

文章编号: 1674—8247(2012)06—0044—04

## C40 钢纤维混凝土在喷锚衬砌隧道中的应用

李 佐

(中铁十二局集团有限公司, 太原 030024)

**摘 要:**结合以色列卡迈尔隧道喷锚衬砌设计,介绍钢纤维混凝土在喷锚衬砌隧道中的应用。从钢纤维混凝土配合比的设计、特性研究、施工工艺及质量控制、检验标准及施工注意事项等方面阐述了欧洲隧道喷射混凝土施工技术,并在实践中取得了良好的效果。

**关键词:**喷锚衬砌;钢纤维混凝土;配合比;质量控制;检验标准

**中图分类号:**TU528.572;TU755.6<sup>+</sup>5 **文献标识码:**B

## Application of C40 Steel Fibre Concrete in Shotcrete Lining Tunnel

LI Zuo

(China Railway 12 Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Combining with the shotcrete lining design of Carmel tunnel in Israel, application of the steel fibre concrete in shotcrete lining tunnel is introduced, the tunnel shotcrete construction technology in Europe is set forth from such aspects as matching ratio design, characteristic research, construction technology and quality control, test standard and construction matters needing attention, etc. of steel fibre concrete, as well as good result is obtained in the practice. This paper provides some reference for the design and construction of similar tunnels.

**Key words:** shotcrete lining; steel fibre concrete; matching ratio; quality control; test standard

### 1 前言

喷锚衬砌是 20 世纪 70 年代发展起来的一种隧道支护体系。最近几十年随着喷射混凝土施工工艺、质量性能的提高,其技术得到了迅速的发展。位于斯堪的纳维亚半岛的挪威和瑞典,是使用喷锚衬砌较早的国家,日本、德国及我国也有过成功的案例。最早的喷锚衬砌结构形式主要是喷衬砌混凝土加锚杆构成的支护体系,后来逐渐发展出现了 2 层或多层的喷射混凝土构造。

在我国,喷锚衬砌应用相对较少,对于喷锚衬砌设计施工的研究相对较少。因此有必要对喷锚衬砌技术的关键问题,如结构设计、防排水和主要的建筑材料等进行设计优化,以利于推广应用。喷锚衬砌相对于复合式衬砌,具有工序简化、施工快速、经济合理、适应不同跨度和多种断面形式,支护工序操作便捷等多方面的优点。本文介绍的以色列卡迈尔隧道采用洞身干喷

钢纤维混凝土作为永久支护,不设二次衬砌。此工程由欧洲德国 WBI 公司设计。

### 2 喷锚衬砌隧道断面设计

#### 2.1 地质情况

隧道设计为双线公路隧道,洞身穿越砾岩、白垩岩、石灰岩、凝灰岩、白云岩等,地质情况较为复杂。隧道范围内无大的地表水系,地表水受大气降雨补给,地下水以土层空隙潜水和基岩裂隙水为主。

#### 2.2 喷锚衬砌断面设计

本隧道采用  $\phi 28$  锚杆作为超前预支护, S500/550 级钢筋  $L=3.5$  m, 循环搭接 2 m, 环向间距 300 mm, 每环 42 根;必要时掌子面打设  $\phi 25$  玻璃纤维锚杆  $L=6$  m, 按  $2.0$  m  $\times$   $2.0$  m 梅花形布置, 循环搭接 3 m; 在上台阶中间部分向前上方进行 30 m 超前取芯地质钻探, 每 20 m 一次。取芯钻头部分要求带双芯筒, 芯样直径大于 146 mm, 连续自动记录钻进速度与轴向压力; 格栅钢架采用 Pantex115/26/34 型钢架, 钢架纵向间距 1~1.5 m, 仰拱不设格栅钢架; 系统锚杆采用  $L=6$  m  $\phi 25$  全长锚固砂浆锚杆, 锚杆间距  $3.0$  m  $\times$   $1.5$  m

收稿日期: 2012-05-09

作者简介: 李佐(1978-), 女, 工程师。

(环×纵), 垫板尺寸 250 mm×250 mm×10 mm。锚杆最终拉拔力不小于 146.3 kN; 全环铺设双层钢筋网,  $\phi 7.5$  圆钢, 网格尺寸 150 mm×150 mm, 网片搭接宽度不小于 300 mm; C40 钢纤维混凝土厚 400 mm, 钢纤维掺量 40 kg/m<sup>3</sup>。大断面喷锚衬砌隧道横断面设计如图 1 所示。

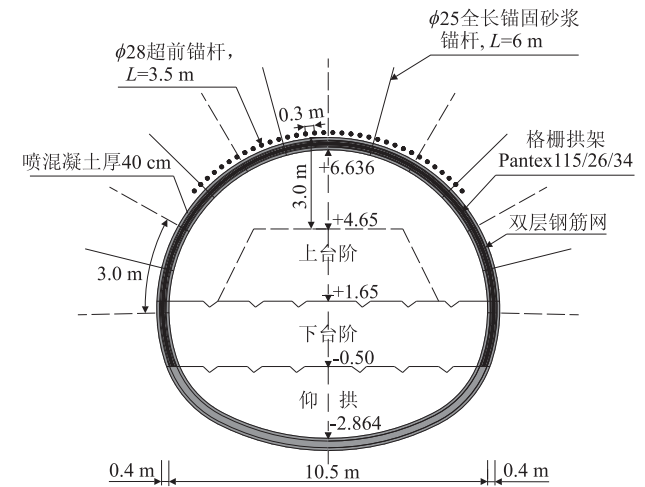


图 1 大断面喷锚衬砌隧道横断面设计图

3 钢纤维混凝土配合比设计

采用喷锚联合支护体系作为永久衬砌结构, 其喷射混凝土是以耐久性作为设计的主要指标, 其耐久性指标主要涉及混凝土的抗裂性、护筋性、耐蚀性、抗冻性、耐磨性及抗碱-骨料反应等。如骨料的碱-硅酸反应砂浆棒膨胀率或碱-碳酸盐反应岩石柱膨胀率应小于 0.10%; 钢筋混凝土中氯离子总含量不应超过胶凝材料总量的 0.10%; 56 d 混凝土抗氯离子渗透性的电通量应小于 1 500 C; 在进行混凝土研制中通过抗裂性试验对比, 确定最优良的配合比, 高性能混凝土抗裂性试件表面非受力裂缝平均宽度不应大于 0.2 mm。

3.1 钢纤维

现场试验和大量工程经验表明, 用于喷锚衬砌的钢纤维混凝土采用的钢纤维几何参数, 一般长度为

20~35 mm, 直径为 0.3~0.8 mm, 长径比为 60~100。钢纤维长度太短则强度增加效果不明显, 太长则不宜拌合均匀, 太细在拌合过程中易弯折或结团, 太粗则在等体积含量时增强效果差。所以选用上述规格较为合适。

3.2 水灰比

普通混凝土添加钢纤维的目的是增加混凝土的抗拉性能。当普通混凝土基体遭到破坏时, 混凝土的粘结力无法克服拉力, 而使钢纤维从混凝土中拔出, 而不是钢纤维被拉断。所以, 增强钢纤维混凝土质量主要是考虑钢纤维的品种、规格及与基体的粘结性能的影响以及是否含有妨碍钢纤维与基体粘结的杂质等。其中, 水灰比是影响混凝土强度的一个主要因素。混凝土的抗压强度主要取决于水灰比和水泥强度等级。如果水灰比过大或水泥用量过低, 虽然可能满足抗压强度要求, 但是钢纤维周围不能满包裹砂浆而导致抗拉等性能不能满足。水灰比过小则混凝土收缩严重。经试验研究采用 0.47 的水灰比, 最大不宜超过 0.5。

3.3 胶骨比

经试验选定, 胶骨比为 1:3.41。

3.4 砂率

钢纤维混凝土的砂率是在普通混凝土用水和砂率的基础上, 考虑加入钢纤维的影响而确定。经试验选定, 砂率为 50.6%。

3.5 坍落度

试验选定 180~220 mm。

3.6 速凝剂

使用前先做与水泥的相容性试验及水泥净浆凝结效果试验, 初凝时间不应大于 3 min, 终凝时间不应大于 10 min。经试验选定采用水泥用量的 3%。

为了提高喷混凝土的耐久性, 通过对 C40 湿喷钢纤维混凝土强度、抗渗性和抗氯离子渗透性等耐久性特性要求的综合分析, 结合以色列当地原材料特性, 通过计算及试验室反复比选, 找到了科学合理的 C40 喷混凝土配合比设计, 如表 1 所示。

表 1 C40 喷混凝土配合比表

每方水泥用量 (kg)	水灰比	速凝剂掺量	钢纤维掺量 (kg/m <sup>3</sup> )	试验室配比 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水泥	水	碎石	机制砂	钢纤维	速凝剂
477	0.47	3 %	40	477	224	803	822	40	14.3

水泥: CEM152.5R; 碎石: (5~10) mm; 机制砂: (0.15~5) mm, 细度模数大于 2.5; 钢纤维:  $L \geq 30$  mm,  $60 \leq$  长径比  $\leq 100$ ; 速凝剂: MEYCO SA 162 (液态)

4 钢纤维混凝土性能研究

4.1 抗渗性试验

通过 1 号和 2 号 2 组钢纤维混凝土的抗渗性试验, 其结果为: 这 2 组试件中每组 6 个试件中 4 个试件

未出现渗水时的最大水压力分别为 1.4 MPa 和 1.5 MPa。由公式  $P = 10H - 1$  (式中  $P$  为抗渗标号,  $H$  为 6 个试件中 3 个渗水时的水压力, 单位: MPa), 即 1 号和 2 号这 2 组试件的抗渗标号分别为 P13 和 P14, 都远大于 P8, 具有高抗渗性。

4.2 抗碳化性能

高性能化的混凝土采用了低水胶比和掺加高性能外加剂、高活性掺和料等技术手段使得混凝土结构致密,具有明显优于普通混凝土的抗碳化性能。依据标准进行了 3 d、7 d、14 d 和 28 d 4 个龄期碳化深度值的测试,碳化深度最大仅为 1 mm,说明本混凝土具有较好的抗碳化性能。

4.3 抗冻融性能

根据混凝土含气量测定,含气量在 4~6 之间,同时部分试件进行了混凝土抗冻融实验。当冻融至预定循环次数时所测试试件相对动性模量均大于 70,质量损失率均小于 3,说明本混凝土具有良好的抗冻融性能。

4.4 抗氯离子渗透性能

氯离子渗透性是用氯离子扩散系数判定,是衡量混凝土耐久性的重要指标之一,混凝土越密实、氯离子扩散系数越小、混凝土的抗腐蚀性能和寿命越长。经过混凝土通电量快速测定方法,对混凝土 28~56 d 龄期的多次试验及生产取样的试件进行测试(试件直径 95~102 mm,厚度 51 mm±3 mm),6 h 通过的电通量低于 1 200 C,氯离子扩散系数在  $4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  范围内。结果表明该混凝土具有良好的抗氯离子渗透能力,如表 2 所示。

表 2 混凝土氯离子渗透性等级表

导电量/库仑	> 4 000	2 000~4 000	1 000~2 000	100~1 000	< 100
氯离子渗透性	高	中	低	很低	忽略

4.5 体积稳定性

混凝土的高体积稳定性是混凝土高耐久性的一个重要指标。进行了混凝土收缩性能测试,结果表明混凝土收缩率在 90%~100% 之间,说明该混凝土具有良好的体积稳定性。

5 施工工艺及质量控制

5.1 施工工艺及流程

在施工过程中严格按照设计配合比做好混凝土的拌合。喷射混凝土之前先用高压风水冲洗受喷面,将虚渣及杂物除去,并湿润受喷面。喷射作业分段分片依次进行,分层喷射混凝土到设计厚度,每层厚 8~10 cm;喷射顺序自下而上,分段长度不宜大于 6 m;先将凹洼部分找平,然后喷射凸出部分,并使其平顺连接,沿水平方向以螺旋形划圈移动,喷头与受喷面垂直,喷嘴口至受喷面距离 0.8~1.2 m。喷混凝土施工艺流程如图 2 所示。

5.2 施工质量控制及注意事项

(1)混凝土拌合。钢纤维混凝土拌合宜采用机械拌合,由于钢纤维体积率较大,一次拌合量不宜超过额

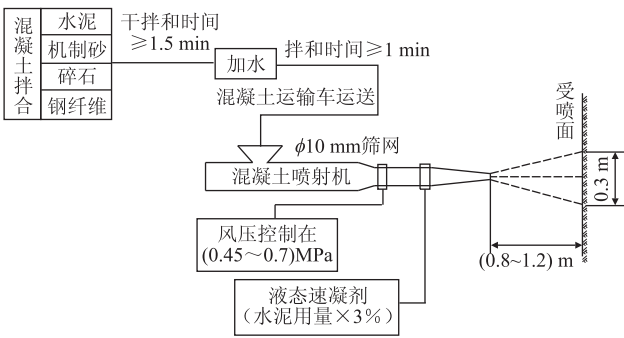


图 2 喷混凝土施工艺流程示意图

定搅拌量的 80%。为确保钢纤维在拌合物中分散均匀,不产生结团的现象,宜先将钢纤维、水泥、粗细骨料进行干拌均匀后,再加水湿拌,且干拌时间不得少于 1.5 min。

(2)混凝土运输。钢纤维混凝土的运输与普通混凝土的运输相同,尽量避免长距离运输,以避免运输中的振动使钢纤维下沉,影响拌合料的均匀性。如出现离析,需做二次搅拌。

(3)喷射前条件。在喷射钢纤维混凝土之前,隧道围岩应具备以下条件:围岩无显著变形,或围岩变形已基本稳定;岩面与喷层之间有足够的粘结力,下台阶及仰拱处的回弹物及浮渣需清理干净;岩面无涌水和大面积淋水。

(4)风压控制。喷射时,送风之前先打开计量泵,控制在 0.45~0.70 MPa 之间。若风压过小,喷射料不能有效地附着在岩面上,可能导致喷射料脱落;若风压过大,粗骨料回撞击岩面后反弹,使喷射层骨料分布不均匀。

(5)喷射厚度。为使喷射层混凝土有效附着在岩面,尤其是拱顶处,一个喷射片内的喷层厚度应控制在 8~10 cm。如果大于 10 cm,喷射混凝土自重过大,在混凝土未凝结的情况下将会掉落。如果喷层较小,则粗骨料和其它混合料分布不匀,使混凝土粘结力降低。一层混凝土喷射完毕后 20 min 左右,混凝土终凝后,进行第二层混凝土喷射。

(6)喷射顺序。喷射混凝土过程中,先将喷射区域划片为单位,在一个喷射片内,喷枪由下向上,“之”字型缓慢走动,使喷射料均匀平顺,混凝土表面光滑平整。喷枪走动时,喷枪口与岩面垂直,距离相等,若岩面被钢架或钢筋网覆盖时,可将喷枪口偏斜,已达到满布喷射的效果。喷射混凝土操作如图 3 所示。

(7)混凝土养护。钢纤维混凝土的养护方法与普通混凝土一样,只是钢纤维混凝土早期强度较高,应加强早期湿养护(不少于 7 d),并保持养护温度。全部养护时间不得少于 14 d,当气温低于 5℃ 时,不宜湿养



图 3 喷射混凝土操作图



图 4 成型后的喷射混凝土表面图

护。喷射混凝土终凝后 4 h 内不得进行爆破作业。成型后的喷射混凝土表面如图 4 所示。

6 检验标准及手段

喷射混凝土检验内容包括混凝土的抗压强度、粘结强度、喷混凝土厚度和抗渗性。检验标准:由现场 QC 工程师根据设计频率(每 30 m<sup>3</sup> 喷射混凝土一组芯

样)指定取芯位置,由有资质的第三方试验室取芯做试验,每组(5 个)5 cm 直径芯样 28 d 平均抗压强度不小于设计强度,喷混凝土厚度不小于设计厚度,喷混凝土应满足抗渗性要求,起到自身防水作用,详细检验标准如表 3 所示。如果达不到上述标准,需采取混凝土补强或拆除重新喷混凝土等措施达到设计要求,另外还应满足抗碳化性能、抗冻融性能、抗氯离子渗透性能

表 3 喷混凝土试验项目检验标准表

序号	试验项目	试验检验依据	试验标准	检验频率	说明
1	钢纤维含量测试	蓝皮书:54046	40 kg/m <sup>3</sup> :1.79 % (1.43 % ~2.15 % ) 50 kg/m <sup>3</sup> :2.23 % (1.78 % ~2.68 % )	每周 2 次	允许误差为规定掺量的 ±20%
2	喷混凝土早期抗压强度试验	技术规范	6 min:0.2 MPa, 1 h:0.5 MPa, 3 h:1.0 MPa, 9 h:2.0 MPa, 24 h:5.0 MPa	每月 2 次	试验时采用喷大板较为方便
3	喷混凝土抗压强度	蓝皮书:54044 54042	28 d 的抗压强度≥42 MPa. 单个芯样不小于规定强度的 90 %	每 30 m <sup>3</sup>	每组 5 个芯样,芯样直径 50 mm,高 50 mm
	粘结强度		喷混凝土与岩石的平均粘结强度≥1.0 MPa. 单个芯样≥0.7 MPa		每组 6 个芯样,芯样直径 50 mm
	缺陷等级	蓝皮书:54044; ASTM – 506.2 – 1.7	肉眼观察缺陷 SYSTEM 试验室按等级划分缺陷等级≥grade 2 为合格		每组 6 个芯样,芯样直径 50 mm
	厚度	蓝皮书:54044	符合设计	每 10 m <sup>3</sup>	芯样直径 50 mm
4	抗渗性	技术规范	抗渗标号≥P8	试验段取 2 组	每组 6 个试件

和体积稳定性等耐久性要求。

7 结语

由于钢纤维混凝土对围岩变形具有良好的吸收能力和湿喷工艺物料回弹率低等特性,湿喷钢纤维混凝土已在隧道工程中广为应用。只有很好地掌握湿喷钢纤维混凝土的施工工艺,合理选择喷射物料配合比,在施工各道工序中严格控制,才能达到良好效果。

以色列卡迈尔隧道火山凝灰岩段设计采用喷锚衬砌施工,提前 2 个月实现了隧道的贯通,化解了工期风险;工程质量全面受控,C40 钢纤维喷射混凝土质量取芯试验一次合格率 95.8%,复取合格率 100%;系统锚杆拉拔试验一次合格率 100%。卡迈尔隧道火山凝灰岩段工程实践证明,湿喷钢纤维混凝土喷锚衬砌代替复合式衬砌,防水效果良好;相对工程量小,工序简单,施工速度快。德国权威设计师 W·Wittke 教授多次对卡迈尔隧道项目特别是火山凝灰岩段的施工质量及进度给予高度评价。

参考文献:

[1] W·WITTKE 设计. CARMEL 隧道设计施工图,德国 WBI 设计公司,图号:CN90. W21 040.  
W·WITTKE, Construction design of CARMEL Tunnel, WBI Design Company, Germany, Drawing Number:CN90. W21 040.

[2] STATE OF ISRAEL. CHAPTER 54: General Specification ,2<sup>nd</sup> edition-Updated 1997.

[3] 贺少辉,马万权,曹德胜,等. 隧道湿喷纤维高性能混凝土单层永久衬砌研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004(20):122 – 130.  
He Shaohui, Ma Wanguan, Cao Desheng, et al, Research on Single-layer Permanent Lining of Wet Blasted Fibre High Performance Concrete[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(20): 122 – 130.

[4] 邓国兵. 客运专线高性能混凝土耐久性问题的研究[J]. 混凝土, 2009(4):118 – 121.  
Deng Guobing, Research on Durability of High Performance Concrete on Highways Special for Passenger Transport [J]. Concrete, 2009 (4):118 – 121.

[5] 姜叶翔,付文瑞. 杭州地铁工程用耐久性混凝土的性能研究[J]. 中国建材科技,2009(6):38 – 44.  
Jiang Yexiang, Fu Wenrui, Research on Property of Durable Concrete Used in Construction of Hangzhou Subway[J]. Science of Building Materials, 2009 (6):38 – 44.