

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.053

# 基于均匀试验的沥青混合料级配优化研究

田青业<sup>1</sup>, 刘红璜<sup>2</sup>, 李剑<sup>2</sup>

(1.甘肃省酒泉公路事业发展中心, 甘肃 酒泉 735000; 2.长安大学, 陕西 西安 710064)

**摘要:**均匀试验是目前用于材料配方设计最流行方法之一。该研究将均匀试验用于沥青混合料级配设计,将均匀试验与体积设计相结合得到的级配可以实现级配骨架密实。通过5种不同级配沥青混合料技术性能对比研究,结果表明:采用均匀试验设计的级配其高温稳定性、抗水害性以及低温抗裂性均要优于Superpave级配,通过禁区下方的级配高温稳定性较好。

**关键词:**沥青混合料;均匀试验;体积法;级配;优化;禁区

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2023)04-0199-05

## 0 引言

沥青混合料中粗集料分布对沥青混合料体积特性有很大影响,只有其形成骨架,沥青混合料才能具有良好的内摩擦阻力<sup>[1-3]</sup>。在SMA沥青混合料中,判断粗集料是否形成骨架的标准是粗集料的VCA<sub>mix</sub>不大于干捣VCA<sub>DRC</sub>。其次,要求沥青砂浆填满粗集料的空隙,通过沥青砂浆保证混合料的密实度,否则会影响混合料的耐久性、抗疲劳性和水稳定性<sup>[4-5]</sup>。

为使沥青砂浆填满粗集料空隙,常采用体积设计法进行设计<sup>[5-7]</sup>,一般设计过程如下:

(1)粗骨料+细骨料+矿粉质量百分比之和为100。

(2)细集料体积+矿粉体积+沥青体积之和等于粗集料体积×(粗集料空隙率-沥青混合料设计空隙率)。

数学表达式为:

$$M_c + M_f + M_p = 100 \quad (1)$$

$$100 \times \frac{M_p}{\rho_p} + \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_a}{\rho_a} = \frac{M_c \times (VCA_{DRC} - VV)}{\rho_{ta}} \quad (2)$$

式中: $M_c$ 、 $M_f$ 、 $M_p$ 分别为粗集料、细集料、矿粉质量百分数,%; $\rho_f$ 、 $\rho_p$ 、 $\rho$ 分别为细集料、矿粉表观密度、粗集料干捣密度, $g/cm^3$ ;VCA<sub>DRC</sub>为粗集料的干捣间隙率,%; $M_a$ 为油石比,%; $\rho_a$ 为沥青密度, $g/cm^3$ ;VV为设计空隙率,%。

这样可以保证沥青砂浆填充骨架空隙,不会产生干涉现象。对于国内常用的骨架密实级配,可以采用逐步捣实的方法以便达到骨架作用,但试验需要

组合方案太多。均匀实验法则可以用较少的实验方法来确定粗骨料骨架。因此,本研究基于均匀试验来设计骨架密实型沥青混合料的配合比,从而达到改善沥青混合料性能目的。

## 1 粗集料级配

针对AC-16级配,选用均匀试验设计方法,通过粗骨料空隙率与不同粒径下含量的相关性确定粗骨料含量。

### 1.1 均匀试验方案

均匀设计表采用 $U_n(qs)$ ,其中U为均匀设计, $n$ 为试验次数, $q$ 和 $s$ 为每个因素有 $q$ 个水平和 $s$ 列<sup>[8,12]</sup>。均匀设计常用步骤如下<sup>[8,12]</sup>:

(1)给定 $s$ 和 $n$ ,查均匀设计表获得生成向量 $(h_1, \dots, h_{s-1})$ ,生成配方均匀设计表 $U_n^*(n^{s-1})$ 或 $U_n(n^{s-1})$ 。用 $\{q_{ki}\}$ 表示 $U_n^*(n^{s-1})$ 或 $U_n(n^{s-1})$ 中的元素。

(2)对每一列 $i$ ,计算

$$c_{ki} = \frac{2q_{ki} - 1}{2n}, k=1, \dots, n \quad (3)$$

(3)计算各行元素得到:

$$x_{ki} = (1 - c_{ki}^{\frac{1}{s-i}}), \prod_{j=1}^{i-1} c_{ki}^{\frac{1}{s-j}}, i=1, \dots, s-1 \quad (4)$$

$$x_{ks} = \prod_{j=1}^{s-1} c_{ki}^{\frac{1}{s-j}}, k=1, \dots, n \quad (5)$$

AC-16级配中粗集料共有16mm、13.2mm、9.5mm和4.75mm四档料,记为四个因素,分别用 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 代表其含量。VCA与各因素比例存在二次非线性相关性。三个独立的因素和三个变量构成的二次非线性回归方程共10项,组成四个因素的配方设计。为提高模型精度,回归方程的自由度应不低于5,水平数不低于15。根据表1,可知D值在水平数为15

收稿日期:2022-05-15

基金项目:甘肃省交通运输厅科技项目(2021-16)

作者简介:田青业(1977—),男,本科,高级工程师,从事道路养护工作。

时最小,因此选用四因素 15 水平的配方均匀设计<sup>[11]</sup>。

表 1 四因素不同水平数下 D 值分布表

水平数	15	16	17	18	19	20
D 值	0.155 1	0.170 5	0.178 5	0.175 4	0.180 7	0.191 5

粗集料配方均匀设计组成见表 2。

### 1.2 干捣 VCA 测定及试验结果分析

石灰岩粗集料  $VCA_{DRC}$  与不同粗集料粒径含量的关系见图 1。

从图 1 可以看出:

表 2 粗集料配方均匀设计组成表

序号	因素						
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$X_1(16\text{ mm})$	$X_2(13.2\text{ mm})$	$X_3(9.5\text{ mm})$	$X_4(4.75\text{ mm})$
1	0.033 3	0.300 0	0.566 7	67.82%	14.56%	7.64%	9.99%
2	0.100 0	0.633 3	0.100 0	53.58%	9.48%	33.24%	3.69%
3	0.166 7	0.966 7	0.700 0	44.97%	0.92%	16.23%	37.88%
4	0.233 3	0.233 3	0.233 3	38.44%	31.83%	22.80%	6.94%
5	0.300 0	0.566 7	0.833 3	33.06%	16.55%	8.40%	41.99%
6	0.366 7	0.900 0	0.366 7	28.43%	3.67%	43.00%	24.90%
7	0.433 3	0.166 7	0.966 7	24.33%	44.78%	1.03%	29.86%
8	0.500 0	0.500 0	0.500 0	20.63%	23.25%	28.06%	28.06%
9	0.566 7	0.833 3	0.033 3	17.25%	7.21%	73.02%	2.52%
10	0.633 3	0.100 0	0.633 3	14.12%	58.72%	9.96%	17.20%
11	0.700 0	0.433 3	0.166 7	11.21%	30.34%	48.71%	9.74%
12	0.766 7	0.766 7	0.766 7	8.48%	11.39%	18.70%	61.44%
13	0.833 3	0.033 3	0.300 0	5.90%	76.92%	12.03%	5.15%
14	0.900 0	0.366 7	0.900 0	3.45%	38.09%	5.85%	52.62%
15	0.966 7	0.700 0	0.433 3	1.12%	16.15%	46.88%	35.85%

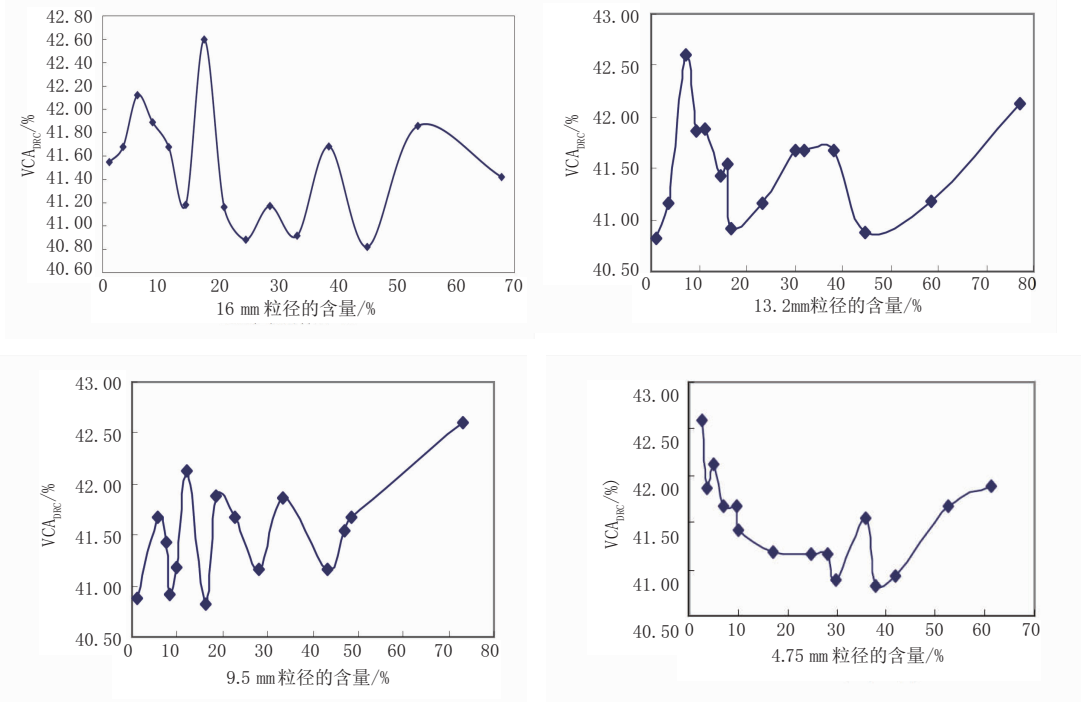


图 1  $VCA_{DRC}$  与粗集料相关性

当 4.75 mm 粒径含量为 33.03% 时,  $VCA_{DRC}$  为 41.02% 达到最小值。

由此可知级配达到嵌挤时, 4.75 mm 含量为 33%。根据最小  $VCA_{DRC}$  原则, 选择 3 号和 7 号作为粗骨料级配。

## 2 细集料级配

### 2.1 不同 n 值下细集料级配

#### (1) 试验方案

细集料级配采用泰波公式计算, 研究不同 n 值

下细集料的空隙率<sup>[9]</sup>。

(2)试验结果及分析

不同  $n$  值下各细集料级配空隙率测定值见图 2。

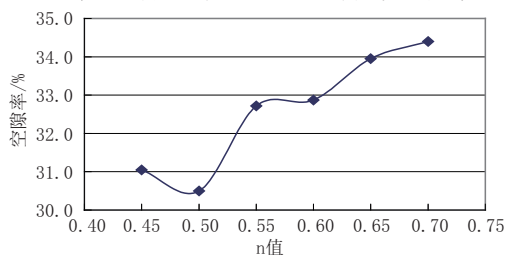


图 2 不同  $n$  值下各细集料级配对应的空隙率

图 2 可以看出,细集料的空隙率随  $n$  值呈现出先增大后减小,当  $n=0.5$  达到最小,随后表现为随  $n$  值增大而增大。说明采用泰波公式计算细集料用量时, $n$  为 0.5 细集料级配最密实。

2.2 细集料用量计算

根据工程经验取定矿粉用量  $M_p$  为 3%~6%、沥青用量  $M_a$  为 3%~5%,粉胶比( $=M_p/M_a$ )为 0.8~1.2。粗细集料用量采用体积法计算。

计算粗细集料用量时,JP1,矿粉用量  $M_p$ 、沥青用量  $M_a$  以及粉胶比分别取 4.4、4.4 和 1.0,JP2、矿粉  $M_p$  含量、沥青  $M_a$  含量、二级粉胶比分别取 5、4.4、0.8。JP1 粗集料级配采用序号 3 的级配组成,JP2 采用序号 5 的级配组成。细集料级配均采用泰波公式

计算, $n$  值为 0.5。设计空隙率为 4%。由式(3)和式(4)计算得到 JP1 粗集料比例为 69.37%,细集料为 26.23%;JP2 粗细集料比例分别为为 68.69% 和 26.31%。JP1 和 JP2 合成级配见表 3。

除了 JP1 和 JP2 外,还确定了代号为 JP3、JP4 和 JP5 的 3 个 Superpave 级配(10),其中:

(1)JP3 取自 Superpave19 控制区上限和禁区上线所包含范围的中值(10),粗集料占矿料总量的 37.2%;

(2)JP5 取自 Superpave19 控制区下限和禁区下线所包区域的中值(10),粗集料占矿料总量的 54.7%;

(3)JP4 是介于级配 3 和级配 4 之间,其粗集料约占矿料总量的 45.5%接近控制区下限;细集料部分和 JP3 基本相同。

上述五种级配中,除 JP1 断级配外,其余均为连续级配,级配组成见表 3。

3 路用性能对比

3.1 最佳沥青用量确定

各级配比计算均采用逐级回配,以保证级配的精度。沥青采用 90 # 石油沥青。表 4 为不同级配下混合料最佳沥青含量和体积参数。图 3 为不同类型沥青混合料小梁截面外观图。

表 3 5 种不同级配组成表

级配	通过下列筛孔(mm)质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
JP1	100	68.8	68.8	56.9	30.6	22.9	17.5	13.7	11.0	9.1	4.4
JP2	100	77.3	65.9	60.2	31.3	23.5	18.1	14.3	11.6	9.7	5.0
JP3	100	95.3	89.8	80.9	62.8	48.1	36.8	27.7	19.9	11.7	5.0
JP4	100	92.3	82.2	63.2	45.0	39.1	34.9	27.7	19.9	11.7	5.0
JP5	100	92.2	84.0	71.0	45.3	31.2	22.2	16	11.9	8.2	5.0

表 4 不同级配在最佳油石比下的物理力学指标结果

级配	最佳油石比/%	密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	理论密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	VV/%	VMA/%	VFA/%	稳定度 /kN	流值 / (0.1 mm)	VCA <sub>MIX</sub> /%	VCA <sub>DRC</sub> /%
JP1	3.8	2.459	2.558	3.9	13.2	70.5	8.14	35	39.76	40.82
JP2	3.7	2.469	2.565	3.7	12.4	70.2	8.84	39	40.05	40.79
JP3	4.4	2.449	2.536	3.4	13.5	74.8	10.36	41	—	—
JP4	4.3	2.457	2.540	3.3	13.1	74.8	9.49	38	—	—
JP5	3.9	2.447	2.558	4.2	13.4	68.7	8.45	37	—	—

从表 4 中试验结果得出:(1)最佳油石比基本上随粗集料含量的增加而减少,这是因为粗集料表面积小,在集料表面裹覆沥青膜少;(2)JP1 和 JP2 的  $VCA_{MIX} \leq VCA_{DRA}$ ,说明混合料已基本形成紧密骨架结构。这可从图 4 断面图中获得验证;(3)常规 AC-16 中值沥青混合料和 JP3 均属于悬浮密实结构,而

在 JP1 和 JP2 中表现为粗集料基本上相互嵌挤,空隙率较小,属于骨架密实结构。

3.2 水稳定性对比分析

沥青混合料水稳定性实验结果见图 4、图 5。

从图 4 中可以看出,五种级配都符合沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)规范要求<sup>[13]</sup>。JP1 和

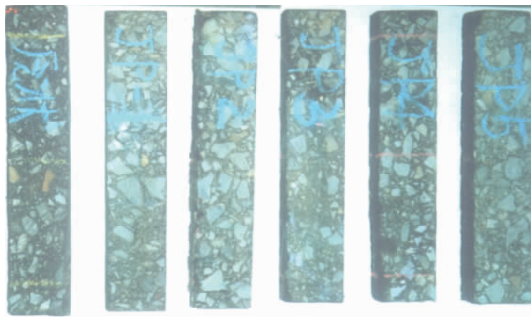


图3 不同级配混合料小梁断面图

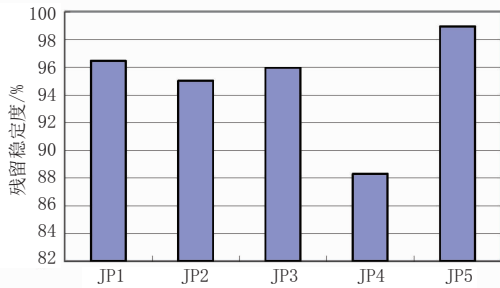


图4 不同级配残留稳定度结果对比

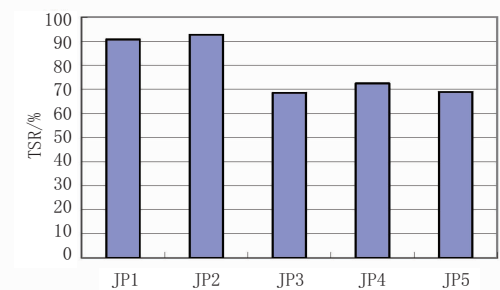


图5 不同级配 TSR 结果对比

JP2 残留稳定度分别为 96.44%和 95.02%, 大致相同。JP1 的残留稳定度最优,JP4 最差,总的排序结果为 JP1>JP2>JP5>JP3>JP4。

从图 5 试验结果来看:(1)JP1 和 JP2 的 TSR 都大于 70%的沥青路面施工技术规范 (JTG F40—2004)规范要求<sup>[13]</sup>要求,说明 JP1 和 JP2 抗水损坏能力要优于其余三种级配;(2)JP1 和 JP2 对比表现为,JP2 要略好于 JP1;(3)JP3、JP4 和 JP5 三种级配对比,JP4 的 TSR 最大,JP5 次之,JP3 最差,JP3 和 JP5 的 TSR 值均小于 70%,应加入抗剥落剂来提高其水稳性。5 种级配沥青混合料抗水害的结果排序为 JP2>JP1>JP4>JP5>JP3。

说明 JP2 的水稳性最好,JP3 和 JP5 的抗水损害能力较差,需要添加抗剥落剂来提高其水稳性。

### 3.3 高温稳定性对比

采用车辙试验来评价沥青混合料的高温稳定性,试验结果见表 5。

表 5 结果表明:(1)JP1、JP2 和 JP5 动稳定度结果均大于 800 次/mm 的沥青路面施工技术规范(JTG F40—2004)规范要求<sup>[13]</sup>要求,且 JP1、JP2 的高温抗

表 5 5 种级配沥青混合料的车辙试验结果

级配类型	JP1	JP2	JP3	JP4	JP5
动稳定度(60℃,1 h, 次/mm)	1 695	1 467	539	434	956
相对变形 /%	6.5	8.3	16.7	19.4	11.7
粗集料含量 /%	69.37	68.69	37.20	45.50	54.70

车辙性能要优于 JP3、JP4 和 JP5 的;(2)粗集料含量与动稳定度关系呈正相关;(3)JP3、JP4 和 JP5 动稳定度实验结果表明,JP5 的动稳定度大于 JP3,说明处于禁区下方级配的动稳定度要比禁区上方大。JP4 动稳定度结果较小,这可能与粗集料没有形成力学嵌挤结构有关;(4)相对变形结果和动稳定度变化趋势基本一致。

### 3.4 低温抗裂性能对比

不同级配沥青混合料小梁弯曲试验结果见表 6。

表 6 -10℃低温弯曲试验结果

级配类型	破坏时最大荷载 /N	破坏时跨中挠度 /mm	抗弯拉强度 /MPa	最大弯拉应变 /( $\times 10^{-6}$ )	弯曲劲度模量 /MPa	应变能 /J
JP1	1 338.48	0.307	5.896	1 882	3 131.2	0.265
JP2	2 031.86	0.429	8.766	2 649	3 536.0	0.367
JP3	2 248.80	0.384	9.901	2 345	4 260.9	0.334
JP4	2 536.89	0.424	10.889	2 625	4 183.8	0.494
JP5	1 980.90	0.292	8.380	1 817	4 618.5	0.309

表 6 结果表明,低温下混合料应变越大,劲度模量越小,其低温抗裂性能越好。(1)5 种级配混合料的抗弯强度从大到小顺序为 JP4>JP3>JP2>JP5>JP1;(2)5 种级配混合料弯拉应变 JP2 最大,JP4 次之,JP5 最小;(3)5 种级配混合料弯曲劲度模量 JP5 最大,JP3 次之,JP1 最小。综合低温弯曲试验结果弯拉强度、最大应变以及劲度模量大小,总的抗低温开裂表现为 JP2、JP4 最好,JP3 次之,其余的依次为 JP5 和 JP1;(4)从应变能结果也可看出,应变能由大到小的顺序为 JP4>JP2>JP3>JP5>JP1。说明 JP4 混合料的低温抗裂性最好,JP1 的最差。

### 3.5 抗滑性能对比

#### 3.5.1 构造深度

5 种级配沥青混合料构造深度试验结果列于表 7。

表 7 沥青混合料构造深度试验结果

级配类型	JP1	JP2	JP3	JP4	JP5	规范要求 <sup>[14]</sup>
构造深度 /mm	0.98	0.95	0.53	0.63	0.73	$\geq 0.55$
粗集料含量 /%	69.37	68.69	37.20	45.50	54.70	

由表7结果可知:(1)除JP3外5种级配构造深度均大于规范<sup>[14]</sup>不小于0.55的要求;(2)JP1和JP2相比,JP1构造深度略大于JP2但均接近1;(3)JP3、JP4与JP5相比,JP5构造深度最大、JP4次之、JP3最小;(4)JP1、JP2构造深度均大于JP3、JP4及JP5,说明其抗滑性能较好。

### 3.5.2 摩擦系数

采用摆式仪法测定沥青混合料摩擦系数,测定结果见表8。

表8 沥青混合料摩擦系数测定结果

级配类型	JP1	JP2	JP3	JP4	JP5	规范要求 <sup>[14]</sup>
摩擦系数	76.3	79.6	71.2	75.8	76.4	≥54
粗集料含量/%	69.37	68.69	37.20	45.50	54.70	

表8可以看出,5种级配混合料摩擦系数均满足规范<sup>[14]</sup>的相关要求,其中JP2最大、JP3最小,其余相差不大。

## 4 结语

采用体积法设计得到了JP1和JP2两种级配,并与Superpave的3种级配进行了对比。通过室内一系列的路用性能试验进行对比,主要结论如下:

(1)JP1和JP2均具有较好的抗水敏感性,JP1的高温抗车辙性能和抗滑性能要优于JP2,而JP2的水稳定性和低温抗裂性要优于JP1,JP1更适用于南方高温多雨地区,JP2适用于更广泛的气候。

(2)采用均匀体积法设计的JP1和JP2其整体的

路用性能要优于Superpave级配。

(3)禁区下方级配混合料的高温抗车辙性能较优。

(4)构造深度与粗集料含量之间存在明显的线性关系。

### 参考文献:

- [1] 蒋玮,沙爱民,肖晶晶,等.基于抗车辙稳定性的多孔沥青混合料级配优化[J].华南理工大学学报,2012,40(12):127-131.
- [2] 王淑红.改进沥青路面材料水稳定性的试验研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [3] 张业茂,陈拴发,胡光伟.逐级填充式沥青混合料粗集料骨架级配设计[J].武汉理工大学学报,2011,33(11):44-49.
- [4] 郑燕金,龙小湖,王旭东.不同粗集料SMA沥青混合料油石比的研究[J].西华大学学报,2012,31(5):101-104.
- [5] 刘元烈.大粒径沥青混凝土级配设计及技术性能研究[D].西安:长安大学,2007.
- [6] 张肖宁,王绍怀,吴旷怀,等.沥青混合料组成设计的CAVF法[J].公路,2001(12):17-20.
- [7] 吴旷怀,张肖宁.沥青混合料设计的主骨料空隙体积填充法研究及应用[J].中南公路工程,2004,29(2):58-61.
- [8] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994.
- [9] 王立久,刘慧.矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J].公路,2008(1):170-174.
- [10] 郝培文,王海林,包斌.SUPERPAVE级配禁区对沥青混合料性能影响[J].中外公路,2005,25(4):167-170.
- [11] 李剑.高速公路沥青路面早期水损害防治措施研究[D].西安:长安大学,2003.
- [12] 王淑红,王娟玲.路面沥青混凝土配合比均匀设计法探讨[J].黄河水利职业技术学院学报,2009,21(4):19-21.
- [13] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [14] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

# 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)