



玄武岩纤维喷射混凝土在热害环境下的性能试验研究

周平, 王志杰, 杨跃, 季晓峰

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要:以隧道热害问题为背景,通过模型试验、近似模拟湿喷技术、定量分析及微观测试相结合的方法研究不同掺量玄武岩纤维喷射混凝土劈裂强度和粘结强度等力学性能的影响,横向对比标准养护和干热养护下的不同体积掺量的玄武岩纤维混凝土的力学性能,同时也加入硅灰以及钢纤维作为参照,以便从机理程度上提出更有效的解决热害措施。试验研究表明:在混凝土中加入玄武岩纤维,对混凝土起到了增强和阻裂的作用,改善了混凝土的脆性易裂的破坏状况。干热环境下,加入少量的玄武岩纤维能够提高混凝土的力学性能。当玄武岩掺量为0.1%玄+5%硅灰时,喷射混凝土的力学性能最好,加入0.2%玄武岩纤维掺量,也有一定程度的改善。实际隧道施工中,可通过加入适量的玄武岩纤维和适量的硅灰,可降低混凝土在热害环境下的危害。

关键词:热害;玄武岩纤维;喷射混凝土;劈裂强度;粘结强度

中图分类号:TU528.0 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)01-0069-08

Experimental study of the performance of basalt fiber shotcrete under heat damage

Zhou Ping, Wang Zhijie, Yang Yue, Ji Xiaofeng

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering,

Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: We studied the effect of different amount of basalt fiber on the splitting strength, bond strength and other mechanical properties of shotcrete under the context of tunnel heat-harm by using a combined method of model test, approximate simulation wet shotcrete technique, quantitative analysis and microscopic testing. Then we compared mechanical properties of shotcrete with different amount of basalt fiber both under standard curing and dry heating curing, and added silica fume and steel fiber into shotcrete to find an effective way to solve heat-harm. The results show that the basalt fiber added to the shotcrete can increase the strength of the shotcrete and resist cracks, which improves the fragility of shotcrete.

收稿日期:2015-10-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11ZT33);交通运输部西部科技项目(2013318J13340);教育部创新团队发展计划(IRT0955)

作者简介:周平(1991-),男,主要从事隧道及地下工程设计研究,(E-mail)pzhou_swjtu@126.com。

Received:2015-10-21

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. SWJTU11ZT33); The ministry of transport in western science and technology project (No. 2013318J13340); The Ministry of Education Innovation Team Development Program funding (No. IRT0955)

Author brief: Zhou Ping(1991-), main research interests; theory and practice of tunnels and underground design, tunnel and underground engineering, (E-mail)pzhou_swjtu@126.com.

Moreover, in dry and hot environment, a small amount of basalt fiber added can improve the mechanical properties of shotcrete. When the mixing amount of basalt consists of 0.1 percent basalt fiber and 5 percent silica fume, the mechanical properties of shotcrete is the best, and 0.2 percent basalt fiber added can also improve to a certain degree. In practice, adding moderate amount of basalt fiber and silica fume into shotcrete can reduce the damage of concrete under heat-harm.

Keywords: heat-harm; basalt fiber; shotcrete; splitting strength; bond strength

中国是世界上隧道数量最多的国家^[1]。随着长大深埋隧道逐渐增多^[2],建设过程中会遇到高地热等自然灾害^[3]。高地热主要以两种形式出现,干热和湿热^[4]。工程调研表明,在高地热环境中,干热环境普遍存在,干热环境喷射混凝土性能劣化严重^[5],特别是粘结强度损失严重,甚至脱粘开裂,对围岩的支护作用基本失效,是制约高地温喷射混凝土功能的关键要素。

玄武岩纤维作为中国最近几年刚刚研发出的一种新型纤维材料^[6],在土木工程中的应用研究还处于刚起步的阶段。国外学者^[7-11]玄武岩纤维复合材料力学方面的进行了相关研究。中国学者如潘慧敏^[12]和郑捷^[13]将其合理地掺入喷射混凝土中,利用玄武岩纤维和混凝土的优点,实现“性能与经济效应叠加”的复合材料设计理念。为改善混凝土脆性大、易开裂等弊端,其他学者^[14-15]把玄武岩纤维材料引入到喷射混凝土中,更好的优化喷射混凝土与岩

石的界面性质,提高粘结强度。对于热害环境下的混凝土性能试验,鲜有学者对玄武岩纤维、硅灰以及钢纤维喷射混凝土进行性能探究。

试验在标准状况下和干热环境下研究不同玄武岩纤维掺量喷射混凝土的力学性能,设置不同纤维体积掺量对喷射混凝土劈裂强度和粘结强度的影响,优化玄武岩纤维的掺量。同时对比探究钢纤维以及玄武岩纤维与硅灰共同作用对喷射混凝土性能的影响,以便从不同角度寻找热害环境下的最优混凝土性能,对后期研究起到帮助作用。

1 工况设计及试件成型

为减小试验偶然误差,本次试验分两批进行,且两批试验独立进行。

1.1 试验工况设计

项目总共进行两次试验,分别对两次试验进行工况设计,如表 1、表 2 所示。

表 1 第 1 批次试验工况(每种工况所对应试件的个数)

Table 1 Test condition one (number of test-piece for each condition)

养护环境	试验项目	配合比(玄武岩纤维以体积比表示)				
		0.0%	0.05%	0.1%	0.15%	0.2%
			(1.325 kg)	(2.65 kg)	(3.975 kg)	(5.3 kg)
标准养护	劈裂强度	3	3	3	3	3
	粘结强度	6	6	6	6	6
70 °C 烘箱	劈裂强度	3	3	3	3	3
	粘结强度	6	6	6	6	6

注:标准养护条件是温度(20±2)°C,相对湿度≥95%。

表 2 第 2 批次试验工况(每种工况所对应试件的个数)

Table 2 Test condition two (number of test-piece for each condition)

养护环境	试验项目	配合比(玄武岩纤维以体积比表示)						
		0.0%	0.05%	0.1%	0.15%	0.2%	5%硅灰+ 0.1%玄	1%钢
			(1.325 kg)	(2.65 kg)	(3.975 kg)	(5.3 kg)		
标准	劈裂强度	3	3	3	3	3	3	3
	粘结强度	6	6	6	6	6	6	6
70 °C 烘箱	劈裂强度	3	3	3	3	3	3	3
	粘结强度	6	6	6	6	6	6	6

注:标准养护条件是温度(20±2)°C,相对湿度≥95%。

1.2 试件选择

通过试验室现有的条件,进行材料的组配试验,并用混凝土振动台振动成型混凝土近似模拟喷射技术,分析热害环境对不同玄武岩纤维掺量的喷射混凝土性能的影响。表3和表4是试验试件尺寸规范和换算系数。

表3 立方体试件尺寸选择

Table 3 Size select of cube test-piece

骨料最大粒径/mm	试件尺寸
31.5	100 mm×100 mm×100 mm
37.5	150 mm×150 mm×150 mm
63.0	200 mm×200 mm×200 mm

表4 抗压强度换算系数

Table 4 Conversion ratio of compressive strength

试件尺寸	换算系数
100 mm×100 mm×100 mm	0.95
150 mm×150 mm×150 mm	1.00
200 mm×200 mm×200 mm	1.05

涉及公式为劈裂强度公式和粘结强度公式。
劈裂抗拉强度:

$$f_{1s} = \frac{2F}{\pi A} = \frac{0.63F}{A} \quad (1)$$

式中: F 为试件的破坏荷载; A 为试件劈裂面面积。

抗折强度:

$$f_t = \frac{PL}{bh^2} \quad (2)$$

表5 第1批次用料情况

Table 5 First time material-consuming situation

组别	C/kg	W/kg	G/kg	S/kg	塌落度	速凝剂/g	减水剂/g	硅灰/g	玄武岩纤维质/g	钢纤维/kg
第1组(0.0%)	8.8	3.96	16.2	19	105	264	40		0	
第2组(0.5%)	8.8	3.96	16.2	19	80	264	41		33.125	
第3组(1%)	8.8	3.96	16.2	19	160	264			66.25	
第4组(1.5%)	8.8	3.96	16.2	19	110	264			99.375	
第5组(2%)	8.8	3.96	16.2	19	115	264			132.5	

注:纤维掺量为体积分数

第2批试验

试验准备:晾晒砂子,清洗小石头,并进行烘箱

式中: P 为破坏荷载, N ; L 为支座距离, mm , 取 450 mm ; h 为试件截面高度, mm ; b 为试件截面宽度。

1.3 试件养护条件

1) 标准养护:标准养护条件下养护 28 d。

2) 干热环境养护:采用烘箱模拟干热环境,设置温度为 70 °C 的条件下进行干热养护,养护条件如下图 1 所示。



图1 模拟干热环境

Fig. 1 Simulation of hot and dry environment

2 混凝土原材料及配合比设计

根据(JGJ55—2000)《普通混凝土配合比设计规程》和(GB50086—2001)《锚杆喷射混凝土支护技术规范》计算得到各原材料配比情况如表5、表6所示。

第1批试验

试验准备:晾晒砂子,清洗小石头,并进行烘箱加热。准备材料数据: $m_{c0} = 440 \text{ kg}$, $m_{w0} = 198 \text{ kg}$, $m_{s0} = 950 \text{ kg}$, $m_{g0} = 810 \text{ kg}$, $m_{速} = 22 \text{ kg}$

各组用料情况如表5所示。

加热。准备材料数据: $m_{c0} = 440 \text{ kg}$, $m_{w0} = 198 \text{ kg}$, $m_{s0} = 950 \text{ kg}$, $m_{g0} = 810 \text{ kg}$, $m_{速} = 22 \text{ kg}$ 。

表 6 第 2 批次用料情况

Table 6 Second time material-consuming situation

组别	C/kg	W/kg	G/kg	S/kg	塌落度	速凝剂/g	减水剂/g	硅灰/g	玄武岩纤维质/g	钢纤维/kg
第 1 组(0.0%)	8.8	3.96	16.2	19	105	264	40		0	
第 2 组(0.5%)	8.8	3.96	16.2	19	80	264	41		33.125	
第 3 组(1%)	8.8	3.96	16.2	19	160	264			66.25	
第 4 组(1.5%)	8.8	3.96	16.2	19	110	264			99.375	
第 5 组(2%)	8.8	3.96	16.2	19	115	264			132.5	
第 6 组(5%硅+1.0%玄)	8.8	3.96	16.2	19	150	264		440	132.5	
第 7 组(钢纤维:1%)	8.8	3.96	16.2	19	110	264				1.57

注:纤维掺量为体积分数

3 试验数据分析

3.1 标准环境玄武岩纤维喷射混凝土性能研究

对经过养护好的玄武岩纤维混凝土进行性能试验,探索标准环境下和干热环境下的玄武岩纤维喷射混凝土的劈裂强度和粘结强度,如图 2 和图 3 所示。按照试验步骤,规范操作,得出一组劈裂强度和粘结强度的试验数据,为了减少误差,使试验数据和结果更具说服力,本组进行了两次试验,第 2 次试验验证第 1 次试验。



图 2 劈裂试验

Fig. 2 Splitting test

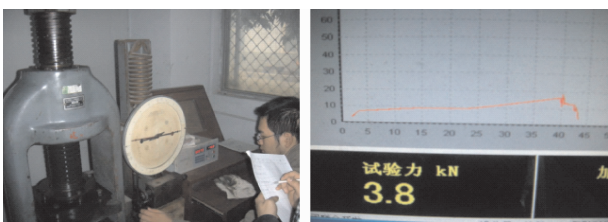


图 3 读取数据

Fig. 3 Reading data

3.1.1 劈裂强度试验数据 标养下第 1 次试验劈裂强度数据,如表 7 所示。

表 7 标养状况下第 1 次劈裂试验数据

Table 7 First time splitting test data under standard curing

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	66.6	1
0.05%	62.5	0.938
0.1%	54.7	0.821
0.15%	54.0	0.811
0.2%	63.0	0.946

标养下第 2 次试验劈裂强度数据,如表 8 所示。

表 8 标养状况下第 2 次劈裂试验数据

Table 8 Second time splitting test data under standard curing

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	62.31	1
0.05%	55.03	0.883
0.1%	56.03	0.899
0.15%	55.50	0.883
0.2%	59.93	0.962
0.1%玄+5%硅灰 1%钢纤维	67.23	1.079

3.1.2 粘结强度试验数据 标养下第 1 次试验粘

结强度数据,如表 9 所示。

表 9 标养状况下第 1 次粘结试验数据

Table 9 First time bonding test data under standard curing

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	31.6	1
0.05%	32.3	1.022
0.1%	33.3	1.054
0.15%	31.9	1.010
0.2%	35.9	1.136

标养下第 2 次试验粘结强度数据,如表 10 所示。

表 10 标养状况下第 2 次粘结试验数据

Table 10 Second time bonding test data under standard curing

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	28.4	1
0.05%	28.8	1.014
0.1%	29.5	1.039
0.15%	29.2	1.028
0.2%	31.1	1.095
0.1%玄+5%硅灰	33.7	1.187
1%钢纤维		

3.1.3 标准环境下数据分析 标准养护下的玄武岩纤维喷射混凝土劈裂强度和粘结强度如下图 4 和图 5 所示。

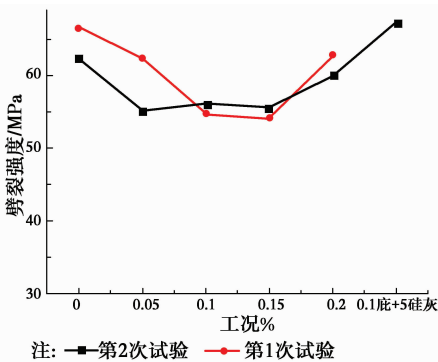


图 4 标准养护下的劈裂强度

Fig. 4 Splitting strength under standard curing

玄武岩纤维喷射混凝土在标准环境下(即 20℃)养护,从试验数据可得出:1)标准养护下,当加入 0.1%玄+5%硅灰时,玄武岩纤维喷射混凝土在劈裂强度和粘结强度将大大提高。特别是针对粘

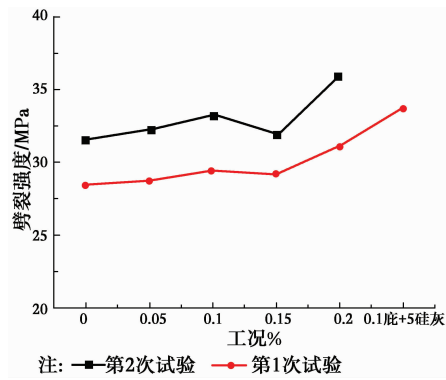


图 5 标准养护下的粘结强度

Fig. 5 Bonding strength under standard curing

结强度,提高比例明显。2)加入 0.2%的玄武岩纤维,在劈裂强度中提高不明显,但在粘结强度中强度大大提高。3)随着玄武岩纤维含量的增加,劈裂强度先减小后增加,呈对数形式;粘结强度随玄武岩纤维的增加而增加。

3.2 干热环境玄武岩纤维喷射混凝土性能研究

3.2.1 劈裂强度试验数据 干热环境下第 1 次试验劈裂强度数据,如表 11 所示。

表 11 干热环境下第 1 次劈裂试验数据

Table 11 First time splitting test data under dry and hot environment

工况	干热	
	强度值/MPa	提高比例
0%	34.7	1
0.05%	33.5	0.965
0.1%	35.6	1.026
0.15%	34.4	0.991
0.2%	37.3	1.075

干热环境下第 2 次试验劈裂强度数据,如表 12 所示。

表 12 干热环境下第 2 次劈裂试验数据

Table 12 Second time splitting test data under dry and hot environment

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	42.50	1
0.05%	39.27	0.924
0.1%	36.75	0.865
0.15%	37.77	0.889
0.2%	41.80	0.984
0.1%玄+5%硅灰	44.50	1.047
1%钢纤维	43.24	1.017

3.2.2 粘结强度试验数据 干热环境下第 1 次试验粘结强度数据,如表 13 所示。

表 13 干热环境下第 2 次粘结试验数据
Table 13 First time bonding test data under dry and hot environment

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	24.1	1
0.05%	24.2	1.004
0.1%	23.3	0.967
0.15%	26.1	1.083
0.2%	30.2	1.253

干热环境下第 2 次试验粘结强度数据,如表 14 所示。

表 14 干热环境下第 2 次粘结强度试验数据
Table 14 Second time bonding test data under dry and hot environment

工况	标养	
	强度值/MPa	提高比例
0%	28.2	1
0.05%	27.4	0.972
0.1%	26.0	0.921
0.15%	28.0	0.993
0.2%	29.9	1.060
0.1%玄武+5%硅灰	35.6	1.262
1%钢纤维	35.7	1.266

3.2.3 干热环境下数据分析 干热环境养护下的玄武岩纤维喷射混凝土劈裂强度和粘结强度如图 6 和图 7 所示。

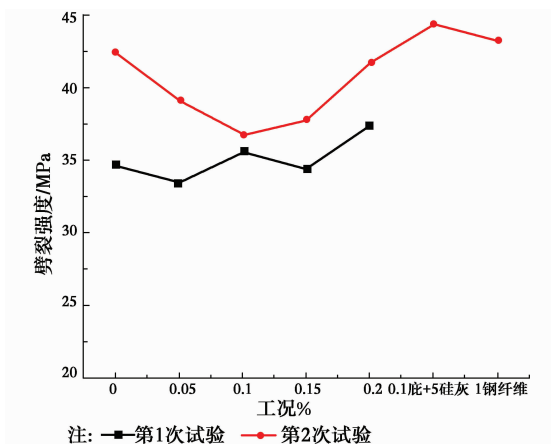


图 6 干热环境下劈裂试验

Fig. 6 Splitting test under dry and hot environment

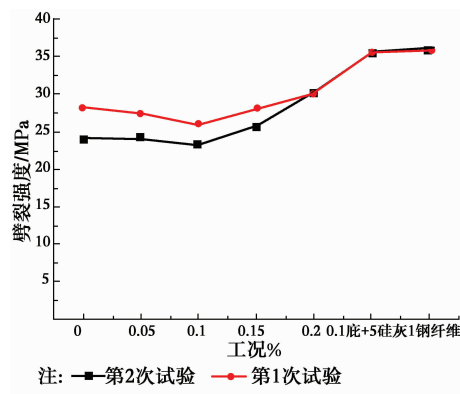


图 7 干热环境下粘结试验

Fig. 7 Bonding test under dry and hot environment

烘箱模拟干热环境(即 70 ℃),并在规定期限进行养护。对混凝土进行劈裂强度和粘结强度试验通过以上试验数据可得出一些结论:1)在喷射混凝土中加入 0.1%玄武+5%硅灰时,将大大提高喷射混凝土的劈裂强度和粘结强度。在劈裂强度中,相对于 0%玄武岩纤维混凝土性能提高 2 MPa。2)在第 1 次试验中,当加入 2%的玄武岩纤维,在劈裂强度中也提高了混凝土的劈裂强度和粘结强度,但在第 2 次试验中对其劈裂强度和粘结强度提高性能不明显。

3.3 机理分析

比较在标准环境下和干热环境下玄武岩纤维喷射混凝土的劈裂强度,对数据进行处理,如图 8 和图 9 所示。

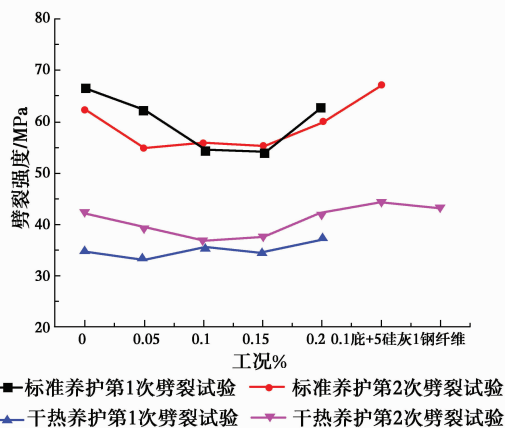


图 8 标养环境与干热环境下劈裂强度比较

Fig. 8 Comparison and analysis of splitting strength both under standard caring and hot and dry environment

从图 8 和图 9 可得出:1)在干热环境下混凝土劈裂强度较标养环境是下降的,即在现实热害隧道工程中,干热环境下的喷射混凝土性能劣化严重,所

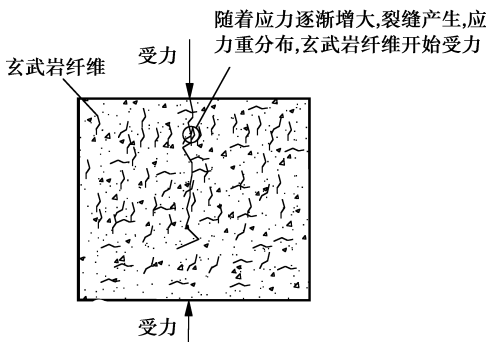


图9 劈裂试验混凝土内部机理

Fig. 9 Split test internal mechanism of concrete

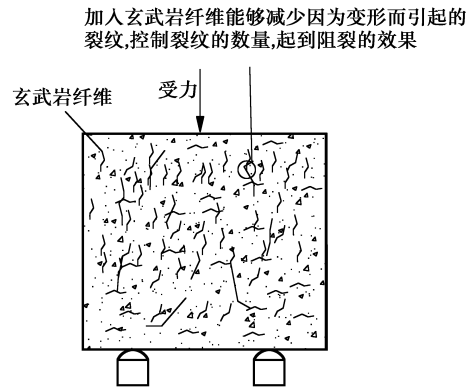


图11 粘结试验混凝土内部机理

Fig. 11 The internal mechanism of bond testing concrete

以有必要对混凝土进行改善。2)从图8可知,当加入0.1%玄+5%硅灰时,其劈裂强度往上升趋势,说明适量的玄武岩与少量的硅灰将提高喷射混凝土的劈裂强度。干热环境下,喷射混凝土容易过早裂化,硅灰的作用可减缓其裂化的时间。且在裂化过程中,玄武岩喷射混凝土受力初期应变较小,玄武岩纤维承受的拉应力小,混凝土起到主要的受力作用;随着应力逐渐增大,裂缝产生,应力重分布,原来混凝土产生的应力向玄武岩纤维转移,使得裂缝处的玄武岩纤维能够继续承受荷载;如果裂缝处的玄武岩纤维越多,裂缝稳定扩展的时间就越长,从而提高劈裂的强度。

比较标准环境下和干热环境下玄武岩纤维喷射混凝土的粘结强度,对数据进行处理,如图10和图11所示。

加入体积比2%的玄武岩纤维也可以较明显的提高喷射混凝土的粘结强度。产生现象的原因在于混凝土在凝固过程中,由于体积减小,导致混凝土内部产生较多的微小裂纹,这些裂纹的存在形成混凝土的初始缺陷,大大降低混凝土的抗拉强度。在干热环境下,水份消失更快,凝固较早,裂纹产生加速。加入玄武岩纤维能够减少因为变形而引起的裂纹,控制裂纹的数量,起到阻裂的效果。同时,玄武岩纤维在混凝土中形成网状的结构,提供了拉拔或拔段荷载,从而提高了混凝土弯拉极限强度。热害环境下的粘结强度效果比标准养护下的要差主要原因在于干热环境下影响着玄武岩纤维与混凝土的相互作用力,但总体作用效果比普通混凝土好。

4 结论

1)从试验数据可得:喷射混凝土在干热环境下,其力学性能降低且劈裂强度较粘结强度降低幅度大。玄武岩纤维喷射混凝土在干热环境下能够改善混凝土因过早开裂而失去承载能力,尤其是粘结强度大大提升。

2)研究表明:不同玄武岩纤维体积掺量对喷射混凝土性能的影响不一样。当加入0.1%玄+5%硅灰时,喷射混凝土的劈裂强度和粘结强度改善效果明显,加入0.2%玄武岩纤维掺量时,也有一定程度的改善。

3)干热环境下以混杂玄武岩纤维和硅灰改性效果优于单种玄武岩纤维喷射混凝土性能;钢钎维在改性方面有待进一步的试验和研究。

4)在玄武岩纤维含量较少的情况下,玄武岩纤维喷射混凝土劈裂强度随玄武岩纤维的含量变化影响小,实际试验中应考虑加大玄武岩纤维的含量。

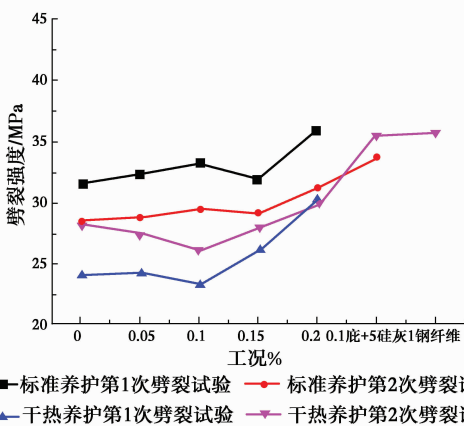


图10 标养环境与干热环境下粘结强度对比

Fig. 10 Comparison and analysis of bonding strength both under standard caring and hot and dry environment

1)相对于标养环境,干热环境下混凝土的粘结强度降低。2)从试验数据可知,在干热环境下,加入0.1%玄+5%硅灰时,其粘结改善效果最好。另外,

5)在实际工程中,喷射混凝土通过加入适量的玄武岩纤维和适量的硅灰,可有效降低热害环境对混凝土的不利性能。

参考文献:

[1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设,2010(4):351-364.
Wang M S. An overview of development of railways, tunnels and uderground works in China [J]. Tunnel Construction,2010(4):351-364. (in Chinese)

[2] 马建,孙守增,赵文义,等. 中国隧道工程学术研究综述:2015[J]. 中国公路学报,2015(5):1-65.
Ma J,Sun S Z,Zhao W Y,et al. Review on China tunnel engineering research: 2015. [J]. China Journal of Highway and Transport,2015(5):1-65. (in Chinese)

[3] 杨平平. 高地温隧道温度场分布规律研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2014.
Yang P P. Study of temperature field distribution law for high ground temperature tunnel[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2014. (in Chinese)

[4] 崔圣爱,郭晨,李福海,等. 基于不同测定方法的热害环境喷射混凝土黏结性能分析[J]. 铁道学报,2015(8):104-108.
Cui S A, Guo C, Li F H, et al. Analysis on bond performance of shotcrete based on different testing methods in thermal damage tunnel [J]. Journal of the China Railway Society,2015(8):104-108. (in Chinese)

[5] 杨红艳. 热害隧道喷射混凝土性能研究及结构行为分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.
Yang H Y. Study on performance of shotcrete under heat harm tunnel and structure behavior analysis [D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)

[6] 吴钊贤. 玄武岩纤维混凝土基本力学性能与应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
Wu Z Q. Research on basic mechanical properties and appliation of basalt fiber reinfoeed conere [D].

Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)

[7] Sim J S,Park C W,Moon D Y. Characteristics of basalt fiber as a Strengthening material for concrete structures [J]. Composites Part B:Engineering,2005,27:504-512.

[8] Dias D P, Thaumaturgo C. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers [J]. Cement and Concrete Composites,2005,27:49-54.

[9] Krzysztof Z,Przemyslaw Q. The impact of basaltic fiber on selected physical and mechanical properties of cement mort [J]. Concrete Precasting Plant and Technology,2005:28-33

[10] Yana L,Jenkins C H,Pendleton R I. Polyolefin fiber-reinforced concrete composites Part I. Damping and frequency characteristics [J]. Cement and Concrete Research,2000,30:391-401.

[11] PCA. Join design for concrete highway and street pavements [M]. Concrete Information,1980.

[12] Pan H M. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber concrete [J]. Portland Bulletin,2009,28(5):955-958.

[13] Zheng J. Research basalt fiber modification effect of concrete [J]. Foreign Highway,2011,31(5):243-246.

[14] 梁玉坤. 热害环境混凝土参合料及力学性能研究[J]. 企业技术开发,2011.
Liang Y K. Study on the concrete mixed material and mechanical properties in hot environment [J]. Technological Development of Enterprise, 2011. (in Chinese)

[15] 陈兴芬,胡显奇. 玄武岩纤维增强混凝土的开发和应用[C]// 第七届全国纤维水泥制品学术、标准、技术信息经验交流会,2008.
Chen X F, Hu X Q. Development and application of basalt fibre reinforced concrete [C]. 2008. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)