

沥青混合料抗剪强度影响因素评价指标研究

袁峻¹ 孙立军²

(1. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009, 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:较高的抗剪强度可以保证沥青混合料在高温下具有良好的抵抗永久变形的能力。主要采用单轴贯入试验,就如何选择高性能沥青混合料的材料设计参数指标进行了研究。研究表明,除了沥青的性能外,粗集料、特别是细集料的性能对沥青混合料抗剪性能也有极大的影响。在进行沥青混合料设计时,采用高棱角性指标的粗、细集料以及高粘度的沥青来提高沥青混合料的整体抗剪强度。并且在施工时控制混合料的压实度以确保沥青路面的长期性能。

关键词:抗剪强度;粗集料棱角性;细集料棱角性;粘度;空隙率

中图分类号:U414 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)06-0140-06

Index of Factors Influencing the Shear Strength of Asphalt Mixtures

YUAN Jun¹, SUN Li-jun²

(1. Building Science and Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, P. R. China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Asphalt mixtures with high shear strength have great capability to resist perpetual deformation under high temperatures. We used a single penetration test to analyze the material design indexes for high performance asphalt mixtures. The test results show that the performance of the asphalt binder and the performance of the coarse aggregate, especially the fine aggregate, greatly affect the shear strength of asphalt mixtures. We also suggest that the coarse aggregate with a high aggregate particle index, fine aggregate with high angularity, and asphalt with high viscosity can increase sharply the shear strength of an asphalt mixture. Furthermore, the degree of compaction of an asphalt mixture should be controlled to guarantee excellent long-term performance of asphalt pavement.

Key words: shear strength; coarse aggregate particle index; fine aggregate angularity; viscosity; air void

沥青路面在高温时易产生剪切流动变形从而形成车辙损坏。根据沥青混合料强度和稳定性理论,较高的抗剪强度可以保证沥青混合料在高温下具有良好的抵抗永久变形的能力。其中材料性能是影响沥青混合料抗剪强度大小的一个主要方面。而通过何种评价指标在设计初期选择优质的材料来提高沥青混合料的整体性能,这是有待研究的一个问题。为此,本文主要就影响沥青混合料抗剪性能的材料因素中的三个主要方面——集料、结合料、混合料体积性质的评价指标进行了试验研究。

1 抗剪强度影响因素介绍

1.1 集料

在沥青混合料中,矿物集料占总体积的80%~90%,以及质量的94%~95%。集料的形状,棱角性和表面纹理被认为是影响集料结构强度乃至混合料抗剪强度的主要因素。由于这一原因,提高集料的性能对于确保合理的道路性能是十分重要的。

1.1.1 粗集料 用作沥青路面的粗集料应清洁、干燥、无风化、无杂质,具有足够的强度和耐磨性。粗集料的颗粒应成立方形,且富有棱角。在我国通常采用针片状含量、压碎值和磨耗值指标来控制粗集料的质

* 收稿日期:2008-06-12

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(50325825)

作者简介:袁峻(1979-),女,扬州大学,博士,主要从事道路材料、结构性能研究。(E-mail)tuyuanjun@163.com

量。扁平 and 针状的集料在施工中易被压碎,且难以起到嵌挤作用,从而改变沥青混合料的级配并影响其性能,因此采用针片状指数控制这一类集料的含量。集料压碎值是集料在连续增加的荷载下,抵抗压碎的能力,作为相对衡量石料强度的一个指标。磨耗值体现了粗集料抵抗摩擦,撞击的能力。在我国主要使用针片状含量这一指标来控制石料的质量,以达到提高沥青混合料的高温稳定性。但针片状含量试验受人为因素影响比较大,试验结果的离散性也较大。

邵显智就针片状含量对沥青混合料抗剪性能影响进行研究。首先将一种石料人为地分成不同针片状含量的试样进行测试,结果发现,随着粗集料针片状含量的增加,沥青混合料的抗剪强度降低。对于由不同石料构成的沥青混合料,虽然其针片状含量也不相同,但实验结果显示粗集料针片状含量与沥青混合料抗剪强度参数之间并没有良好的关系^[1]。

美国有6个州将针片状颗粒含量作用 Superpave 设计标准。其中5个州最大容许值为20%,1个州最大容许值为10%。值得注意的是,研究发现当针片状颗粒含量在10%~40%的范围内时,针片状含量与沥青混合料性能之间没有显著的关系^[2]。

有实验结果表明 ASTM D3398(粗集料颗粒形状和表面纹理指数)及 AASHTO TP56(粗集料未压实孔隙率)这两个指标与沥青混合料抗永久变形性能之间有较好的相关性。不仅如此,两个指标自身也具有较高的相关性,相关系数 $R^2 = 0.94$ ^[3-4]。这两个指标都同时受到集料颗粒形状、棱角性和表面纹理的影响,具有较高颗粒指数值或者未压实空隙率值的粗集料能够提高混合料抗车辙性能。

1.1.2 细集料 不仅是粗集料,细集料的性能也影响着沥青混合料抗永久变形能力。在我国规范中有细集料棱角性试验(包括间隙率法和流动时间法),但并没有提出具体的技术指标要求。

在 Superpave 规范中指定 AASHTO T304“细集料未压实空隙率”作为实验方法来测定细集料棱角性(FAA)这一参数。细集料的未压实孔隙率或者说细集料棱角性(FAA),受到集料颗粒形状、棱角性和表面纹理的影响。通常具有较大 FAA 值的细集料具有较高的内摩擦力并且和沥青粘结料之间结合的更好,这样可以提高沥青混合料的稳定性和抗车辙能力。

Kandhal 和 Parker^[4]认为 FAA 值越大,沥青混合料抗车辙性能越好。对于粗级配的沥青混合料,其研究结果显示当使用 APA、Couch Wheel Tracker 和 SST 试验仪器不能测量 FAA 值对沥青混合料的影响^[5]。然而,当使用 APT, PurWheel 和三轴试验发现

粗级配沥青混合料 FAA 值和沥青混合料抗车辙性能有很好的相关性^[6-7]。

1.2 沥青

在汽车荷载剪切力的作用下,沥青混合料内部既存在矿质颗粒之间的相互位移和错位,又有裹附在颗粒表面的沥青膜之间的粘滞阻力;因此,沥青混合料的抗剪强度不仅同集料的性状有关,也同所采用沥青的性能有关。

国内外的沥青规范基本上有两种:一是针入度级规范,即以沥青 25℃ 时的针入度作为分级依据,例如我国就是采用针入度进行分级的;二是粘度级规范:其中以原样沥青 60℃ 粘度作为分级标准的称为 AC 级,如美国沥青协会。通常认为粘稠度高的沥青,软化点高,温度稳定性好,在高温下仍能保持足够的粘滞性,使混合料具有一定的强度和劲度,因而不致于出现过大的剪切变形。

1.3 体积指标

空隙率是沥青混合料设计的关键指标,在我国现行规范中悬浮密实结构混合料的设计空隙率在 3%~6%,当考虑 97% 的压实度时,路面现场初始空隙率实际上在 6%~9%。

美国西部环道 Westrack 足尺试验中,选用粗、中、细三种不同的级配混合料,分析车辙与初始空隙率的关系。不同级配试验路段的结果均表明:现场初始空隙率较大,车辙深度相应较大,车辙深度随着空隙率的增大而加深^[8-9]。

以马歇尔方法设计的混合料,Monismith 等建议将混合料空隙率维持在 4% 的水平,以使混合料具有较高的结构强度,同时混合料空隙率应不低于 3%,以使混合料维持良好的热稳定性,避免形成泛油^[10]。

2 试验仪器和材料

为了研究各种影响因素对沥青混合料抗剪强度的影响,采用单轴贯入试验仪器^[11]进行一系列测试。单轴贯入试验其原理就是在试件上施加小于试件直径的钢压头进行加载以模拟路面中的实际受力状态,以获得沥青混合料的抗剪强度值。单轴贯入试验中采用直径为 28.5 mm 的压头,试件尺寸为 $\Phi 100 \times 100$ mm,加载速率选取 1 mm/min。采用单轴贯入试验方法来评价沥青混合料的抗剪强度一方面其受力模式与路面一致,另一方面其试验方法易操作,设备简单,适合工程应用。

试验计划中先采用 AC13 级配,粗、细集料均为辉绿岩;使用马歇尔设计方法确定混合料最佳油石比,具

体参数见表 1。使用旋转压实仪成型剪切试验试件，行抗剪试验。空隙率均控制在 4%±0.5%，在不利温度 60℃ 下进

表 1 试验级配

混合料级配	通过下列筛孔(方孔筛/mm)的矿料质量百分率/%										油石比/%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC13-A	100	97.5	79	58	44.5	32.5	24	17	12	6	4.4
AC13-B	100	95	70	48	36	24	18	12	8	4	4.2
AC13-C	100	99	84	62	42	30	20	14	9	4	4.2

3 抗剪强度因素评价

3.1 粗集料对抗剪强度的影响

沥青混合料中 AC13-A 级配及沥青用量保持不变如表 1 所示，沥青均为 70# 基质沥青，细集料均为同一种辉绿岩，通过在混合料中替换不同的粗集料来研究粗集料性能对沥青混合料抗剪强度的影响。试验共采用 5 种粗集料，其中一种为玄武岩，一种为辉绿岩，其他三种均为石灰岩。不同粗集料的各项性能指标如表 2。

表 2 粗集料的性能指标

石料类型	针片状	磨耗值	压碎值
A	4.3	7.0	6.8
B	10.9	8.5	12.1
C	4.4	6.8	11.1
D	11.7	8.3	10.3
E	7.6	7.5	9.6
技术要求	≤15	≤30	≤25

由于以前的研究证明，粗集料针片状指数只反映了石料某一方面的特性，与沥青混合料抗剪强度之间没有良好的相关性^[1]，因此在本研究中对不同的粗集料增加测定其棱角性指数这一指标。

粗集料棱角性指数(ASTM D3398)试验原理与方法^[12]如下：将集料洗净烘干至恒重，测量每一级粒径的毛体积密度。将每一级粒径的集料分三层装入一个圆桶容器中，捣棒插捣次数分别为 10 次和 50 次，捣棒距离每层集料表面 2 inch(50 mm)自由落下。当压实完最后一层后，可用石料填平容器表面，并保证颗粒不超出模具边缘，然后测量出集料的质量 m。根据两次平行试验得到的质量均质(保证两次试验结果误差不大于 0.5%)以及圆桶容器的体积和集料的毛体积密度计算出不同插捣次数下的空隙率 q。再根据空隙率的值计算每一粒径的棱角性系数 I_a，公式如下：

$$q_{10} = [1 - m_{10}/sv] \times 100 \quad (1)$$

$$q_{50} = [1 - m_{50}/sv] \times 100 \quad (2)$$

$$I_a = 1.25 \times q_{10} - 0.25 \times q_{50} - 32 \quad (3)$$

$$I = \sum_{i=1}^n P_i \times I_{ai} / 100 \quad (4)$$

式中，q₁₀、q₅₀分别为插捣 10 次和 50 次下的空隙率(%)；m₁₀、m₅₀分别为插捣 10 次和 50 次下集料的质量(g)，s 为集料的毛体积密度(g·cm⁻³)；v 为圆桶的体积(cm³)；I_a为每一级粒径的棱角性系数；I 为整个级配的平均棱角性系数；P_i、I_{ai}分别为各粒径集料的质量百分含量(%)和棱角性系数。

以粗集料 C 为例给出棱角性系数的计算方法，如表 3 所示。

表 3 粗集料棱角性计算示例

粒径/mm	整个级配中比例/%	粗集料中比例/%	单级粒径棱角性 I _a /%	平均棱角性 I /%
13.2	2.5	5.952	15.98	0.95
9.5	18.5	44.048	15.63	6.88
4.75	21	50	15.77	7.89
∑	42	100		15.72

不同石料的每一粒径的棱角性系数和相对于级配的平均棱角性系数见表 4。

表 4 不同石料的棱角性

粒径/mm	石料类型				
	A	B	C	D	E
13.2	16.34	13.60	15.98	14.57	14.97
9.5	17.10	13.23	15.63	14.36	14.84
4.75	17.34	13.81	15.77	17.21	14.78
∑	17.18	13.54	15.72	15.80	14.82

不同粗集料搭配同一种细集料，相同级配、沥青和用油量进行抗剪试验，得到的试验结果如表 5 所示。

表 5 不同沥青混合料抗剪强度

粗集料种类	A	B	C	D	E
τ _{max} /MPa	1.190	0.929	1.126	1.065	0.951

集料棱角性之间的关系如图 1 所示:

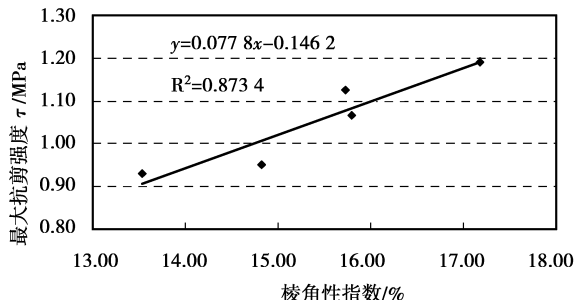


图 1 粗集料棱角性与与沥青混合料抗剪强度的关系

从图 1 可以看出,粗集料的棱角性和沥青混合料抗剪强度有着较好的相关性。随着粗集料棱角性的增加,沥青混合料抗剪强度增加。而粗集料针片状含量与沥青混合料强度之间的相关系数 $R^2 = 0.45$,即二者的相关性不强。与此同时,可得到粗集料的磨耗值和压碎值与沥青混合料抗剪强度之间相关系数也分别只有 $R^2 = 0.47$ 和 $R^2 = 0.41$ 。本次实验采用的石料各项指标均在规范的要求之内,因此由试验结果可以看出:对于针片状含量满足规范要求的石料,粗集料棱角性这一指标涵盖了粗集料颗粒的形状,棱角性和表面纹理等因素,相对于针片状含量能够更好的反映粗集料的性能。抗剪强度和粗集料的棱角性指标有较好的相关性,随着粗集料棱角性的增加,粗集料在沥青混合料中嵌挤摩擦作用得到了发挥。针对石料 A 和 B,当棱角性指数从 13.54 增长至 17.18 时,沥青混合料抗剪强度增幅为 0.261 MPa,增长了 28%。

3.2 细集料对抗剪强度的影响

为了研究细集料棱角性对沥青混合料抗剪强度的影响,沥青混合料中固定 AC13-A 级配及沥青用量如表 1 所示,沥青均为 70# 基质沥青,粗集料均为辉绿岩,搭配 5 种不同的细集料。细集料中石料 C 为花岗岩,石料 D 为辉绿岩,石料 E 为一种河砂,其余为石灰岩。采用细集料棱角性试验(间隙率法)(T0344-2000)来测量细集料的棱角性。不同细集料棱角性以及不同细集料搭配同一种粗集料,进行抗剪试验,得到的试验结果如表 6 所示:

表 6 不同细集料的棱角性

石料种类	A	B	C	D	E
棱角性/%	41.5	43.2	36.9	39.8	37.2
τ_{max}/MPa	0.798	1.009	0.643	0.929	0.536

不同细集料构成的沥青混合料抗剪强度和细集料棱角性之间的关系如图 2 所示。

从以上的实验结果可以看出,沥青混合料抗剪强度与细集料棱角性有一定的相关性,提高细集料的棱角性可以相应提高沥青混合料的抗剪强度。以石料 B

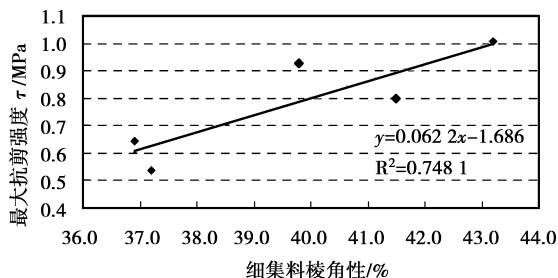


图 2 细集料棱角性与与沥青混合料抗剪强度的关系

和 E 为例,棱角性从 37.2 增长到 43.2,沥青混合料抗剪强度增幅为 0.483 MPa,增长了约 90%。因此可以说明,细集料品质对沥青混合料抗剪强度有较大的影响。随着细集料棱角性的增大,细集料之间形成了良好的嵌挤,沥青混合料的抗剪强度也随着增大。

3.3 沥青对抗剪强度的影响

本试验选取了 30#,50#,90# 基质沥青各一种以及两种 70# 基质沥青进行沥青对混合料抗剪强度的影响分析。不同种沥青的各项基本性能指标如表 7 所示。其中基质沥青的粘度在 60℃ 温度下试验。沥青混合料中固定 AC13-A 级配及沥青用量如表 1 所示,粗、细集料均为辉绿岩,采用不同类型沥青成型的沥青混合料试件进行抗剪试验得到的结果如表 8。

表 7 不同沥青基本指标试验结果

沥青类型	沥青标号	针入度, 25℃, 100 g, 5 S/0.1 mm	软化点 /℃	延度/ 5 cm · min ⁻¹ , Pa · s/	
				15℃	60℃
A	30#	36	58	25	277
B	50#	58	49	21	259
C	70#	77	48	20	189
D	70#	63	48	18	175
E	90#	86	51	≥150	151

表 8 不同沥青混合料试验抗剪强度

沥青种类	A	B	C	D	E
τ_{max}/MPa	1.325	1.171	1.061	0.929	0.887

观察表 7 和表 8 中的数据可以发现,在沥青的各项性能指标中,60℃ 粘度与沥青混合料抗剪强度参数之间的相关性较好。沥青针入度与沥青混合料抗剪强度之间的相关性为 $R^2 = 0.73$;而粘度与抗剪强度之间的相关性为 $R^2 = 0.93$,如图 3 所示。

从表 8 和图 3 的试验结果可以看出,对于不同标号的基质沥青,随着针入度的降低,粘度则在增加。在沥青混合料中添加低标号的沥青,混合料各抗剪参数均有提高。

从 90# 至 30#,标号降低,沥青粘度增大,抗剪强度增幅为 0.428 MPa,强度提高 49.38%,幅度较大。

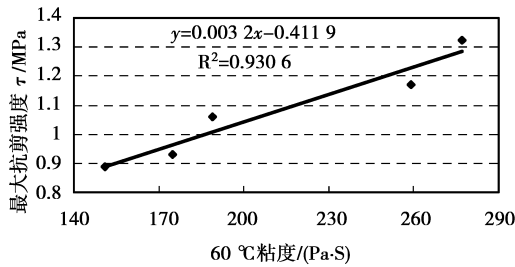


图 3 基质沥青粘度与沥青混合料抗剪强度的关系

因此可以看出,沥青粘度的增加,对沥青混合料抗剪强度的提高起到了积极的作用。

3.4 空隙率对抗剪强度的影响

由于室内外沥青混合料压实度的不同,造成空隙率也不同,因此就空隙率对抗剪强度的影响进行了研究。

沥青混合料采用玄武岩粗料和辉绿岩细料在不同的空隙率下成型,得到的抗剪强度参数如表 9 所示。抗剪强度随空隙率变化的趋势见图 4。

表 9 不同空隙率下沥青混合料的抗剪强度

平均空隙率	4.1	5.2	6.2	7.1	7.9
τ_{max} /MPa	1.126	0.946	0.583	0.494	0.401

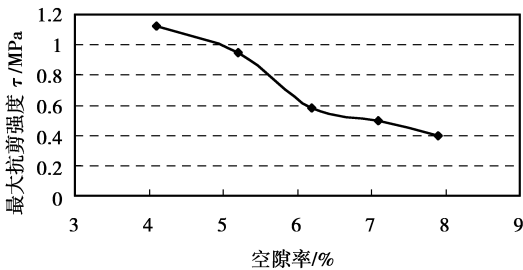


图 4 空隙率与沥青混合料抗剪强度的关系

混合料空隙率增大后,抗剪强度降低幅度很大。特别是从 4%至 6%的空隙率,沥青混合料抗剪强度迅速降低;从 6%的空隙率增大至 8%的空隙率,抗剪强度降低的幅度小。4%空隙率的沥青混合料增大 2%的空隙率后,抗剪强度只有原来的 51.8%。当沥青混合料从 4%空隙率增至 8%时,空隙率增大了一倍,抗剪强度只有原来的 35.6%。

对于本次实验中的沥青混合料在最佳油量时,空隙率为 4%。当空隙率升至 6%时,压实度接近 98%,此时抗剪强度已降为 4%空隙率的一半左右。在 8%空隙率时,压实度约为 96%,沥青混合料抗剪强度更低。因此,在施工时需要严格控制沥青路面的压实度。

3.5 级配对抗剪强度的影响

级配也是影响沥青混合料抗剪强度的一个重要因素,针对表 1 中的三种级配,粗、细集料均采用同一种辉绿岩,沥青均采用同一种 70 # 沥青,在最佳油石比下成型,进行抗剪试验,得到不同级配沥青混合料的抗

剪强度如表 10 所示。

表 10 不同级配沥青混合料的抗剪强度

级配类型	AC13-A	AC13-B	AC13-C
τ_{max} /MPa	0.929	1.010	0.784

级配 AC13-C 到 AC13-B,抗剪强度增幅为 0.226 MPa,强度提高 28.82%;与上述改变混合料材料性能来提高沥青混合料抗剪强度的效果相近。因此,在设计沥青混合料前先选择品质优良的材料,能够更好的提升沥青混合料的高温稳定性。

4 小 结

1) 沥青混合料在高温下抗剪强度低,相对于沥青混合料的整体强度,石料的强度非常大,此时在荷载的作用下剪切裂缝沿着石料与石料之间粘结处的薄弱点发展,石料本身的强度性能并没有得到发挥。针片状含量在规范要求范围内的粗集料,其针片状含量和沥青混合料抗剪强度之间的相关性不强。在选择颗粒棱角性这一指标后发现,该试验不仅操作简便,且该指标和沥青混合料抗剪强度具有较好的相关性,因此建议使用该指标在设计初期选择合适的粗集料。

2) 细集料棱角性与沥青混合料抗剪强度之间有一定的相关性,通过使用较高棱角性的细集料可以大大提高沥青混合料的抗剪强度。以往在混合料设计中多注意粗集料的性能,而忽视细集料的性能,在今后的设计中可以通过细集料棱角性指标来选取具有优良性能的细集料。

3) 沥青粘度越大,混合料抗剪强度越高,高温下不易破坏。在我国多选用针入度这一指标来区分不同性能的沥青。试验结果表明,使用原样沥青 60 °C 粘度与沥青混合料抗剪强度之间相关性更好,因此建议在现有针入度分级的基础上,引入固定温度的粘度试验评价沥青高温抗车辙能力。

4) 当沥青路面压实度不足,沥青混合料实际空隙率增大,沥青混合料的抗剪强度明显降低。因此,在施工时需要对接青面层进行充分的压实。以防止沥青路面在初期交通荷载的作用下由于剪切强度不足而产生破坏。

参考文献:

[1] 邵显智, 沥青混合料抗剪性能影响因素及剪切疲劳试验研究[D]. 上海, 同济大学交通运输工程学院, 2005.

[2] BRIAN D. PROWELL, JINGNA ZHANG AND E. RAY BROWN, Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt (NCHRP report 539)[R], National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL. 2005.

- [3] AHLRICH, R. C. Influence of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavement [C], Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1996; 7 - 14.
- [4] KANDHAL, P S AND PARKER JR. F, Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Pavement Performance in Pavements(NCHRP Report 405)[R], Transportation Research Board, Washington, D. C. , 1998.
- [5] HUBER, G A, JONES, J C, AND JACKSON, N M, Contribution of Fine Aggregate Angularity and Particle Shape to Superpave Mixture Performance [C], 77th Annual Meeting of the Transportation Research Board Meeting, Washington, D. C. , January 1998.
- [6] STIADY, J L, Validation of SHRP Asphalt Mixture Specification using Accelerated Testing [D], West Lafayette, IN, Purdue University, May 2000.
- [7] WHITE, T D, LEE, C J, AND HADDOCK, J E. Fine Aggregate Angularity[C]. 6th Annual Symposium of the International Center for Aggregate Research, St. Louis, Missouri, April, 1998.
- [8] JOHN EPPS etc. Westrack Performance-Interim Findings [C]. AAPT, 1998.
- [9] Federal Highway Administration, performance of coarse-graded mixes at westrack-premature rutting [EB/OL], FHAW, Auburn, 1998. 6, <http://www.tfhrc.gov/pavement/pubs/westrack/westrack.htm>.
- [10] MONISMITH, C L, EPPS, J A, FINN, F N. Improved Asphalt Mix Design[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54, 347-406, 1985.
- [11] 孙立军,等. 沥青路面结构行为理论[M], 北京, 人民交通出版社, 2005.
- [12] Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture[S], ASTM D3398.

(编辑 胡玲)

(上接第119页)

5 结 语

夏热冬冷地区由于其特有的建筑气候特征,低能耗建筑从试点到规模化发展还需要从理论和实践中分析当前建筑节能所面临的问题和误区,既不能照搬国外的经验,也不能套用国内其他气候地区的技术途径。科学发展的建筑节能技术使节能建筑逐步朝低能耗建筑、超低能耗建筑和零能耗建筑这一发展过程,体现了建筑工程的节能技术和手段与气候条件在不同层次的适应过程,以及与气候资源在不同范围的利用过程。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准(JGJ134-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [2] 江亿,林波荣,曾剑龙,等. 住宅节能[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [3] 谭礼保,李强民. 夏季湿热地区置换通风和冷却顶板复合系统节能潜力研究[J]. 暖通空调,2006,36(12):104-108. TAN Li-bao, LI Qiang-min. Energy saving potential of a combined cooling ceiling and displacement ventilation system in hot and humid climate zones in summer[J]. Heating Ventilation & Air-conditioning, 2006,36(12):104-108.
- [4] 曹福永. 芬兰低能耗建筑物[J]. 太阳能,2003(1):18. CAO Fu-yong. Low energy consumption architecture in Finland[J]. Solar Energy,2003(1):18.
- [5] 田原,刘丽娜,王姝. 锋尚国际公寓的低能耗建筑设计[J]. 建筑创作,2002(10):70-73. TIAN Yuan, LIU Li-na. Low energy consumption design of Fengshang international apartments[J]. Architectural Creation, 2002(10):70-73.
- [6] 徐佳,毛利群. 低能耗建筑初探[J]. 建筑,2001(2):75-77. XU Jia, MAO Li-qun. Seeking of low energy architecture[J]. Architecture, 2001(2): 75-77.
- [7] 贺湘凌,黄振利. 低能耗建筑-调整能源消费结构的出路[J]. 施工技术,2005(10):42-43. HE Xiang-ling, HUANG Zhen-li. The way out of changing consuming composition of energy sources-Low energy sources consuming building [J]. Construction Technology, 2005(10):42-43.
- [8] 贾洁,郑宝华. 建筑节能的发展方向——低能耗建筑技术[J]. 建筑节能,2006,36(1):16-18. JIA Jie, ZHENG Bao-hua. The development direction of the building energy conservation——Low energy consumption construction technology [J]. Construction Energy Conservation, 2006,36(1):16-18.
- [9] 付祥钊,范亚明,龙恩深. 夏热冬冷地区零能耗建筑空调技术的基本原理[J]. 暖通空调,2004,34(7):40-42. FU Xiang-zhao, FAN Ya-ming, LONG En-shen. Air conditioning technique for zero energy buildings in hot summer and cold winter areas[J]. Heating Ventilation & Air-conditioning, 2004,34(7):40-42.
- [10] 余晓平,付祥钊,黄光德,等. 夏热冬冷地区外窗性能对居住建筑能耗限值的影响[J]. 住宅科技,2007(4):4-8. YU Xiao-ping, FU Xiang-zhao, HUANG Guang-de, et al. A probe into the impact of outer windows' performance on residential buildings' energy efficiency in hot summer and cold winter areas[J]. Housing Science, 2007(4):4-8.

(编辑 王秀玲)