

# 玄武岩纤维网对混凝土板早龄期抗裂性能影响研究

刘红波<sup>1,3</sup>, 杨向东<sup>1</sup>, 杜鹏<sup>1</sup>, 齐晓雷<sup>2</sup>, 王世斌<sup>2</sup>, 赵亮<sup>4</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 河北建工集团有限责任公司, 石家庄 050051;  
3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 4. 石家庄职业技术学院 建筑工程系, 石家庄 050081)

**摘要:** 为研究玄武岩纤维网对混凝土板早龄期抗裂性能的影响, 开展了混凝土板约束收缩开裂试验。设计了两种不同配合比的混凝土板, 并选取两种规格玄武岩纤维网作为分析参数, 以验证纤维网在混凝土板中的抗裂效果。通过对混凝土板的裂缝分布规律、开裂面积、最大裂缝宽度、开裂时间和收缩应变等进行对比分析, 评估了玄武岩纤维网增强混凝土板的抗裂效果。试验结果表明: 混凝土板裂缝主要出现在约束端和中心部位; 纤维网布置在混凝土板中会提升其抗裂性能, 且随着网片布置位置靠近板表面其抗裂效果更好, 对比素混凝土板开裂面积降低了 79.33%; 当网片均布置在混凝土板表面时, 布置纤维网的试件相比布置钢丝网片的试件开裂面积分别降低了 13.14%、39.17%、53.92%; 在混凝土板表面布置纤维网可以有效地减小板内部的收缩应变。研究成果可为玄武岩纤维网的工程应用提供试验数据支撑。

**关键词:** 玄武岩纤维网; 配合比; 平板约束试验; 抗裂性能; 收缩应变

**中图分类号:** TU528.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0071-08

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.012

## Effect of Basalt Fiber Mesh on Crack Resistance of Concrete Slabs

LIU Hongbo<sup>1,3</sup>, YANG Xiangdong<sup>1</sup>, DU Peng<sup>1</sup>, QI Xiaolei<sup>2</sup>, WANG Shibin<sup>2</sup>, ZHAO Liang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Construction Engineering Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Department of Architectural Engineering, Shijiazhuang University of Applied Technology, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** In order to study the effect of basalt fiber web on the early age crack resistance of concrete slab, the restrained shrinkage cracking test of concrete slab was carried out. Two kinds of concrete slabs with different mix proportions were designed, and two kinds of basalt fiber webs were selected as analysis parameters to verify the crack resistance effect of fiber webs in concrete slabs. Through the comparative analysis of the crack distribution law, cracking area, maximum crack width, cracking time and shrinkage strain of the concrete slab, the anti-cracking effect of the basalt fiber mesh reinforced concrete slab was evaluated. The test results show that the concrete slab cracks mainly appear in the constraint end and the central part; the

项目来源: 国家重点研发计划 (2022YFB4200700)。

作者简介: 刘红波 (1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 新型建筑材料。

通信作者: 赵亮 (1973—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑施工技术。

收稿日期: 2025-03-01

## 材料科学

fiber mesh arrangement in the concrete slab will improve its crack resistance, and the crack resistance is better as the mesh arrangement position is close to the surface of the slab, and the cracking area of the plain concrete slab is reduced by 79.33% compared with that of the plain concrete slab. When the mesh is arranged on the surface of the concrete slab, the cracking area of the specimen with fiber mesh is reduced by 13.14%, 39.17% and 53.92% respectively compared with the specimen with steel wire mesh. The arrangement of fiber net on the surface of concrete slab can effectively reduce the shrinkage strain inside the slab. The research results can provide experimental data support for the engineering application of basalt fiber web.

**Key words:** basalt fiber mesh; mix proportion; plate restraint test; crack resistance; shrinkage strain

## 0 引言

混凝土板的收缩裂缝是建筑工程中的常见问题,这些裂缝不仅影响建筑物外观,还会引起结构的稳定性和耐久性问题<sup>[1-2]</sup>。此外,混凝土板的开裂还会引发渗水、建筑美观受损等。我国每年也有大量的建筑物因耐久性问题不足而被拆除,造成巨大的经济损失<sup>[3]</sup>。因此,如何提高混凝土板的抗裂性能已成为当前工程领域的重要研究课题<sup>[4-5]</sup>。

为了更有效地预防和控制混凝土在使用过程中的开裂现象,一些学者提出通过在混凝土中添加纤维材料来增强其抗裂性能。何余良等<sup>[6]</sup>将短切纤维引入混凝土板中进行开裂损伤研究,结果表明,掺加短切纤维可以显著减小裂缝宽度,并使开裂荷载提高约150%;李杉等<sup>[7]</sup>研究了聚乙烯醇(PVA)纤维掺量对混凝土早期塑性收缩开裂、干燥收缩和自生收缩的影响,发现纤维的加入不仅能增强混凝土的抗裂性能,还能提升其抗收缩能力,且当掺量为2%时,混凝土的抗开裂和抗收缩性能最佳。这表明,在混凝土中掺入短切纤维能够有效提高其韧性和抗裂能力,从而有效防止裂缝的产生与扩展。然而,短切纤维在混凝土内部的分布具有较大的随机性,导致其抗裂性能表现不稳定<sup>[8-9]</sup>。

针对上述问题,另一部分学者提出将短切纤维加工成网状结构(即纤维网),可以有效解决纤维丝在混凝土中分布不均匀的问题。吕杨等<sup>[10]</sup>将纤维网布置于混凝土梁中进行抗弯试验,结果表明,纤维网能够使裂缝分布更加均匀,显著减少大裂缝的产生;邓宗才等<sup>[11]</sup>对铺设了钢丝网和玻璃纤维网的双向板进行了抗弯性能研究,发现网片可提高混凝土板的延性和韧性,从而达到了抗裂效果;李云鹏等<sup>[12]</sup>通过数值模拟分析玄武岩纤维网提高了边坡稳

定性,当坡度较陡且为均质土坡时,提升效果更明显;修嘉凯等<sup>[13]</sup>通过四点弯曲加载试验,分析纤维网层数、Tex含量和冻融循环次数对BTRC梁弯曲性能的影响,结果表明,纤维网能有效提升试件的开裂荷载,但层数和Tex含量影响较小;高孟冉等<sup>[14]</sup>通过TRC单轴拉伸试验,结果表明,配网率增加显著提高了TRC的抗拉强度和变形能力;李冬等<sup>[15]</sup>通过四边简支方板试验,结果表明,玄武岩纤维网格布可以显著提高承载力,但脆性特征明显;Zhu等<sup>[16]</sup>提出自黏性玄武岩纤维网格土工布用于沥青路面,通过力学试验和数字图像相关技术,研究了其与沥青的黏附性和抗裂性。结果表明,玄武岩纤维网格布通过互锁增强效应提高了复合土工布的强度,从而增强了路面层间的抗裂性和结构性能;Zhang等<sup>[17]</sup>针对军事机场跑道表面层易损伤的问题,选用碳纤维、芳纶纤维和玄武岩纤维网进行加固砂浆层,结果表明,纤维网能显著提高路面板的抗冲击性,芳纶纤维网效果最佳,玄武岩纤维网最弱;Hu等<sup>[18]</sup>通过冻融试验和耐磨试验,结果表明,纤维网可以提高混凝土的冻融抗性和耐磨性。

玄武岩纤维网作为一种高性能且环保材料,凭借其优异的力学性能和较高的性价比,可以配合混凝土用于多方面使用<sup>[19]</sup>,且已广泛应用于建筑行业的多个领域<sup>[20-21]</sup>。然而,当提到玄武岩纤维时,现有研究大多集中于短切纤维<sup>[22]</sup>和纤维网增强材料的应用<sup>[23-24]</sup>,对于玄武岩纤维网在增强混凝土楼面、地面及屋盖等结构抗裂性能的研究和工程应用较少,尤其缺乏玄武岩纤维网增强混凝土板抗裂性能的试验数据。因此,试验旨在研究玄武岩纤维网增强混凝土板的抗裂性能,研究结果将为实际工程中玄武岩纤维网的应用提供参考依据。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

胶凝材料采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥，粗骨料选用粒径在 5~20 mm 的天然碎石，细骨料使用细度模数为 2.5 的优质河砂。试验用水为自来水，减水剂使用聚羧酸高效减水剂，减水率为 23%~25%。混凝土的配合比及通过试验测得的抗压强度 ( $R_c$ ) 与劈裂强度 ( $R_t$ ) 见表 1。

玄武岩纤维网为古铜色网格状织物，网格尺寸为 25 mm×25 mm，其相关物理性质见表 2。

表 1 混凝土配合比及力学性能

Table 1 Concrete mix proportion and mechanical properties

配合比类型	水泥 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	水 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	砂子 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	石子 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$R_c-28\text{d}$ /MPa	$R_t-28\text{d}$ /MPa
泵送	398	239	743	1 026	29.7	3.97
非泵送	367	220	691	1 081	30.5	4.16

表 2 玄武岩纤维网 (BFRP) 材料性能

Table 2 Material properties of basalt fiber mesh (BFRP)

纤维网类型	单位面积质量 ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	拉伸断裂强力 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )		断裂伸长率/%		断裂强力保留率/%	
		径向	纬向	径向	纬向	径向	纬向
BFRM-60	224	61	67.7	2.9	3.2	88.8	75.6
BFRM-90	282	93	95.0	3.0	3.1	78.0	79.0

### 1.2 试件制作

立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试件的尺寸均为 100 mm×100 mm×100 mm；约束收缩开裂试验所用试件的尺寸为 600 mm×600 mm×63 mm。

试件制作参考 CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》进行。制作混凝土板试件时，在模具底板铺设一层塑料薄膜。

混凝土浇筑过程，边浇筑边使用橡胶小锤锤击模具边缘，确保浇筑好的混凝土密实性和强度达到要求。随后将裁剪完成的纤维网铺设于混凝土表面，待混凝土完全覆盖纤维网时，用抹子和刮刀将混凝土表面刮抹平整。

试件的具体参数见表 3。编号中的 S 表示不铺设任何网片，X 表示铺设纤维网，G 表示铺设钢丝网片。0.50、0.25、表面分别表示纤维网铺设在混凝土板厚度的 1/2、1/4 及表面处。1 表示使用泵送配比，2 表示非泵送。BFRM 1×1-60×60 表示纤维网每英寸内的网格数量为 1×1，且纤维网的经纬向强度为

60 kN/m。 $\Phi 3@50\times 50$  表示钢丝网片的网格大小为 50 mm×50 mm，钢丝直径为 3 mm。

表 3 试件参数

Table 3 Specimen parameters

编号	网位置	配合比类型	网片类型
C-S-0-0-1	表面	泵送	无网片
C-X-0.5-60-1	0.50	泵送	BFRM 1×1-60×60
C-X-0.5-90-1	0.50	泵送	BFRM 1×1-60×60
C-X-0.25-60-1	0.25	泵送	BFRM 1×1-60×60
C-X-0.25-90-1	0.25	泵送	BFRM 1×1-90×90
C-X-0-60-1	表面	泵送	BFRM 1×1-90×90
C-X-0-90-1	表面	泵送	BFRM 1×1-90×90
C-G-0-3-1	表面	泵送	$\Phi 3@50\times 50$
C-G-0-4-1	表面	泵送	$\Phi 4@100\times 100$
C-G-0-6-1	表面	泵送	$\Phi 6@200\times 200$
C-S-0-0-2	表面	非泵送	无网片
C-X-0.5-60-2	0.50	非泵送	BFRM 1×1-60×60
C-X-0.5-90-2	0.50	非泵送	BFRM 1×1-60×60
C-X-0.25-60-2	0.25	非泵送	BFRM 1×1-60×60
C-X-0.25-90-2	0.25	非泵送	BFRM 1×1-90×90
C-X-0-60-2	表面	非泵送	BFRM 1×1-90×90
C-X-0-90-2	表面	非泵送	BFRM 1×1-90×90
C-G-0-3-2	表面	非泵送	$\Phi 3@50\times 50$
C-G-0-4-2	表面	非泵送	$\Phi 4@100\times 100$
C-G-0-6-2	表面	非泵送	$\Phi 6@200\times 200$

### 1.3 试验方法

立方体抗压和劈裂强度试验按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。

约束收缩开裂试验中，混凝土板浇筑完成后，将试件置于温度为 23℃、相对湿度为 24% 的实验室环境下。在试验的最初 3 h 内，每 5 min 观察一次，以记录首次出现裂纹的时间。一旦观察到裂纹，观察频率调整为每 30 min 一次。过了 10 h 后，观察频率进一步调整为 60 min 一次。一直观察至试验结束为止，记录裂缝的数量、长度、宽度并记录相关情况。

M6 栓钉根部安装有应变片，用于测量混凝土板内部的应变变化。当应变值不再变化时，试验结束。每组试验布置 16 个应变片。

试验通过观察裂缝数量、宽度、长度、开裂面积、开裂时间及板开裂面积等参数，来评估混凝土板的早期抗裂性能。裂缝的宽度和长度分别使用型号为 BST-JM 的便携式显微镜和钢尺进行测量，显微镜的精度为 0.01 mm，放大倍数为 40 倍。

## 材料科学

## 2 结果与讨论

## 2.1 裂缝特征观测

混凝土在固化过程中会发生干缩,当表面水分蒸发或环境干燥时,会出现干缩裂缝。其内部的骨料在这个过程中对裂缝的开展起到了抑制作用,可以看作是混凝土内部的一种约束。与此同时,外围栓钉的约束以及纤维网的作用也对混凝土的裂缝开展情况产生了影响。这些因素共同作用,导致混凝土板表现出不同的裂缝开展情况。

如图1所示,各试件的裂缝开展情况有所不同。裂缝主要出现在混凝土板的中心或边缘部位。中心部分的裂缝相对较为稀疏,但通常较长且较宽;而边缘部位的裂缝数量更多,通常较短、较窄且不连续。这种现象可以解释为:混凝土板的四周均匀布置了长度不一的栓钉,这种“混凝土+栓钉”的组合形成了类似钢筋混凝土的结构,使得边缘区域的应力得以均匀分布并释放,从而导致较短且密集的裂缝形成。相比之下,在板中心,由于四周受到了栓钉的约束,中心区域缺乏额外的承力材料支撑,导致该区域的应力无法得到均匀释放,从而形成了较长且较宽的裂缝特征。

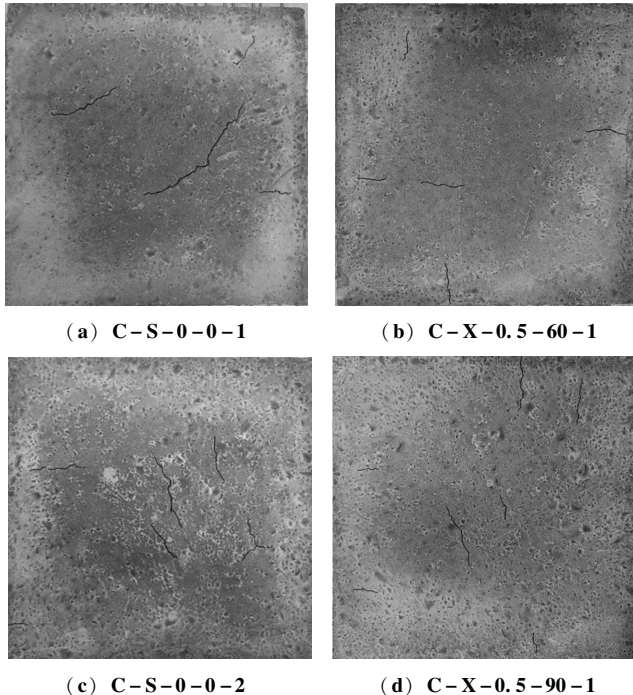


图1 混凝土板试件裂缝分布

Fig.1 Crack distribution in concrete slab specimens

## 2.2 BFRM60 混凝土板抗裂性能分析

混凝土板裂缝的名义总面积、最大长度、最大宽度以及裂缝降低系数结果见表4。初裂时间、裂缝长度、裂缝宽度随纤维网的布置位置变化如图2~图4所示。

表4 早龄期抗裂试验观察结果

编号	裂缝条数	初裂时间/h	裂缝最大长度/mm	裂缝最大宽度/mm	名义总面积/mm <sup>2</sup>	降低系数/%
C-S-0-0-1	8	1.5	106	0.56	474.88	表面
C-S-0-0-2	8	1.8	102	0.54	440.64	表面
C-X-0.5-60-1	6	3.0	101	0.54	327.24	31.66
C-X-0.5-60-2	6	3.5	97	0.52	302.64	31.31
C-X-0.25-60-1	6	4.0	95	0.51	290.70	38.46
C-X-0.25-60-2	6	4.3	90	0.49	264.60	39.95
C-X-0-60-1	4	5.1	71	0.35	99.40	79.91
C-X-0-60-2	4	5.3	68	0.33	89.76	79.62

由图2可知,相较于未布置纤维网的C-S-0-0-1和C-S-0-0-2试件,纤维网的加入显著延长了混凝土的初裂时间。(C-X-0.5-60-1、C-X-0.25-60-1、C-X-0-60-1)、(C-X-0.5-60-2、C-X-0.25-60-2和C-X-0-60-2)初裂时间相较于C-S-0-0-1和C-S-0-0-2分别增加了1.5、2.5、3.6、1.7、2.5、3.5 h。这主要是因为纤维网在混凝土中能够有效抵消混凝土因水化作用和温度变化等因素引起的内力变化,从而在混凝土开裂时提供足够的拉应力,延缓裂缝产生。

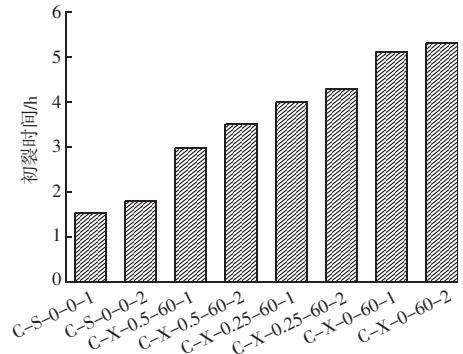


图2 初裂时间

Fig.2 Initial cracking time

由图3、图4可知,(C-X-0.5-60-1、C-X-0.25-60-1、C-X-0-60-1)、(C-X-0.5-60-2、C-X-0.25-60-2、C-X-0-60-2)裂缝最大长度较C-S-0-0-1和C-S-0-0-2降低了8.33%、10.37%、33.01%、4.9%、11.76%、33.33%。(C-X-0.5-60-1、C-X-0.25-60-1、C-X-

0-60-1)、(C-X-0.5-60-2、C-X-0.25-60-2、C-X-0-60-2) 裂缝最大宽度较C-S-0-0-1 和 C-S-0-0-2 降低了 3.57%、8.92%、37.5%、3.7%、9.25%、38.88%。当混凝土布置纤维网后, 裂缝最大长度和宽度随纤维网位置逐渐向表面靠近呈线性降低。主要是因为裂缝会在混凝土板表面开展, 随着纤维网的位置不断靠近混凝土板表面, 其对混凝土表面裂缝的约束作用逐渐增强, 当裂缝发生在纤维网附近时, 裂缝的开展就会被纤维网阻止, 使得裂缝的长度和宽度受到限制。最终当纤维网布置于混凝土表面时, 混凝土板的抗裂性能最优。

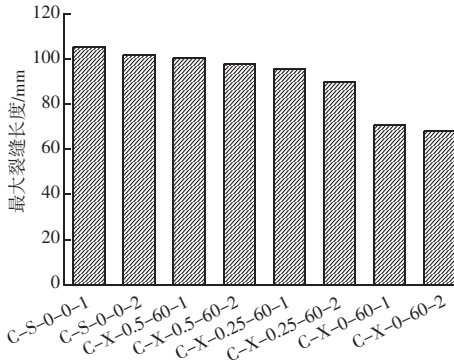


图3 最大裂缝长度

Fig. 3 Maximum crack length

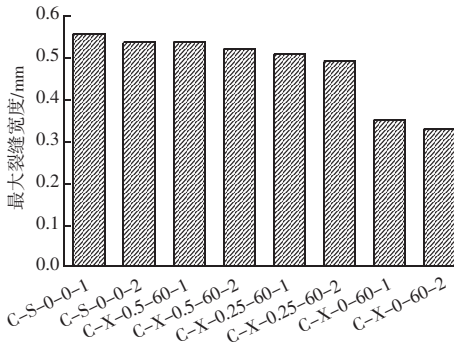


图4 最大裂缝宽度

Fig. 4 Maximum crack width

根据表4 试验数据绘制出每组试件裂缝的开裂面积和裂缝降低系数关系图, 如图5所示。裂缝的开裂面积随着纤维网的加入和布置位置的变化逐渐降低, 裂缝降低系数呈上升趋势。取两种配合比试件的平均值计算可知, 纤维网布置于混凝土板 1/2 厚度、1/4 厚度和表面时, 裂缝的开裂面积相比于不布置纤维网的素混凝土组分别降低了 31.19%、39.34%、79.33%, 混凝土板裂缝的开裂面积显著降低。

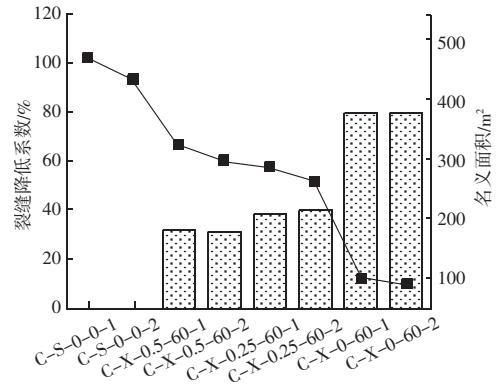


图5 裂缝名义面积和裂缝降低系数趋势图

Fig. 5 Trend chart of nominal crack area and crack reduction coefficient

这说明当纤维网布置在合适位置后, 加大了对混凝土板的约束作用, 使得裂缝的发展受到限制。从而使得混凝土早龄期的开裂风险得到降低。

### 2.3 网片对混凝土板抗裂性能影响分析

其余试件裂缝的总面积、最大长度、最大宽度以及裂缝降低系数结果见表5。结合表4 数据绘制的关键性参数对比如图6所示。

观察试验数据发现, BFRM90 纤维混凝土板抗裂效果较 BFRM60 混凝土板更优。这是因为当混凝土因水化作用和外部环境影响发生收缩时, 纤维网起到约束混凝土收缩的作用。BFRM90 纤维网相比 BFRM60 纤维网抗拉能力更强, 可以更好的抵消混凝土板内产生的收缩应力。此外 BFRM90 纤维网布置于混凝土板内的比表面积大于 BFRM60 纤维网, 当混凝土裂缝发生在纤维网网格间隙时, 比表面积小的纤维网覆盖的范围有限, 综合以上各因素作用, BFRM90 纤维网的抗裂效果更优秀。

表5 试验结果

Table 5 Test results

编号	裂缝条数	初裂时 间/h	裂缝最大 长度/mm	裂缝最大 宽度/mm	名义总面积 /mm <sup>2</sup>	降低系数 /%
C-X-0.5-90-1	6	3.2	98	0.52	305.76	35.61
C-X-0.5-90-2	6	3.7	94	0.50	282.00	36.00
C-X-0.25-90-1	6	4.1	92	0.47	259.44	45.36
C-X-0.25-90-2	6	4.4	88	0.45	237.60	46.07
C-X-0-90-1	4	5.3	69	0.32	88.32	81.40
C-X-0-90-2	4	5.5	65	0.30	78.00	82.29
C-G-0-3-1	4	4.8	73	0.37	108.04	77.24
C-G-0-3-2	4	5.0	69	0.35	96.60	78.07
C-G-0-4-1	5	4.6	75	0.41	153.75	67.62
C-G-0-4-2	5	4.7	71	0.39	138.45	68.58
C-G-0-6-1	6	4.3	78	0.43	201.24	57.62
C-G-0-6-2	6	4.5	75	0.41	184.50	58.12

## 材料科学

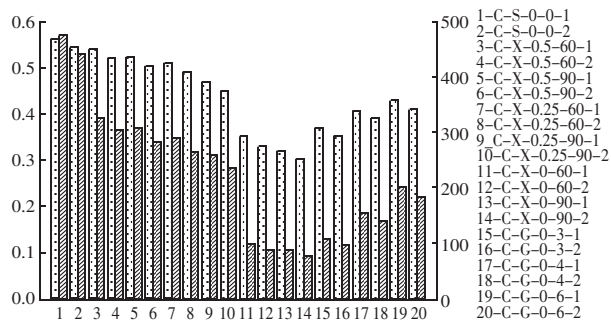


图6 关键性参数图  
Fig. 6 Key parameters chart

从试验数据还可看出,无论是泵送配比还是非泵送配比,布置纤维网的试件相比布置钢丝网片的试件抗裂效果要更好。这是因为所用纤维网的网格尺寸为  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ,而工程常用钢丝网片的网格尺寸为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。较小的网格尺寸能够增加材料与混凝土表面的接触面积,有助于更均匀地分散混凝土水化及收缩应力,从而有效提高抗裂效果。钢丝网片由于网格较大,无法提供同样程度的应力分散,导致抗裂效果略逊一筹。计算两种纤维网开裂面积的平均值可知,分别较三种规格钢丝网片开裂面积减小了 13.14%、39.17%、53.92%。

此外,试验数据显示,无论是泵送配比还是非泵送配比的混凝土板,加入纤维网后均能显著提高

混凝土的抗裂性能。然而,非泵送配比试件在抗裂效果上优于泵送配比试件。这是因为混凝土在固化过程中会发生水化反应,随后出现干燥收缩现象。与非泵送配比试件相比,泵送配比试件在浇筑相同体积混凝土时用水量更大,这导致干燥收缩现象更加显著,从而抗裂效果较差。

## 2.4 收缩应变分析

在试验过程中,混凝土的收缩受到周围栓钉的约束。由于混凝土收缩产生的应力作用,栓钉会发生弹性变形,该变形可以通过安装在栓钉根部的应变片进行监测。通过分析应变数据的规律和幅度,能够有效判断混凝土板内部应变的变化趋势。以下描述了部分试件在收缩过程中,栓钉应变在 15 h 内变化的情况。测量点的布置如图 7 所示,应变随时间的变化关系如图 8 所示。

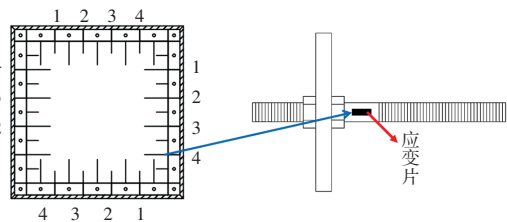


图7 应变片编号  
Fig. 7 Strain gauge number

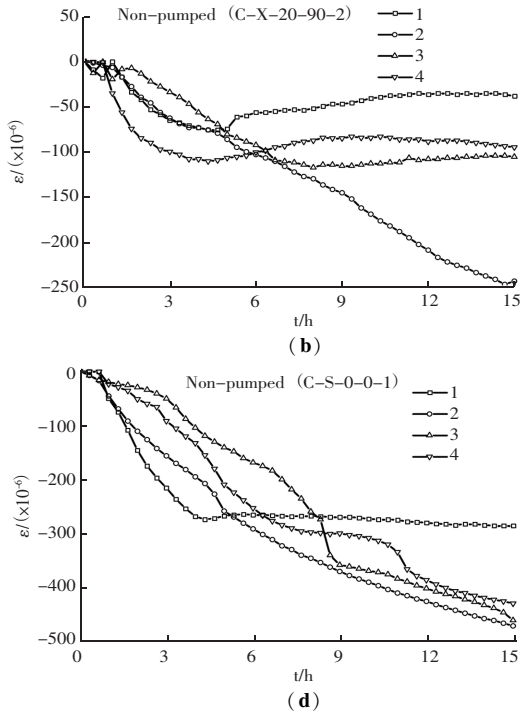
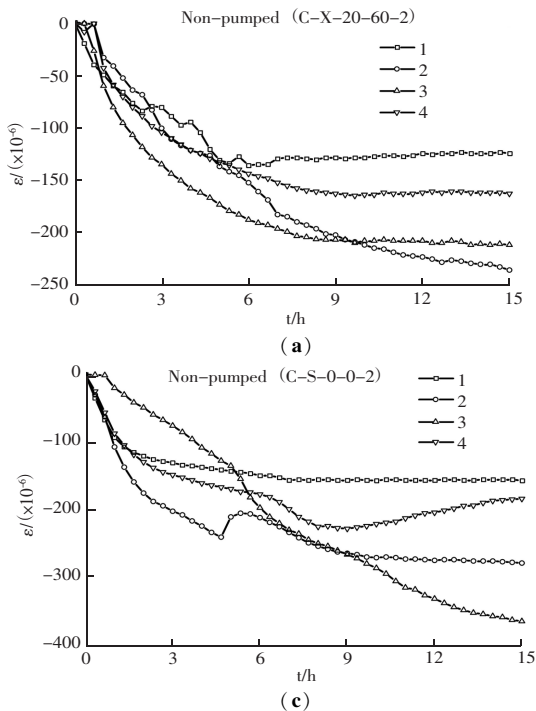


图8 应变曲线  
Fig. 8 Strain curve

为消除偶然因素影响,图7中统一位置的应变测点被赋予统一编号,应变随时间变化的曲线为相应编号的四个测点数据的平均值。观察结果显示,混凝土板边缘的收缩应变分布不均匀,中部收缩应变较大,而靠近转角的收缩应变较小。应变特征与裂缝特征一致:收缩裂缝通常出现在板边缘的中部区域,而边角处未出现裂缝。此外,布置纤维网的试件相比于未布置网片的对照组,收缩应变较小,这表明纤维网的加入能够有效承提部分收缩应力,从而提高混凝土板的抗裂性能。

### 3 结论

通过对布置不同类型纤维网的混凝土板进行约束收缩开裂试验,研究纤维网对混凝土板抗裂性能的影响。纤维网分为两种:BFM60和BFM90,布置分为三种:1/2厚度、1/4厚度、表面,并设置了钢丝网片的混凝土板作为对照试验,通过对混凝土板的裂缝分布规律、初裂时间、最大裂缝宽度、开裂面积和收缩应变等参数进行分析,对比各试件的抗裂性能,主要结论如下:

(1) 裂缝主要出现在约束端和板中心部位。约束端的裂缝较窄、短且不连续,而中心部位的裂缝则较长且较宽。

(2) 纤维网的加入能显著提升混凝土板的抗裂效果,且随着纤维网的布置逐渐接近混凝土板表面抗裂效果会更好。当纤维网布置于混凝土板表面时,与未加网的素混凝土板相比,初裂时间延长了3.6 h,最大裂缝宽度和开裂面积分别降低了38.88%、79.33%。

(3) 试验发现纤维网相比常用的抗裂钢丝网片,具有更优异的抗裂效果。其开裂面积分别较三种常见钢丝网片( $\Phi 3@50 \times 50$ 、 $\Phi 4@100 \times 100$ 、 $\Phi 6@200 \times 200$ )降低了13.14%、39.17%、53.92%。

(4) 混凝土板边缘的收缩应变分布不均,中部应变较大,而边角处较小。纤维网的加入能够有效减小混凝土板因收缩引起的应力。

### 参 考 文 献

[1] MAO J, LIANG N, LIU X, et al. Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests [J]. *Journal of Building Engineering*,

2023, 70: 106155.

- [2] 贾宝新,梁世纪,李东泽,等.植物浸出液改性混凝土力学性能及抗裂性能[J].*复合材料学报*,2024,42(7):1-15.
- [3] 罗大明,李凡,牛荻涛.人工智能时代混凝土结构耐久性诊断研究进展[J].*建筑结构学报*,2024,45(2):1-13.
- [4] 潘自立,徐键,刘剑光,等.高原无砟轨道混凝土抗裂性能提升技术研究[J].*铁道工程学报*,2021,38(10):37-43.
- [5] 张鹏,花东升,邓宇.低周反复荷载下预应力CFRP筋-型钢/混凝土偏拉构件抗裂性能试验[J].*复合材料学报*,2022,39(8):4017-4027.
- [6] 何余良,吴财俊,何吾健,等.预应力混杂纤维混凝土组合梁负弯矩区开裂损伤研究[J].*中国公路学报*,2025,38(12):430-443.
- [7] 李杉,周郑州,卢亦焱,等.聚乙烯醇纤维掺量对高延性地聚合物混凝土早期抗裂和收缩性能影响[J].*大连理工大学学报*,2024,64(1):74-81.
- [8] 周臻,张逸,王永泉,等.网格增强UHPC薄板拉伸力学性能试验研究[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2019,49(4):611-617.
- [9] HAMODA A, SHAHIN R I, ABADEL A A, et al. Shear strengthening of normal concrete deep beams with openings using strain-hardening cementitious composites with glass fiber mesh: Structures [C], 2024. Elsevier.
- [10] 吕杨,吴学乾,李芳芳,等.BTRC和BRRC加固混凝土梁抗弯性能试验研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2023,31(1):224-235.
- [11] 邓宗才,鹿宇浩,桂营金.钢丝网或纤维网增强超高性能混凝土双向板弯曲性能[J].*复合材料学报*,2022,39(10):4757-4768.
- [12] 李云鹏,陈学平.玄武岩纤维网应用于公路边坡防护稳定评价[J].*公路*,2020,65(8):65-69.
- [13] 修嘉凯,王伯昕,白子龙,等.冻融循环作用下玄武岩纤维网增强混凝土梁弯曲性能试验研究[J].*混凝土*,2023(10):17-20.
- [14] 高孟冉,吴学乾,成全喜,等.玄武岩纤维网增强混凝土轴拉力学性能研究[J].*天津城建大学学报*,2020,26(5):328-332.
- [15] 李冬,丁一宁.钢纤维对玄武岩纤维编织网增强混凝土双向弯曲性能的影响[J].*复合材料学报*,2019,36(2):482-490.
- [16] ZHU Z, XIAO P, KANG A, et al. Innovative design of self-adhesive basalt fiber mesh geotextiles for enhanced pavement crack resistance [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2024, 52(4): 368-382.
- [17] ZHANG J, XU W, WENG X, et al. Impact resistance of concrete pavement surface reinforced with fibre mesh [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, 24(1): 2088753.

导弯矩  $M_x$  及最大主应力  $\sigma_{\max}$  均大于  $y$  方向分量, 表明顶板倾向为主要的承力与破断发展方向。

(2) 顶板破断是一个动态演化过程, 其形态演进遵循“O-X-<”规律。初次破断前, 长边缘中部首先形成半“O”形应力集中区, 随后拉应力区向板内扩展并连接形成为“X”形, 最终导致失稳破断。

(3) 周期破断时, 因破断岩块结构的铰接作用, 应力集中区发生转移, 在右长边形成新的半“O”形应力区, 并在左长边(煤壁侧)演化为“<”形区域。

## 参 考 文 献

- [1] 左建平, 于美鲁, 孙运江, 等. 不同厚度岩层破断模式转变机理及力学模型分析 [J]. 煤炭学报, 2023, 48 (4): 1449 - 1463.
- [2] 左建平, 于美鲁, 胡顺银, 等. 不同厚度岩层破断模式实验研究 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1 (2): 88 - 96.
- [3] 高晓进, 张震, 黄志增, 等. 深井直覆硬厚顶板侧向破断模式及采动应力响应特征研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (8): 2450 - 2461.
- [4] 蔺星宇, 徐刚, 张震, 等. 大采高综放工作面支架动态响应特征研究及应用 [J/OL]. 煤炭学报, 2025, 50 (增刊1): 177 - 191. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0732.
- [5] 陈冬冬, 李子健, 谢生荣, 等. 弹 - 塑性基础边界两侧采空(留煤柱)基本顶板结构初次破断特征 [J]. 煤炭学报, 2024, 49 (5): 2195 - 2211.
- [6] 张守宝, 李强, 刘志高, 等. 伪斜工作面梯形采场的基本顶初次破断特征 [J]. 矿业科学学报, 2022, 7 (2): 175 - 184.
- [7] 刘一扬, 宋选民, 王仲伦. 厚硬岩层周期破断步距计算及影响因素分析 [J]. 煤炭工程, 2020, 52 (7): 106 - 111.
- [8] 朱卫兵, 于斌, 鞠金峰, 等. 采场顶板关键层“横 U - Y”型周期破断特征的试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (2): 36 - 43.
- [9] 滕博, 李东顶, 李文平. 基于弹性薄板理论的大南湖矿区弱胶结覆岩离层动态演化规律研究 [J]. 煤炭技术, 2024, 43 (11): 45 - 50.
- [10] 胡威, 高志强. 基于薄板理论的覆岩导水裂隙带高度研究 [J]. 煤炭科技, 2024, 45 (3): 126 - 130.
- [11] 李子臣, 王沉, 张浩鑫, 等. 急倾斜煤层俯伪斜工作面基本顶破断特征分析 [J]. 煤炭工程, 2023, 55 (6): 94 - 100.
- [12] 何富连, 何文瑞, 陈冬冬, 等. 考虑煤体弹 - 塑性变形的基本顶板初次破断结构特征 [J]. 煤炭学报, 2020, 45 (8): 2704 - 2717.
- [13] 何文瑞, 何富连, 陈冬冬, 等. 坚硬厚基本顶特厚煤层综放沿空掘巷煤柱宽度与围岩控制 [J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37 (2): 349 - 358, 365.
- [14] 谢生荣, 陈冬冬, 何尚森, 等. 基本顶弹性基础边界薄板模型分析 (II) —— 周期破断 [J]. 煤炭学报, 2017, 42 (12): 3106 - 3115.
- [15] 薛熠, 滕腾, 王希贺, 等. 采场顶板破断模型及垮落规律分析 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (7): 156 - 161.
- [16] 浦海, 黄耀光, 陈荣华. 采场顶板 X - O 型断裂形态力学分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40 (6): 835 - 840.
- [17] 王新丰, 高明中, 陈雨雪, 等. 基于弹性薄板理论的采场顶板破断特征分析 [J]. 金属矿山, 2015 (6): 24 - 28.
- [18] 屠洪盛, 屠世浩, 陈芳, 等. 基于薄板理论的急倾斜工作面顶板初次变形破断特征研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31 (1): 49 - 54, 59.
- [19] 徐芝纶. 弹性力学: 下册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 1 - 3, 75 - 78, 3 - 10.

(上接第 77 页)

- [18] HU C, WENG X, YAN X, et al. Study on frost resistance and abrasion resistance of fiber mesh reinforced concrete; E3S Web of Conferences [C], 2020. EDP Sciences.
- [19] 朱德举, 黄伟, 郭帅成. 树脂涂层及海水浸泡对玄武岩纤维织物增强海水海砂混凝土力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2024, 41 (8): 4211 - 4224.
- [20] 王妹嫻. B - FRCM 加固钢筋混凝土梁抗弯性能有限元分析 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019.
- [21] 王娟. 玄武岩纤维的生产及其应用 [J]. 国际纺织导报, 2022, 50 (2): 3 - 6.
- [22] DADVAR S A, MOUSA S, MOHAMED H M, et al. Eccentric loading behavior of fibrous self - consolidated concrete columns reinforced with basalt FRP (BFRP) bars and spirals [J]. Engineering Structures, 2025, 325: 119408.
- [23] HU P, SONG X, LIU Y, et al. Optimizing fiber - reinforced flexible concrete blankets: A study on basalt fiber effects on strength properties [J]. Construction and Building Materials, 2024, 456: 139272.
- [24] 谢剑, 刘家旺, 李伟, 等. 玄武岩纤维网格增强磷酸镁水泥砂浆复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41 (10): 5492 - 5503.