

# 聚丙烯纤维网喷射混凝土性能和衬砌试验

朱永全 刘 勇 刘志春 边亦海

(石家庄铁道学院土木工程分院 石家庄 050043)

**摘要** 聚丙烯网状纤维喷射混凝土与传统素喷混凝土相比,抗拉、抗弯、抗渗水压力强度分别提高了 56.2%, 92.9%, 100%; 增加了密实性和质量稳定性; 喷射作业回弹损失量减少 10%~20%, 粉尘减少 1 倍以上。在铁路、公路隧道中, 已多次成功地将聚丙烯纤维网喷射混凝土用作隧道初期支护和永久衬砌, 形成了完善的施工工艺, 提高了隧道结构强度和品质。

**关键词** 隧道工程, 聚丙烯纤维网, 喷射混凝土, 支护, 衬砌

**分类号** U 455.48<sup>+1</sup>

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)19-3376-05

## EXPERIMENT ON BEHAVIOUR OF POLYPROPYLENE-FIBER-NET SHOTCRETE AND LINING

Zhu Yongquan, Liu Yong, Liu Zhichun, Bian Yihai

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043 China)

**Abstract** In comparison with the traditional plain shotcrete, the tensile, flexural and permeability strength of polypropylene-fiber-net shotcrete are improved for 56.2%, 92.9% and 100%, respectively. The density and quality stability of concrete are improved, the resilience loss is reduced for 10%~20%, and dust is reduced for more than 100% in the spraying. In railway and highway tunnels, polypropylene-fiber-net shotcrete has been used as primary support and permanent lining successfully. A comprehensive construction technology has been formed, and the structural strength and quality have been improved in recent years.

**Key words** tunnel engineering, polypropylene fiber net, shotcrete, support, lining

### 1 引言

喷射混凝土因其施作及时, 施工方便, 自 20 世纪 60 年代以来已广泛应用于隧道工程领域。在隧道工程中采用喷射混凝土支护代替传统钢木支撑, 能及时封闭围岩, 充分利用围岩的自承能力; 采用喷射混凝土衬砌代替传统的模筑混凝土, 使衬砌与围岩更加密贴, 能减薄衬砌厚度, 施工方便、快捷, 无施工缝。但传统喷射混凝土的水灰比随意性大,

导致质量离散性大、强度低, 密实性和耐久性差; 传统喷射混凝土如同一般混凝土, 其抗压强度高、抗拉强度低, 混凝土硬化收缩裂缝多、抗渗性差。在隧道支护、衬砌薄壁结构及特殊施工环境下, 为增强喷射混凝土性能, 曾掺加过钢纤维、碳纤维、石棉纤维及塑料纤维等材料, 但钢纤维易锈蚀、结团且价高, 碳纤维价格过高, 石棉和玻璃纤维有毒、有害。20 世纪 80 年代以来, 合成纤维混凝土在国外已得到广泛的研究和应用<sup>[1~5]</sup>, 被视为“21 世纪混凝土”。合成纤维中应用较多的聚丙烯纤维, 开始

2003 年 5 月 7 日收到初稿, 2003 年 6 月 16 日收到修改稿。

作者 朱永全 简介: 男, 43 岁, 博士, 1983 年毕业于石家庄铁道学院铁道建筑系地下工程专业, 现任教授, 主要从事于地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: 7935526@163.com。

多为单丝型, 因其在混凝土中分散性较差, 改进后的网状纤维为多根纤维单丝相互交连而成的网状结构, 纤维单丝间的横向联结经混凝土搅拌的揉搓和摩擦作用而破坏, 形成单丝或网状结构并充分张开, 从而实现每立方米混凝土内数千万根纤维均匀分散的效果。在国内聚丙烯纤维模筑混凝土也成功应用于公路、建筑结构等领域<sup>[6~8]</sup>。

本研究结合潮喷、湿喷混凝土新工艺<sup>[9, 10]</sup>, 采用强度高、性能稳定、无害、价低的聚丙烯纤维网进行混凝土改性<sup>[11]</sup>。为了充分发挥喷混凝土的优点、提高喷混凝土质量, 控制工程造价, 作者通过理论研究、室内试验和现场应用相结合的方法, 掌握聚丙烯纤维网混凝土的力学性能, 确定其合理掺量和配合比, 结合隧道工程进行现场应用试验, 形成了成熟的施工方法和工艺, 为聚丙烯纤维网喷射混凝土在隧道初期支护和衬砌中的推广应用打下坚实的基础。

## 2 聚丙烯纤维网混凝土力学性能的室内试验

### 2.1 试验材料

(1) 聚丙烯纤维网纤维。采用山东泰安市现代塑料有限公司生产的聚丙烯纤维网纤维, 长度 20

mm; 密度  $0.91 \text{ g/cm}^3$ ; 抗拉强度 370 MPa; 抗拉弹模 3.7 GPa; 断裂伸长度大于 80%; 当量直径  $100 \mu\text{m}$ 。

(2) 水泥。采用河北邯郸产“太行山牌”水泥, 细度为 5.8%; 初凝时间为 75 min; 终凝时间为 220 min; 28 d 抗压强度为 59.2 MPa; 28 d 抗折强度为 8.21 MPa。

(3) 粗骨料。石灰岩碎石, 最大粒径  $D_{\text{max}} = 10 \text{ mm}$ , 5~10 mm 级配, 颗粒浑圆, 压碎指标为 7.8%, 非活性骨料。

(4) 细骨料。河砂,  $u_f = 2.8$ , 洁净, 级配良好。

(5) 外加剂。山西宝中化工厂生产的高效减水液态速凝剂, 掺量为水泥用量的 0.6%, 减水率 18%~20%。

(6) 拌和水。采用洁净的饮用水。

### 2.2 配合比

水灰比  $W/C = 0.36$ , 水泥、石子、砂子的重量比  $C:S:G = 1:1.78:2.08$ 。水泥用量  $460 \text{ kg/m}^3$ , 聚丙烯纤维网的体积掺量分别为 0.0%, 0.1%, 0.15%, 0.2% 和 0.25%, 即每立方米混凝土拌合物加入 0.00, 0.90, 1.35, 1.80 和 2.25 kg 的纤维。试验配比及编号如表 1 所示。按现行国家标准分别制备立方体劈裂抗压、抗弯、抗渗、抗冻和经历高温的试件及相应试验, 其结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 随着掺量的增加, 混凝土抗压强

表 1 纤维混凝土试件材料组成

Table 1 Components of test member material of polypropylene-fiber-net concrete  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

试件编号	水泥	水	砂	碎石	减水剂	纤维
A-1	460	166	819	957	2.99	0.00
A-2	460	166	819	957	2.99	0.90
A-3	460	166	819	957	2.99	1.35
A-4	460	166	819	957	2.99	1.80
A-5	460	166	819	957	2.99	2.25

表 2 聚丙烯纤维网喷射混凝土性能试验结果

Table 2 Testing results of properties of polypropylene-fiber-net shotcrete MPa

试件编号	劈裂抗压强度	弯曲强度	抗压强度	抗渗水压力强度	抗冻质量损失/kg	抗冻强度损失	抗高温强度损失
A-1	3.93	4.66	52.3	9	0.062	2.2	1.83
A-2	5.93	8.06	55.8	14	0.026	0.8	0.46
A-3	6.09	8.81	56.5	16	0.005	0.4	0.43
A-4	6.14	8.99	56.8	18	0.014	0.3	0.70
A-5	6.19	9.23	54.9	18	0.007	0.2	0.65

度增大,当体积掺量为0.1%时,混凝土强度提高6.7%;当体积掺量为0.2%时,混凝土强度提高8.6%;掺入量继续增大后,抗压强度增加不再明显。随着掺量的增加,混凝土劈裂抗拉强度增加显著,当体积掺量为0.1%时,强度提高51%;当体积掺量为0.2%时,强度提高56.2%。抗弯强度随纤维掺量增加而增加,当体积掺量为0.1%时;强度增加73%,当体积掺量为0.2%时;强度提高92.9%。对于抗渗水压力,由于掺入聚丙烯纤维网的混凝土大大减少了因塑性收缩、干燥收缩而引起的原生裂纹和次生裂纹,从而提高了其抗渗能力。随着纤维掺量的增加,混凝土抗渗能力增加显著。当体积掺量为0.1%时,抗渗水压力提高55.6%;当体积掺量为0.2%时,抗渗水压力提高100%。耐久性、抗冻、抗高温、抗老化及抗酸、碱能力均有显著增大。

根据纤维掺量与混凝土性能关系及价格比,较为合理的聚丙烯纤维网体积掺量应为0.1%~0.2%。

### 3 聚丙烯纤维网潮式喷射混凝土在隧道支护中应用

几年来,聚丙烯纤维网喷射混凝土作为支护材料,已成功应用于多座隧道工程。1996年7月至1997年3月,在我国著名的特长铁路隧道,即秦岭隧道I号平导钻爆施工支护中,采用聚丙烯纤维作为喷射混凝土的增韧材料,采用潮式喷射施工技术,较成功地解决了秦岭隧道平导的高地应力岩爆问题。1997年7月至1998年6月,云南楚大高速公路九顿坡隧道,大断面、围岩破碎,采用聚丙烯纤维混凝土作为初期支护,潮式喷射施工技术,聚丙烯纤维网潮式喷射混凝土总用量达2080 m<sup>3</sup>。1999年8月至1999年12月,在水柏铁路易拉嘎隧道中,采用聚丙烯纤维网潮式喷射混凝土作为隧道支护,并采用美国博赛特生产的聚丙烯纤维网潮式喷射混凝土作为对比,在纤维体积掺量为0.2%的条件下,各施作100 m长隧道的支护,经测定国外与国内产品无实质上的区别,但国产价格便宜一半以上。1999年3月至1999年12月,在赣龙铁路金华山隧道(全长5192 m),1768 m的I、II级围岩段和长660 m的施工斜井中,采用聚丙烯纤维网潮式喷射混凝土,总用量达6624 m<sup>3</sup>,替代传统的钢筋网喷射混凝土,减少钢架使用量,提高喷层质量。

经施工单位经济分析,节省了投资,经济效益明显。

### 4 聚丙烯纤维网湿式喷射混凝土隧道衬砌应用试验

宝兰复线东巨寺沟单线铁路隧道,里程为DK1334+955~DK1335+716,全长761 m,最大埋深213 m。隧道穿越地层基本为燕山期花岗岩,进口端45 m和出口端56 m为IV级围岩,洞身段均为III级围岩,地表水和地下水不发育,地震基本烈度为VII度。

根据铁道部工程设计鉴定中心意见,东巨寺沟隧道内III级围岩地段选取60 m采用聚丙烯纤维网喷射混凝土作为永久衬砌试验,试验段里程DK1335+510~+570,全长60 m,其中DK1335+510~+530长20 m,喷层厚度10 cm,纤维掺量1.35 kg/m<sup>3</sup>;DK1335+530~+550长20 m,喷层厚度10 cm,纤维掺量1.8 kg/m<sup>3</sup>;DK1335+550~+570长20 m,喷层厚度15 cm,纤维掺量0.9 kg/m<sup>3</sup>。

采用山东泰安现代塑料公司生产的聚丙烯网状纤维,32.5号水泥,现场级配碎石、河砂及水。水泥:碎石:砂:水:纤维:速凝剂和减水剂=1:1.76:1.76:0.4:0.004:0.003,ESP-60型湿式喷射机,湿式喷射工艺。

花岗岩地层III级围岩段,施工中采用简易台车风枪钻孔,岩面爆破,开挖后的岩面无欠挖,平均线性超挖量小于80 mm,炮眼残留率大于85%,基本达到了光面爆破效果。聚丙烯纤维网湿式喷射混凝土既作为开挖后的隧道支护,又作为隧道的永久衬砌,分两次喷射,最小喷射厚度达到了设计要求,最大喷层厚度达30 cm。

现场大板喷模试件强度如表3所示。聚丙烯纤维网湿式喷射混凝土,其强度达到了设计要求,早期强度高,强度离散性小。

实测的喷射回弹损失率拱部为10.7%,边墙部位7.5%,作业粉尘浓度1.27 mg/m<sup>3</sup>。

施工中分别选取DK1335+500, +520, +540, +560共4个断面,即3个不同参数的试验及临近的对比段,分别进行围岩压力、喷层应力、周边变形和拱顶下沉量测。实测围岩压力和喷层应力最终值如表4所示。

各断面的周边收敛分别测量了拱脚和墙腰两水

表 3 聚丙烯纤维网湿式喷射混凝土现场试验强度(DK1335+510~+530)

Table 3 In-site experiment results of wet polypropylene-fiber-net shotcrete strength (DK1335+510~+530) MPa

组号	抗压强度			抗折强度		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
1	14.7	30.0	44.0	1.8	4.2	5.9
2	13.9	28.0	42.7	2.0	4.4	5.8
3	14.2	29.0	44.4	1.7	4.3	6.0
平均	14.3	29.0	43.7	1.8	4.3	5.9

表 4 实测围岩压力和喷层应力最终值

Table 4 The measured final results of surrounding rock pressure and shotcrete stress MPa

测试项目	断面	左侧墙腰	左侧拱脚	左侧拱腰	拱顶	右侧拱腰	右侧拱脚	右侧墙腰
围岩压力	DK1335+500	0.42	0.33	0.36	0.12	0.26	0.19	0.11
	DK1335+520	0.40	0.11	0.10	0.10	0.20	0.09	0.25
	DK1335+540	0.11	0.15	0.20	0.10	0.13	0.28	0.10
	DK1335+560	0.11	0.22	0.15	0.11	0.25	0.27	0.25
喷层应力	DK1335+500	-0.37		-0.27	-0.27	-0.69	-0.68	
	DK1335+520		-0.61	-0.78	-0.11	-0.67	-0.14	
	DK1335+540		-0.11	-0.10	-0.09	-0.93	-0.57	-0.41
	DK1335+560		-0.67	-0.14	-0.08	-0.79	-0.41	

平测线。各测线的收敛值均很小,最大收敛值为 6.5 mm,最大拱顶下沉 1.5 mm。收敛和拱顶下沉曲线均很快趋于收敛形式。

由此可见,围岩压力分布均匀,混凝土应力和洞室变小,洞室稳定。建成后使用 2 年多效果良好。

在节理裂隙发育的硬岩地层中,直接利用喷射混凝土作为隧道衬砌,衬砌与围岩紧密接触,堵塞、封闭围岩裂隙,充分利用围岩的自承能力,施作及时,施工方便。本隧道试验及应用的成功,拓宽了喷锚式衬砌的应用范围,丰富了隧道衬砌的形式。经测算,与复合式衬砌相比,可节约材料成本费 306.38 元/m,经济效益十分明显。

## 5 结 论

(1) 聚丙烯纤维网喷射混凝土大幅度提高了传

统喷射混凝土抗拉、抗折、抗弯、抗渗水压力强度,增加了密实性、耐久性和质量稳定性。湿式喷射纤维混凝土的施工新工艺减少了喷射混凝土作业回弹量和粉尘,改进了施工作业环境。

(2) 经过大量系统的室内试验,掌握了聚丙烯纤维网喷射混凝土的力学性能与掺量关系,确定了纤维的合理掺量。

(3) 铁路、公路隧道中的实有和结果证明,聚丙烯纤维网喷射混凝土用作隧道支护,喷层结构抗拉、抗折、抗弯强度获得了大幅提高,也减少了喷射混凝土作业回弹损失量和粉尘。

(4) 聚丙烯纤维网湿式喷射混凝土作为隧道永久衬砌,效果十分良好,成功地拓宽了喷锚式衬砌的应用范围,丰富了隧道衬砌的形式。

## 参 考 文 献

- 1 陈润峰, 张国防, 顾国芳. 我国合成纤维研究进展与应用现状[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(2): 167~173
- 2 袁 勇, 邵晓芸. 合成纤维增强混凝土的发展前景[J]. 混凝土, 2000, (9): 3~7
- 3 Ong K C, Baxkeerkhan M, Paramasivam P. Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact[J]. Cement & Concrete Composites, 1999, 21(4): 391~401
- 4 Kake Mi M, Hannant D J. Effect of autoclaving on cement composites containing polypropylene, glass and carbon fibers[J]. Cement & Concrete Composites, 1996, 18(1): 61~66
- 5 Ziad Bayasi, Jack Zeng. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. ACI Material Journal, 1993, 90(6): 1 358~1 363
- 6 戴建国, 黄承逵. 网状聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1999, (4): 35~38
- 7 江镇海. 混凝土用聚丙烯纤维的性能及应用[J]. 合成纤维工业, 2000, 24(2): 32
- 8 杨昌泉, 农开河, 陈自德. 掺超混杂纤维喷射混凝土的研究[J]. 铁道标准设计, 1999, 19(8): 37~39
- 9 陈德红. 秦岭 I 线隧道湿喷混凝土施工技术[J]. 铁道建筑技术, 1991, (1): 31~32
- 10 赵 林, 张海亮. 湿喷技术在黄土隧道中的应用[J]. 铁道标准设计, 2000, 20(6): 50~51
- 11 朱永全, 华 渊, 李国良等. 聚丙烯纤维网湿式喷射混凝土衬砌试验研究[R]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2002

上接第 3369 页

## 《岩石力学与工程学报》2004年9期EI收录论文(27篇)(II)

No	论文题目	作者名	页码
15	三维结构面连通率的随机模拟计算	张发明 汪小刚 贾志欣等	1 486~1 490
16	窗口测线法获取岩体 $RQD$	陈剑平 王 清 赵红亮	1 491~1 495
17	高层建筑基础与下部地下洞室相互作用的空间效应研究	彭立敏 施成华 吴 波等	1 496~1 501
18	软基 SSI 体系动力特性研究——一阶模态化趋势	张之颖 吕西林 楼梦麟等	1 502~1 508
19	非线性地基-结构系统的地震共振突变分析	房营光	1 509~1 514
20	粘弹性地基中考虑桩体剪切变形的单桩水平振动解析理论	胡安峰 谢康和 应宏伟等	1 515~1 520
21	锚碇深基坑排桩冻土墙围护结构的冻胀力研究	姚直书 程 桦	1 521~1 524
22	岩溶地区公路隧道施工力学响应研究	吴梦军 许锡宾 赵明阶等	1 525~1 529
23	非全长粘结型锚索锚固段长度的一种确定方法	肖世国 周德培	1 530~1 534
24	预应力锚索的非线性分析	何思明 张小刚 王成华	1 535~1 541
25	川藏公路南线八宿—林芝段滚石灾害的工程地质调查与评价	张路青 许 兵 尚彦军等	1 551~1 557
26	清江水布垭电站现场帷幕灌浆试验与分析	熊义泳 孙忠明 姚文武	1 558~1 563
27	高压注浆土钉特性及应用	李志刚 任佰俪 秦四清	1 564~1 567