

沥青混合料导热系数测试及其影响因素分析

张倩¹, 李彦伟^{2,3}, 谢来斌⁴

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 3. 石家庄交通运输局, 河北 石家庄 050001; 4. 陕西中霖集团路桥设计有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 由于沥青混合料为多相体, 其热物理特性参数的测试较为困难。随着对抗车辙等沥青混合料高温特性研究的深入, 发现针对沥青混合料导热系数等热物理参数测试方法相关研究很少。基于瞬态热线法, 采用 TC3000 导热系数仪, 针对四种典型沥青混合料进行导热系数测试。试验结果分析发现就内部组成因素而言, 沥青混合料导热系数随着空隙率增大而减小, 随 4.75 mm 以下细集料通过率增大而减小, 随沥青用量增大而减小, 但其减小不显著。另一方面, 在外部环境变化时, 混合料导热系数随温度增加有先减小后增大的趋势, 浸水时较干燥时导热系数也提高, 压力水平变化对导热系数测试结果影响不大。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 导热系数; 瞬态热线法

中图分类号: U416.221

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2004)02-0199-05

我国沥青路面车辙损坏较为严重, 车辙预估及防治已成为当下亟需解决的重要课题。高温对材料的影响与材料热物理特性紧密相关, 与沥青混合料温度传导及分布有关的物理参数主要有导热系数、导温系数、比热容和密度, 它们是进行沥青路面结构温度场模拟计算和路面温度应力分析必不可少的热物性参数, 其中导热系数尤为关键。

目前, 沥青混合料导热系数的获取, 一方面依赖于已有的数学模型, 从公式推导计算, 另一方面则通过测试得到。1972年Williamson对沥青混合料导热系数进行了研究, 提出了数学推算公式, 但因未考虑到温度和湿度的影响, 在应用上存在较大局限性^[1]。沥青混合料导热系数测试大多借鉴非金属固体材料导热系数测试方法, 已尝试的有稳态平板法、瞬态平面热源法、瞬态热线法等。稳态平板法测试过程受温度、湿度等环境因素影响较大, 且对于沥青混合料而言, 由于热传导速率慢、热量耗散大、混合料有空隙率等原因, 测试结果偏小, 耗时长。瞬态平面热源法依据的数学物理方程较为抽象, 测试结果因数学解析方法不同而不同, 故同种方法所测结果差异较大。瞬态热线法测试过程有相应电脑软件监测计算, 相对方便, 对试件要求简单, 但仪器造价昂贵。邴文山20世纪90年代对寒区道路材料的热物参数进行了测定研究^[2]; 牛俊明(1997)在研究排水性沥青抗滑层混合料热学性能时, 采用稳态法对混合料导热系数进行测试^[3]。逯彦秋等(2007)利用Hot Disk导热测试仪对SMA沥青混合料导热系数进行了研究^[4]。李兴海等(2007)采用非稳态常功率热源法测量了混合料导热系数和导温系数, 通过密度测量计算得到混合料比热容^[5-6]。张慧或(2011)等人采用快速导热系数测定仪进行了导热系数测试, 实验原理类似于瞬态热线法^[7]。黄慧(2010)根据比热、导热系数、导温系数之间的转换关系, 利用实测导温系数及比热的计算值和实测值推算了沥青混合料导热系数^[8]。邹玲(2011)用快速导热系数测定仪测试了沥青、集料、沥青混合料的导热系数, 揭示沥青混合料各组分对其导热系数的影响^[9]。

导热系数数值直接影响到沥青路面结构温度场及温度应力的计算^[10], 因而合理选择导热系数测试方法, 对其影响因素进行相关分析可为路面温度场计算及车辙研究提供依据。由于没有标准试验方法, 目前对沥青混合料导热系数的测试多为探索性试验, 远未形成完善体系。考虑各种方法的优缺点、试验可操作性以及结果准确性等因素, 本文采用瞬态热线法进行导热系数测试, 并对其影响因素进行了分析。

1 瞬态热线法沥青混合料导热系数测试

采用 TC3000 导热系数仪对四种类型沥青混合料在不同条件下的导热系数进行测试, 测试装置如图 1。混合料设计参数见表 1。沥青为 SBS(I-C)改性沥青, 粗集料采用陕西商洛产辉长岩, 细集料为陕西渭南产石灰岩机制砂, 矿粉为陕西蓝田产石灰石矿粉, 德国产 CFF 絮状木质素纤维。

室内成型沥青混合料马歇尔试件, 将圆柱体试件沿其中部切割成大小相同的两个圆柱体试件, 两个试

收稿日期: 2013-03-11

修改稿日期: 2014-04-08

基金项目: 河北省交通科技项目(Y-2010090); 陕西省外专局 2012 择优资助项目; 陕西省教育厅专项科研计划项目(12JK0795); 国家自然科学基金项目(51108374)

作者简介: 张倩 (1971-), 女, 博士, 副教授, 主要从事道路工程领域的教学和科研工作。E-mail: zhzzqs@126.com

件为一组进行测试,测试时热线置于两个试件新鲜切割面之间并用重物压紧,测试电源为 220V/50Hz. 要求试样表面清洁,保持干燥. 热线法是测定材料导热系数的一种非稳态方法,其原理是在匀温的试样中放置一根电阻丝,即所谓的“热线”,当热线以恒定功率放热时,热线和其附近试样的温度将会随时间升高. 试验过程中测量热丝温升随时间对数变化的关系就可由式 (1) 确定试样导热系数.



图 1 导热系数瞬态热线法测试装置示意图
Fig.1 Testing system of transient hot line thermal conductivity coefficient

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(d\Delta T_{id}/d\ln t)}$$

(1)

式中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; q 为金属丝发热量, J ; ΔT_{id} 为金属丝的温升, K ; t 为加热时间, s .

2 沥青混合料导热系数影响因素分析

针对沥青混合料自身组成及所处工作环境,对 SMA-13、AC-20、ATB-30、OGFC-13 四种混合料进行导热系数测试,其设计参数见表 1. 一方面,从沥青混合料自身组成而言,分析空隙率、细集料通过率、沥青用量对其导热系数的影响;另一方面,就沥青路面工作环境,分析温度、水及压力对沥青混合料导热系数的影响.

表 1 沥青混合料设计参数
Tab.1 Asphalt mixture design parameters

混合料 类型	油石比/%	最大理论 相对密度	毛体积 相对密度	空隙率/%	矿料间隙率 /%	沥青饱和度/%	稳定度 /%	流值 /mm	连通空隙率 /%
SMA-13	5.9	2.602	2.508	3.6	17.1	78.9	13.7	7.1	-
AC-20	4.3	2.575	2.467	4.2	14.8	71.6	16.2	3.6	-
ATB-30	3.3	2.582	2.466	4.7	12.1	61.2	23.2	4.6	-
OGFC-13	4.8	2.664	2.13	20.1	-	-	9.2	7.8	14.6

2.1 组成因素

沥青混合料的组成特性采用空隙率、细集料通过率以及沥青用量来表征,按照表 1 四种级配类型制作混合料试件,进行导热系数测试,结果如图 2~4 所示.

(1) 空隙率对导热系数的影响

从图 2 可以看出,随空隙率增大,沥青混合料导热系数随之减小,可见存在于空隙中的空气对混合料传热存在明显影响,空气导热系数为 $0.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,空隙率越大,空气占混合料百分率就越大,阻热越明显,使混合料导热系数变小,所以 OGFC-13 (孔隙率 20%) 导热系数绝对值较 SMA-13 (孔隙率 3.6%) 小 $0.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之多.

(2) 细集料通过率对导热系数的影响

从图 3 可以看出,沥青混合料导热系数随着 4.75 mm 以下细集料通过率的增加而减小. 根据已有研究,粗骨料导热系数大于沥青和空气的导热系数,骨料导热系数是直接影响沥青混合料导热系数的因素

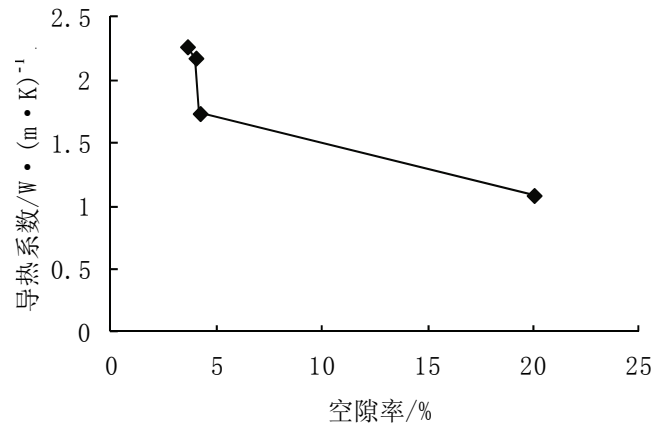


图 2 导热系数与空隙率的关系
Fig.2 Thermal conductivity vs mixture void ratio

之一. 细集料通过率间接反映了骨料在沥青混合料中的百分率, 细集料通过率越高, 粗骨料所占百分率越小, 混合料导热系数随粗骨料所占比例减小而变小.

(3) 沥青用量对导热系数的影响

从图4可以看出, 随着沥青用量增大, 混合料导热系数逐渐减小. 由于沥青、空气导热系数明显小于集料, 与空气类似, 沥青在混合料中也有阻热作用. 其包裹集料, 填充空隙, 较空气连续且占混合料总体百分率大, 但因沥青导热系数值在 $0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右, 较空气导热系数略大, 因而, 沥青用量对导热系数的影响不及空隙率对导热系数影响大.

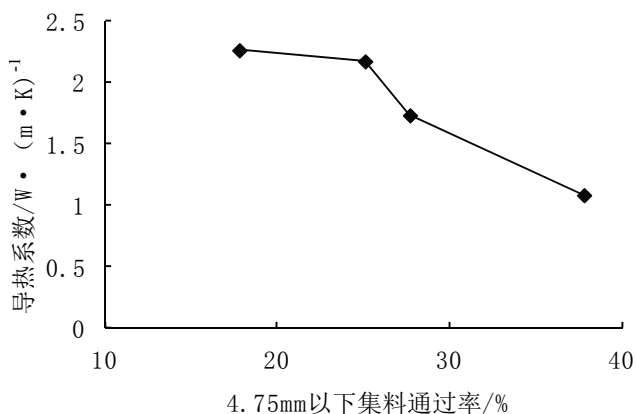


图3 导热系数与细集料通过率的关系

Fig.3 Thermal conductivity vs fine aggregate passing ratio

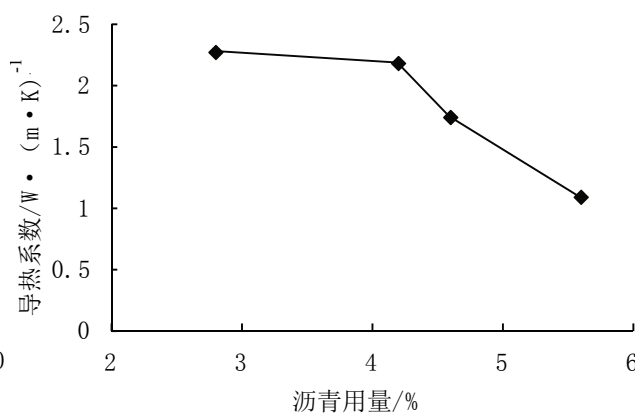


图4 导热系数与沥青用量的关系

Fig.4 Thermal conductivity vs asphalt content

2.2 环境因素

考虑到实际路面工作环境, 在试验室通过温控箱改变温度、对试件进行先浸水后测试、试样上放置砝码等依次模拟温度、水及压力对沥青混合料导热系数的影响, 测试结果如图5~7所示.

(1) 温度对沥青混合料导热系数的影响

从图5可以看出, 随着温度由低到高改变, 沥青混合料导热系数先减小后增大, 整体表现为低温时, 混合料导热系数随温度增大而减小, 高温时, 随温度增大而增大. 导热系数变化转折点出现在 0°C 附近, 可能和低温时沥青硬化、高温时沥青软化有关, 温度的变化直接引起沥青晶体结构发生变化, 以及混合料空隙率的改变, 都会影响混合料导热系数.

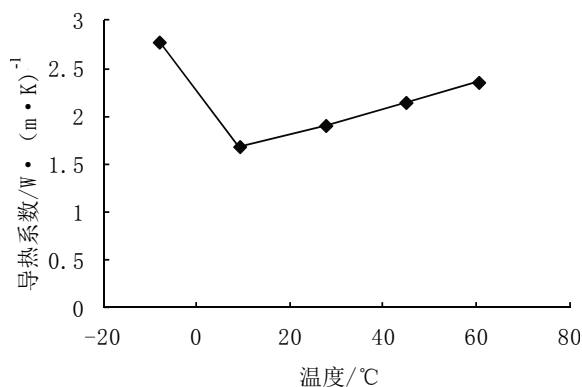


图5 导热系数与温度的关系

Fig.5 Thermal conductivity vs temperature

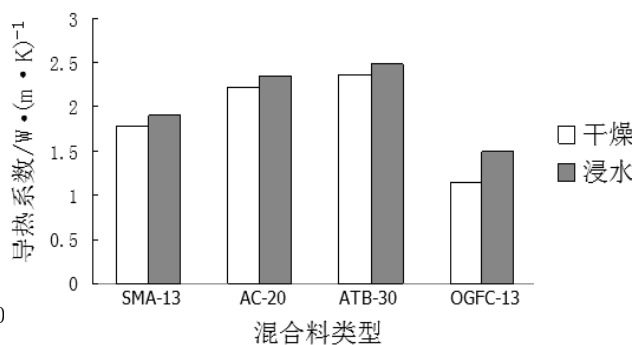


图6 导热系数与试件干湿状态的关系

Fig.6 Thermal conductivity vs specimen moisture status

(2) 水对沥青混合料导热系数的影响

从图6可以看出, 对各种类型混合料, 浸水时导热系数较干燥时均有提高, 一定程度上可反映面层混合料导热系数在晴天、雨天的差别. 混合料浸水后, 水替代了部分空隙中的空气, 水导热系数为 $0.58 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 大于空气的导热系数, 可加快热量传导. 另一方面, 又受空隙率限制, 水对混合料导热系数影响不大, 从图中可以看出, OGFC-13 导热系数较 SMA-13 导热系数提高较多, 原因在于前者空隙率明显高于后者, 因而排水性路面导热系数不能忽略水的影响.

(3) 压力对沥青混合料导热系数的影响

从图7可以看出,随着混合料上所放砝码压力水平的增大,导热系数有增大趋势,但变化幅度不大.由于采用马歇尔试件(中间横切置金属热线)进行试验,放置砝码可使上下部分接触紧密,减小空隙和空气进入量.另外适当增加砝码质量,能间接近似反映荷载压力水平对路面材料导热系数的影响.虽然试验时受砝码质量限制,压力数值有待商榷,但仍可反映出压力对导热系数影响较小,且实际路面所承受的行车荷载具有瞬时性,所以可忽略压力对导热系数的影响.

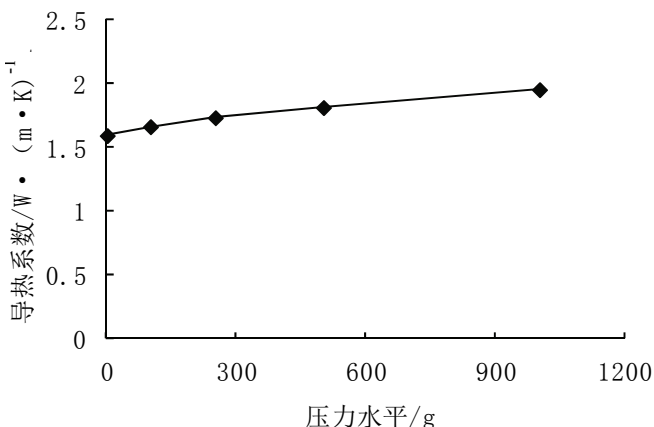


图7 导热系数与压力水平的关系

Fig.7 Thermal conductivity vs pressure

3 结语

本文基于瞬态热线法对沥青混合料导热系数进行测试,发现瞬态热线法有实验操作简易、试验结果再现性好等优点,通过分析可得到以下结论:

(1) 就内部组成因素而言,沥青混合料导热系数随其空隙率增大而减小,随其4.75 mm以下细集料通过率增大而减小,随沥青用量增大而减小,但减小的幅度不大.

(2) 沥青用量对混合料导热系数的影响不及空隙率对导热系数的影响,对于排水型大空隙率类混合料表现更明显.

(3) 就外部环境因素而言,混合料导热系数随温度增加有先减小后增大的趋势,浸水时较干燥时导热系数有所提高,压力水平变化时导热系数略有变化,但变化不大.

(4) 温度是影响导热系数的重要环境因素之一,在建立导热系数数学计算模型时,必须引入温度相关参数.温度及水对混合料导热系数的影响均是通过对混合料自身特性的改变引起,间接证实了环境条件通过改变沥青混合料组成特性而改变混合料热力学参数的规律.

为能更好地提高路用性能,准确计算路温,防治车辙,必须从根本出发,研究材料的热物理特性,做好基础工作,由小及大.沥青混合料作为复杂的多相体,其热物性参数的研究还需细化.

参考文献 References

- [1] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
WU Ganchang. Thermal stress analysis of semi-rigid pavement[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [2] 邴文山. 热稳流理论在道路冻深计算中的应用[J]. 中国公路学报, 1992, 5(1): 11-16.
BING Wenshan. The application of steady heat transfer theory to the calculation of road frost penetration[J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5(1): 11-16.
- [3] 牛俊明, 戴慧莹, 赵平均, 等. 排水性沥青抗滑层混合料热学性能研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 18(1): 5-9.
NIU Junming, DAI Huiying, ZHAO Pingjun et al. Thermal properties of permeable asphalt anti-skidding surface[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 18(1): 5-9.
- [4] 逯彦秋. 刚桥桥面铺装层温度场的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 9-24.
LU Yanqiu. Study on rigid bridge deck paving temperature field [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2007: 9-24.
- [5] 冯德成, 李兴海, 郭大进. 基于热物理特性的混合料的研究[J]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010, 27(3): 28-33.
FENG Decheng, LI Xinghai, GUO Dajin. Research of asphalt mixture based on thermophysical property [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010, 27(3): 28-33.
- [6] 李兴海. 沥青混合料的热物理特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
LI Xinghai. Research on Thermophysical characteristic of asphalt mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2007.
- [7] 张慧或, 邹玲, 纪小平. 沥青混合料导热系数的试验研究[J]. 公路, 2011(10): 50-51.
ZHANG Huiyu, ZOU Ling, JI Xiaoping. Research on the conductivity experiment of asphalt mixture[J]. Highway. 2011(10): 50-51.
- [8] 黄慧. 沥青及沥青混合料热物理特性及测试方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
HUANG Hui. Thermophysical properties and test of asphalt and asphalt mixture[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010.
- [9] 邹玲. 沥青混合料热物性参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
ZOU Ling. Research on thermal physical parameters of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

- [10] 冯德成, 胡伟超, 于飞. 沥青路面材料热物性参数对温度场的影响及敏感性分析[J]. 公路交通科技, 2011. 28(11): 12-19.
FENG Decheng, HU Weichao, YU Fei. Impact of asphalt pavement thermophysical property on temperature field and sensitivity analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011. 28(11): 12-19.

Analysis of testing method and influencing factors of asphalt mixture thermal conductivity coefficient

ZHANG Qian¹, LI Yanwei^{2,3}, XIE Laibin⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shijiazhuang Traffic & Transportation Bureau, Shijiazhuang 050001, China; 4. Shaanxi Zhonglin Group Road Design Company Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract: It's difficult to test the asphalt thermal physical parameters because asphalt mixture is a heterogeneous material. Little research work has been done in this area. With the development in asphalt mixture anti-rutting property study, it's necessary to look for a proper asphalt mixture thermal conductivity coefficient testing method. In this paper, thermal conductivity coefficients of four typical asphalt mixtures are obtained using transient hot line thermal conductivity coefficient testing system, TC3000. These four mixtures have different grade, different asphalt content and different air void ratio. Result analysis shows that thermal conductivity coefficient drops as void ratio increases and thermal conductivity coefficient decreases as fine aggregate passing ratio increases. Thermal conductivity coefficient decreases slightly with increase of asphalt content and it first reduces and then increases when the temperature increases. The coefficient enhances when the mixture is treated with water. Pressure level doesn't influence the coefficient apparently. Research results can be helpful in the study on pavement temperature field calculation and control.

Key word: road engineering; asphalt mixture; thermal conductivity; transient hot-wire method

(本文编辑 桂智刚)

(上接第 198 页)

The elastic lateral stiffness of single sway rod eccentrically braced steel frame

SU Mingzhou, LI Shen, FAN Ruichang, ZHANG Qian

(Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance of the Ministry of Education, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to identify loading path and internal force distribution of single sway rod eccentrically braced steel frames ('SSR-EBF' in brief) and compute story drifts and link rotations conveniently, the formulas of elastic axial forces of brace and shear force of link subjected to lateral loads have been proposed based on the fundamental assumption of structural mechanics, and then the elastic lateral stiffness formula of SSR-EBF is put forward on the basis of the small deformation assumption and Hooke's law. The analysis results of 30 examples indicate that, the error of elastic lateral stiffness formula is approximate 10%, and the accuracy of formulas of internal force is sufficiently. The simplified design method of brace rod is suggested.

Key words: elastic lateral stiffness; SSR eccentrically braced steel frame; link; loading path; story drift

(本文编辑 桂智刚)