

# 玄武岩纤维增强沥青混凝土试验与性能研究

许婷婷 顾兴宇 倪富健

东南大学，交通学院，南京 210096

**摘要：**为研究玄武岩纤维对沥青混凝土性能的影响，在采用车辙试验和低温弯曲试验优选纤维类型和掺加量的基础上，通过劈裂试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验、车辙试验、60℃动态蠕变试验以及-10℃低温弯曲试验，将无纤维添加剂、掺加聚酯纤维、木质素纤维与玄武岩纤维的沥青混凝土性能进行对比研究。结果表明：掺加0.25%、经膨化及特定浸润剂处理的长径比为13μm/4.5mm的玄武岩纤维对沥青混凝土具有最好的增强效果；玄武岩纤维可以改善沥青混凝土的各项路用性能，尤其在高温稳定性和低温抗裂性方面效果显著，提高幅度均能达到80%。

**关键词：**玄武岩纤维；沥青混凝土；类型优选；纤维掺量；路用性能

中图分类号：U214.1\*8

文献标识码：A

文章编号：1672-4747(2011)02-0115-07

## Experimental Research on Performance of Basalt Fiber Reinforced Asphalt Concrete

XU Ting-ting GU Xing-yu NI Fu-jian

Transportation College, Southeast University,

Nanjing 210096, China

**Abstract:** To study the impact of basalt fibers on the performance of asphalt concrete, the performance of asphalt concrete without the fibers and with polyester fiber, lignin fiber and basalt fiber were compared by splitting test, freeze-thaw splitting test, immersion marshall test, rutting test, 60℃ dynamic creep test and -10℃ bending test, on the basis of optimum selecting the fiber type and dosage. The test data supported that the basalt

收稿日期：2010-05-14.

基金项目：河北省交通科技项目（7921000005）。

作者简介：许婷婷（1986-），女，汉族，江苏连云港人，东南大学道路与铁道工程专业硕士研究生，主要研究方向为路基路面结构与新材料。

fiber, which was expanded, specific infiltrating, with a length and radius ration of  $13\mu\text{m} / 4.5\text{mm}$  and the content of 0.25%, gave the optimum enhancing effect. The results showed that the basalt fiber could enhance all the pavement performances of asphalt concrete, especially, in high-temperature stability and low-temperature anti-cracking, increased by 80%.

**Key words:** Basalt fiber, asphalt concrete, type optimization, fiber content, pavement performance

## 0 引言

在沥青混合料中掺加纤维是改善沥青混凝土路面性能的有效手段之一,目前在道路工程中广泛应用的纤维主要有木质素、聚合物纤维和矿物纤维。木质素纤维由天然木材经过化学处理得到,具有较好的吸油性,主要用于 SMA 沥青混合料中。聚合物纤维为高聚物合成的有机纤维,如聚脂纤维和聚丙烯纤维,已在多条高速公路建设中得到应用。但这几种常用纤维均存在应用缺陷,木质素纤维加筋作用较差,易发生退化及氧化反应,且吸湿性较大;聚合物纤维在高温拌和时易出现弯曲融化;早期使用的矿物纤维实践证明对人们的呼吸系统有较大的危害,同时污染环境,逐渐被淘汰<sup>[1-7]</sup>。近年来,玄武岩纤维作为一种新型路用矿物纤维,以其优良的物理化学性能、原材料分布广且低廉,在公路建设中受到越来越多的重视。

## 1 玄武岩纤维的技术特点

玄武岩纤维(GBF)是以天然玄武岩矿石为原料,在  $1450\sim 1500^\circ\text{C}$  熔融后,通过喷丝板拉伸而成的矿物纤维<sup>[8,9]</sup>,技术指标见表 1。

表 1 玄武岩纤维技术指标

Tab. 1 Specifications of GBF

技术指标	数值
杨氏模量/GPa	90~110
抗拉强度/MPa	3 000~4 840
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	2.14

纤维的吸湿性能对纤维增强沥青混凝土具有重要意义。吸湿性大的纤维不仅存放时易吸水结团降低拌合分散性,还会使纤维沥青界面产生湿胀,造成沥青混凝土的水损害<sup>[10]</sup>。精确称量两份 100gGBF 纤维,在  $105^\circ\text{C}$  的烘箱里放置 4h,烘干至恒重,冷却后称量烘干后纤维的质量,测定其平均吸水率为 0.125%,符合规范小于 5% 的要求。

纤维的吸油性能反映了纤维吸持沥青的能力。吸油率高表明纤维与沥青的相容性好,有利于防止沥青在高温条件下发生析漏现象,提高混合料的高温稳定性<sup>[2]</sup>。采用网篮试验测定 GBF 吸油率:精确称量两份 5g GBF 纤维,放置在漏勺上(漏勺的孔径要保持不能漏掉纤维),一起放入煤油中完全浸润 5min 后取出,手动上下抖动 50 次后(抖动过程中保持速度和幅度的稳定)称量其质量,测得 GBF 吸油率平均为纤维质量的 4 倍。

路用纤维必须具有足够的高温耐热性,以保证在拌和、运输及摊铺工程中性能不会大幅下降。玄武岩纤维的高温稳定性非常好,在  $600^\circ\text{C}$  烘箱中放置 2h 后测得的强度为常温下强度的 95%,保持了很好的力学完整性<sup>[11]</sup>。

## 2 室内试验材料说明

本文室内试验采用的粗集料为玄武岩,细集料为石灰岩,各项指标均满足规范对集料的要求;沥青混凝土级配选择 AC-13C 和 SMA-13 两种,级配组成见表 2;选用 70#普通沥青和 PG 等级为 76-22 的 SBS 改性沥青,检测指标见表 3;纤维选择常用的聚酯纤维、木质素和短切玄武岩纤维。

表 2 沥青混凝土级配组成

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13C	100	93.2	66.2	42.7	31.9	23.7	17.8	12.1	8.0	5.4
SMA-13	100	93.1	65.3	27.2	19.0	16.5	14.7	13.0	11.2	9.7

表 3 沥青技术指标

指 标	试验值		技术要求	
	70 <sup>#</sup>	SBS	70 <sup>#</sup>	SBS
针入度 (25℃, 100g, 5S) / (0.1mm)	62	56	60~75	30~60
延度 (5cm/min, 5℃) /cm	38(10℃)	52	≥30	≥20
软化点 (环球法) / (℃)	47	83	≥46	≥60
动力粘度 (绝对粘度 60℃) / (Pa·s)	190	23 703	≥180	≥5 000

### 3 玄武岩纤维类型优选

玄武岩纤维由于生产工艺、表面处理剂及长径比的不同,对沥青混凝土的增强效果也有所不同。为了达到最佳的增强效果,基于 GBF 改善沥青混合料高温性能的效果,选择最佳的纤维类型。为便于表达,将本文中涉及的几种 GBF 进行编号,如表 4 所示。

表 4 试验用玄武岩纤维类型

Tab. 4 Type of basalt fiber used in test

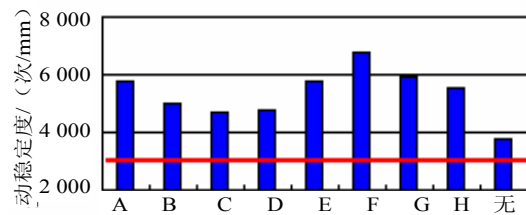
类型	编号	尺寸
GBF602	A	13 $\mu$ m/3mm
	B	13 $\mu$ m/4.5mm
	C	17 $\mu$ m/3mm
	D	19 $\mu$ m/3mm
GBF603	E	13 $\mu$ m/3mm
GBF101	F	13 $\mu$ m/4.5mm
GBF501	G	13 $\mu$ m/3mm
	H	17 $\mu$ m/3mm

注:纤维尺寸中“/”前面为纤维直径,后面为纤维长度;GBF101和GBF602为膨化的玄武岩纤维,但是二者所使用的表面处理剂有所差别;GBF603为未膨化的玄武岩纤维,表面处理剂同GBF602;GBF501为增强沥青短切纱。

对于各种类型纤维,在AC-13沥青混合料中掺加0.2%相同的用量,室内拌和时,首先纤维与热干料一起加入搅拌机干拌30~50s,再湿拌60s,以保证纤维尽可能分散均匀<sup>[12]</sup>。通过拌和过程中的拌和效

果观察和沥青混凝土高低温性能比较,选择增强效果最好的纤维。

通过各GBF纤维增强沥青混凝土试验(见图1、图2)可以看出,随着纤维直径和长度增大,高低温性能有所降低;不同的浸润剂对混合料性能影响较大(F最优);膨化处理使得纤维绒化对高温有利。综合纤维对沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性的影响,宜采用13 $\mu$ m/4.5mm、膨化处理及特定浸润剂处理的玄武岩纤维。



注:红线为2800次/mm

图1 车辙试验结果

Fig. 1 Rutting test result

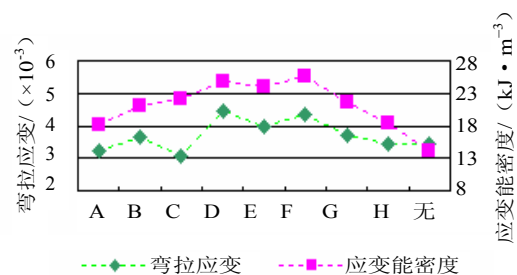


图2 低温小梁弯曲试验结果

Fig. 2 Low-temperature bending test result

### 4 玄武岩纤维掺量研究

根据已有纤维增强沥青混凝土的研究<sup>[13,14]</sup>,纤维的用量一般在0.2%~0.4%,当纤维用量在0.35%以上时,一方面增加路面造价,另外一方面在沥青混合料中难以分散,反而会影响混合料性能。为研究GBF纤维掺量对沥青混凝土性能的影响,在AC-13C沥青混合料中,掺加0、0.1%、0.2%、0.25%、0.3%、0.35%GBF,进行室内车辙试验和-10℃小梁弯曲试验(依据规范JTJ052-2000要求),结果如图3、图4所示。

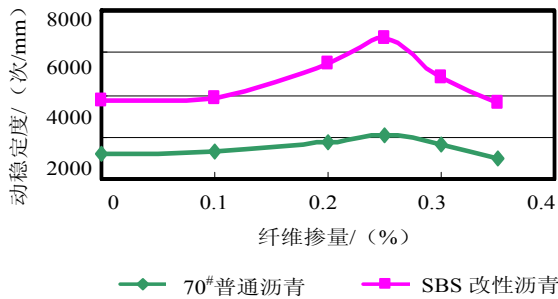


图3 不同纤维掺量沥青混凝土动稳定度

Fig.3 Dynamic stability of asphalt concrete with different fiber dosage

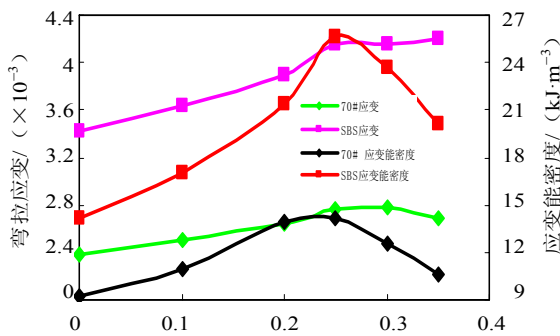


图4 不同纤维掺量沥青混凝土的弯曲应变与应变能密度

Fig.4 Bending strain and strain energy density of asphalt concrete with different fiber dosage

由试验结果可知:(1)随纤维掺量增加,混合料高低温性能先增加后减降低,在0.25%掺量附近存在峰值。纤维掺量过大,纤维均匀分散性下降,易出现结团现象,致使混合料性能降低。结合经济性

分析,在沥青混凝土中掺加0.25%GBF是比较合理的。(2)沥青对纤维增强作用影响较大,相对于普通沥青,在SBS改性沥青中添加GBF,更有利于纤维优越性能的发挥。

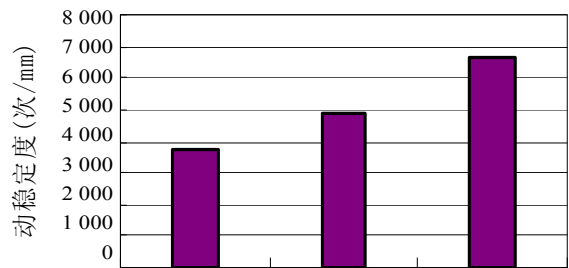
### 5 玄武岩纤维与其他路用纤维性能比较试验

#### 5.1 GBF与聚酯纤维增强沥青混凝土路用性能比较

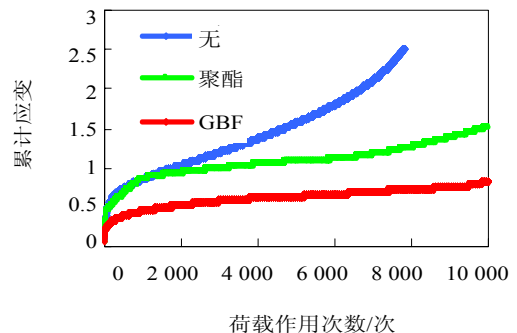
聚酯纤维是目前密级配沥青混合料中常用加筋纤维,因此室内通过向AC-13SBS改性沥青混合料中掺加0.25%纤维,比较了GBF与聚酯纤维增强沥青混凝土的效果。

##### 5.1.1 高温性能比较

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,进行车辙试验和60℃动态蠕变试验评价高温性能,结果如图5所示。



(a) 车辙试验



(b) 60℃动态蠕变试验

图5 路用纤维增强沥青混凝土高温性能比较

Fig.5 Test result of high-temperature performance of asphalt concrete

由图 5 可以看出,加入纤维可以大大改善沥青混凝土的高温性能,GBF 增强沥青混凝土的效果远好于聚酯纤维,表现为动稳定度大大提高,蠕变失稳阶段明显延后。

### 5.1.2 低温性能比较

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,进行 $-10^{\circ}\text{C}$ 小梁弯曲试验评价低温性能。由图 6 可见,加入纤维可以增强混合料低温抗裂性能,GBF 增强效果最为显著,表现为小梁弯拉应变和应变能密度明显增大。

### 5.1.3 水稳性能比较

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,

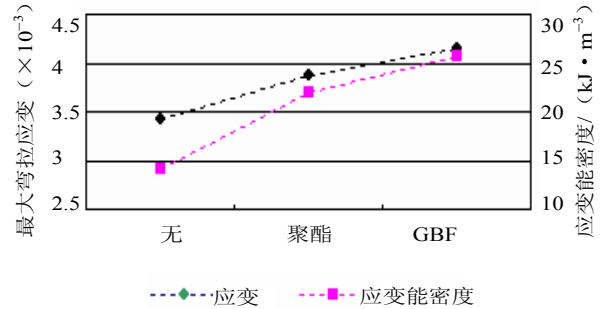


图 6 路用纤维增强沥青混凝土低温性能比较

Fig. 6 Test result of low-temperature performance of asphalt concrete

进行浸水马歇尔和冻融劈裂试验评价耐水损害能力,试验结果如表 5 所列。

表 5 水稳性能试验结果

Tab. 5 Test result of water stability of asphalt concrete

混合料类型	稳定度 $S_1/\text{kN}$	稳定度 $S_2/\text{kN}$	残留稳定度 $S_0/(\%)$	劈裂强度 $R_{T1}/\text{MPa}$	劈裂强度 $R_{T2}/\text{MPa}$	残留强度比 $\text{TSR}/(\%)$
无	14.0	13.2	94.3	1.18	1.02	86.4
聚酯	15.0	14.3	95.3	1.32	1.16	87.8
GBF	18.6	18.0	96.7	1.48	1.32	89.2

由表 5 可知,GBF 对混合料耐水损害能力的改善幅度比聚酯纤维要好,表现为混合料的劈裂强度明显增大,残留强度比明显提高。

### 5.1.4 力学性能比较

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,进行劈裂试验评价力学性能,试验结果如表 6 所列。

由表 6 可知,加入纤维可提高混合料的力学性能,GBF 增强作用比聚酯纤维显著,表现为混合料抗拉强度和破坏劲度模量明显增大。

表 6 力学性能试验结果

Tab. 6 Test result of mechanical property of asphalt concrete

沥青类型	劈裂抗拉强度/ $\text{MPa}$	破坏拉伸应变/ $(\times 10^{-3})$	破坏劲度模量/ $\text{MPa}$
无	1.81	5.47	618
聚酯	1.93	5.73	628
GBF	2.02	5.71	660

### 5.1.5 结论

与聚酯纤维相比,玄武岩纤维具有较好吸持沥青能力、优异的力学性能和便于加筋桥接的特点,均匀地分散在沥青混合料中,有效地提高了混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和力学性能,可综合改善沥青混合料的路用性能。

## 5.2 GBF 与木质素增强沥青混凝土路用性能比较

木质素是目前 SMA 沥青混合料中常用纤维,因此室内通过向 SMA-13SBS 改性沥青混合料中掺加 0.3%纤维,比较了 GBF 与木质素增强沥青混凝土的效果。依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,对混合料进行车辙试验和  $60^{\circ}\text{C}$  动态蠕变试验评价高温性能, $-10^{\circ}\text{C}$  小梁弯曲试验评价低温性能,浸水马歇尔和冻融劈裂评价耐水损害能力,劈裂试验评价力学性能如表 7 所示。

表7 纤维增强沥青混凝土路用性能比较

Tab.7 Pavement performance of fiber-reinforced asphalt mixture

试验指标		纤维类型	
		木质素	GBF
车辙试验	动稳定度(次/mm)	5 253	6 958
动态蠕变试验	流动荷载作用次数	7 300	9 100
-10℃小梁弯曲试验	弯拉应变/(×10 <sup>-3</sup> )	3.681	4.233
	应变能密度/(kJ·m <sup>-3</sup> )	18.25	25.49
浸水马歇尔试验	残留稳定度/(%)	93.8	92.9
冻融劈裂试验	残留强度比/(%)	92.1	91.2
劈裂试验	劈裂抗拉强度/MPa	1.86	1.99
	劲度模量/MPa	599	652

由表7可知,与木质素相比,玄武岩纤维混合料的动稳定度大幅提高,蠕变失稳阶段明显延后,高温稳定性更好;-10℃小梁弯拉应变明显增大,有效阻止并延缓低温开裂;水稳试验的残留稳定度、强度比略低,但均远高于85%<sup>[15]</sup>的规范要求,玄武岩纤维基本不吸水,避免纤维沥青界面湿胀,保证路面具有较好的长期耐水损害能力;劈裂强度和破坏劲度均高于木质素,表现出优良的力学性能。

## 6 结束语

(1)不同生产工艺、表面处理剂和长径比的玄武岩纤维,在增强沥青混凝土性能上存在一定的差异,

综合纤维对沥青混合料高低温性能的影响,宜采用13μm/4.5mm、膨化处理及特定浸润剂处理的玄武岩纤维。在沥青混凝土中掺加玄武岩纤维,并不是用量越多越好,综合纤维改善沥青混合料的高低温效果,结合拌合分散性和经济成本分析知掺加0.25%玄武岩纤维比较合理。

(2)玄武岩纤维增强沥青混凝土高温稳定性、低温抗裂性的效果极为显著,提高幅度各约80%。玄武岩纤维均匀地分散在沥青混合料中,一方面对沥青的蠕变行为产生约束,增强沥青与矿质骨料的粘结力,大幅提高沥青混合料的高温稳定性;另一方面,提高沥青混合料的油石比,增大沥青混凝土的柔性,同时,高抗拉强度、高模量的纤维起到加筋桥接作用,提高沥青混凝土破坏时消耗的能量,增大沥青混凝土低温时的断裂韧性,有效阻滞并延缓裂纹的产生,大幅增强沥青混合料的低温抗开裂性能。

(3)与聚酯纤维和木质素纤维相比,玄武岩纤维耐热性能好,克服纤维高温拌和易卷曲融化缺陷;较好的吸持沥青能力,增强沥青与矿质骨料的相对稳定性;明显突起的端部相互搭接,便于“桥接”与“加筋”作用的发挥;较高的杨氏模量和抗拉强度,有效分散并承担荷载,提高沥青混合料的整体强度;极低的吸水率,避免纤维沥青界面因水分侵蚀膨胀,保证路面具有长期良好的耐水损害能力。

(4)总的来说,玄武岩纤维具有耐热性能好、耐久抗老化、综合性能强、纯天然环保、性价比高等特点,可以综合改善沥青混合料的路用性能,尤其在改善高温稳定性和低温抗裂性方面效果显著。

## 参考文献

[1] 封基良. 纤维沥青混合料增强机理及其性能研究[D]. 东南大学, 2006.

[2] 陈华鑫, 李宁利, 胡长顺, 等. 纤维沥青混合料路用性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(2): 1-6.

[3] 吴少鹏, 叶群山, 刘至飞. 矿物纤维改善沥青混合料高温稳定性研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(11): 20-23.

[4] 陈华鑫, 张争奇, 胡长顺. 纤维沥青混合料的低温抗裂性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 82-86.

[5] 吴国雄, 李亮, 胡敢峰. 纤维沥青混凝土低温开裂的分形研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(3): 537-542.

- [6] 彭广银, 钱振东, 傅栋梁. 短切玄武岩纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 石油沥青, 2009, 23(1): 8-11.
- [7] 尚正强. 玄武岩纤维——SMA 与 OGFC 沥青路面的完美选择[J]. 中国公路, 2004, (3): 16-18.
- [8] 崔毅华. 玄武岩连续纤维的基本特性[J]. 纺织学报, 2005, 26(5): 120-121.
- [9] 胡显奇. 我国连续玄武岩纤维的进展及发展建议[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(6): 12-19.
- [10] Allen Cooley Jr L, Ray Brown E, Watson Donald E. Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibers[J]. Transportation Research Record, 2000(1723):19-25.
- [11] Jongsung Sim, Cheolwoo Park, Do Young Moon. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. Composites: Part B Engineering, 2005: 504-512.
- [12] 吴国雄, 张远航, 王爱民, 等. 拌和工艺与压实温度对聚酯纤维沥青砼性能的影响[J]. 重庆交通学院学报, 2007, 26(2): 101-103.
- [13] 高丹盈, 黄春水, 汤寄予. 纤维沥青混合料最佳纤维掺量试验研究[J]. 公路, 2009, 2(2): 141-145.
- [14] 郭乃胜, 赵颖华, 孙略伦. 纤维掺量对聚酯纤维沥青混凝土韧性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(4): 32-35.
- [15] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面设计规范 (JTG D50-2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

(中文编辑: 刘娉婷)

上接第 82 页

## 5 结束语

动车组运用计划编制中最重要的部分就是确定动车组周转接续关系。研究中,除了考虑动车组之间要具有的良好接续外,还需考虑动车组的定点检修,与经典的 TSP 问题有相似之处,但不完全相同。现阶段解决该方法主要有:遗传算法、模拟退火

算法、人工神经网络算法、蚁群算法等。本文采用元胞蚁群算法分两个阶段解决此问题,因只在第二阶段考虑动车组定点检修问题,故得出的动车组周转接续方案可能并不是最佳的,而且对部分接续过于紧凑的动车组还需进行一定的人工调整。因此,对该模型的求解还有待深入研究,用更有效的方法以减少人工调整的工作。

## 参考文献

- [1] 赵 鹏, 张迦南. 铁路动车组的运用问题研究[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(3): 6-16.
- [2] 彭其渊. 客运专线运输组织[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 169-180.
- [3] 聂 磊, 赵 鹏, 杨 浩, 等. 高速铁路动车组运用的研究[J]. 铁道学报, 2001, 23 (3): 1-7.
- [4] 张 杰, 陈 韬, 施福根. 客运专线动车组运用计划的计算机编制[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41 (5): 635-640.
- [5] 徐 安. 多目标规划问题及其解决方法[J]. 济南交通高等专科学校学报, 1995, 3 (4): 11-17.
- [6] 马 良, 朱 刚, 宁爱兵. 蚁群优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 47-84.
- [7] 李士勇, 等. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 53-61.
- [8] 深圳市交委会. 武广高铁广州南站 30 日正式启用 [DB]. <http://www.szbt.gov.cn/citizen/Detail.aspx?cID=7&ID=9559>, 2010.
- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁路动车组运用维修规程 (暂行) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.

(中文编辑: 刘娉婷)