

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.042

# 地铁盾构应用玻璃纤维筋产生的社会效益

金鑫, 刘军, 章良兵, 孙田

(北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044)

**摘要:**采用室内试验的方法对玻璃纤维筋的基本力学性能进行了研究。以北京地铁 16 号线 03 标为实际工程背景,在盾构始发与接收的过程中,用玻璃纤维筋局部替代钢筋,盾构直接对围护结构进行切削,免除了人工凿桩的过程,实现了盾构的无障碍始发与接收。从安全质量、经济效益、生态文明、技术进步 4 个方面与传统始发与接收方法进行了对比分析,以此来说明新工艺产生的社会效益。

**关键词:**玻璃纤维筋;盾构始发与接收;围护结构;社会效益

**中图分类号:**TU741.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0223-06

## The social benefit of the application of GFRP bars in metro shield

Jin Xin, Liu Jun, Zhang Liangbing, Sun Tian

(School of Civil and Traffic Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, P. R. China)

**Abstract:** Adopted method of laboratory test to study basic mechanical properties of GFRP, based on the background of the construction of Beijing Metro Line 16 bid package 03, in the course of the origin and reception of the shield, by means of replacing reinforcing bars to GFRP bars, the shield cuts the retaining structure directly, dispensing with the process of manual cutting to achieve accessibly origin and reception of the shield. From four aspects of the safety quality, economic benefits, ecological civilization, technological progress, compared with the traditional method of origin and reception methods the new technology is analyzed to illustrate the social benefits of it.

**Key words:** glass fiber reinforced polymer; TBM break through and launching; enclosure structure; social benefit

在中国城市地铁快速建设的今天,盾构法以其独特的优势正逐步成为地铁隧道建设的首选工法<sup>[1]</sup>。盾构法一般包括始发、正常掘进、接收 3 个阶段<sup>[2]</sup>,其中始发与接收的施工问题仍为突出。传统盾构始发与接收围护结构为钢筋混凝土结构,需要人工凿除,施工安全风险高、工期较长、作业环境极其艰苦,且易出现涌水和塌方,尤其是在深埋情况下,极易出现流砂等不良工程地质现象,严重违背了我国可持续发展战略和生态文明建设布局。在此背

景下,玻璃纤维筋替代钢筋作为围护结构就应运而生了。

该技术于 2000 年在香港地铁中首次应用,很多国外地铁工程依据香港经验进行设计施工,并将该技术称为“soft eyes”<sup>[3-6]</sup>。目前,国内外对玻璃纤维筋作为围护结构的研究主要是对其力学性能的研究,例如 Choi 等<sup>[7]</sup>对玻璃纤维筋在无约束环境下粘结性能进行研究,探讨了两种筋体的搭接长度、最小厚度保护层以及与混凝土强度的影响;米向乾等<sup>[8]</sup>

收稿日期:2015-11-10

基金项目:北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划(IDHT20130512)

作者简介:金鑫(1991-),男,硕士生,主要从事隧道与地下工程研究,(E-mail)4-gold@163.com。

刘军(通信作者),男,教授级高工,博士生导师,(E-mail)liujun01@tsinghua.org.cn。

设计了不同的玻璃纤维筋混凝土轴心受压圆柱,对不同配筋率和配箍率下玻璃纤维筋混凝土柱受压性能进行试验研究;Ascione 等<sup>[9]</sup>进行了静态加载常规试验,探讨了玻璃纤维筋跨中位移和裂缝宽度的发展过程以及极限状态的变化过程;Bentz 等<sup>[10]</sup>对大尺寸的矩形梁进行无腹筋抗剪理论分析,发现玻璃纤维筋混凝土抗剪承载力尺寸效应与构件大小和主筋应力有关;Dong 等<sup>[11]</sup>进行了梁和板的弯曲试验,结果表面玻璃纤维筋黏结强度低于钢筋黏结强度。

以北京市地铁 16 号线 03 标(稻香湖路站—屯佃站)为实际工程依托,用玻璃纤维筋局部替代钢筋作为围护结构后,盾构可以直接切削围护结构,从而实现了盾构的无障碍始发与接收,安全高效环保,具有良好的社会效益。

## 1 工程概述

北京地铁 16 号线 03 标(稻香湖路站—屯佃站)由一站一区间组成,区间里程范围 BK5+621.650~BK7+624.700,长 2 003.050 m,单线单洞隧道。区间隧道左、右线间距 11.9~15.2 m,轨面标高为 24.26~27.78 m,隧道底板标高为 23.08~26.64 m,隧道底板埋深为 18~20 m,覆土厚度为 11.97~15.88 m,采用盾构法施工。投入盾构机为日本石川岛  $\phi 6.14$  m 加泥式土压平衡盾构机,盾构主要穿越粉质粘土层,局部为粉土夹层。采用辐条式刀盘,中心支撑,以便于更好的建立土压。盾构主要参数为盾构直径 6 140 mm,总推力 40 000 kN,推进速度 0~92 mm/min,工作扭矩 6 282 kN·m,脱困扭矩 7 538 kN·m,刀盘转速 0~1.6 r/min,最小转弯半径 250 m,同步注浆为双液注浆系统。

## 2 玻璃纤维筋力学性能研究

玻璃纤维筋(GFRP)全称玻璃纤维增强复合材料筋,是由高性能的含碱量小于 0.8%的无碱玻璃纤维无捻粗纱或者高强玻璃纤维无捻粗纱和树脂基体(环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和聚酯树脂)、固化剂,采用成型固化工艺复合而成表面形状为全螺纹式的杆体<sup>[12]</sup>,是纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer 简称 FRP)的一种,为各向异性材料,与钢筋相比较具有抗拉强度高、剪切强度低、耐腐蚀性强、质量轻、弹性模量低、脆性破坏、易于切割等特点<sup>[13-16]</sup>。

采用室内试验的方法,结合理论分析,分别选取直径大小为 20、22、25、28 mm 的玻璃纤维筋进行单向拉伸试验研究和横向剪切试验研究。

### 2.1 玻璃纤维筋单向拉伸试验研究

试件在万能试验机上加载,设计尺寸如图 1 所示,其中  $L_1$  为钢套管长度, $L_0$  为杆体有效长度。试验结果如图 2~3 所示。

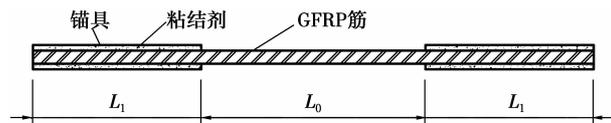


图 1 玻璃纤维筋拉伸构件尺寸设计图

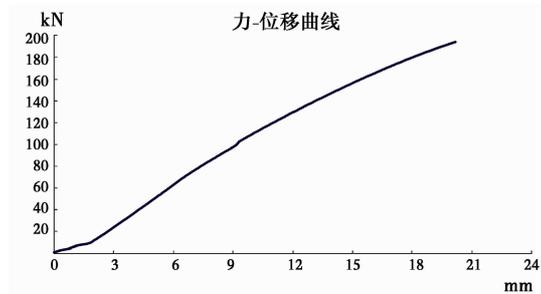


图 2 玻璃纤维筋拉伸力-位移曲线

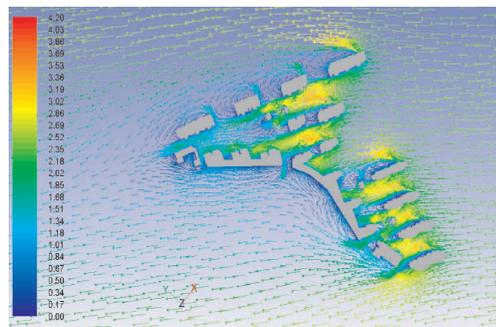


图 3 玻璃纤维筋拉伸应力-应变关系

对每个规格的玻璃纤维筋拉伸试验结果进行处理,计算求得极限抗拉强度值、抗拉弹性模量的平均值与标准差。

表 1 玻璃纤维筋拉伸试验结果统计

规格	极限抗拉强度/MPa		弹性模量/GPa	
	平均值	标准差	平均值	标准差
20	793.3	99.3	48.54	2.37
22	737.2	69.3	47.21	1.46
25	722.8	59.5	48.15	1.88
28	729.4	67.1	48.30	1.73

## 2.2 玻璃纤维筋横向剪切试验研究

对于剪切试验,通过剪切模具进行剪切试验。加载速度约为 30 MPa/min,均匀加载直至试样发生剪切破坏,记录试验破坏后的最大荷载和破坏形式。

每个规格的玻璃纤维筋试件取为 5 根,每个规格的玻璃纤维筋样品都取 300 mm,试验结果如表 2 所示。

表 2 玻璃纤维筋剪切试验结果统计表

试件规格	φ20		φ22		φ25		φ28	
	P/kN	$\tau_u$ /MPa	P/kN	$\tau_u$ /MPa	P/kN	$\tau_u$ /MPa	P/kN	$\tau_u$ /MPa
1	79.79	127.0	100.2	131.8	131.85	134.3	175.01	142.1
2	88.92	141.5	89.23	117.4	145.04	147.7	160.72	130.5
3	84.26	134.1	100.42	132.1	140.45	143.1	164.36	133.5
4	87.45	139.2	105.82	139.1	142.52	145.2	155.56	126.3
5	93.62	149.0	107.4	141.5	131.2	133.6	174.56	141.8
平均值	86.8	138.2	100.6	132.4	138.2	140.8	166.0	134.8
标准差	5.17	8.23	7.12	9.40	6.32	6.45	8.57	6.96

从试验结果可以得到,玻璃纤维筋的剪切强度为 117~149 MPa,其变化范围不大。

## 2.3 试验小结

1)玻璃纤维筋在单向拉伸试验下表现为脆性破坏,其应力-位移曲线几乎成一直线。

2)对于同一批次,同一规格的玻璃纤维筋,极限抗拉强度差异较大,其离散性大于钢筋,在保证率发现应大于钢筋的 95%。

3)在其他因素相同条件下,玻璃纤维筋极限抗拉强度主要受杆件截面尺寸影响,弹性模量主要受玻璃纤维含量影响。

4)玻璃纤维筋的弹性模量为钢筋弹性模量的 24%。

5)玻璃纤维筋横向剪切强度明显小于轴向抗拉强度。

6)玻璃纤维筋的横向抗剪强度变化随其杆件直径变化不大。

## 3 盾构始发与接收洞口玻璃纤维筋围护结构的使用

为实现盾构无障碍始发与接收,在盾构进出洞范围内使用相同数量、相同直径的玻璃纤维筋围护桩替代钢筋混凝土桩,每个洞口处直接切削玻璃纤维筋桩有 6 根,位置如图 4 所示(B 代表玻璃纤维筋桩)。

围护桩采用 C25 混凝土,受力主筋保护层为 50 mm,洞口钻孔桩骨架材质上部与下部为钢筋,洞口处与洞口上下 500 mm 范围内为玻璃纤维筋。普

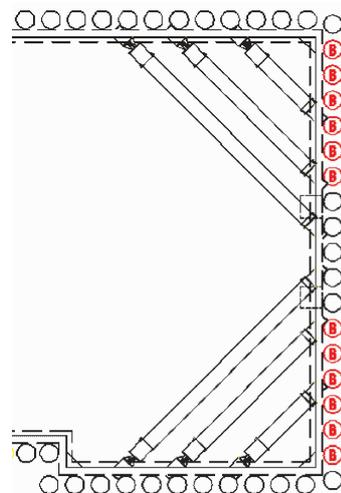


图 4 洞口盾构始发与接收处围护桩布置图

通纵筋接头采用搭接焊,玻璃纤维筋与普通钢筋搭接长度为 2 470 mm,玻璃纤维筋与钢筋之间的搭接采用 3 个钢制 U 形卡固定,钢筋搭接布置在盾构机刀盘外 1 m 以上的范围,且搭接过程中同一搭接错开 50%。

## 4 盾构直接切削玻璃纤维筋盾构无障碍始发与接收工艺

基于玻璃纤维筋围护结构盾构始发主要流程包括:端头土体加固、盾构机始发托架的安装、盾构机组装调试、反力架及洞门密封止水装置安装、负环管片的安装、盾构切削玻璃纤维筋围护桩、盾构机掘进与管片拼装。盾构接收主要流程包括:端头土体加固、接收基座安装并固定、洞门密封止水装置安装、

调整盾构掘进姿态、接收段盾构掘进、盾构切削玻璃纤维筋围护桩、盾构接收上基座。为了顺利完成始发与接收,需要提前做好一系列的技术准备,主要有:始发、接收场区平面布置,盾构姿态的调整,反力架与基座设计、受力分析及安装,洞口处端头土体加固,进出洞门帘的安装及进出洞管片拉紧联系条的安装等。

用玻璃纤维筋局部替代钢筋作为围护结构,盾构可以直接对其进行切削,不需要人工凿除钢筋混凝土围护结构,在切削玻璃纤维筋的过程中,盾构磨桩参数的选择与控制极其关键。通过理论计算及分析,在始发磨桩时,总推力应控制在 1 600~1 800 kN,推进速度 3~5 mm/min,刀盘转速 < 1 r/min,刀盘扭矩 900~1 500 kN·m。在接收磨桩时,总推力控制在 22 000 kN 以下,推进速度 3~5 mm/min,刀盘转速 < 1 r/min,刀盘扭矩 2 000~3 000 kN·m。在实际施工过程中,要根据具体情形严控磨桩参数,实际参数如表 4 所示。

表 4 盾构始发、接收磨桩参数

	总推力/kN	推进速度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	刀盘转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	刀盘扭矩/ (kN·m)
盾构始发	1 713	3.6	0.95	1 300
盾构接收	18 226	2.9	0.95	2 500

在进出洞时,鱼尾刀中心点高出刀盘面板 490 mm,为使刀盘平面受力均匀,在刀盘接触到掌子面前,需要利用水钻把盾构机鱼尾刀与掌子面接触的位置凿除,同时将盾构机两侧的同时注浆脊与掌子面接触的位置凿除。另外,刀盘磨桩会产生大量热量,为了给刀具降温,可以适当往刀盘前注入冷却水。从而实现盾构直接切削玻璃纤维筋围护结构,顺利完成无障碍始发与接收。

## 5 盾构无障碍始发与接收同传统方法社会效益对比分析

在我国经济大发展的今天,地铁的修建顺应了时代发展的潮流。然而,在地铁修建技术要求高,周期较长,修建过程中需要消耗大量的资源、能源,产生废气、废水、废弃固体,产生粉尘、噪声和强光等污染<sup>[17]</sup>,更严重的是,在修建过程特别是始发与接收时,传统的人工凿除洞门围护结构存在着巨大的安全风险,而采用玻璃纤维筋局部替代钢筋作为围护结构,盾构顺利完成了无障碍始发与接收,具有良好

的社会效益,满足了“绿色施工”安全环保的基本要求,实现了可持续发展,响应了生态文明建设的战略决策。

### 5.1 安全质量对比分析

传统盾构始发与接收均存在较大安全风险,导致国内主要城市地铁建设发生了一系列工程事故,不仅造成了经济损失,更重要的是产生了极其不好的社会负面影响。例如:天津海河共同沟隧道始发,在破除洞门处地下连续墙时洞门出现涌水流砂,继续破除地下连续墙时,涌水流砂量逐渐变大,直至盾构设备被完全淹没;北京地铁高米店南站盾构始发,左线盾构洞门破除围护结构时,围护桩突然倒塌,造成一名工人受伤,同时洞门上部发生土体坍塌,塌方体高约 1.5 m,宽约 2 m,塌方量约 5 m<sup>3</sup>;广州地铁人和站盾构接收,当洞门破除一半时,洞门顶点水平探孔流出水砂。在排除刀盘按钮失效故障后,转动刀盘,水砂大量流出。因大量砂土流出压住锁压板的钢丝绳,当刀盘顶住橡胶帘布时,钢丝绳立即断裂。南京地铁元通站盾构接收,盾构刀盘顶到地下连续墙外侧,排空土仓内上部土体后,盾构操作人员为方便割除洞门处围护结构的钢筋而转动刀盘,导致刀盘下部局部区域开始出现了漏水漏砂点,并且迅速发展扩大,从盾构四周流入土仓,并从土仓下部涌入车站端头。大约 0.5 h 后,1173 环管片突然发生下沉,并与相邻管片错台约 15 cm,周边混凝土开裂,环缝出现长约 150 cm、宽 5 cm 的张开裂缝,大量水土从接缝向元通站涌入。同时相邻管片开始崩裂、错台、渗漏,此时盾尾急剧下沉,约 5 min 的时间里盾尾基准点沉降约为 49 mm,铰接压力由 160 bar 急剧增大到 275 bar<sup>[18]</sup>。

该标段采用玻璃纤维筋替代钢筋作为围护结构,盾构直接切削围护桩,在切削过程中,加强地面沉降监测,沉降监测数值如表 5 所示。

表 5 始发与接收盾构磨桩地面沉降监测

始发监测点号	沉降值			接收监测点号	沉降值		
	沉降值	沉降值	沉降值		沉降值	沉降值	沉降值
SF-1	0.21	-0.37	-0.09	JS-1	-0.13	0.45	0.88
SF-2	0.33	-0.56	-0.19	JS-2	0.20	0.03	0.17
SF-3	0.45	-0.95	-0.74	JS-3	0.43	0.13	0.59
SF-4	0.46	-1.21	-0.98	JS-4	0.24	-0.12	-0.15
SF-5	0.43	-0.98	-0.84	JS-5	0.15	0.17	-0.47
SF-6	0.36	-0.78	-0.23	JS-6	-0.13	0.81	0.35
SF-7	0.25	-0.39	-0.12	JS-7	0.12	0.58	-0.30

可见地面沉降值最大为 $-1.21\text{ mm}$ ,地面隆起值最大为 $0.88\text{ mm}$ ,符合北京市地方标准《地铁工程监控量测技术规范》(DB11/490—2007)的相关要求。并且现场发现,从刀盘开始磨桩到穿过整个桩体,刀具几乎无损伤。

该项目防范了地表塌陷、道路开裂、房屋变形倒塌等人为灾害的发生,同时也消除了安全隐患,避免了二次灾害发生的可能性,对保障社会安全、改善人民生活质量起到了重要作用,利于可持续发展。

## 5.2 经济效益对比分析

经济效益包括直接经济效益和间接经济效益。直接经济效益体现在:一是材料本身及不需要凿除桩体方面;二是大幅度提高生产效率,节约工期方面。

以单个洞口为例,每个洞口含玻璃纤维筋桩 6 根,进行经济对比如表 6 所示,其中统计所用的主筋长度为 $7.7\text{ m}$ ,玻璃纤维筋和钢筋的规格均为 $\phi 25$ 、 $\phi 20$ 、 $\phi 14$ 。

表 6 常规技术与项目技术经济对比

序号	项目名称	数量	单位	单价	总价/元
1	增加项目				40 078
1.1	玻璃纤维筋 $\phi 25$	1 060	m	25	26 500
1.2	玻璃纤维筋 $\phi 20$	64	m	19	1 216
1.3	玻璃纤维筋 $\phi 14$	883	m	14	12 362
2	减少项目				118 438
2.1	钢筋	4.39	t	4 200	18 438
2.2	钢筋混凝土凿除	1	项	100 000	100 000
3	费用减少总额				78 362

从表 6 可以看出,玻璃纤维筋筋材比钢筋费用高,但节省了凿除钢筋混凝土桩的费用,玻璃纤维筋费用为 4 万元,钢筋及混凝土凿除费用为 12 万,因此采用玻璃纤维筋后总费用比钢筋混凝土的费用低将近 8 万元,始发与接收,以及过风道(相当于始发与接收)总共 8 个洞门,北京地铁 16 号线 03 标(稻香湖路—北清路)盾构的始发与接收可直接节约投资 64 万元。

另外,采用该技术后大幅度提高生产效率,节约工期,每次始发或接收由原来的 $7\sim 10\text{ d}$ ,减少到 $1\sim 2\text{ d}$ 时间,因此降低了管理成本。该标段每天的管理成本约 5 万元,若按节约 6 d 考虑,每个洞口可节约管理成本 30 万元,该标段可节约管理成本 240 万。以上两项,将为该标段直接节约投资 304 万元。

间接经济效益则主要体现在盾构直接切削围护结构,减少了人工破除钢筋混凝土的过程,简化了施工工艺,同时极利于设计、施工阶段的总筹划。更重要的是该工艺避免了塌方等工程事故,塌方不仅在社会上造成恶劣影响,并可能造成巨大的经济损失、人员伤亡,还会造成社会恐慌。为处理塌方、恢复道路交通不仅耗费物力、人力,还可能产生二次灾害,给国家造成大量损失。项目技术产生的这些间接效益无法精确估量。

## 5.3 生态文明对比分析

传统盾构始发与接收在人工凿除钢筋混凝土围护结构的过程中,会产生大量的诸如 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}$ 等有害气体,氧气含量低,且隧道内噪声巨大,通风不畅,作业环境极其艰苦。另一方面,在凿除的过程中,会出现土体和地下水的流失现象,对地表环境及生态环境产生极为不利的影 响,不利于环境、生态及资源的保护。用玻璃纤维筋替代钢筋后,免除了人工凿除围护结构,切割出的渣土对环境无污染,可直接与其他渣土一起运输,因此,对生态环境的保护起到了巨大的作用。同时,玻璃纤维筋的使用减少了钢筋的用量,而玻璃纤维筋易于得到,因此,对资源的节约及合理利用具有极为重要的作用。且项目技术工艺简单、施工速度快,节约了开支且降低了能源消耗。

综合比较可以发现,基于玻璃纤维筋围护结构的盾构始发与接收对环境、生态、资源保护、资源合理利用及节支降耗起到了巨大的推动作用。

## 5.4 技术进步对比分析

基于玻璃纤维筋围护结构的盾构始发与接收在基础理论方面研究实现了突破,发现了新的科学现象;解决了行业发展中普遍存在的共性技术问题,即安全问题,拓展了在盾构工程中的应用领域,提高了盾构的使用效率并实现了行业技术的跨越,推动了盾构工程行业技术的向前发展和产业结构优化升级。项目对科技进步的推动作用已体现在北京市工法、国家发明专利及北京地方标准、国家标准规范中。项目解决了盾构行业发展的技术共性问题,对提高科学研究基础建设水平做出了贡献。同时,研究成果已成功应用在了热力隧道设计与施工中,对相关行业起到了促进作用,相信在不久的将来会进一步应用在电力、燃气等市政基础行业中,对北京市市政基础建设起到极为重要的作用。另一方面,项目技术在国内刚起步,项目制定的国家、北京地方标

准以及编制的设计与施工指南,培养了大量技术人员、技术管理人员、研究生及研究人员,为本行业的发展培养了大量人才。

## 6 结 论

1)用玻璃纤维筋局部替代钢筋作为围护结构,盾构对玻璃纤维筋直接切削,免除了人工凿除钢筋混凝土围护结构,实现了盾构的无障碍始发与接收。

2)该工艺在安全质量、经济效益、生态文明、技术进步等方面较传统盾构始发与接收有着显著的进步,取得了良好的社会效益。

3)该工艺已经成功应用在热力隧道建设中,提高了北京的基础设施建设。

4)今后,希望有更多更好的新工艺应用于地铁盾构施工中,争取早日实现地铁盾构的全过程“绿色施工”。

### 参考文献:

- [1] 陈馈,洪开荣,吴学松. 盾构施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [2] 鲍绥意,关龙,刘军,等. 盾构技术理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3] Tarua A, James A. Cross city's driven tunnel design [J]. *Tunnels & Tunnelling International*, 2004, 36(2): 7-23.
- [4] Beau P, Maghazy M, Chiriottie E. Importance of geological and geotechnical model upgrading for the tunnel/station interface during the TBM breakthrough on Dubai Metro Project[J]. *Underground Facilities for Better Environment and Safety: Proceedings of the ITA World Congress, Agra, India*. 2008: 1130-1138.
- [5] Flint G R, Elliott I H, Foreman W, et al. Collection system: tunnels [J]. *Proceedings of the ICE-Civil Engineering*. Ice Virtual Library, 1993, 97(5): 18-33.
- [6] Taerwe L. Use of Fibre Reinforced Polymers (FRP) in concrete structures: A critical appraisal[J]. *Massivbau in ganzerBreite*. Springer Berlin Heidelberg. 2005: 161-174.
- [7] Choi D U, Chun S C, Ha S S. Bond strength of glass fibre-reinforced polymer bars in unconfined concrete [J]. *Engineering Structures*, 2012, 34: 303-313.
- [8] 米向乾. GFRP 筋及 GFRP 筋混凝土柱受压性能研究 [D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2012.
- [9] Ascione L, Mancusi G, Spadea S. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars [J]. *Strain*, 2010, 46(5): 460-469.
- [10] Bentz E C, Massam L, Collins M P. Shear strength of large concrete members with FRP reinforcement [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(6): 637-646.
- [11] Dong-Uk Choia, Sung-Chunb, Sang-Su Hac. Bond strength of glass fibre-reinforced polymer bars in unconfined concrete [J]. *Engineering Structures*, 2012 (34): 303-313.
- [12] DB44/T 497-2008. 土木工程用玻璃纤维增强复合材料 (GFRP)筋[S]. 广东省质量技术监督局.
- [13] 蒋华,刘军,原海军,等. 盾构始发中的玻璃纤维筋应用研究[J]. *市政技术*, 2014, 6(32): 79-82, 86.
- [14] 宋早云,刘军,周洪. 玻璃纤维筋在地铁盾构施工中的应用[J]. *北京建筑工程学报*, 2014, 30(2): 32-36.
- [15] 周洪,刘军,宋早云. 玻璃纤维筋拉伸力学性能试验研究[J]. *北京建筑工程学院学报*, 2013, 29(3): 20-23.
- [16] 刘军,原海军,李京凡,等. 玻璃纤维筋在盾构工程中的研究与应用[J]. *都市轨道交通*, 2014, 2(27): 81-85, 103.
- [17] 李伟. 地铁工程绿色施工应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [18] 江玉生,王春河,江华,等. 盾构始发与到达:端头加固理论研究及工程实践[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

(编辑 王维朗)