泥基浆材; 温度; 水灰比; 膨润土; 浆液性能

中图分类号: U454

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-0974-07

Study on Properties of Cement-based Grouting Material in High Temperature

Shi Zhijie¹, Fan Lidan¹, Song Yan², Yu Yongqiang¹, Li Kaifang¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P.R.China;
2. Survey, Design and Research Institute of China Railway Tunnel Group, Luoyang, Henan 471009, P.R.China)

Abstract: In view of the emerging issues of grouting in geothermal field recently, the main properties of cement grout mixed with bentonite and water reducing agent were researched through simulate high geothermal environment in the laboratory. The properties including setting time, viscosity, syneresis ratio and compressive strength of the grout with different water-cement ratios, different proportions of bentonite and certain proportion of water reducing agent, were tested in different temperatures. According to the study, with the temperature and the content of bentonite increasing the sitting time and the syneresis ratio reduce, and the viscosity of grout with water-cement ratio of 0.8 increases gradually, nevertheless, the viscosity of grout with water-cement ratios of 1.0 and 1.2 changes little. At low temperature of 20℃ and 40℃, the compressive strength improves with the temperature and the curing age increasing, while the long-term compressive strength decreases at high temperature of 60℃ and 80℃, and bentonite can reduce the compressive strength further. For the grout with water-cement ratio of 0.8, the appropriate content of bentonite is 6% under the of temperature 40℃, and 3% as the temperature rises. For the grout with water-cement ratio of 1.0 and 1.2, the suitable content of bentonite is 6%.

Keywords: cement-based grouting material; temperature; water-cement ratio; bentonite; property of grouting

* 收稿日期: 2017-12-20(修改稿)

作者简介: 史志杰(1990-), 男, 河南焦作人, 硕士生, 主要从事注浆方面的研究。E-mail: 530552505@qq.com

通信作者: 范利丹(1982-), 女, 河南濮阳人, 硕士, 讲师, 主要从事建筑新型材料和地下工程支护方面的研究。

E-mail: lidanfan@hpu.edu.cn

基金项目: 中铁隧道集团有限公司科技创新计划项目(H14-233); 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室开放基金(2014KF-02)

0 引言

随着注浆技术在路基处理、巷道围岩加固、矿井防治水、煤矿开采等工程中越来越广泛应用^[1-3],人们对注浆材料的研究也越来越成熟^[4-7]。近些年,为适应国民经济快速发展的趋势,西部地区公路、铁路及隧道建设的步伐日益加快,长大深埋隧道项目不断增多,与此同时,矿井开采深度进一步加大,都不可避免地遇到高地温热害问题。例如,高黎贡山隧道越岭地段地下水水温 25~108℃^[8];拉萨—日喀则铁路隧道,最高岩温约为 60℃,最高裂隙水温达 80℃^[9];徐州三河尖矿岩温高达 40℃以上^[10]。高地温地质条件下的注浆施工,不仅是注浆工艺方面需要克服的课题,也将促使高地温环境下注浆材料的研究开发。针对高地温注浆堵水加固,水泥-水玻璃双浆液的研究表明,其凝胶时间短,易造成堵孔,并且浆液胶结后呈果冻或豆腐渣状^[11];普通水泥净浆在较高温度的力学性能表现较好,但浆液析水率较大且凝结时间过长^[12];也有研究关注聚氨酯注浆材料在不同温度下的抗压强度,发现浆材在密度一定的情况下,其强度随温度升高而降低^[13]。目前,对适宜于高地温条件下注浆材料及其性能的研究,国内外文献还鲜有报道。

本研究采用来源丰富、价格低廉且注浆施工中采用较多的普通水泥浆,加入膨润土以改善浆液的稳定性,添加减水剂以降低浆液黏度,研究了不同水灰比以及膨润土掺量的浆液在不同温度下的凝结时间、黏度、析水率和抗压强度,以期为高地温条件下注浆施工提供一定的借鉴。

1 试验方案

1.1 试验材料

采用河南中晶水泥有限公司生产的 P·O 42.5 水泥,性能指标满足国家规范要求;膨润土采用河南信阳钠基膨润土;减水剂采用郑州美亚化工产品有限公司的聚羧酸高效减水剂;采用自来水。

1.2 试验配比设计

膨润土是以蒙脱石为主要成分的黏土,可作为悬浮剂添加于水泥浆液中改善浆液稳定性。聚羧酸高效减水剂具有改善浆液流动性、增加结石体强度和提高了抗渗性等特点。经前期试验探索,本文分别按照水灰比(w/c)0.8、1.0、1.2,膨润土掺量为水泥质量的 0%、3%、6%、9%、12%,减水剂掺量皆

为水泥质量的 0.2% 配制 15 组不同配比浆液,对比分析各浆液在不同温度(20℃、40℃、60℃、80℃)环境的凝结时间、黏度、析水率和抗压强度。

1.3 试验方法

(1)凝结时间:按照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011),将搅拌好的浆液倒入自行设计的水浴保护套中^[12],并放入不同温度的恒温水浴锅中,利用维卡仪测试浆液的初、终凝时间。

(2)黏度:采用相应温度保温的水泥和膨润土,以及相应温度的自来水配制浆液,用 JND-1006 型黏度计测定流出浆液所用的时间,即黏度,单位为秒(s)。

(3)析水率:将用相应温度的自来水搅拌好的浆液倒入 250 mL 量筒内,并放入相应温度的恒温水浴锅中,分别测试各浆液析水稳定时间以及 2 h 时的析水率:

$$P = V_1/V_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: P 为浆液析水率,%; V_1 为静置后析出水的体积,mL; V_0 为初始浆液总体积,mL。

(4)抗压强度:①按照 1.2 中的配比配制浆液,经搅拌机搅拌(低速 120 s,高速 120 s);②将搅拌均匀的浆液倒入 40 mm×40 mm×160 mm 三联试模中;③分别放入 20℃、40℃、60℃和 80℃的养护箱中养护 24 h 后拆模(其中 20℃采用的标准养护箱,高温养护采用 JYZ-700 型混凝土加速养护箱);④分别继续养护至 3 d、7 d、14 d 和 28 d;⑤采用 NYL-300 型压力实验机进行抗压强度测试。

2 试验结果及分析

2.1 浆液凝结时间

凝结时间是指水泥水化反应所需的时间,其长短表示浆液产生强度的快慢,初凝时间越短,表示产生强度越早。注浆液的初、终凝时间决定了注浆液的可操作性与可泵性。图 1 为不同温度下浆液凝结时间随膨润土掺量变化曲线。

由图 1 可知,当水灰比和膨润土掺量一定,温度由 20℃增加到 40℃时,浆液的初、终凝时间都缩短且缩短幅度较大,而随着温度的继续升高,浆液的初、终凝时间也随之缩短,但缩短幅度已不明显。温度升高浆液凝结时间缩短,是因为在高温条件下,水泥水化速率加快,水化产物快速沉淀带来的。

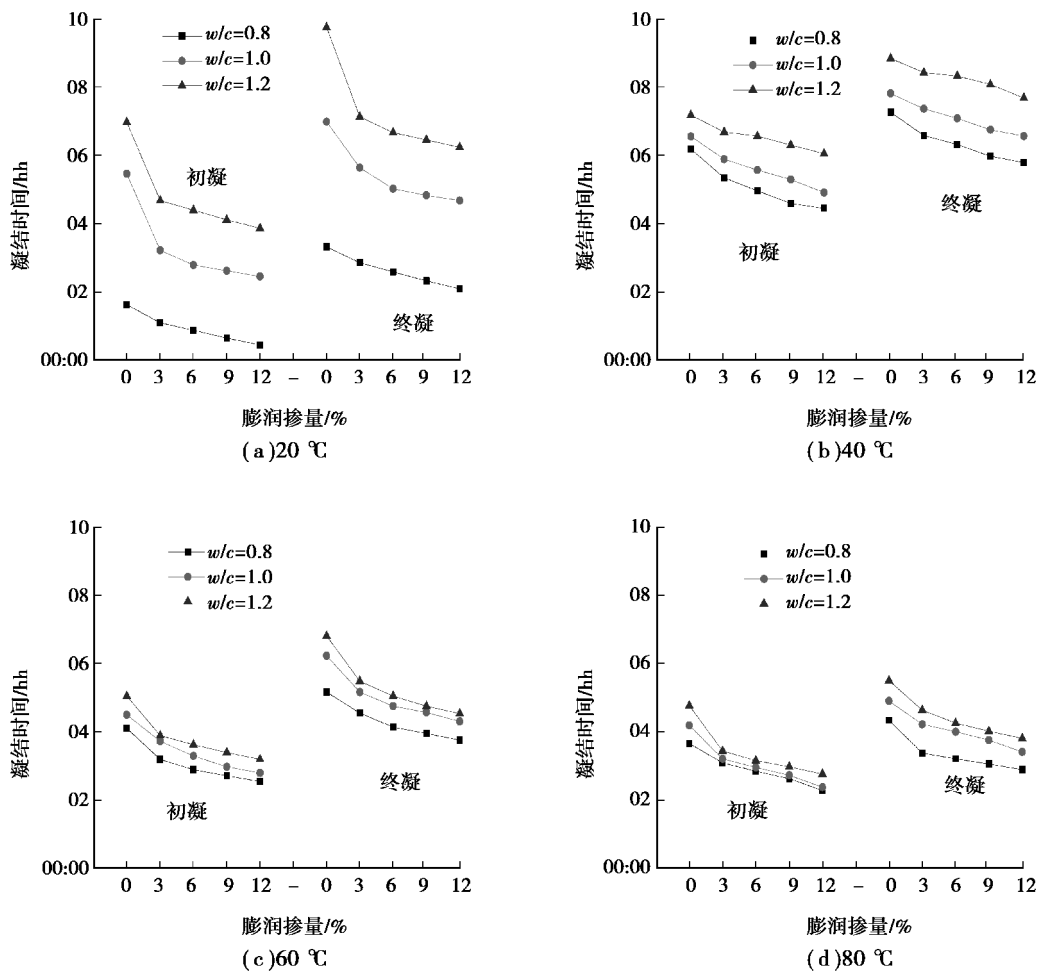


图1 不同温度下浆液凝结时间

Fig. 1 Setting time of cement grout in different temperature

膨润土掺量和温度一定时,随着水灰比的增大,浆液的初、终凝时间逐渐增长。但 60 °C 和 80 °C 的各水灰比浆液,初、终凝时间相差不大,也就说明高地温环境注浆,仅改变水灰比,难以调节凝结速度,还需采用早强剂或缓凝剂等外加剂调节。

水灰比和温度一定时,膨润土掺量由 0% 增加到 3% 时,浆液的凝结时间(尤其是初凝时间)有较大幅度缩短,这是因为膨润土的加入起到了增稠作用,降低了水泥水化产物相互搭结、贯穿所需时间。而后随着膨润土掺量的增加,浆液的初、终凝时间也随之缩短,但缩短幅度明显减小。

2.2 浆液黏度

浆液黏度代表浆液的流变性,是浆液流动时内部所产生的内摩擦力,其大小直接影响注浆效果的好坏。因此,经常将浆液黏度作为注浆材料重要的控制指标之一。图 2 为不同温度下浆液黏度变化曲线,其中,膨润土掺量较高时缺少黏度数据,是因

为其值过大,无法测取。

从图 2 可以看出,不同温度条件下各水灰比的浆液,其黏度都随膨润土掺量的增加而增大,当水灰比 0.8 时,浆液黏度随膨润土掺量增加增幅较大,而水灰比 1.0 和 1.2 的浆液,浆液黏度已相差无几,黏度随膨润土掺量增加和温度升高增幅都较小。也就表明,注浆施工中,若需调节浆液黏度,需要在水灰比小于 1.0 的范围内实施。

此外,对于水灰比 0.8 的浆液,在 20 °C 和 40 °C 条件下,当膨润土掺量为 12% 时,浆液呈液滴状从漏斗黏度计滴落,无法测定,说明此时浆液黏度已经很大;而在 60 °C 和 80 °C 条件下,当膨润土掺量为 9% 时,浆液黏度就已经无法测取,说明温度对水灰比 0.8 的水泥-膨润土浆液黏度影响较大。有研究表明,对于水泥净浆,水灰比在 0.6 时,温度的变化才会对之产生较大影响^[12],说明膨润土的加入提高了这一阈值。

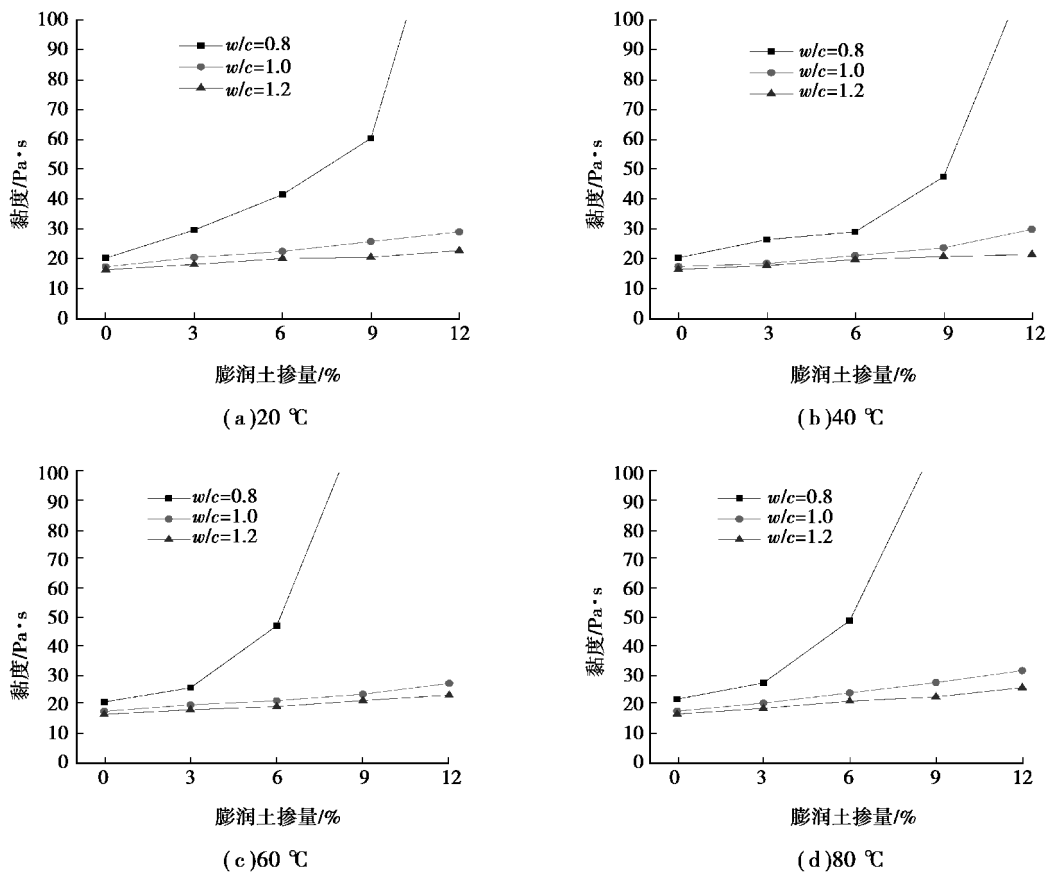


图 2 不同温度下浆液的黏度

Fig. 2 Viscosity of cement grout in different temperature

2.3 浆液析水率

浆液析水率是指浆液在静置条件下因固体颗粒沉淀而析出水的比率,其大小直接关系到充填加固效果。析水率越小,浆液稳定性越好,一般认为 2 h 析水率不大于 5% 的浆液即为稳定浆液。

由试验得出,不同温度下各水灰比浆液稳定时所需的时间不同,表现为随温度升高,浆液析水稳定所需时间缩短;而同温度下,即使膨润土掺量不同、水灰比不同的浆液,析水稳定所需的时间也大体相同,即温度是影响浆液析水稳定所需时间的主要因素,具体见表 1。

图 3 是不同温度下浆液析水率随膨润土掺量变化曲线。可以看出,水灰比和膨润土掺量一定时,浆液析水率随温度升高呈降低趋势,在温度低于 60 °C 时,降低幅度较大,而温度高于 60 °C 时,降低趋势不明显。这是由于高温下分子扩散运动更加剧烈,从而在一定程度上降低浆液析水率,而当温度达到一定值之后,分子扩散运动剧烈程度增加

缓慢,体现为浆液析水率降低幅度减小。

表 1 浆液稳定所需时间

Table 1 Time required for cement grout stability		
温度/(°C)	水灰比	稳定时间/min
20	0.8	>120
	1.0	>120
	1.2	>120
40	0.8	<60
	1.0	<60
	1.2	<60
60	0.8	<30
	1.0	<30
	1.2	<30
80	0.8	<15
	1.0	<30
	1.2	<30

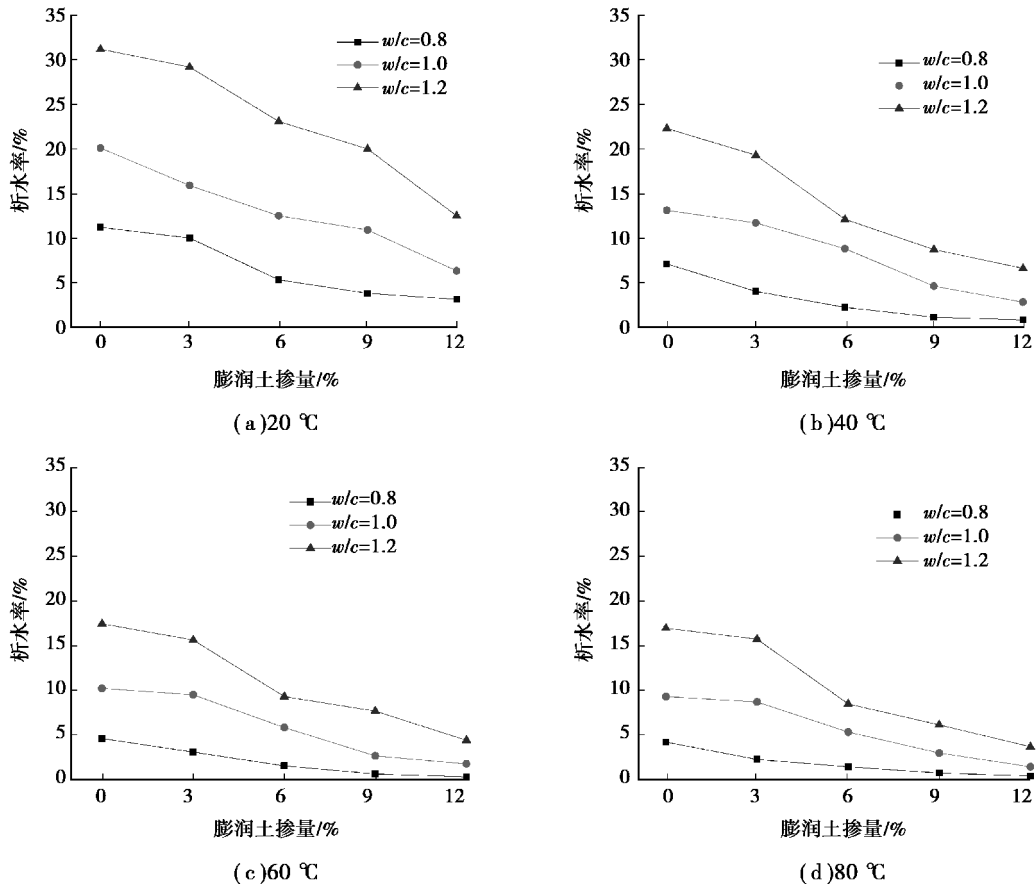


图 3 不同温度下浆液稳定时的析水率

Fig. 3 Syneresis ratio of stabilizing cement grout in different temperature

当温度和膨润土掺量一定时,浆液的析水率随水灰比增大而增大;温度和水灰比一定时,浆液析水率随膨润土掺量的增加而减小,这是因为膨润土有极强的吸附性,可以吸附体系中的自由水且悬浮于浆液中,使浆液析水率减小。

2.4 结石体强度

结石体强度是指注浆材料凝结硬化后,所形成的结石体具有的抗压强度。浆液结石体强度决定了浆液对地下涌水的封堵能力和结石体的长期稳定性。

由试验得出,在温度和膨润土掺量一定时,结石体抗压强度随水灰比增大而减小,且不同水灰比浆液结石体抗压强度随温度和膨润土掺量变化趋势相同,所以在此重点分析水灰比为 0.8 的浆液结石体抗压强度。各温度下不同膨润土掺量的浆液结石体抗压强度变化曲线如图 4 所示。

可以看出,当浆液配比一定时,其 3 d 强度随着温度的升高而增加。在 20 °C 和 40 °C 环境下,各浆液随着龄期的增长,结石体抗压强度逐渐增强;当温度为 60 °C 时,14 d 龄期之后,强度呈递减趋势;当温度升至 80 °C 时,浆液强度在 3 d 达到最

高,之后随着龄期的增加,强度不断降低,这是因为在较高的温度下,水泥凝结硬化非常迅速,短时间内水化已达到较高程度,强度发展较大,但因为较高温度下水化产物没有足够的时间有序沉淀,水化产物搭接错乱,体系中有较多的粗糙孔隙系统^[14],还可能由于水化产物中的氢氧化钙和高硫型水化硫铝酸钙快速形成,体积膨胀,产生破坏作用,从而导致结石体强度降低。

在 20 °C 的较低温度条件下,掺膨润土的浆液在各个养护龄期内的抗压强度都比不掺膨润土的浆液抗压强度高,这应该是除了生成水泥水化产物之外,膨润土活性成分和水泥水化产物发生硬凝反应的生成物会较为均匀地填充于水泥水化产物的较大空隙之中^[15],起到填充毛细孔和微细裂缝的作用,改善了孔结构,提高了结石体强度。当温度升至 40 °C 时,膨润土掺量为 9% 和 12% 的浆液,其强度要高于不掺膨润土的。而当温度为 60 °C 和 80 °C 时,掺膨润土浆液的抗压强度则低于没有掺膨润土的浆液。这可能是因为高温下水分蒸发速度较快^[16],而膨润土的加入又消耗了一部分水分,使

得用于水泥水化的水分减少;另一方面,高温形成的结石体中,有害孔隙总体积较大,而膨润土的加入虽然填充了部分空隙,但高温下在水泥石中形成

了较多的薄弱“界面”结构,后者的不利作用超过了前者的增强作用,导致结石体强度低于未掺加膨润土的浆液结石体强度。

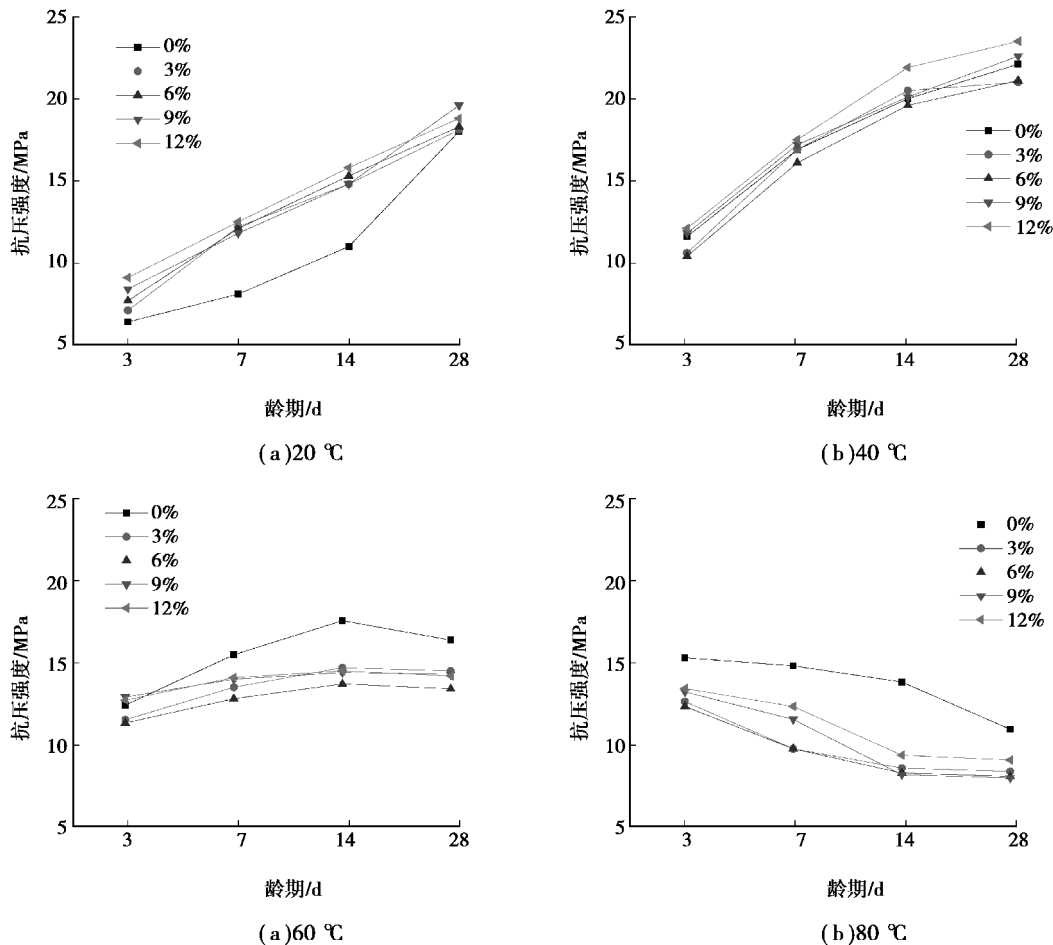


图4 不同温度下注浆体(水灰比0.8)的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of cement grout (water-cement ratio is 0.8) in different temperature

3 结论

根据高地温地质条件下注浆施工需求,研究了不同水灰比、膨润土掺量的水泥注浆液性能,试验结果可以为实际工程提供依据,主要结论如下:

(1)浆液配比一定时,随着温度升高,浆液的初、终凝时间缩短,当温度由20℃增加到40℃时,缩短幅度较大,60℃和80℃的高温环境中,不同水灰比浆液的凝结时间相差不大;随膨润土掺量增多,凝结时间缩短,由0%增加到3%时,缩短幅度较大。

(2)对于水灰比0.8的浆液,温度升高和膨润土掺量增加都会提高其黏度,而水灰比1.0和1.2的浆液,其黏度随膨润土掺量增加和温度升高增幅较小。

(3)20℃~60℃的温度范围内,随温度升高,各浆液的析水稳定所需时间越短,析水率越小;60℃之后,变化不明显。水泥浆液中掺膨润土可以改善其稳定性,随膨润土掺量增加,析水率不断降低,对改善水泥净液浆析水率较大造成跑浆漏浆这一缺点有重要意义。

(4)在20℃和40℃的较低温度下,各浆液随温度升高和龄期增长,结石体抗压强度不断增大;60℃和80℃的较高温度下,结石体后期强度会降低,且掺加膨润土会进一步降低强度。

(5)综合考虑浆液的黏度、析水率、强度等性能指标,认为水灰比0.8时,在20℃和40℃环境下,膨润土掺量为6%较好,在60℃和80℃的高温环境下,掺量为3%比较适宜;对于水灰比1.0和1.2的浆液,膨润土掺量为9%则较为合适。

参考文献(References)

- [1] 任海强,陶广美. 受动压影响巷道注浆加固技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 22-25. (Ren Haiqiang, Tao Guangmei. Study on grouting reinforced technology of roadway affected by dynamic pressure[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 22-25. (in Chinese))
- [2] Wang F, Zhang C, Wei SF, et al. Whole section anchor-grouting reinforcement technology and its application in underground roadways with loose and fractured surrounding rock [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 133-143.
- [3] Stille H, Gustafson G, Hassler L. Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(3): 603-624.
- [4] 李剑,张永兴,唐树名,等. 注浆体物理力学性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1076-1080. (Li Jian, Zhang Yongxing, Tang Shuming, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of cement grout [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1076-1080. (in Chinese))
- [5] 谷天峰,孙忠弟,骆凤涛,等. 水泥-黄土注浆充填材料的试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 98-105. (Gu Tianfeng, Sun Zhongdi, Luo Fengtao, et al. Experimental research on loess grouting material for coal gob filling [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 98-105. (in Chinese))
- [6] 刘人太,李术才,张庆松,等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1444-1459. (Liu Rentai, Li Shucai, Zhang Qingsong, et al. Experiment and application research on a new type of dynamic water grouting material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1444-1459. (in Chinese))
- [7] Sui W H, Liu J Y, Hu W, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50(1): 239-249.
- [8] 侯新伟,李向全,蒋良文,等. 大瑞铁路高黎贡山隧道热害评估[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(5): 60-65. (Hou Xinwei, Li Xiangquan, Jiang Liangwen, et al. Estimation of heat-harm of gaoligong mountain tunnel of Dali-Ruili railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(5): 60-65. (in Chinese))
- [9] 王小兵,王万金,夏义兵,等. 高原地热隧道混凝土衬砌施工技术研究[J]. 中国铁路, 2012(12): 52-55. (Wang Xiaobing, Wang Wanjin, Xia Yibing, et al. Research of concrete lining construction technology in plateau geothermal tunnel [J]. Chinese Railways, 2012(12): 52-55. (in Chinese))
- [10] 杨晓杰,韩巧云,田弋弘,等. 徐州三河尖矿深井高温热害机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2447-2454. (Yang Xiaojie, Hai Qiaoyun, Tian Yihong, et al. Mechanism of high-temperature heat-hazard at Sanhejian coal mine, Xuzhou [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2447-2454. (in Chinese))
- [11] 潘光明,张宵. 高温下双液注浆关键技术及现场试验研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(增2): 110-114. (Pan Guangming, Zhang Xiao. Study and field test on the key technologies of C-S liquid grouting based on the high temperature [J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2009, 39(supp.2): 110-114. (in Chinese))
- [12] 范利丹,胡彪,邵红超. 不同温度条件下水泥注浆液性能的实验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 274-280. (Fan Lidan, Hu Biao, Shao Hongchao. The experimental study on the properties of the cement grout in different temperature [J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2016, 35(2): 274-280. (in Chinese))
- [13] Shi M S, Wang F M, Luo J. Compressive strength of polymer grouting material at different temperatures [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater (Sci ence Edition), 2010, 25(6): 962-965.
- [14] 张文华,张云升. 高温养护条件下现代混凝土水化、硬化及微结构形成机理研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 34(1): 149-155. (Zhang Wenhua, Zhang Yunsheng. Research progress on the hydration, hardening and microstructure formation mechanism of modern concrete under high temperature curing conditions [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(1): 149-155. (in Chinese))
- [15] 徐超,冯颖彦,黄亮. 水泥-膨润土泥浆固结体的微观孔隙结构特征[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 90-93. (Xu Chao, Feng Yingyan, Huang Liang. Microstructure features of voids in cement-bentonite slurries [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 90-93. (in Chinese))
- [16] 张子明,周红军,赵吉坤. 温度对混凝土强度的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 674-679. (Zhang Ziming, Zhou Hongjun, Zhao Jikun. Influences of temperature on strength of concrete [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2004, 32(6): 674-679. (in Chinese))