

## 玄武岩纤维 TRC 板拉伸性能试验研究\*

杜运兴<sup>1,2†</sup>, 张蒙蒙<sup>1,2</sup>, 周芬<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**采用短切钢纤维体积掺量为0%、0.8%、1.6%的3种精细混凝土基体分别制备玄武岩纤维 TRC 板,并对纤维编织网施加不同水平的预拉力,通过单轴拉伸试验,考察了各类 TRC 板试件的应力-应变关系和裂缝形态.试验结果表明:随着纤维编织网层数的增加,TRC 板试件的开裂荷载减小,极限荷载和极限应变均增大,裂缝形态得到很大改善.随着纤维编织网上预拉力水平的提高,TRC 板试件的开裂荷载增大,极限荷载并未产生明显变化,极限应变减小,裂缝逐渐表现出不良的形态.TRRC 板试件的拉伸性能与短切钢纤维掺量和预拉力水平均存在一定的相关性;当基体混凝土中掺加体积分数为1.6%的短切钢纤维且纤维编织网上施加的预拉力大小合适时,TRC 板试件表现出相对较好的拉伸性能.

**关键词:**玄武岩纤维编织网;TRC 板;拉伸试验;纤维编织网层数;预拉力;钢纤维

**中图分类号:**TU312

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Tensile Performance of Basalt TRC Plate

DU Yunxing<sup>1,2†</sup>, ZHANG Mengmeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Fen<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Three kinds of fine-grained concrete matrix with chopped steel fibers of 0%, 0.8% and 1.6% volume ratios were used to fabricate the basalt TRC plates, and various prestressing were exerted on basalt textile layers. The stress-strain relationship and cracking patterns of TRC plate were investigated by means of uniaxial tensile tests. The obtained results indicate that, with the increase of the number of textile layers, cracking strength of TRC plate decreases, the peak load and strain capacity tend to increase, and cracking patterns are greatly improved. In addition, the increased cracking strength, reduced strain capacity and undesirable cracking patterns are observed with the increase of prestressing, while no obvious change occurs for peak load. Furthermore, the tensile performance of basalt TRC plate is correlated with volume ratios of chopped steel fibers and prestressing. When chopped steel fibers with 1.6% volume ratio are mixed in the matrix and appropriate prestress force is applied to textile layers, the basalt TRC plate exhibits its relatively good tensile performance.

**Key words:** basalt textile; TRC plate; tensile testing; textile layers; prestressed; steel fibers

纤维编织网增强混凝土(Textile Reinforced Concrete,简称 TRC)是一种新型复合材料,将高强

\* 收稿日期:2017-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378199), National Natural Science Foundation of China(51378199)

作者简介:杜运兴(1971—),男,河南平顶山人,湖南大学副教授

† 通讯联系人, E-mail: duyunxing@hnu.edu.cn

度、高延性的纤维编织网与脆性的基体材料很好地结合起来.与普通钢筋混凝土材料相比,TRC 具有较好的耐腐蚀性能、较高的极限应变、轻质高强等优点,可用于多种形式的构件<sup>[1]</sup>.

本文尝试使用成本较低且环保的玄武岩纤维作为增强材料.近年来,玄武岩纤维在 FRP 领域已得到一定的应用,但在 TRC 领域的研究还很缺乏<sup>[2]</sup>.

Rambo 等<sup>[3]</sup>的研究发现,当玄武岩纤维编织网的层数增加到 3 层和 5 层时,TRC 板表现出较好的裂缝形态,承载力和延性均得到了明显的提升.徐世烺等<sup>[4]</sup>提出了临界配网率的概念,其研究表明,当配网率大于临界配网率时,TRC 板表现出很好的开裂形式,极限荷载大于开裂荷载.

国内外学者通过对纤维编织网施加预应力和外掺短切纤维来提高 TRC 板的抗裂性能.Reinhardt 等<sup>[5]</sup>的研究发现,对于环氧树脂胶浸渍处理过的碳纤维 TRC 板,预应力可提高其开裂荷载和极限承载力,降低开裂后的裂缝宽度,减小变形.苟勇等<sup>[6]</sup>的研究发现,预应力使 TRC 板开裂荷载提高,挠曲变形减小,但破坏荷载并没有提高.Barhum 等<sup>[7-8]</sup>的研究发现,掺入短切玻璃纤维和碳纤维可显著提高 TRC 板的开裂荷载,但对其承载力的提高幅度不明显.卜良桃等<sup>[9-10]</sup>指出,在水泥砂浆中掺入钢纤维可以大大改善水泥基材料的性能,使其具有高强度、高韧性、高抗裂性和大延伸率的特性.

本文使用玄武岩纤维编织网来增强精细混凝土基体,通过对纤维编织网施加预拉力来提高 TRC 板的抗裂性能,同时外掺短切钢纤维,以获得较高的极限承载力,改善 TRC 板的裂缝形态.本文通过单轴拉伸试验,考察各类试件的应力-应变关系和裂缝形态,来研究纤维编织网层数、纤维编织网的预拉力以及短切钢纤维掺量对 TRC 板拉伸性能的影响.

## 1 试验材料

### 1.1 精细混凝土基体

试验中的预拉力试件采用先张法制作,在基体材料中加入硅灰来提高早期强度以减少释放预拉力带来的损失.基体采用精细混凝土(骨料最大粒径为 1.2 mm),且具有较好的自密实性和流动性,以保证纤维编织网网格内及各层纤维编织网之间基体

混凝土密实.基体混凝土配合比见表 1.基体混凝土的材料性能见表 2.

表 1 精细混凝土基体的配合比

P.O 42.5 水泥	粉煤灰	硅灰	0~0.6 mm 砂	0.6~1.2 mm 砂	减水剂	水	消泡剂
645	274.4	58.8	408	817	4	392	2.4

注:减水剂的固含量为 40%.

表 2 精细混凝土基体的材料性能

时间/d	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
7	40.72	4.20
28	52.20	5.26

### 1.2 纤维编织网与短切钢纤维

试验所用玄武岩纤维编织网的表面经苯丙乳液浸渍,网格尺寸为 5 mm×5 mm,如图 1(a)所示.试件的承载力由经向纤维束承担.测试了经向纤维编织网条带的拉伸力学性能,条带宽 40 mm(包含 8 根纤维束),标距为 100 mm.在条带两端粘贴带有波纹状压痕的铝片进行加强,通过夹具将其夹持在 MTS C43.304 万能试验机上,以 0.5 mm/min 的加载速率进行测试.图 1(b)为玄武岩纤维编织网条带.表 3 为玄武岩纤维编织网条带的材料参数.

试验所用短切钢纤维呈细圆形,表面镀铜,直径 0.22 mm,长度 4~6 mm,密度 7.8 g/cm<sup>3</sup>,抗拉强度 2 800 MPa,短切钢纤维形态如图 1(c)所示.

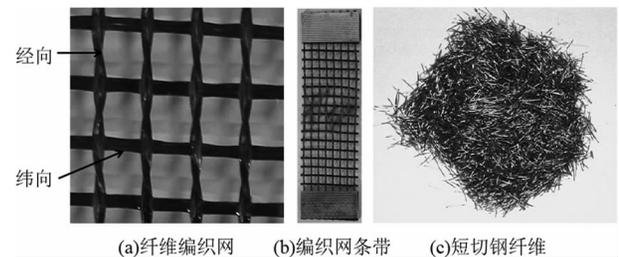


图 1 玄武岩纤维编织网及短切钢纤维形态

Fig.1 Configuration of basalt textile and chopped steel fibers

表 3 玄武岩纤维编织网条带的材料参数

纤维类型	单层抗拉承载力/N	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%	面密度/(g·m <sup>-2</sup> )	密度/(g·m <sup>-3</sup> )
13μ 264×2tex (经向)	1 383	884	90	2.18	220	2.7

## 2 试件制备和试验方法

### 2.1 试件制备

TRC 板的设计厚度为 12 mm.试件布置 1 层编织网时,编织网位于板截面中间;试件布置 2 层编织网时,编织网之间间距和保护层厚度均为 4 mm;试件布置 3、4、5 层编织网时,编织网之间间距分别为 3 mm、2 mm、1.5 mm,保护层厚度均为 3 mm.

试件制作的第一步是将编织网固定于预拉力张拉装置上,保证每层编织网的经向纤维束对齐.第二步,利用预拉力张拉装置对编织网施加预拉力,施加的预拉力值为预设预拉力值的 1.05 倍,24 h 后,编织网的预拉力出现损失,将编织网的预拉力重新加至编织网预设预拉力值的 1.05 倍.第三步,将按设计配合比拌制的基体混凝土直接浇筑在编织网上,充分振捣后抹平.对于预拉力试件,浇筑后 5 d 拆模,并将此时的预拉力值作为实际施加的预拉力值  $F_{con}$ .对于非预拉力试件,2 d 后方可拆模.拆模后,放置于标准养护室养护至 28 d.

将养护完成后的薄板切割成尺寸均为 250 mm(长)×40 mm(宽)×12 mm(厚)的试件作为待测试件,每种工况 6 个待测试件<sup>[11]</sup>.对每个试件取 3 个截面分别测量厚度和宽度,计算横截面积,取平均值作为截面面积代表值.编织网的预拉力水平由实际施加的预拉力值( $F_{con}$ )与编织网条带本身抗拉承载力( $F_t$ )的比值来衡量,将单层编织网条带的抗拉承载力与编织网层数的乘积作为  $F_t$  的代表值.

试件的编号规则为 P-预拉力水平-L-纤维编织网层数-S-钢纤维的体积分数,例如 P17.4L4S1.6 表示:预拉力水平为 17.4%,纤维编织网为 4 层,短切钢纤维体积分数为 1.6%的 TRC 拉伸试件.

### 2.2 试验方法

单轴拉伸试验在 MTS C43.304 万能试验机上完成.加载速率为 0.5 mm/min,拉伸试件标距为 100 mm.荷载和标距内变形分别由与试验机配套的力传感器和引伸计同步采集.试验采用的拉伸装置<sup>[12]</sup>如图 2(a)所示,图 2(b)为拉伸试验测试原理图.

## 3 试验工况与结果分析

### 3.1 试验工况及结果

为了研究纤维编织网层数对 TRC 板拉伸性能的影响,以纤维编织网层数为变化参数完成了 6 种工况的研究,分析了基体混凝土试件及 1~5 层纤维

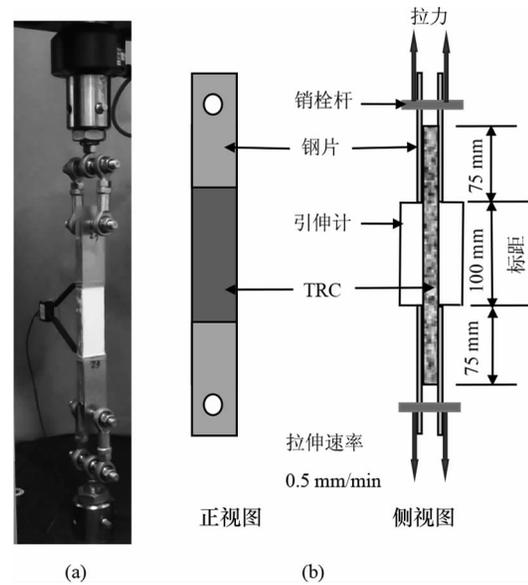


图 2 拉伸试验装置

Fig.2 Tensile test set-up

编织网 TRC 板试件的拉伸性能.这 6 种工况试件的纤维编织网均未施加预拉力,基体混凝土中均未掺加短切钢纤维.6 种工况的试验编号为: P0L0S0、P0L1S0、P0L2S0、P0L3S0、P0L4S0、P0L5S0.

为了研究预拉力对 TRC 板拉伸性能的影响,以预拉力水平为变化参数完成了 2 种工况的研究,对 4 层纤维编织网施加 2 种水平的预拉力,这 2 种工况试件的基体混凝土中均未掺加短切钢纤维.2 种工况的试验编号为: P17.4L4S0、P24.9L4S0.

为了研究短切钢纤维对预拉力 TRC 板拉伸性能的影响,以短切钢纤维掺量和预拉力水平为变化参数完成了 4 种工况的研究,对 P17.4L4S0、P24.9L4S0 两种工况的基体混凝土中分别加入 2 种掺量的短切钢纤维:0.8%和 1.6%.4 种工况的试验编号为: P17.4L4S0.8、P17.4L4S1.6、P24.9L4S0.8、P24.9L4S1.6.

图 3 对各工况试件的开裂应力和极限应力进行

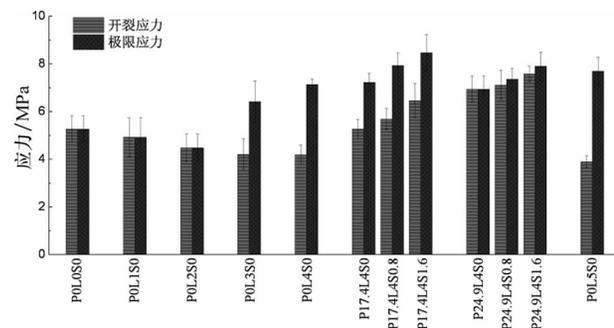


图 3 TRC 板的开裂应力和极限应力

Fig.3 The first-crack stress and ultimate tensile strength of TRC plate

了比较,表4汇总了各工况试件在单轴拉伸试验下的结果。

表4 TRC板单轴拉伸试验结果

Tab.4 The experimental results of TRC plate under uniaxial tensile loading

试件编号	线弹性段		强化段	
	开裂应力	开裂应变	极限应力	极限应变
	/MPa	/%	/MPa	/%
P0L0S0	5.26(0.55)	0.012(0.001)	—	—
P0L1S0	4.92(0.81)	0.022(0.003)	—	—
P0L2S0	4.48(0.57)	0.026(0.005)	—	—
P0L3S0	4.21(0.65)	0.033(0.001)	6.42(0.87)	0.935(0.145)
P0L4S0	4.19(0.40)	0.033(0.008)	7.14(0.22)	1.026(0.030)
P17.4L4S0	5.26(0.41)	0.032(0.010)	7.22(0.39)	0.621(0.073)
P17.4L4S0.8	5.68(0.44)	0.028(0.005)	7.93(0.52)	0.684(0.135)
P17.4L4S1.6	6.46(0.71)	0.028(0.006)	8.47(0.76)	0.916(0.164)
P24.9L4S0	6.94(0.55)	0.033(0.032)	—	—
P24.9L4S0.8	7.11(0.62)	0.036(0.025)	7.35(0.45)	0.273(0.324)
P24.9L4S1.6	7.58(0.33)	0.031(0.076)	7.90(0.59)	0.419(0.297)
P0L5S0	3.89(0.25)	0.029(0.005)	7.70(0.58)	1.172(0.243)

注:表中数值表示平均值,括号中数值表示标准差。

### 3.2 试验结果分析

#### 3.2.1 纤维编织网层数对TRC板拉伸性能的影响

图4汇总了P0L0S0、P0L1S0、P0L2S0、P0L3S0、P0L4S0、P0L5S0的单轴拉伸应力-应变曲线,图5反映了这6种工况试件拉伸后的裂缝形态。

图4中6种工况试件的单轴拉伸应力-应变曲线表明不同纤维编织网层数的TRC板试件的拉伸性能有较大的差别。P0L0S0和P0L1S0的曲线表现为一单调直线,试件在达到开裂荷载时,直接发生脆性断裂。P0L2S0的曲线开裂之前表现为一曲线,开裂后承载力突降,然后纤维编织网开始发挥作用,荷载慢慢提升,形成第二条裂缝,这两条裂缝不断扩展,很快试件被拉断,试件在完全断裂之前的承载力达不到试件开裂时的水平。其余工况的曲线呈明显的3个阶段<sup>[4]</sup>,试件表现出了明显的应变硬化性能。这些现象说明,1~2层纤维编织网对基体混凝土没有增强作用,试件的最大承载力即为基体的抗拉承载力;3层及其以上层数的纤维编织网对基体混凝土起到增强作用。

各工况试件应力-应变曲线的第I阶段均为线弹性阶段,该阶段基体混凝土和纤维编织网共同承担荷载,第一条裂缝的出现标志着这一阶段的结束。结合图3和图4,可以发现,随着纤维编织网层数的增加,试件的开裂荷载逐渐降低。P0L5S0的开裂荷载降低幅度最大,与P0L0S0相比,P0L5S0的开裂荷载降低了26%。产生这种现象的原因是:试件采用的纤维编织网既有经向纤维束也有纬向纤维束,

纬向纤维束在TRC板试件中不承担荷载,仅起到连接固定经向纤维束的作用,在基体混凝土中纬向纤维束相当于削弱了该位置的试件截面,此截面成为相对薄弱截面,从而降低了开裂荷载。

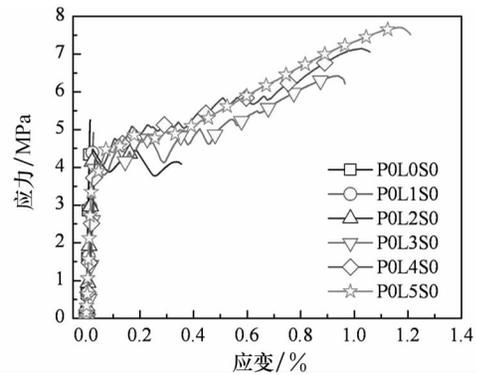


图4 不同纤维编织网层数TRC板的拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Tensile stress-strain curves of TRC plate with different reinforcement

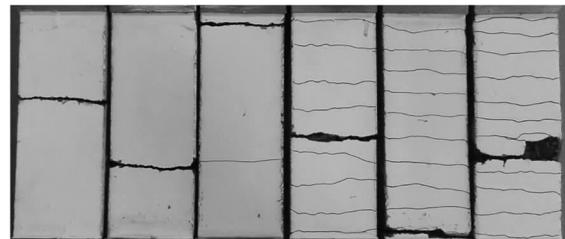


图5 不同纤维编织网层数TRC板的裂缝形态图

Fig.5 Typical cracking patterns of TRC plate with different reinforcement

各工况试件应力-应变曲线的第II阶段为多裂缝开展阶段,P0L0S0和P0L1S0不存在该阶段。该阶段的裂缝位置处主要由纤维编织网承担轴向拉力,裂缝以外的区域纤维编织网与基体混凝土之间保持良好的黏结状态,裂缝位置处纤维编织网的力会逐渐传递给未开裂位置的基体混凝土和纤维编织网,距离裂缝的位置越远基体混凝土分配的拉应力越大,当未开裂的基体达到其抗拉强度时,出现下一条裂缝,应力在基体混凝土与纤维编织网之间往复传递,当试件上裂缝间距内的基体混凝土获得的应力不足以达到基体混凝土的抗拉强度时,裂缝不再出现。此阶段表现为应变持续增加,应力基本保持不变。TRC板试件在拉伸过程中的裂缝形态反映试件的应变硬化性能,裂缝数目越多、裂缝间距和裂缝宽度越小,应变硬化性能越显著,这个特点可在应力-应变曲线的第II阶段反映。将P0L5S0分别与P0L3S0和P0L4S0比较,从图5中发现P0L5S0裂缝数目增加,反映在图4应力-应变曲线上

P0L5S0 第 II 阶段的应变反而减小,这说明 P0L5S0 的裂缝宽度是减小的,其裂缝形态表现为细而密的特点.这说明,随着纤维编织网层数增加,裂缝形态得到很大改善,裂缝数目增多,裂缝间距和裂缝宽度减小.

各工况试件应力-应变曲线的第 III 阶段为强化阶段,该阶段主裂缝扩展,荷载完全由纤维编织网来承担.结合图 3 和图 4,可以发现,当纤维编织网为 3 层及其以上层数时,极限荷载和极限应变都有不同幅度的提升,且两者都随着纤维编织网层数的增加而增大.P0L3S0、P0L4S0、P0L5S0 与 P0L0S0 相比,极限荷载分别提升了 22.1%、35.7%、46.4%. P0L5S0 的极限应变达到最大值,为 1.17%.

### 3.2.2 纤维编织网预拉力对 TRC 板拉伸性能的影响

图 6 汇总了 P0L4S0、P17.4L4S0、P24.9L4S0 的单轴拉伸应力-应变曲线,图 7 反映了这 3 种工况试件拉伸后的裂缝形态.

图 6 中 3 种工况试件的单轴拉伸应力-应变曲线表明纤维编织网的预拉力对 TRC 板试件的拉伸性能有较大的影响.

图 8 说明了纤维编织网预拉力的作用原理<sup>[5]</sup>.纤维编织网预拉力的释放使基体混凝土产生预压力  $N_p$ .在对试件进行单轴拉伸时,轴向拉力要同时抵消基体混凝土的预压力  $N_p$  和其自身的抗拉承载力  $N_t$ ,试件才能达到开裂荷载  $N_{cr}$  ( $N_{cr} = N_p + N_t$ ).

结合图 3 和图 6,可以发现,纤维编织网的预拉力可明显提高 TRC 板试件的开裂荷载,且随着预拉力水平的提高,开裂荷载提高幅度增大.P17.4L4S0、P24.9L4S0 与 P0L4S0 比较,开裂荷载分别提高 25.5% 和 65.6%.对纤维编织网施加预拉力可以使基体混凝土产生预压力  $N_p$ ,如图 8 所示;又由于纤维编织网在试件中处于预拉状态,可以减少基体混凝土浇筑振捣对编织网位置的改变,从而减少了编织网在基体混凝土内的弯曲、扭转.这两个因素共同导致了试件开裂荷载的提高.

结合图 3 和图 6 可发现,纤维编织网的预拉力对 TRC 板试件的极限荷载没有明显的影响.P17.4L4S0 与 P0L4S0 比较,极限荷载仅提高了 1.1%;P24.9L4S0 与 P0L4S0 比较,极限荷载仅降低了 2.8%.

结合图 6 和图 7 可以发现,P17.4L4S0 工况的试件经历了多裂缝开展的过程,而 P24.9L4S0 工况

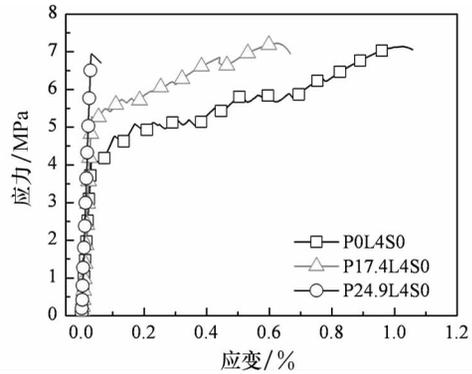


图 6 不同预拉力水平 TRC 板的拉伸应力-应变曲线  
Fig.6 Tensile stress-strain curves of TRC plate with different prestress degrees

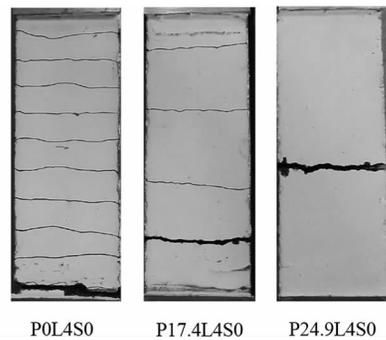


图 7 不同预拉力水平 TRC 板的裂缝形态图  
Fig.7 Typical cracking patterns of TRC plate with different prestress degrees

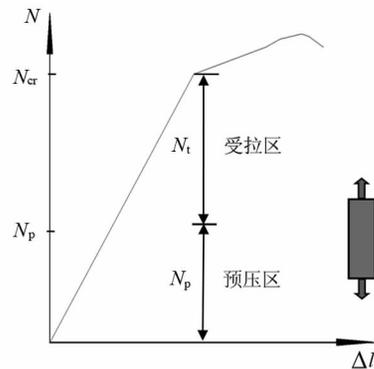


图 8 预拉力作用原理图  
Fig.8 Principle of prestress

的试件在达到开裂荷载时发生突然的脆性破坏.这说明,P17.4L4S0 工况试件的纤维编织网施加的预拉力大小是合适的;P24.9L4S0 工况试件的纤维编织网施加的预拉力过大,其开裂荷载即为极限荷载.

结合图 6 和图 7 可以发现,纤维编织网的预拉力对 TRC 板试件的裂缝形态产生不良影响,会明显减少试件的裂缝数目、增大裂缝间距,表现为 TRC 板试件在破坏时的极限应变减小.这是因为,

在多裂缝开展的过程中,应力在编织网与基体混凝土之间往复传递时,当试件上裂缝间距内的基体混凝土所获得的拉力能抵消  $N_{cr}$  时,如图 8 所示,才会出现下一条裂缝,这就使得与非预拉力 TRC 板试件相比,预拉力 TRC 板试件的裂缝数目减少、裂缝间距增大,从而板件在破坏时的极限应变减小。P24.9L4S0 工况的试件在这方面的表现更为突出,在达到开裂荷载时发生突然的脆性破坏,这说明,要合理控制纤维编织网预拉力的大小,过大的预拉力会严重降低 TRC 板试件的变形能力。

### 3.2.3 短切钢纤维对预拉力 TRC 板拉伸性能的影响

图 9 中汇总了 P17.4L4S0、P17.4L4S0.8、P17.4L4S1.6、P24.9L4S0、P24.9L4S0.8、P24.9L4S1.6 六种工况试件的单轴拉伸应力-应变曲线,图 10 反映了这 6 种工况试件拉伸后的裂缝形态。

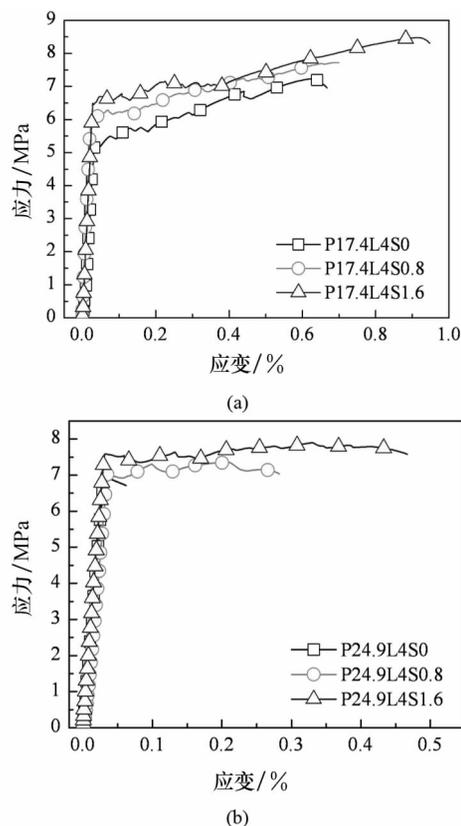


图 9 不同短切钢纤维掺量的预拉力 TRC 板拉伸应力-应变曲线

Fig.9 Tensile stress-strain curves of prestressed TRC plate with different volume fractions of chopped steel fibers

图 9 中 6 种工况试件的单轴拉伸应力-应变曲线表明 TRC 板的拉伸性能与预拉力水平和短切钢纤维掺量均存在一定的相关性。

结合图 3 和图 9 可以发现,对于纤维编织网预

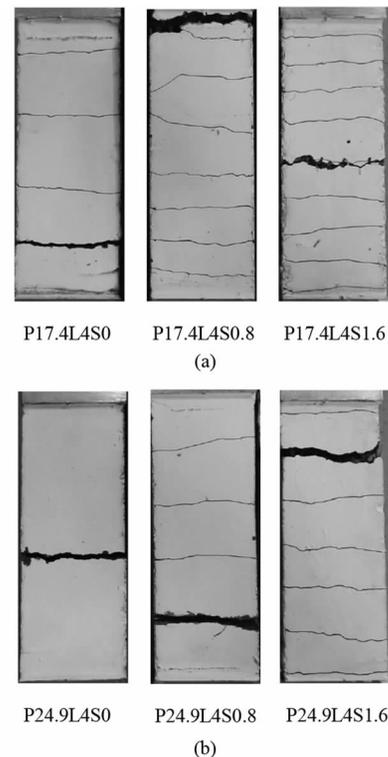


图 10 不同短切钢纤维掺量的预拉力 TRC 板裂缝形态图

Fig.10 Typical cracking patterns of prestressed TRC plate with different volume fractions of chopped steel fibers

拉力大小合适的 TRC 板试件,短切钢纤维的掺入可提高 TRC 板试件的开裂荷载、极限荷载和极限应变,且随着短切钢纤维掺量的增加,三者的提高幅度都增大。P17.4L4S0.8 与 P17.4L4S0 比较,开裂荷载、极限荷载、极限应变分别提高 8.0%、9.8%、10.1%;P17.4L4S1.6 与 P17.4L4S0 比较,三者分别提高 22.8%、17.3%、47.5%。产生上述现象是因为: 1) 在 TRC 板试件开裂前,短切钢纤维对微观裂缝的开展起到较好的桥联作用,阻碍了微观裂缝的扩展,从而达到提高开裂荷载的效果; 2) 短切钢纤维在基体混凝土中乱向分布,为基体混凝土和编织网提供额外的连接,从而提升了编织网与基体混凝土之间的黏结性能,一方面使 TRC 板试件的裂缝变得细而密,表现为试件极限应变的增加,另一方面提升了 TRC 板试件中各层编织网协同受力的性能,表现为试件极限荷载的提高;另外,在多裂缝开展的过程中,短切钢纤维跨接在细小裂缝之间,作为次要增强材料传递和承受一部分的荷载,这也会使 TRC 板试件的裂缝变得细而密,并使 TRC 板试件极限荷载提高;细而密的裂缝形态又有利于短切钢纤维传递和承受荷载这一性能的发挥,如此反复循环作用,直至裂缝超过一定的宽

度,短切钢纤维失去桥联作用,从而达到提高极限荷载和极限应变的效果。

结合图 3 和图 9 可以发现,对于纤维编织网预拉力过大的 TRC 板试件,0.8% 掺量的短切钢纤维对 TRC 板试件的开裂荷载和极限荷载没有明显的影响,1.6% 掺量的短切钢纤维可提高 TRC 板试件的开裂荷载和极限荷载,但提高幅度不大;2 种掺量的短切钢纤维均可提高 TRC 板试件的极限应变,但提高后的极限应变仍然很小,工程应用价值仍然较低。P24.9L4S0.8 与 P24.9L4S0 比较,开裂荷载、极限荷载分别提高 2.4%、3.4%,P24.9L4S1.6 与 P24.9L4S0 比较,开裂荷载、极限荷载分别提高 9.2%、13.8%;P24.9L4S0.8 和 P24.9L4S1.6 的极限应变分别为 0.273% 和 0.419%。

结合图 9 和图 10 可以发现,短切钢纤维的掺入有助于改善预拉力 TRC 板试件的裂缝形态,表现为裂缝数目增加、裂缝间距减小。这 6 种工况相比,P17.4L4S1.6 工况的试件裂缝形态相对较佳。

上述讨论说明,1.6% 掺量的短切钢纤维可以使预拉力 TRC 板更好地发挥拉伸性能。将 P17.4L4S1.6 和 P24.9L4S1.6 分别与 P0L4S0 比较,开裂荷载分别提高 54.2% 和 80.9%,极限荷载分别提高 18.6% 和 10.6%;P0L4S0、P17.4L4S1.6、P24.9L4S1.6 的极限应变分别为 1.026%、0.916%、0.419%。综合考虑,P17.4L4S1.6 具有相对较好的力学性能。

总之,在保证纤维编织网预拉力大小合适的前提下,外掺短切钢纤维能够使预拉力 TRC 板更好地发挥拉伸性能,且随着短切钢纤维掺量的增加,预拉力 TRC 板的拉伸性能更加优越。

## 4 结 论

本文通过单轴拉伸试验,研究了纤维编织网层数、纤维编织网的预拉力和短切钢纤维的掺量对玄武岩 TRC 板拉伸性能的影响,得到如下结论:

1) 纤维编织网层数是影响玄武岩纤维 TRC 板拉伸性能的重要因素。1~2 层纤维编织网对基体混凝土没有增强作用,其最大承载力即为基体的抗拉承载力;3~5 层纤维编织网的 TRC 板表现出明显的应变硬化性能,TRC 板的拉伸力学性能和裂缝形态均得到较大改善。

2) 合理控制预拉力的大小,是充分发挥预拉力作用优势的关键。纤维编织网的预拉力有助于提高 TRC 板的开裂荷载,对极限荷载的影响并不明显,

会降低 TRC 板的极限应变,对 TRC 板的裂缝形态产生不良影响;纤维编织网过大的预拉力,会严重降低 TRC 板的变形能力。

3) 对于预拉力 TRC 板,短切钢纤维的掺入有助于提高其开裂荷载、极限荷载和极限应变,且改善了其裂缝形态。在保证纤维编织网预拉力大小合适的前提下,外掺短切钢纤维能够使预拉力 TRC 板更好地发挥拉伸性能,且随着短切钢纤维掺量的增加,预拉力 TRC 板表现出更加优越的拉伸性能。

## 参考文献

- [1] COLOMBO I G, MAGRI A, ZANI G, *et al.* Textile reinforced concrete: experimental investigation on design parameters[J]. *Material and Structures*, 2013, 46(11): 1933-1951.
- [2] LARRINAGA P, CHASTRE C, BISCAIA H C, *et al.* Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress [J]. *Materials and Design*, 2014, 55(6): 66-74.
- [3] RAMBO D A S, SILVA F A, FILHO R D T, *et al.* Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete [J]. *Materials and Design*, 2015, 65: 24-33.
- [4] 徐世焯, 阎轶群. 低配网率纤维编织网增强混凝土轴拉力学性能[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5): 206-213.  
XU S L, YAN Y Q. Mechanical properties of textile reinforced concrete plate at low textile ratios[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5): 206-213. (In Chinese)
- [5] REINHARDT H W, KRUGER M, GROBE C U. Concrete prestressed with textile fabric [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 231-239.
- [6] 荀勇, 孙伟, REINHARDT H W, 等. 短纤维和织物增强混凝土板试验研究[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(11): 58-63.  
XUN Y, SUN W, REINHARDT H W, *et al.* An experimental study on short and textile reinforced concrete thin-slabs[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(11): 58-63. (In Chinese)
- [7] BARHUM R, MECHATCHERINE V. Effect of short, dispersed glass and carbon fibers on the behavior of textile-reinforced concrete under tensile loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 92: 56-71.
- [8] BARHUM R, MECHATCHERINE V. Influence of short dispersed and short integral glass fibers on the mechanical behavior of textile-reinforced concrete [J]. *Material and Structures*, 2013, 46(4): 557-572.
- [9] 卜良桃, 鲁晨, 朱健. 水泥钢纤维砂浆钢筋网加固矩形 RC 偏压柱试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(3): 15-20.  
BU L T, LU C, ZHU J. Experimental study of RC columns strengthened with steel fiber cement mortar with mesh reinforcement under eccentric loading [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(3): 15-20. (In Chinese)
- [10] 卜良桃, 曾坚, 李为. 钢纤维水泥砂浆钢筋网加固 RC 梁抗剪试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 7-11.  
BU L T, ZENG J, LI W. Shear behavior of RC beams strengthened by steel fiber ferrocement mortar [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2012, 39(2): 7-11. (In Chinese)
- [11] BSEN ISO 527-5 Plastics-determination of tensile properties—Part 5: test conditions for unidirectional fiber-reinforced plastic composites[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2009: 4-7.
- [12] CONTAMINE R, LARBI A S, HAMELIN P. Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2011, 528(29/30): 8589-8598.