



# 混杂纤维喷射混凝土的弯曲韧性

夏冬桃,张周强,张严方,祝玉亭

(湖北工业大学 土木工程与建筑学院,武汉 430064)

**摘要:**为了研究混杂纤维喷射混凝土的弯曲韧性,采用不同掺量的钢纤维和聚丙烯纤维混杂以及高炉微粉复合超叠加的方法制备 600 mm×600 mm×100 mm 混杂纤维喷射混凝土方板并置于刚性支撑架上,选用等位移控制对方板进行中心加载。通过生成的荷载-挠度曲线及对其进行积分所得的能量吸收值综合评价各组方板的弯曲韧性,同时,通过破坏过程评价各板裂缝控制能力。试验结果表明:掺入 1.2% 钢纤维和 0.11% 聚丙烯纤维的喷射板试件的弯曲韧性优于掺入 0.8% 钢纤维和 0.11% 聚丙烯纤维的喷射板,其最大峰值荷载提高了 18%,板中心挠度至 25 mm 时的能量吸收值也提高了 25.6%;对于仅掺入 0.8% 单一钢纤维的板,混杂了 0.11% 聚丙烯纤维后,两种纤维间的正混杂效应使得板中心挠度至 25 mm 时的能量吸收值提高了 28.5%;高炉微粉掺量的增加能提高混杂纤维喷射混凝土板的弯曲韧性;混杂纤维喷射混凝土板均展现出了良好的裂缝控制能力,板整体呈现裂而不断的延性破坏。

**关键词:**喷射;纤维混凝土;方板;弯曲韧性

**中图分类号:** TU528.572      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0067-06

## Flexural toughness of hybrid fiber reinforced shotcrete

Xia Dongtao, Zhang Zhouqiang, Zhang Yanfang, Zhu Yuting

(College of Civil and Building Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, P. R. China)

**Abstract:** The flexural toughness of hybrid fiber reinforced shotcrete was studied with hybrid fiber including different contents of steel fiber, polypropylene fiber and blast furnace powder super composite were used to reinforce in cement matrix. 600 mm×600 mm×100 mm hybrid fiber reinforced shotcrete panels were adopted and placed on the rigid support frame and the equal displacement was used to control the load on the center of panels. The load-deflection curves and the energy absorption value were used to comprehensively evaluate the flexural toughness of each group, and by analyzing the process of the panels failure the ability of the panels to limit the cracks could be assessed. The results showed that, the jet panels with 0.8% steel fiber and 0.11% polypropylene fiber showed better flexural toughness than the jet panels with 1.2% steel fiber and 0.11% polypropylene fiber, and the peak load increased by 18% and the energy absorption increased by 25.6% when the deflection was 25 mm. When jet panels with 0.8% steel fiber mixed with 0.11% polypropylene fiber, the energy absorption increased by 28.5% because of the positive

**收稿日期:** 2014-09-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(51108164)

**作者简介:** 夏冬桃(1975-),女,副教授,主要从事纤维混凝土研究,(E-mail) xdtxy@126.com。

**Received:** 2014-09-17

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(No. 51108164)

**Author brief:** Xia Dongtao (1975-), associate professor, main research interest: fiber reinforced concrete, (E-mail) xdtxy@126.com.

synergy effect of steel and polypropylene fiber. The flexural toughness of hybrid fiber reinforced shotcrete panels were reinforced and toughed with more blast furnace powder. All of the hybrid fiber reinforced shotcrete panels showed great ability to limit the cracks, and the whole of panels where the cracks appeared but not ran through presented ductile failure.

**Key words:** shot; fiber reinforced concrete; panel; flexural toughness

喷射混凝土是利用压缩空气或其他动力,借助喷射机械,将按一定比例配合的拌合料,通过管道输送并高速喷射到受喷面上凝结硬化而成的一种混凝土。喷射混凝土因其自身材料和工艺等特点在工程上得到极大应用,但喷射混凝土韧性差,且破坏常呈脆性,这也在一定程度上限制了其应用<sup>[1]</sup>。纤维的掺入能明显改善其韧性<sup>[2]</sup>,掺入纤维后的喷射混凝土被广泛应用于矿井、巷道、隧道、边坡等工程的支护及房建桥梁的加固工程中<sup>[3-5]</sup>。中国目前用来评价纤维喷射混凝土韧性所采用的指标主要为弯曲韧性,所采用的试验方法大部分是以美国 ASTM-C1018 方法和日本 JSCE 方法为代表的梁弯折试验<sup>[6-9]</sup>,但梁弯折试验所采用的梁试件因与实际纤维喷射混凝土受载作用机理存在较大的差别,故其试验结果只能反映纤维喷射混凝土材料所具备的部分性能<sup>[10]</sup>。在实际工程应用中纤维喷射混凝土更多的是以类板式构件的形式存在的,故相较于基于梁试件的梁弯曲试验,研究所采用的编入于《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13 : 2009)<sup>[11]</sup>中的方板法更符合纤维喷射混凝土的应用实际,能更客观、准确地反映纤维喷射混凝土的弯曲韧性。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 原材料与配合比

试验原材料:标号 42.5 的普通硅酸盐水泥;普通的自然水;碎石粒径为 5~15 mm;砂子的细度模数为 2.6;活性材料选用高炉微粉,其质量取体积分数与水泥质量的乘积,其主要性质如下:比表面积为 459 m<sup>2</sup>/kg,密度是 2.91 g/cm<sup>3</sup>,烧失量为 0.5%,28 d 的活性指数有 108%,其中三氧化硫、氯离子及玻璃体等组分的含量分别为 0.12%、0.005 7%和 95%;外加剂为 FDN-2 高效减水剂和 DE-5 型无碱液体速凝剂。基准配合比见表 1,钢纤维及聚丙烯纤维的基本参数见表 2。试验共采用 5 组试件,各组纤维喷射混凝土板的钢纤维、聚丙烯纤维及高炉微粉的体积分数参照表 3。试验组的编号如 S8P2 意思为钢纤维(Steel fiber)掺量为 0.8%,高炉微粉(blast furnace Powder)掺量为 20%,并默认聚丙烯纤维掺量为 0.11%;S8P0P2 中间的 P0 意思为未掺入聚丙烯纤维(Polypropylene fiber),而 S8 和 P2 的含义与前述含义一致。

表 1 纤维喷射混凝土的基准配合比

Table 1 The benchmark mix proportion of fiber reinforced shotcrete (kg · m<sup>-3</sup>)

水	水泥	砂	碎石	减水剂	速凝剂
173	481	692	1038	4.81	18.83

表 2 钢纤维和聚丙烯纤维参数

Table 2 The parameters of steel fiber and polypropylene fiber

纤维类型	长度/mm	等效直径/mm	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	长径比
钢纤维	13	0.2	7.85	2 000	65
聚丙烯纤维	12	0.03	0.91	276	400

表 3 各组板中纤维及高炉微粉的体积掺量

Table 3 The volume percents of fiber and blast furnace powder in each group panel %

组号	钢纤维	聚丙烯纤维	高炉微粉
S0P2	0.0	0.11	20
S8P1	0.8	0.11	10
S8P0P2	0.8	0.00	20
S8P2	0.8	0.11	20
S12P2	1.2	0.11	20

### 1.2 试件制作工艺

试件采用湿喷法制作,模板统一选用 650 mm × 650 mm × 120 mm 的加固木模板,其中一部分用于切割成 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块和 100 mm × 100 mm × 300 mm 的棱柱体试块,另一部分则切割成 600 mm × 600 mm × 100 mm 的方板试件。试件的基本制作过程如下所示:先采用强制式搅拌机对各组分进行添加搅拌,在这个过程中每次加料搅拌 3 min 后再进行下一次的加料搅拌,加

料的顺序为砂、石、水泥和高炉微粉→钢纤维和聚丙烯纤维→80%的水→20%的水和减水剂,待全部组分添加完后再拌合搅拌 3 min 即铲出并装入湿喷机的进料口中,而后在喷嘴处用空压机将速凝剂掺合到纤维混凝土料中后一并喷射到加固木模板中。喷射成型的试件在养护 1 d 后拆模,养护 15 d 后进行切割并表面打磨,最后在养护 28 d 后进行强度试验和方板实验。

### 1.3 试验方法

基本强度试验选用基于 100 mm×100 mm×100 mm 立方体的立方体抗压强度试验和基于 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体的轴心抗压强度试验,2 种试验方法均参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13 : 2009)<sup>[11]</sup>中的有关规定。考虑到 2 个试验所采用试件均为非标准试件,故参考文献[11],其对应的抗压强度折减系数均取 0.9,各组经折减后的立方体抗压强度值( $f_{icu}$ )和轴心抗压强度值( $f_c$ )参见表 4。参考文献[12],基于各组纤维混凝土的轴心抗压强度值( $f_c$ )可换算出各组的劈裂抗拉强度值( $f_{ts}$ ),换算公式为

$$f_{ts} = 0.85 f_c^{0.5}$$

经换算后的各组劈裂抗拉强度值( $f_{ts}$ )见表 5。

表 4 各组经折减的立方体抗压强度值和轴心抗压强度值

Table 4 The values of cube compressive strength and axial compressive strength in each group which were got after reducing MPa

组号	$f_{icu}$	$f_c$
S0P2	49.78	33.40
S8P1	56.30	37.72
S8P0P2	59.79	39.92
S8P2	60.85	40.62
S12P2	63.23	41.97

表 5 各组经换算的劈裂抗拉强度值

Table 5 The values of splitting tensile strength in each group which were got after reducing MPa

组号	$f_{ts}$
S0P2	4.91
S8P1	5.22
S8P0P2	5.37
S8P2	5.42
S12P2	5.51

试验采用的方板法是按照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13 : 2009)<sup>[11]</sup>中弯曲韧性试验(方板法)方法,实验装置如图 1 所示,600 mm×600 mm×100 mm 的纤维喷射混凝土板的四边支撑在刚性金属框架上,采用 YAW-3000G 电液伺服高刚性压力试验机并通过置于试件表面的 100 mm×100 mm×100 mm 的加载垫块对试件进行中心加载,在加载过程中

用 TestMaster 数据采集系统实时采集荷载与板中心挠度数值,试验加载方式选用通过置于中心板底的 CY050-2A 型变形计(量程为 50 mm)的变形变化量来进行的等位移控制,加载速率为 1.5 mm/min,加载至板中心挠度至 25 mm 时停止。

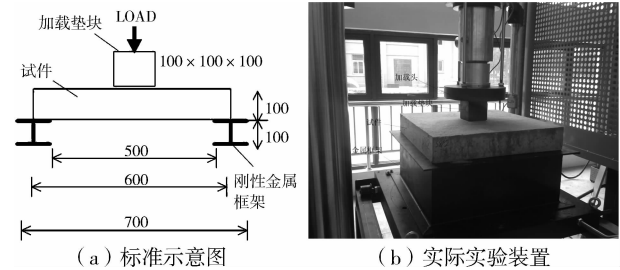


图 1 试验装置

Fig. 1 The test device

## 2 试验结果及分析

### 2.1 纤维对混杂纤维喷射混凝土板弯曲韧性的影响

4 组掺入不同纤维体积分数喷射板的荷载-挠度曲线分别如图 2、图 3 所示,能量-挠度曲线见图 5,其中对应挠度下的能量吸收值是通过对此挠度之前范围的荷载-挠度曲线进行积分而求得的,另列出了全部 5 组方板试件的特征数值于表 6。

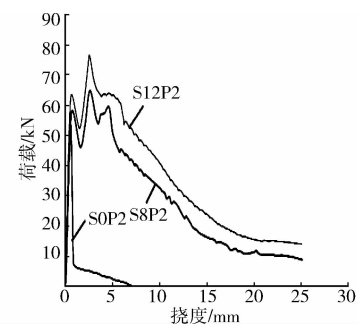


图 2 S0P2、S8P2 和 S12P2 组荷载-挠度曲线

Fig. 2 The load-deflection curves of group S0P2, S8P2 and S12P2

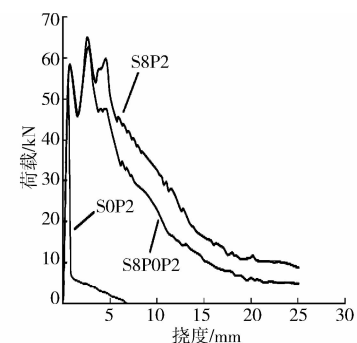


图 3 S0P2、S8P0P2 和 S8P2 组荷载-挠度曲线

Fig. 3 The load-deflection curves of group S0P2, S8P0P2 and S8P2

表 6 方板各组特征数值列表

Table 6 The list of characteristic value in each group panel

组号	第 1 次 峰值/kN	最大 荷载/kN	25 mm 时的 能量吸收值/J
S0P2	53.8	53.8	挠度未达到 25 mm 时实验已结束
S8P1	55.45	56.88	651.77
S8P0P2	57.05	62.58	544.37
S8P2	57.22	64.99	699.95
S12P2	59.56	76.68	879.66

由图 2 及表 6 可知:当加在 S0P2 组板的荷载较小时,其荷载-挠度曲线呈线性发展,此时,板处于线弹性阶段。当 S0P2 组板中心挠度到达 0.5 mm 时,其荷载值到达最大峰值荷载 53.8 kN,其后随着挠度值小幅度的增加,板的荷载值会出现大幅度的降低,板整体所呈现出的弯曲韧性较差。这主要是因为将小掺量聚丙烯纤维掺入喷射混凝土后,虽然在板的线弹性阶段,荷载较小,聚丙烯纤维因在混凝土基体受拉区的微裂缝处参与受力而能限制微裂缝的扩展,但随着荷载的进一步增大,混凝土基体因其最大受拉区变形到达初裂应变而开裂后,裂缝处的混凝土基体会失去抗拉能力,同时,横跨裂缝的聚丙烯纤维也会因弹性模量低而不能与未开裂部分的混凝土基体形成足够的粘结力来限制裂缝的扩展,此时聚丙烯纤维的拉伸变形会突然增大,大量聚丙烯纤维会被拔出或拉断,板承载力会出现陡降,故板整体所呈现出的弯曲韧性较差。

同样,由图 2 和表 6 可知:混杂钢纤维后,当荷载较小时,S8P2 和 S12P2 两组曲线呈线性发展至第 1 次峰值荷载,此时的荷载较 S0P2 组的最大峰值荷载分别有 6.3% 和 10.7% 的提升,在经历一个短暂的下降段后会 2 次提升至最大峰值荷载,最大峰值荷载后的两条曲线都会呈现出一个不稳定且平缓的下降段。这可能是因为当荷载较小时,钢纤维因与混凝土基体间的粘结力而能共同参与受力,且二者变形协调,故板的荷载-挠度曲线呈线性发展,此时钢纤维对板受力的影响较弱;随着荷载的进一步增大,板的受拉区会开裂,虽裂缝处的混凝土会退出工作,板在裂缝处的受力平衡会被打破,但跨越裂缝的高弹模钢纤维会因桥接作用与未开裂部分的混凝土基体产生足够粘结力来限制裂缝的扩展,此时板在受拉区的应力会经应力重分布而变得更加均匀,其荷载也会二次提升至最大峰值荷载;其后随着板中心挠度的增加,虽然大量横跨裂缝的钢纤维因与混凝土基体间的粘结力到达极限值而被拔出,板的承

载力会下降,但这些钢纤维在拔出的过程中会消耗大量混凝土基体在开裂时所释放的能量,同时仍有许多钢纤维通过与混凝土基体的粘结力参与受力,故在两者的共同作用下,两组曲线都呈现一个不稳定且平缓的下降段,均表现出了较好的弯曲韧性。

进一步来看图 2、图 5 和表 6, S12P2 组相对于 S8P2 组,最大峰值荷载提升了 18%,其后的下降段曲线更加的丰满平缓,同等挠度下的承载力和能量吸收值更高,板中心挠度达到 25 mm 时的能量吸收值提高了 25.6%,表现出了更好的弯曲韧性。这可能是因为随着钢纤维掺量的增加,当混凝土基体的受拉区出现裂缝时,横跨裂缝的钢纤维数量也会增加,故与基体传递粘结力的能力也在增加,钢纤维在脱粘和拔出过程中吸收的能量也在增加,曲线下降段更丰满且平缓,弯曲韧性也会明显增加<sup>[13]</sup>。由以上分析可以看出:对于混杂纤维喷射混凝土板而言,当其它各组掺量相同时,钢纤维掺量越高,所表现的弯曲韧性越好。

由图 3、图 5 及表 6 可知:二元混杂的 S8P2 组相较于仅掺入钢纤维的 S8P0P2 组,虽然在第 1 次峰值荷载和最大峰值荷载上只提高了 0.2% 和 3.8%,但在最大峰值荷载后的下降段,同等挠度下的荷载和能量吸收值明显提高,板中心挠度至 25 mm 时的能量吸收值更是提高了 28.5%,表现出了更优的弯曲韧性。这是因为聚丙烯纤维虽只是低弹模纤维,但因延展性好,直径小,根数多(0.11% 的掺量在每立方米喷射混凝土中的数量能达到  $3 \times 10^7$  根)等特点能有效缓解裂缝处的应力集中,并在变形伸长中消耗掉大量能量<sup>[14]</sup>,这既能在混凝土基体出现微裂缝时因参与受力而抑制微裂缝的进一步扩展和延伸,又能在裂缝出现时协助钢纤维限制裂缝的开裂宽度,从而延后部分钢纤维被拔出的时间。因此当钢纤维掺量相同时,混杂了小掺量聚丙烯纤维的 S8P2 组板的弯曲韧性会因两种纤维的正混杂效应而明显优于未掺入聚丙烯纤维的 S8P0P2 板。

## 2.2 高炉微粉对混杂纤维喷射混凝土板弯曲韧性的影响

S8P1、S8P2 两组不同高炉微粉掺量喷射板的荷载-挠度曲线如图 4 所示,能量-挠度曲线见图 5。

由图 4、图 5 及表 4 可以看出:掺入 20% 高炉微粉的 S8P2 组相较于掺入 10% 高炉微粉的 S8P1 组,第 1 次峰值荷载提高了 3.1%,最大峰值荷载提高了 14.2%,板中心挠度至 25 mm 时的能量吸收值增加了 7.4%,下降段中同等挠度值下的荷载值和能量吸收值也略有提高。这可能是由于高炉微粉具有

颗粒细、活性高等特点,掺入混凝土基体后,一方面与富集在界面上的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应而生成 C-H-S 凝胶,从而大量减少  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体、钙矾石和孔隙;另一方面可以减少内泌水,消除骨料下部的水膜,使界面过渡区的原生微裂缝大大减少,界面过渡区厚度变薄,骨料与浆体的粘结力得到增强<sup>[15]</sup>。高炉微粉掺量越多,上述增强作用越明显,抑制混凝土中原生微裂缝出现的能力越强,也就能更好地降低混凝土的脆性。故随着高炉微粉掺量的增加,混杂纤维喷射混凝土板的弯曲韧性会有提高。

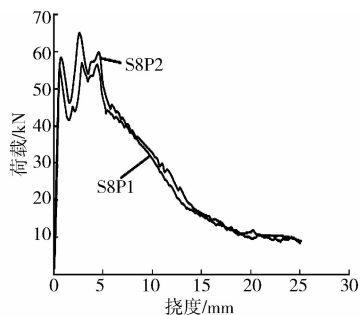


图4 S8P1和S8P2组荷载-挠度曲线

Fig. 4 The load-deflection curves of group S8P1 and S8P2

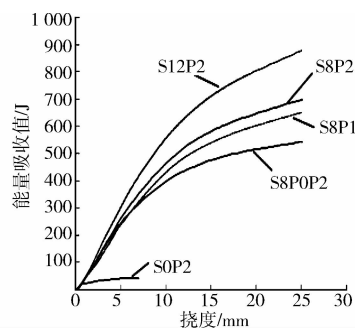


图5 5组能量-挠度曲线

Fig. 5 The energy-deflection curves of five groups

### 2.3 混杂纤维喷射混凝土板裂缝发展过程及破坏形式分析

由实验过程观察可知,在水平方向上,混杂纤维喷射混凝土板会首先在板底中部出现裂缝并向底面四边发展;在垂直方向上,板底面会先出现裂缝并向顶面发展。呈现这样的裂缝发展可能是因为试验的荷载作用和支撑条件下,板上部受压,下部受拉,板底中部会因拉应力最大而最先开裂,随着挠度的增大,板底面裂缝会沿拉应力较大的中部区域向着拉应力较小的各底边呈放射状发展;当已开裂底面处的跨裂缝纤维全部被拔出,板的受拉区会因其范围减小而使中和轴向上移,板上部原本参与受压的部分开始承受拉力,此时,底面裂缝会向上发展至顶

面。同时,由观察可知,上述裂缝发展的过程是缓慢进行的。故几组混杂纤维喷射混凝土板均展示出了良好的裂缝控制能力。

部分试件不同角度的破坏图如图6、图7和图8所示。图6所示的仅加入0.11%低弹模聚丙烯纤维的S0P2组板在加载到达最大峰值荷载后会形成裂缝,并因聚丙烯纤维与基体的粘结力过小而使裂缝迅速发展,破坏时板已沿裂缝完全断开,断口处较整齐,板整体呈现一定的脆性破坏。与之相比,对于图7、图8所示的混杂纤维喷射混凝土板,在底面上,其最大裂缝宽度虽达到了15~20mm(S8P2组板在此区间内),但板底并未沿裂缝处完全断开;在侧面上,其裂缝宽度会随着高度的增加而不断减小,近底面的裂缝宽度明显大于远底面的,板整体呈现裂而不断的延性破坏。这是由于在加载的过程中,随着板中心挠度的增加,虽然板的受压区面积逐渐减少,板中越来越多的受拉区域会出现裂缝,乃至试验后期板会出现大量裂缝,但是许多跨越裂缝且未被拔出或拉断的混杂纤维能通过桥接作用与基体产生粘结力,使得板仍保有一定程度的残余强度,从而保持板的完整性<sup>[16]</sup>,故几组混杂纤维喷射混凝土板整体呈延性破坏。



图6 S0P2顶面破坏图

Fig. 6 The failure graph of top in group S0P2



图7 S8P1底面破坏图

Fig. 7 The failure graph of bottom in group S8P1



图8 S12P2底面及侧面裂缝图

Fig. 8 The cracks graph of bottom and side in group S12P2

由以上分析可知,从裂缝发展过程和破坏形式来看,混杂纤维喷射混凝土板均展示出了良好的裂缝控制能力,板整体呈延性破坏。

### 3 结论

1)对于混杂喷射纤维混凝土板而言,其他各组掺量相同的情况下,钢纤维掺量越高,所表现的弯曲韧性越好。

2)因两种纤维的正混杂效应,当钢纤维掺量相同时,混杂了小掺量聚丙烯纤维的混杂纤维喷射混凝土板的弯曲韧性明显优于未掺入聚丙烯纤维的板。

3)随着高炉微粉掺量的增加,混杂纤维喷射混凝土板的弯曲韧性会有提高。

4)混杂纤维喷射混凝土板均表现出了良好的裂缝控制能力,板整体呈延性破坏。与梁弯曲试验相比,基于方板法的研究更便于混杂纤维喷射混凝土的设计与施工提供理论参考。

#### 参考文献:

- [1] Cengiz O, Turanli L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fiber and high-performance polypropylene fiber reinforced shotcrete in panel test [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34: 1357-1364.
- [2] 孙成访, 谷倩, 彭少民. 喷射纤维混凝土的性能与应用综述[J]. 混凝土, 2008(8): 101-104.  
Sun C F, Gu Q, Peng S M. General introduction of the performance and application of sprayed FRPC [J]. Concrete, 2008(8): 101-104. (in Chinese)
- [3] 毕远志, 季斌, 张大林, 等. 喷射纤维混凝土在深井地下空间支护应用关键技术[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(2): 229-234.  
Bi Y Z, Chen J B, Zhang D L. Research on key technology of hybrid fiber concrete sprayed in deep mine roadway [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(2): 229-234. (in Chinese)
- [4] 孙斌, 王贤来, 文有道. 不良岩体巷道的湿喷混凝土支护技术[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(6): 2381-2385.  
Sun B, Wang X L, Wen Y D. Drift support technology with wet shotcrete method in weak rock mass [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(6): 2381-2385. (in Chinese)
- [5] 徐磊, 庞建勇, 张金松, 等. 聚丙烯纤维混凝土喷层支护技术研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 150-155.  
Xu L, Pang J Y, Zhang J S, et al. Research and application of polypropylene fiber concrete shotcrete support technology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 150-155. (in Chinese)
- [6] 苏安双, 宁逢伟, 韩旭东, 等. 含水率及加载速率对纤维增韧喷射混凝土弯曲韧性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 46-52.  
Su A S, Ning F W, Han X D, et al. Influences of moisture content and loading rate on flexural toughness of fiber reinforced shotcrete [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(5): 46-52. (in Chinese)
- [7] 杜国平, 刘新荣, 祝云华, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1448-1454.  
Du G P, Liu X R, Zhu Y H, et al. Performance examination of fiber reinforced shotcrete in tunnel and its engineering application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1448-1454. (in Chinese)
- [8] 陈迅捷, 陈基成, 王宏. 聚丙烯纤维与钢纤维喷射混凝土弯曲韧性的对比[J]. 混凝土, 2003(11): 48-51.  
Chen X J, Chen J C, Wang H. Flexural toughness of polypropylene fiber reinforced shotcrete in contrast with steel fiber reinforced shotcrete [J]. Concrete, 2003(11): 48-51. (in Chinese)
- [9] 赵晓晶. 喷射补偿收缩钢纤维喷射混凝土弯曲韧性与抗剪强度实验研究[D]. 安徽 淮南: 安徽理工大学, 2012.
- [10] 王胜辉, 袁勇. 喷射混凝土试验方法述评[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005, 30(4): 55-58.  
Wang S H, Yuan Y. Reviews on testing methods of shotcrete [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2005, 30(4): 55-58. (in Chinese)
- [11] CECS 13: 2009 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2010.
- [12] 周博儒. 低掺量三元混杂纤维混凝土轴拉性能试验[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2014.
- [13] 尤志国, 覃霜, 丁一宁. 混杂纤维自密实混凝土梁受弯性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(5): 87-91.  
You Z G, Qin S, Ding Y N. Experimental study on flexural behavior of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete beams [J]. Industrial Construction, 2010, 40(5): 87-91. (in Chinese)
- [14] 夏冬桃, 刘向坤, 夏广政, 等. 混杂纤维增强高性能混凝土弯曲韧性研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(6): 108-112.  
Xia D T, Liu X K, Xia G Z, et al. Flexural toughness of high-performance hybrid fiber reinforced concrete [J]. Huangzhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(6): 108-112. (in Chinese)
- [15] 张慧莉, 田堪良. 矿渣聚丙烯纤维混凝土抗弯疲劳性能[J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 2011, 45(4): 699-707.  
Zhang H L, Tian K L. Flexural fatigue performance of polypropylene fiber reinforced concrete containing slag [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(4): 699-707. (in Chinese)
- [16] 梅国栋, 李继祥, 刘肖凡, 等. 混杂纤维混凝土抗弯性能及混杂效应试验研究[J]. 混凝土, 2013(2): 21-24.  
Mei G D, Li J X, Liu X F, et al. Hybrid fiber reinforced concrete flexural behavior and hybrid effects [J]. Concrete, 2013(2): 21-24. (in Chinese)