

骨料粒径对水工沥青混凝土基本力学性能影响研究

陈朋朋

(新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:为探明粗骨料最大粒径对水工沥青混凝土基本力学性能的影响,对粗骨料最大粒径(D_{\max})为19.0、26.5、31.5、37.5 mm的水工沥青混凝土开展了大型马歇尔和大型劈裂试验,在相同配合比参数的条件下分析了 D_{\max} 对马歇尔稳定度、流值、劈裂抗拉强度及拉伸应变的变化规律,计算了四种 D_{\max} 下沥青混合料的沥青膜厚度,从细观角度进行了分析和验证。试验结果表明:马歇尔稳定度随骨料粒径的增大而降低,流值呈上升趋势; $D_{\max}=37.5$ mm时沥青混凝土的劈裂抗拉强度仅低于常规骨料沥青混凝土的3.79%,但拉伸应变提高了30%,表明大粒径沥青混凝土具有较优的适应变形能力且强度损失相对较小;沥青膜厚度的计算结果表明沥青膜厚与 D_{\max} 呈正相关趋势,验证了大粒径沥青混凝土具备较强变形能力的基础,研究结果可为大粒径骨料在水工沥青混凝土中的应用提供参考依据。

关键词:水工沥青混凝土;大粒径骨料;大型马歇尔;大型劈裂;沥青膜厚度

中图分类号:TV431

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2026)01-0144-06

Effects of Aggregate Particle Size on the Basic Mechanics of Hydraulic Asphalt Concrete

CHEN Pengpeng

(Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of the maximum aggregate size on the basic mechanical properties of hydraulic asphalt concrete, this work conducted large-scale Marshall and large-scale splitting tests on hydraulic asphalt concrete with maximum aggregate sizes (D_{\max}) of 19.0, 26.5, 31.5, and 37.5 mm. Under identical mix design parameters, the influence of D_{\max} on Marshall stability, flow value, splitting tensile strength, and tensile strain under identical mix design parameters were analyzed. The asphalt film thickness of the asphalt mixture was calculated for the four D_{\max} values, and the results were analyzed and verified from a microstructural perspective. The test results are as follow. Marshall stability decreases with increasing aggregate particle size, while flow value shows an upward trend; the splitting tensile strength of asphalt concrete with $D_{\max}=37.5$ mm is only 3.79% lower than that of conventional aggregate asphalt concrete, but the tensile strain increased by 30%, indicating that coarse-grained asphalt concrete has superior deformation adaptability and relatively minor strength loss; the calculated results of asphalt film thickness show a positive correlation with D_{\max} , verifying the foundation for the strong deformation capability of coarse-grained asphalt concrete. The research findings could provide reference for the application of coarse-grained aggregates in hydraulic engineering asphalt concrete.

Keywords: hydraulic asphalt concrete; large aggregate; large marshall; large split; asphalt film thickness

水工沥青混凝土因具有良好的防渗性、适应变形能力和一定的自愈能力被广泛应用于水利工程中^[1-2]。现行规范对粗骨料最大粒径提出一定的限

制条件,这在某种程度上制约了沥青混凝土的发展。甘肃党河水库、辽宁碧流河水库大坝和美国的蒙哥马利水库就成功使用了超越规范要求的粗骨料最大粒

径的沥青混凝土作为心墙材料^[3],至今运行良好。

目前有关大粒径水工沥青混凝土研究已有很多成果,相关研究表明适当的提高骨料最大粒径,不仅可以有效的改善沥青混凝土心墙强度特性,提高自身的抗弯性能、抗剪性能和改善延性等,同时还可以降低沥青用量和提高骨料利用率,从而达到降低工程造价的目的^[4-6]。王丽峰基于骨料最大粒径为 31.5 mm 的沥青混凝土材料,研究了最优配合比下的抗渗性、水稳定性、拉伸性能和弯曲性能,结果表明,提高骨料最大粒径其抗渗性满足规范要求,但抗拉和抗弯强度较低^[7]。王中良等^[8]通过正交试验设计和 PPR 单因素仿真分析的方法探讨了骨料最大粒径从 19 mm 增大至 42 mm 的沥青混凝土配合比设计,优选出的配合比各项性能均能满足规范要求,认为大粒径沥青混凝土应用在工程中是可行的。何建新等^[9]研究了大粒径沥青混凝土的剪胀特性,并基于有限元仿真模拟验证了大粒径沥青混凝土的适用性。伦聚斌^[10]对比了最优配合比下骨料最大粒径为 19.0 mm 和 26.5 mm 的沥青混凝土的抗剪强度,通过三轴和直剪试验发现骨料粒径增大抗剪强度有所提高,但随着应变的增加剪胀现象也越突出。卢建南^[11]分别研究了骨料最大粒径为 19.0、26.5、31.5 mm 水工沥青混凝土弯曲性能和断裂韧性,基于数字图像散斑技术(DIC)分析了大粒径沥青混凝土的裂缝扩展轨迹和开裂机理。杨志豪^[12]基于优选出的骨料最大粒径为 19.0~37.5 mm 的沥青混凝土配合比,开展了一系列试验研究,对比了邓肯“E-B”、“E- ν ”和“南水”等本构模型的拟合效果,通过投影寻踪无假定建模技术建立了沥青混凝土本构关系的计算模型。当前对大粒径水工沥青混凝土的研究成果已十分丰富,但前人学者大多都是基于各骨料最大粒径对应的最优配合比开展的,单因素粗骨料最大粒径对水工沥青混凝土基本常规力学特性的影响还尚不清楚。

因此,本研究基于相同配合比参数,对粗骨料最大粒径为 19.0、26.5、31.5、37.5 mm 沥青混凝土开展大型马歇尔、大型劈裂试验,并计算沥青混合料的沥青膜厚度,从细观角度量化分析大粒径沥青混凝土的力学性能影响规律,证明大粒径沥青混凝土的优势及可适用性。研究成果可为大粒径骨料在水工沥青混凝土中的应用提供参考依据。

1 原材料及配合比

1.1 试验材料

天然砾石在新疆分布范围广、储量丰富、能耗及造价低,因此本研究选用天然砾石作为试验原材料。根据《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》^[13](SL501—2010)规范要求对骨料进行筛分和技术性能检测,通过室内筛分将骨料划分为 37.5~31.5、31.5~26.5、26.5~19.0、19.0~9.5、9.5~4.75、4.75~2.36 mm 六级。各粒级原材料见图 1。



图 1 各粒级原材料

由于天然砾石骨料大多呈酸性,为加强骨料与沥青粘附性^[14-16],本研究采用 P. O42.5R 的水泥作为填料,沥青采用新疆克拉玛依石化公司生产的 90#(A 级)道路石油沥青。各级原材料的技术性能检测结果见表 1。沥青的技术性能指标见表 2。经检测各级骨料的技术性能均满足相关规范要求。

表 1 各级骨料技术指标检测结果^[13]

试验项目	技术要求	粗骨料/mm					
		37.5~31.5	31.5~26.5	26.5~19.0	19.0~9.5	9.5~4.75	4.75~2.36
表观密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	≥ 2.60	2.71	2.70	2.70	2.72	2.72	2.70
吸水率/%	≤ 2.00	0.25	0.37	0.48	0.87	0.85	1.12
含泥量/%	≤ 0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
压碎值/%	≤ 30.0	16.6	16.6	16.6	16.6	—	—
粘附性	≥ 4	4	4	4	4	—	—
针片状含量/%	≤ 25.0	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	—
耐久性	≤ 12.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2

表 2 沥青主要技术指标

检测项目	样品检测结果	
	SL501—2010 要求	90#(A级)道路 石油沥青
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1mm	80~100	94
延度(5 cm/min,10℃)/cm	≥100	>100
软化点(环球法)/℃	≥45.0	50.5
溶解度/%	≥99.5	99.8
闪点/℃	≥245	255

1.2 配合比

为提高试验结果的普适性,统计新疆 31 项碾压式沥青混凝土心墙坝工程的心墙配合比资料,以统计的平均配合比参数(级配指数 0.39、填料用量 12%、沥青用量 6.6%)作为本研究的试验基础。按照丁朴荣级配公式^[17]分别计算骨料最大粒径为 37.5、31.5、26.5、19.0 mm 各级矿料的通过率见式(1),级配曲线如图 2,骨料最大粒径的

各级矿料的配合比如表 3。丁朴荣级配公式为:

$$P_i = P_{0.075} + (100 - P_{0.075}) \frac{d_i^n - 0.075^n}{D_{\max}^n - 0.075^n} \quad (1)$$

式中: P_i 为孔径是 d_i 筛的通过率,%; $P_{0.075}$ 为粒径小于 0.075 mm 的填料用量,%; D_{\max} 为矿料最大粒径,mm; d_i 为某一筛孔尺寸,mm; n 为级配指数。

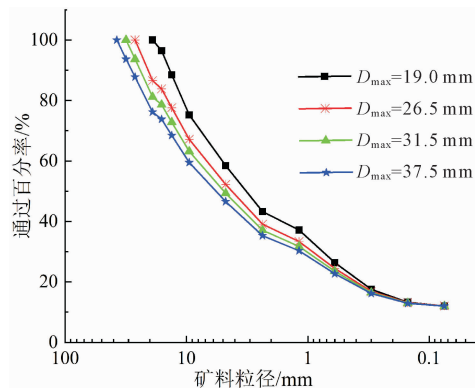


图 2 级配曲线

表 3 各级矿料配合比

骨料最大 粒径/mm	各级矿料(mm)占比/%							填料用量	沥青用量
	37.5~31.5	31.5~26.5	26.5~19	19~9.5	9.5~4.75	4.75~2.36	2.36~0.075		
19.0	—	—	—	25.0	16.6	15.2	31.5	12.0	6.6
26.5	—	—	13.5	19.6	14.8	13.1	27.3	12.0	6.6
31.5	—	6.3	12.5	18.2	13.7	12.2	25.2	12.0	6.6
37.5	6.3	5.9	11.6	16.9	12.7	11.3	23.4	12.0	6.6

2 试件制备及试验方法

2.1 试件制备

由于本试验的最大粒径为 37.5 mm,使用标准马歇尔模具($\varphi 101$ mm \times 63.5 mm)制作沥青混凝土试样时,大粒径骨料会带来尺寸效应对试验结果产生影响。因此,根据公路工程测试规范^[18],使用大型马歇尔压实机和模具来制备大型沥青混凝土马歇尔标准试件。马歇尔试验所选用的模具为 $\varphi 152.4$ mm \times 95.3 mm 圆柱形模具进行制样,成型后的试件见图 3(a);劈裂抗拉试验采用的试件和大型马歇尔试验相同,成型后的试样见图 3(b)。



图 3 马歇尔及劈裂试件

2.2 试验方法

同条件下制备各骨料最大粒径的大型标准马歇尔和劈裂试样各 3 个,进行 3 次平行试验,最终取 3 次试验结果的平均值,劈裂试验温度为 10℃。根据《水工沥青混凝土试验规程》^[19](DL/T 5362—2018)大型马歇尔试验方法为:将试样在 40℃ 的恒温水槽中水浴不少于 60 min。然后,将试样直接转移到试验机上,开始加载试验,加载速率为 50 mm/min,当加载达到试样所承受的峰值时,设备将自动关闭,记录压力和位移值;大型劈裂试验方法:将试件置于 10℃ 恒温室控温不少于 12 h,然后将试件安装在特制的劈裂试验夹具中,试验示意图见 4,试验夹具由上承压板、上下压条、限位滑轨和底座组成,采用宽 19.05 mm 的试验压条,试样侧放于压力机上,在其上下各加置试验压条,以 50 mm/min 的加载速度进行试验,并测定其最大力值与对应垂向位移。

3 试验结果与分析

3.1 大型马歇尔试验

为探究骨料最大粒径对马歇尔稳定度和流值的

影响,基于各骨料粒径的大型马歇尔试件进行试验,试验仪器及马歇尔稳定度流值试验后试样见图 5。骨料最大粒径与马歇尔稳定度和流值的关系见图 6。

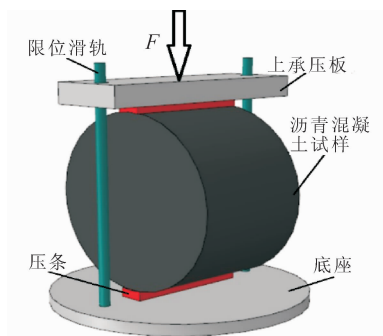


图 4 劈裂试验示意图

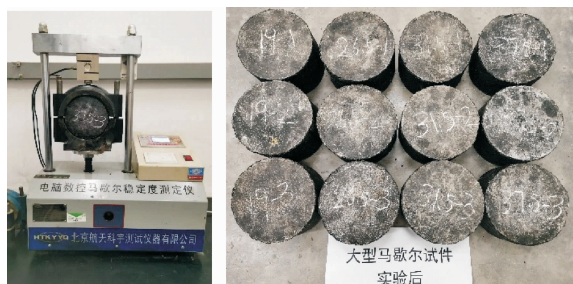


图 5 马歇尔试验

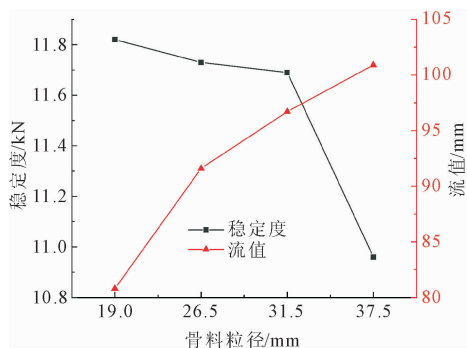


图 6 骨料粒径与稳定度流值的关系

从以上结果可已看出,随着骨料最大粒径的增大马歇尔稳定度在逐渐降低, $D_{\max} = 37.5$ mm 时,稳定度下降较为明显;流值随着骨料最大粒径的增大而增大。这是由于本研究是在同配合比参数制备的试件,因此对于大粒径骨料而言沥青用量是偏多的,所以流值不断增大,稳定度随骨料最大粒径逐渐降低,粒径越大降低程度越明显。

3.2 大型劈裂试验

为探究骨料粒径增大对劈裂抗拉强度和破坏拉伸应变的影响,进一步分析大粒径沥青混凝土的低温抗裂性能,开展各骨料粒径的大型劈裂试验。劈裂试验所用仪器为自动控温万能试验机(UTM-5105),

试验后试样及试验仪器见图 7,劈裂抗拉强度、破坏拉伸应变与骨料最大粒径之间的关系见图 8。



图 7 劈裂试验

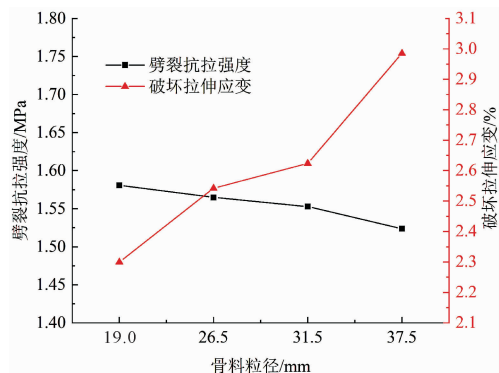


图 8 骨料粒径与劈拉强度、拉伸应变的关系

从图 8 中可以看出,劈裂抗拉强度随着骨料粒径的增大变化差异不明显,从总体上来看略有降低,37.5 mm 沥青混凝土的劈裂抗拉强度相较于 19 mm 沥青混凝土仅仅只降低了 3.79%,可以认为大粒径沥青混凝土与常规粒径沥青混凝土具有相当的劈裂抗拉强度。但是其破坏拉伸应变随骨料粒径的增大有显著提升,骨料最大粒径为 19 mm 的沥青混凝土的破坏拉伸应变为 2.30%,骨料最大粒径 37.5 mm 的沥青混凝土的破坏拉伸应变为 2.99%,相对于 19 mm 的沥青混凝土的破坏拉伸应变提高了 30%。从以上数据可以得出,在相同配合比参数下配制不同最大粒径骨料的沥青混凝土,其间接拉伸强度表现相当,对于 $D_{\max} > 19$ mm 沥青混凝土来说富余的自由沥青使其具有较大的破坏拉伸应变,这相对于常规骨料粒径 19 mm 是一个优势,即保留较高间接拉伸强度的同时,还具有优异的变形能力。

3.3 沥青膜厚度计算

沥青膜的厚度与包裹碎石表面的有效沥青层的范围有关,其大小在决定沥青混凝土的强度、高温和低温性能以及耐久性方面起着至关重要的作用^[20]。研究表明,较薄的沥青膜会减弱集料之间的凝聚力,导致混合料的整体剪切强度下降,并加速沥青的氧

化和老化,从而影响混合料的耐久性。相反,沥青膜过厚则会导致集料颗粒之间存在大量的游离沥青,在承受外部荷载时有利于颗粒之间的相对滑动^[21-23]。沥青混合料中的沥青主要分布特征大致可以分为三部分,如图 9 所示。第一部分位于骨料表面的微小孔洞中,部分沥青被嵌入其中,对于沥青混凝土整体性能的影响较小,其含量约占混合料中沥青总量的 3.5%~10.0%。第二部分沥青环绕在骨料表面,形成一层沥青薄膜,被称为结构沥青,在骨料之间起着粘结作用,沥青与骨料之间的附着性决定了沥青混合料整体性能的优劣。第三部分沥青是游离在沥青膜与沥青膜之间,这部分沥青被称为自由沥青,其对整体沥青混凝土结构也可以起到一定的粘结作用,但是这部分粘结力是由沥青自身性质所决定的。沥青膜的平均厚度会随着混合料级配的变化而变化。

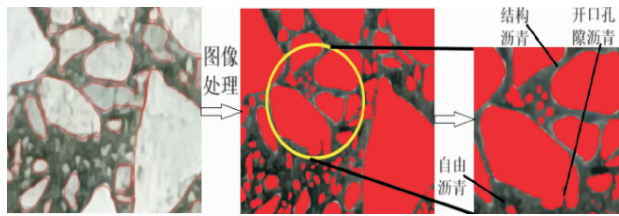


图 9 沥青在骨料表面的分布类型

沥青厚度的计算方法如下:

首先,计算沥青混合料的合成毛体积相对密度

γ_{sb} :

$$\gamma_{sb} = \frac{100}{p_1/\gamma_1 + p_2/\gamma_2 + \dots + p_n/\gamma_n} \quad (2)$$

式中: γ_{sb} 为矿料合成毛体积密度; p_n 为各种矿料成分的配比,其和为 100; γ_n 为各种矿料相应的毛体积密度。

计算矿料的有效相对密度:

$$\gamma_{se} = \frac{100 - P_b}{100/\gamma_t + P_b/\gamma_b} \quad (3)$$

式中: γ_{se} 为合成矿料的有效相对密度; P_b 为试验采

用的沥青用量; γ_t 为实测混合料的最大相对密度; γ_b 为 25℃ 下沥青相对密度。

计算有效沥青含量:

$$P_{ba} = \frac{\gamma_{se} - \gamma_{sb}}{\gamma_{se} \times \gamma_{sb}} \times \gamma_b \times 100 \quad (4)$$

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s \quad (5)$$

式中: P_{ba} 为被集料吸收的沥青比例,%; P_{be} 为沥青混合料中的有效沥青含量,%; P_s 为各种矿料占沥青混合料总质量的百分率之和,%。

计算矿料的比表面积 S_A ,可采用美国沥青学会提出的经验公式:

$$S_A = \sum (P_i \times FA_i) \quad (6)$$

式中: S_A 为集料的比表面积; P_i 为各种粒径的通过百分率; FA_i 为各粒径集料的比表面积系数。

将集料视为球形颗粒可以得到各粒径集料的比表面积,表 4 为通过各筛孔的集料比表面积系数。

表 4 各级矿料比表面积系数

筛孔尺寸/mm	≥4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
比表面积系数 ($m^2 \cdot kg^{-1}$)	0.41	0.82	1.64	2.87	6.14	12.29	32.77

将上式(5)中 P_{be} 和集料比表面积 S_A 代入式(7),即可求得沥青膜厚度 D_A :

$$D_A = \frac{P_{be} \times M_s}{S_A \times \gamma_b} \times 10^3 \quad (7)$$

式中: D_A 为矿料表面的平均有效沥青膜厚度, μm ; M_s 为矿料的总质量,kg; S_A 为矿料的表面积总和, m^2 ; γ_b 为沥青的相对密度。

基于上述方法对四种骨料最大粒径(19.0、26.5、31.5、37.5 mm)对应的沥青混合料计算沥青膜厚度。四种骨料最大粒径对应四组不同级配,为了便于分析,把四组级配分别命名为 JP1、JP2、JP3、JP4,各组矿料级配见表 5,骨料最大粒径与沥青膜厚、矿料比表面积的关系见图 10。

表 5 不同骨料最大粒径沥青混合料矿料级配

级配类型	设计级配下通过筛孔(mm)质量百分率/%													
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
JP1				100	94	87	76	58	45	34	26	20	16	12
JP2			100	88	83	77	68	52	40	31	24	19	15	12
JP3		100	94	83	77	72	64	49	38	30	24	19	15	12
JP4	100	94	88	78	73	68	60	47	36	29	23	18	15	12

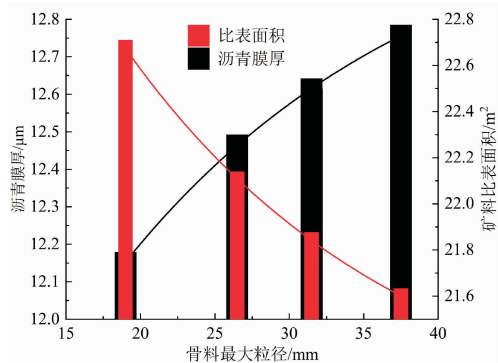


图 10 骨料最大粒径与沥青膜厚度和比表面积的关系

在相同配合比参数下配制的四种骨料最大粒径沥青混凝土在颗粒级配有较大的差异,级配不同对沥青膜厚度有较大影响。从图 10 可以看出,沥青膜厚度随骨料粒径的增大而增大,最大骨料粒径为 37.5 mm 沥青混凝土的沥青膜厚度为 12.756 μm ,相较于 19 mm 骨料的沥青膜厚度增大了 4.99%。矿料的总比表面积随骨料粒径的增大逐渐减小,常规骨料粒径 19 mm 沥青混凝土的矿料总比表面积为 22.7 m^2 ,相较于 37.5 mm 骨料的矿料比表面积提高了 5.09%。沥青膜厚度和矿料的比表面积均呈现出非线性变化的趋势,这是由于基础配合比中只考虑了骨料最大粒径,而随着骨料粒径的增大其比表面积对整体矿料的影响较小,相同质量条件下,骨料粒径越大相对于小粒径的骨料颗粒数量越少,其比表面积就会降低,在相同沥青用量的前提下,大粒径骨料沥青混凝土就会有更多的沥青,从而导致较厚的沥青膜和更富余的自由沥青。

由于大粒径沥青混凝土有较多的自由沥青,该条件为适应变形打下了基础,另外由于大粒径骨料的存在加强了沥青混凝土的骨架结构,增大了其强度特性。正如劈裂试验的结果所示,虽然大粒径沥青混凝土的强度略低于常规粒径,略低的原因是由于富余的自由沥青对沥青混凝土自身的强度产生了“削弱效应”,而大粒径骨料骨架又对其进行了弥补,导致强度仅仅降低了 3.79%。但是大粒径沥青混凝土在拥有与常规骨料粒径相当强度,同时又具有较优异的适应变形能力,在相同条件下,这是骨料最大粒径为 19 mm 沥青混凝土无法做到的。因此,大粒径沥青混凝土更适用于地基条件变形大的建坝区域,如深厚覆盖层等地基基础。

4 结 论

本研究在相同配合比参数的基础上开展了大型

马歇尔、大型劈裂试验,探究了骨料最大粒径对马歇尔稳定度、流值、劈裂抗拉强度和破坏拉伸应变的影响,同时计算了骨料最大粒径为 19.0、26.5、31.5、37.5 mm 沥青混合料的沥青膜厚度,从细观角度分析了原因并验证了试验结果,主要得出以下结论:

(1) 马歇尔稳定度随着骨料粒径的增大逐渐降低;流值随着骨料粒径的增大而增大,表现出大粒径沥青混凝土适应变形能力优于常规骨料粒径沥青混凝土。

(2) 劈裂试验结果表明,大粒径沥青混凝土既保留了与常规骨料粒径沥青混凝土相当的强度,同时兼具较强的适应变形能力,这对于深厚覆盖层具有潜在大变形的地基应用大粒径沥青混凝土心墙筑坝是有利的。

(3) 相同沥青用量下,沥青混凝土骨料粒径越大,沥青混合料中自由沥青越多,材料适应变形能力越强;混合料中的结构沥青承担的粘结作用,大骨料颗粒承担骨架作用,充沛的自由沥青可适应较大的变形工况,因而大粒径水工沥青混凝土兼具强度与较优的变形特性。

参考文献:

- [1] 郝巨涛,刘增宏,汪正兴.我国沥青混凝土防渗工程技术的发展与展望[J].水利学报,2018,49(9):1137-1147.
- [2] 何建新.碾压式沥青混凝土心墙坝新技术研究与实践[M].郑州:黄河水利出版社,2020:1-5.
- [3] DL/T 5363—2016 水工碾压式沥青混凝土施工规范[S].北京:中国电力出版社,2016:50-55.
- [4] 董子震,张金喜,孙国强,等.骨料级配相对变沥青混合料性能的影响[J].科学技术与工程,2024,24(1):352-359.
- [5] 伦聚斌,何建新,王怀义.粗骨料超径率对心墙沥青混凝土力学性能的影响分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(1):169-173.
- [6] 何建新,杨晓征,马晓兰,等.骨料最大粒径对浇注式沥青混凝土力学性能影响研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(5):88-91,95.
- [7] 王丽峰.粗骨料最大粒径对心墙沥青混凝土力学性能影响研究[J].黑龙江水利科技,2024,52(2):1-4.
- [8] 王中良,杨丽,翁雨薇.超大粒径沥青混凝土配合比设计方法探讨[J].水利技术监督,2021(4):124-129.
- [9] 何建新,杨寒冰,陈朋朋,等.大粒径骨料心墙沥青混凝土剪胀特性及影响分析[J].长江科学院院报,2025,42(7):164-173.
- [10] 伦聚斌.大粒径骨料对心墙沥青混凝土抗剪性能影响分析[J].广东水利水电,2020(1):56-59.

- [19] 罗官幸,潘虹,李世宏,等. 准噶尔盆地北三台凸起南斜坡石炭系火山岩储层特征及成藏模式[J]. 东北石油大学学报,2024,48(5):27-47,133.
- [20] 林斯雅. 德惠断陷白垩系火石岭组凝灰岩致密储层成因与成藏特征[D]. 西安:西安石油大学,2025.
- [21] 于景维,李璐璐,祁利祺,等. 阜东斜坡带头屯河组二段储集层控制因素[J]. 新疆石油地质,2014,35(1):34-38.
- [22] 陈思芮. 深层凝灰质碎屑岩储层成岩模拟研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2024.
- [23] 吴迪,李宁,李震,等. 辫状河三角洲储层隔夹层展布规律及剩余油分布研究[J]. 测井技术,2025,49(6):952-961.
- [24] 魏启任,谢明英,刘伟新,等. 番禺油田钙质夹层分布特征及剩余油挖潜[J]. 科学技术与工程,2025,25(29):12421-12429.
- [25] 赵瑞祥,安玉华,刘豪. BZ 油田隔夹层地震反射特征研究与应用[J]. 石油地质与工程,2025,39(6):38-43.
- [26] 陈雷,余涛,王冲,等. 砂岩油藏隔夹层识别及定量表征方法研究——以塔中 16 井区为例[J]. 地质论评,2025,71(S1):333-336.
- [27] 于景维,郑荣才,殷新花,等. 准东阜东斜坡区头屯河组储集层非均质性综合研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(5):567-576.
- [28] 柳妮,文华国,于景维,等. 准噶尔阜康东部斜坡区中侏罗统头屯河组高分辨层序地层格架内储集层宏观非均质性研究[J]. 地质论评,2014,60(5):1158-1166.
- [29] 林少玲. 陆梁油田陆 9 井区西山窑组四段钙质夹层表征与建模[D]. 荆州:长江大学,2025.
- [30] 王伟,代梦莹,陈俊凯,等. 塔里木盆地英买 35 井区志留系隔夹层识别及分布[J]. 新疆石油地质,2025,46(2):154-162.
- [31] 刘书燕,孙浩元,胡烁,等. 柳江盆地本溪组铁质鲕粒粉砂岩特征及成因[J]. 科学技术与工程,2024,24(27):11547-11557.
- [32] 朱世发,朱筱敏,刘学超,等. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报,2014,35(2):276-285.
- [33] 陈俊林,黄亚浩,郭小文,等. 方解石脉体形成时间与流体来源及其地质意义:以苏北盆地黄桥地区三叠系青龙组碳酸盐岩储层为例[J]. 地质科技通报,2024,43(3):157-169.

(上接第 149 页)

- [11] 卢建南. 大粒径水工沥青混凝土弯曲性能与断裂扩展轨迹研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2023:45-65.
- [12] 杨志豪. 大粒径水工沥青混凝土离析特性与静力本构关系研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2022:61-77.
- [13] SL-501—2010 土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2010:5-6.
- [14] 李琦琦,何建新,张正宇,等. 大孔隙率下水泥作填料的沥青混凝土水稳定性分析[J]. 新疆农业大学学报,2017,40(4):308-312.
- [15] Du Shaowen. Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures[J]. Materials & Structures, 2014,47(7):1149-1159.
- [16] Qian Xiaou. The test analysis on cement to improve the adhesive of asphalt and acidic aggregate[J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Sciences), 2013,29(2):66-73.
- [17] 丁朴荣. 水工沥青混凝土材料选择与配合比设计[M]. 北京:水利电力出版社,1990:10-25.
- [18] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011:224-229.
- [19] DL/T 5362—2018 水工沥青混凝土试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,2018:124-143.
- [20] Al-Khateeb G G. Conceptualizing the asphalt film thickness to investigate the Superpave VMA criteria[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018,19(11):957-965.
- [21] Dong Mansheng, Sun Wei, Li Linglin, et al. Effect of asphalt film thickness on shear mechanical properties of asphalt-aggregate interface[J]. Construction and Building Materials, 2020,263:120208.
- [22] Oshone M, Ghosh D, Dave E V, et al. Effect of mix design variables on thermal cracking performance parameters of asphalt mixtures[J]. Transportation Research Record, 2018(28):471-480.
- [23] 郭乃胜,于安康,王志臣,等. 基于吸附沥青膜厚度的沥青与矿粉交互作用能力评价研究[J]. 材料导报,2023,37(17):137-144.