

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.010

引用格式:吕正龙,吴威伟.基于 IDEAL-CT 的沥青混合料抗裂性能评价研究[J].公路与汽运,2024,40(5):60-66.

Citation:LV Zhenglong,WU Weiwei.Research of evaluation method for asphalt mixture cracking resistance based on IDEAL-CT[J].Highways &amp; Automotive Applications,2024,40(5):60-66.

# 基于 IDEAL-CT 的沥青混合料抗裂性能评价研究\*

吕正龙<sup>1,2</sup>, 吴威伟<sup>1,2</sup>

(1.苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 211112;2.新型道路材料国家工程研究中心,江苏 南京 211112)

**摘要:**为提高沥青路面材料性能评价方法的可实施性,提高沥青路面养护决策效率,通过间接拉伸开裂试验(IDEAL-CT)评价沥青混合料的抗裂性能,分析试件厚度和混合料类型对抗裂性能指标的影响及指标的离散性,研究抗裂性能评价指标。结果表明,沥青混合料 IDEAL-CT 试验结果存在尺寸效应,随着试件厚度的增加,所有抗裂性能指标均呈上升趋势,且试件厚度低于 62 mm 时,变异系数较高,数据稳定性差;断裂功变异性较低,试验结果稳定性高,可作为沥青混合料抗裂性能评价指标。

**关键词:**公路;沥青混合料;抗裂性能;间接拉伸开裂试验(IDEAL-CT)

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)05-0060-07

裂缝是沥青路面的一种典型病害。一般可通过评价在役沥青路面芯样的抗裂性能反映沥青路面的抗裂性能,预测沥青路面剩余服役寿命。欧美规范针对不同裂缝产生机制提出了不同试验方法。美国国家公路战略合作项目 NCHRP 9-57 通过对业主方、工业界和学术界的调研,明确了不同试验方法的可行性<sup>[1]</sup>;NCHRP 20-07 从不同角度对比了已有抗裂性能试验方法的差异,调研了管理机构和其他利益相关方对不同试验方法的认可度<sup>[2]</sup>。国内外标准规范中典型沥青混合料抗裂性能试验方法包括间接拉伸试验、四点弯曲梁试验、半圆弯曲试验(SCB)及间接拉伸开裂试验(IDEAL-CT)等<sup>[3-7]</sup>。SCB 试验是目前沥青路面养护中应用较多的一种方法。Q/SJKG YH B2-001—2020《江苏高速公路沥青路面养护设计指南》采用芯样半圆弯曲试验断裂能  $G_f$  评价沥青路面的抗裂性能。文献[8-9]的研究也表明,断裂能与横向裂缝总长度相关。SCB 试验的缺点在于试验所用试件均需要进行切割加工,试验结果受加工精度影响(变异性约为 20%),且切割过程较为费时<sup>[3]</sup>。IDEAL-CT 试验方法见文献[10],该方法可对圆柱体试件进行直接加载,且加载模式为单次加载,加载过程快速,一般在 1 min 内可完成试验;其试验结果变异系数较小,且与路面性能具有良

好的相关性。但目前该方法在国内应用较少。本文采用江苏省高速公路沥青路面典型结构所用混合料,通过 IDEAL-CT 试验,研究沥青混合料抗裂性能评价指标,分析试件厚度及混合料类型对抗裂性能指标的影响,通过试验结果离散性分析提出适宜的评价指标,为沥青路面养护工程中路面材料性能评价提供参考。

## 1 材料

### 1.1 SBS 改性沥青 SMA-13

SBS 改性沥青 SMA-13 混合料的集料为玄武岩,油石比为 6.0%,矿料级配见表 1,体积指标和性能试验结果见表 2、表 3。

表 1 SMA-13 的矿料级配

| 公称最大粒<br>径/mm | 通过率/<br>% | 公称最大粒<br>径/mm | 通过率/<br>% |
|---------------|-----------|---------------|-----------|
| 0.075         | 9.5       | 2.360         | 23.0      |
| 0.150         | 12.1      | 4.750         | 26.3      |
| 0.300         | 13.7      | 9.500         | 61.2      |
| 0.600         | 16.4      | 13.200        | 96.0      |
| 1.180         | 19.1      | 16.000        | 100.0     |

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2601000)

表 2 SMA-13 体积指标试验结果

| 项目          | 试验结果  | 技术要求            |
|-------------|-------|-----------------|
| 油石比/%       | 6.0   | —               |
| 毛体积相对密度     | 2.510 | —               |
| 理论最大相对密度    | 2.618 | —               |
| 空隙率/%       | 4.1   | 3.0~4.5         |
| 矿料间隙率/%     | 17.0  | ≥17             |
| 饱和度/%       | 75.7  | 75~85           |
| 粗集料骨架间隙率/%  | 39.4  | ≤ $R_{VCA,DRC}$ |
| 稳定度/kN      | 9.82  | ≥6              |
| 流值/(0.1 mm) | 31.4  | 20~50           |

注: $R_{VCA,DRC}$ 为捣实状态下粗集料骨架间隙率。

表 3 SMA-13 性能试验结果

| 项目                         | 试验结果    | 技术要求   |
|----------------------------|---------|--------|
| 析漏损失/%                     | 0.05    | ≤0.1   |
| 飞散损失/%                     | 4.6     | ≤15    |
| 动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 9 975   | ≥3 000 |
| 破坏应变/10 <sup>-6</sup>      | 2 603.1 | ≥2 500 |
| 残留稳定度/%                    | 90.8    | ≥80    |
| 劈裂强度比/%                    | 88.2    | ≥80    |

1.2 SBS 改性沥青 Sup-20

SBS 改性沥青 Sup-20 混合料的集料为石灰岩,沥青用量为 4.3%,矿料级配见表 4,体积指标和性能试验结果见表 5、表 6。

表 4 Sup-20 的矿料级配

| 公称最大粒<br>径/mm | 通过率/<br>% | 公称最大粒<br>径/mm | 通过率/<br>% |
|---------------|-----------|---------------|-----------|
| 0.075         | 4.3       | 4.750         | 37.0      |
| 0.150         | 5.6       | 9.500         | 61.2      |
| 0.300         | 7.6       | 13.200        | 74.6      |
| 0.600         | 12.5      | 19.000        | 92.5      |
| 1.180         | 17.9      | 26.500        | 100.0     |
| 2.360         | 24.3      |               |           |

1.3 70# 道路石油沥青 Sup-25

70# 道路石油沥青 Sup-25 混合料的集料为石灰岩,沥青用量为 3.9%,矿料级配见表 7,体积指标和性能试验结果见表 8、表 9。

表 5 Sup-20 体积指标试验结果

| 项目        | 试验结果 | 技术要求    |
|-----------|------|---------|
| 沥青用量/%    | 4.3  | —       |
| 设计次数压实度/% | 96.0 | —       |
| 矿料间隙率/%   | 13   | ≥13     |
| 饱和度/%     | 69.2 | 65~75   |
| 粉胶比       | 1.13 | 0.6~1.2 |
| 初始压实度/%   | 84.3 | ≤89     |

表 6 Sup-20 性能试验结果

| 项目                         | 试验结果    | 技术要求   |
|----------------------------|---------|--------|
| 动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 7 904   | ≥2 800 |
| 破坏应变/10 <sup>-6</sup>      | 2 568.6 | ≥2 500 |
| 残留稳定度/%                    | 91.2    | ≥85    |
| 劈裂强度比/%                    | 88.7    | ≥80    |

表 7 Sup-25 的矿料级配

| 公称最大<br>粒径/mm | 通过率/<br>% | 公称最大<br>粒径/mm | 通过率/<br>% |
|---------------|-----------|---------------|-----------|
| 0.075         | 4.0       | 4.750         | 33.5      |
| 0.150         | 5.0       | 9.500         | 50.7      |
| 0.300         | 6.8       | 13.200        | 60.9      |
| 0.600         | 11.1      | 19.000        | 76.4      |
| 1.180         | 15.9      | 26.500        | 91.9      |
| 2.360         | 21.3      | 37.500        | 100.0     |

表 8 Sup-25 体积指标试验结果

| 项目        | 试验结果 | 技术要求    |
|-----------|------|---------|
| 沥青用量/%    | 3.9  | —       |
| 设计次数压实度/% | 96.0 | —       |
| 矿料间隙率/%   | 12.1 | ≥12     |
| 饱和度/%     | 67   | 65~75   |
| 粉胶比       | 1.18 | 0.8~1.6 |
| 初始压实度/%   | 84.2 | ≤89     |

表 9 Sup-25 性能试验结果

| 项目                         | 试验结果  | 技术要求   |
|----------------------------|-------|--------|
| 动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 1 405 | ≥1 000 |
| 残留稳定度/%                    | 87.8  | ≥85    |
| 劈裂强度比/%                    | 85.3  | ≥80    |

## 2 试验设计与评价指标

### 2.1 试验设计

按照 ASTM D8225—2019 进行沥青混合料 IDEAL-CT 试验。

(1) 试件尺寸。采用圆柱形试件,直径为 $(150 \pm 2)$  mm, SMA-13 和 Sup-20 混合料试件的标准厚度为 62 mm, Sup-25 混合料试件的标准厚度为 95 mm。江苏省高速公路典型路面结构组合为 4 cm SBS 改性沥青 SMA-13+6 cm SBS 改性沥青 Sup-20+8 cm 70<sup>#</sup> 道路石油沥青 Sup-25+36 cm 水泥稳定碎石基层+20 cm 低剂量水泥稳定碎石基层,如果从现场取芯直接按照 ASTM D8225—2019 进行试验,中面层和上面层厚度均小于 62 mm,无法满足要求,难以采用标准尺寸进行芯样性能评价。因此,对根据实体工程混合料厚度确定的适宜厚度与 ASTM D8225—2019 规定的试件厚度的试验结果进行对比,分析试件厚度对试验结果的影响,设置 SMA-13 混合料试件厚度分别为 30 mm、62 mm, Sup-20 混合料试件厚度分别为 30 mm、50 mm、62 mm、70 mm、95 mm, Sup-25 混合料试件厚度分别为 70 mm、95 mm。

(2) 试件成型及条件。根据沥青混合料配合比成型试件,成型前在压实温度下保温 2 h,其中 SMA-13 和 Sup-20 的成型温度为 165 ℃, Sup-25 的成型温度为 145 ℃。通过体积法控制沥青混合料目标空隙率为  $7.0\% \pm 0.5\%$ 。试件脱模后,用切割机进行切割,使其达到目标高度。

(3) 试验温度。根据 ASTM D8225—2019,试验温度可在 5~35 ℃ 变化,一般为 25 ℃,也可按照公式根据沥青胶结料的 PG 等级确定试验温度。本文试验温度设为 25 ℃。加载前,将试件在 25 ℃ 水浴中保温 2 h。

(4) 加载模式。加载过程中,控制荷载线位移速率为 $(50 \pm 2)$  mm/min,峰后荷载降至 0.1 kN 时停止试验。

### 2.2 评价指标

IDEAL-CT 试验的典型加载曲线见图 2。结合 ASTM D8225—2019 及相关指标的物理含义,初步确定以下 6 个抗裂性能评价指标:

(1) 抗裂指数  $I_{CT, index}$ 。抗裂指数为 ASTM D8225—2019 中规定的指标,其值越大,沥青混合料的抗裂性能越好。抗裂指数按式(1)~(3)计算。

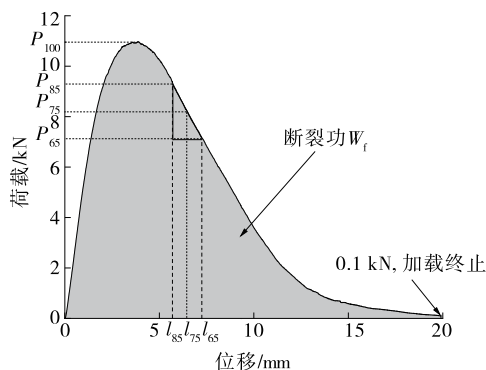


图 1 IDEAL-CT 试验的典型荷载-位移曲线

$$I_{CT, index} = \frac{t}{62} \times \frac{l_{75}}{D} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{W_f}{Dt} \times 10^6 \quad (2)$$

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (3)$$

式中: $t$  为试件厚度(mm); $D$  为试件直径(mm); $G_f$  为断裂能(J/m<sup>2</sup>); $|m_{75}|$  为峰后荷载降至最大荷载的 75% 时荷载-位移曲线斜率绝对值。

(2) 断裂功(J)。

(3) 峰值荷载(kN)。为加载过程中的最大荷载。

(4) 断裂能(J/m<sup>2</sup>)。按式(2)计算。

(5) 峰值荷载作用功(J)。为荷载-位移曲线与  $l_{100}$  围成的面积。 $l_{100}$  为峰值荷载对应的位移。

(6)  $|m_{75}|$ 。可反映开裂后裂缝扩展速度,  $|m_{75}|$  越小, 沥青混合料的抗裂性能越好。

## 3 试验结果分析

### 3.1 试件厚度对抗裂性能的影响

以 SBS 改性沥青 Sup-20 为试验对象,研究试件厚度对抗裂性能指标的影响,试验结果见表 10。

#### 3.1.1 试件厚度对抗裂指数的影响

不同试件厚度下抗裂指数见表 10 和图 2。从表 10 和图 2 可以看出:随着试件厚度的增加,抗裂指数上升。试件厚度为 30 mm、50 mm、62 mm 时,抗裂指数的变异系数分别为 41.50%、32.55%、57.61%;试件厚度为 70 mm、95 mm 时,变异系数均小于 3%,对抗裂指数的影响较小。

表 10 试件厚度对 SBS 改性沥青 Sup-20 抗裂性能指标的影响

| 试件厚度/mm | 项目     | 峰值荷载      | 断裂功       | 断裂能                        | 抗裂指数    | 峰值荷载作用功  | $ m_{75} $ |
|---------|--------|-----------|-----------|----------------------------|---------|----------|------------|
| 30      | 平均值    | 3.323 kN  | 22.601 J  | 5 022.445 J/m <sup>2</sup> | 213.063 | 7.660 J  | 0.496      |
|         | 标准差    | 0.359 kN  | 3.434 J   | 763.059 J/m <sup>2</sup>   | 88.426  | 0.819 J  | 0.123      |
|         | 变异系数/% | 10.80     | 15.19     | 15.19                      | 41.50   | 10.69    | 24.75      |
| 50      | 平均值    | 7.418 kN  | 54.751 J  | 7 300.134 J/m <sup>2</sup> | 229.978 | 25.780 J | 1.102      |
|         | 标准差    | 0.315 kN  | 5.690 J   | 758.671 J/m <sup>2</sup>   | 74.867  | 6.081 J  | 0.146      |
|         | 变异系数/% | 4.25      | 10.39     | 10.39                      | 32.55   | 23.59    | 13.24      |
| 62      | 平均值    | 10.938 kN | 82.764 J  | 8 899.356 J/m <sup>2</sup> | 278.548 | 22.110 J | 1.535      |
|         | 标准差    | 0.677 kN  | 9.972 J   | 1072.247 J/m <sup>2</sup>  | 160.473 | 4.969 J  | 0.335      |
|         | 变异系数/% | 6.19      | 12.05     | 12.05                      | 57.61   | 22.48    | 21.82      |
| 70      | 平均值    | 11.570 kN | 100.328 J | 9 555.000 J/m <sup>2</sup> | 348.405 | 31.740 J | 1.476      |
|         | 标准差    | 0.113 kN  | 2.510 J   | 239.002 J/m <sup>2</sup>   | 7.743   | 2.666 J  | 0.050      |
|         | 变异系数/% | 0.98      | 2.50      | 2.50                       | 2.22    | 8.40     | 3.39       |
| 95      | 平均值    | 16.580 kN | 141.048 J | 9 898.072 J/m <sup>2</sup> | 387.610 | 53.770 J | 1.951      |
|         | 标准差    | 0.877 kN  | 7.420 J   | 520.682 J/m <sup>2</sup>   | 6.449   | 5.388 J  | 0.048      |
|         | 变异系数/% | 5.29      | 5.26      | 5.26                       | 1.66    | 10.02    | 2.46       |

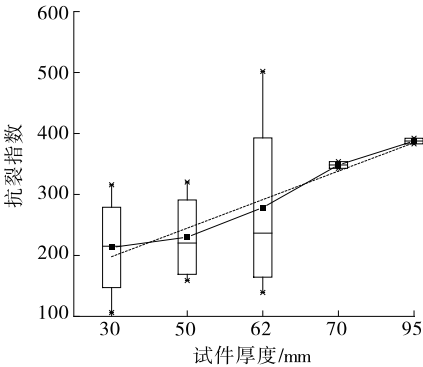


图 2 试件厚度对抗裂指数的影响

3.1.2 试件厚度对峰值荷载作用功的影响

不同试件厚度下峰值荷载作用功见表 10 和图 3。从表 10 和图 3 可以看出:随着试件厚度的增

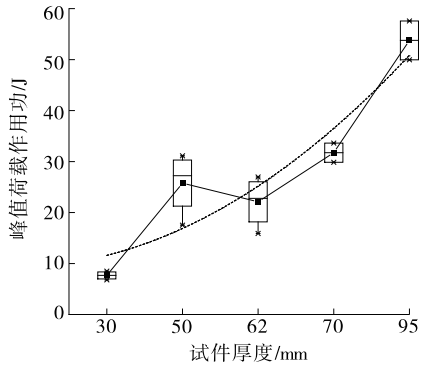


图 3 试件厚度对峰值荷载作用功的影响

加,峰值荷载作用功上升,且试验数据的离散性较小。试件厚度为 50 mm 时,峰值荷载作用功的变异系数最大,为 23.59%;试件厚度为 70 mm 时,变异系数最小,为 8.40%。

3.1.3 试件厚度对峰值荷载的影响

不同试件厚度下峰值荷载见表 10 和图 4。从表 10 和图 4 可以看出:随着试件厚度的增加,峰值荷载上升,且试验数据的离散性较小。试件厚度为 30 mm 时,峰值荷载的变异系数最大,为 10.80%。

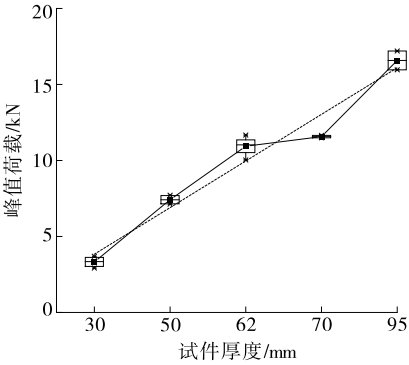


图 4 试件厚度对峰值荷载的影响

3.1.4 试件厚度对断裂功的影响

不同试件厚度下断裂功见表 10 和图 5。从表 10 和图 5 可以看出:随着试件厚度的增加,断裂功上升,且试验数据的离散性较小。试件厚度为

30 mm 时,断裂功的变异系数最大,为 15.19%;试件厚度为 70 mm 时,变异系数最小,为 2.50%。

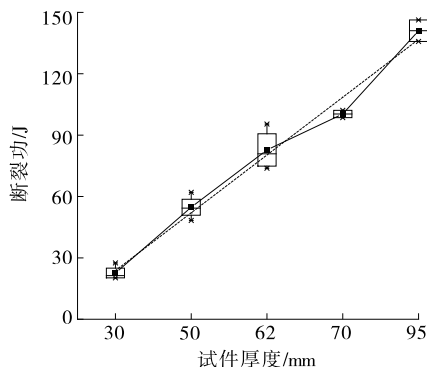


图 5 试件厚度对断裂功的影响

### 3.1.5 试件厚度对断裂能的影响

不同试件厚度下断裂能见表 10 和图 6。从表 10 和图 6 可以看出:随着试件厚度的增加,断裂能上升,且试验数据的离散性较小。试件厚度为 30 mm 时,断裂能的变异系数最大,为 15.19%;试件厚度为 70 mm 时,变异系数最小,为 2.50%。

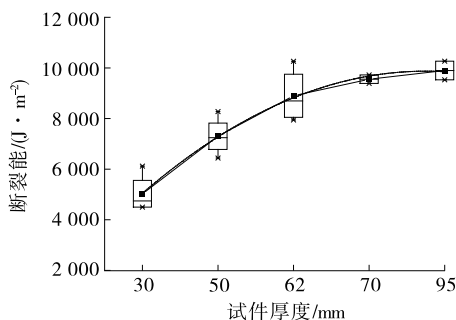


图 6 试件厚度对断裂能的影响

### 3.1.6 试件厚度对 $|m_{75}|$ 的影响

不同试件厚度下  $|m_{75}|$  见表 10 和图 7。从表 10 和图 7 可以看出:随着试件厚度的增加,  $|m_{75}|$  上升,且试验数据的离散性较小。试件厚度为 30 mm、62 mm 时,  $|m_{75}|$  的变异系数较大,分别为 24.75%、21.82%。

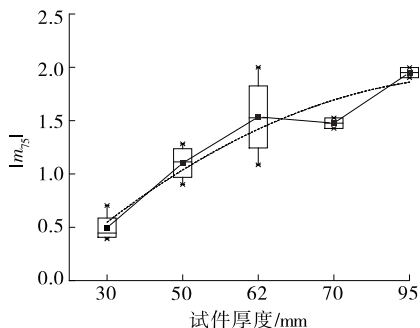


图 7 试件厚度对  $|m_{75}|$  的影响

### 3.1.7 抗裂性能指标与试件厚度的相关性分析

以 SBS 改性沥青 Sup-20 为研究对象,分析抗裂性能试验结果与试件厚度的相关性,结果见图 8~13。从图 8~13 可以看出:除抗裂指数与试件厚度的相关性较差外(相关系数  $R^2=0.38$ ),峰值荷载、 $|m_{75}|$ 、断裂功、断裂能及峰值荷载作用功均与试件厚度呈现良好的相关性,其中峰值荷载和断裂功的相关系数超过 0.95。养护设计过程中,当试件厚度无法满足标准厚度时,可根据经验公式(见表 11)计算得到标准尺寸的抗裂性能指标。

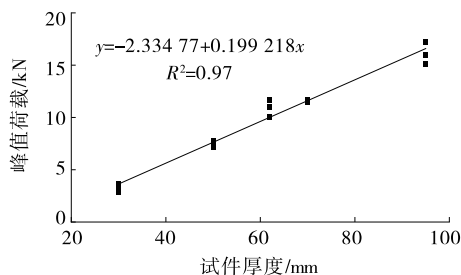


图 8 峰值荷载与试件厚度的相关性

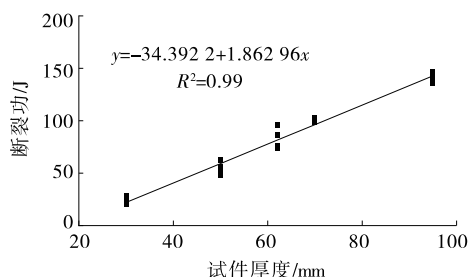


图 9 断裂功与试件厚度的相关性

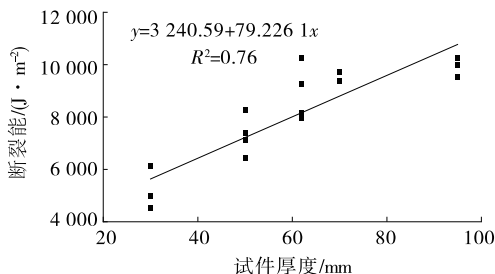


图 10 断裂能与试件厚度的相关性

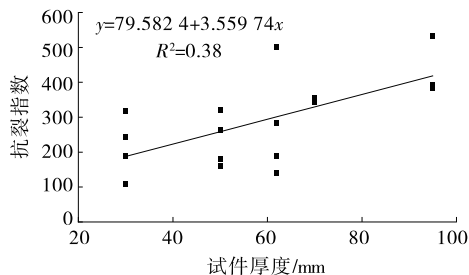


图 11 抗裂指数与试件厚度的相关性



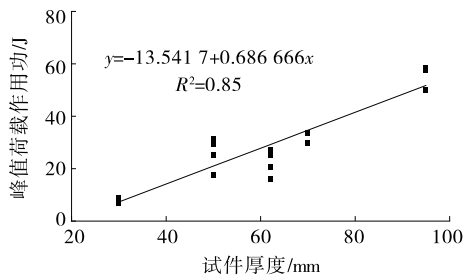


图 12 峰值荷载作用功与试件厚度的相关性

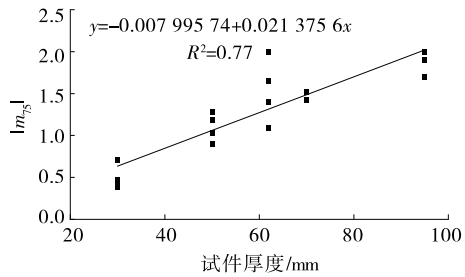
图 13  $|m_{75}|$  与试件厚度的相关性

表 11 抗裂性能指标的经验公式

| 抗裂性能指标        | 经验公式                                  |
|---------------|---------------------------------------|
| 峰值荷载 $F$      | $F = -2.33477 + 0.199218h$            |
| 断裂功 $W_f$     | $W_f = -34.3922 + 1.86296h$           |
| 断裂能 $G_f$     | $G_f = 3240.59 + 79.2261h$            |
| 峰值荷载作用功 $W_p$ | $W_p = -13.5417 + 0.686666h$          |
| $ m_{75} $    | $ m_{75}  = -0.00799574 + 0.0213756h$ |

注:  $h$  为试件厚度。

### 3.2 混合料类型对抗裂性能指标的影响

试件厚度相同时,不同类型混合料的 IDEAL-CT 试验结果见图 14、图 15。总体而言,试件厚度相同时,对于不同混合料,不同指标反映的抗裂性能趋势基本一致,本文提出的评价指标可用于沥青混合料抗裂性能评价。

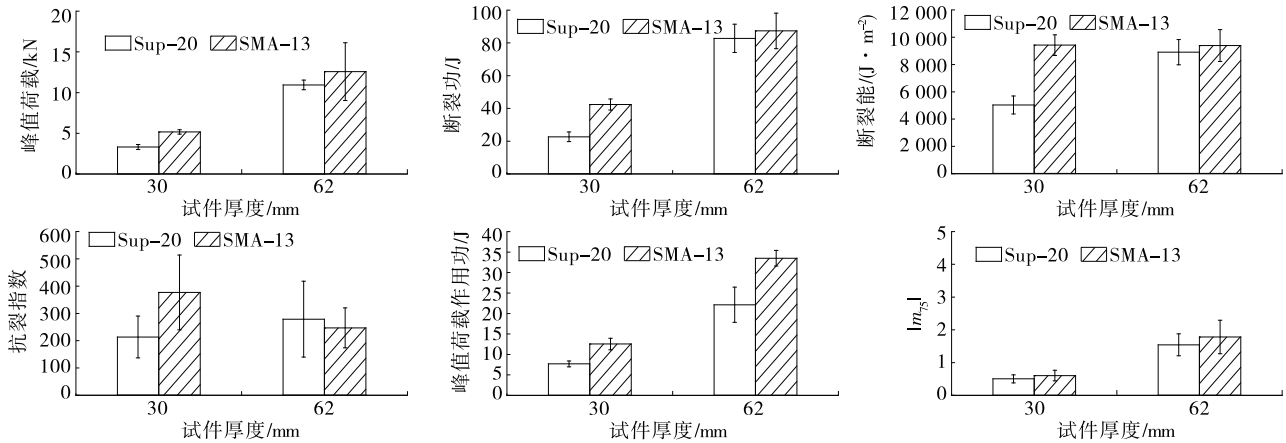


图 14 SMA-13 和 Sup-20 的抗裂性能试验结果对比

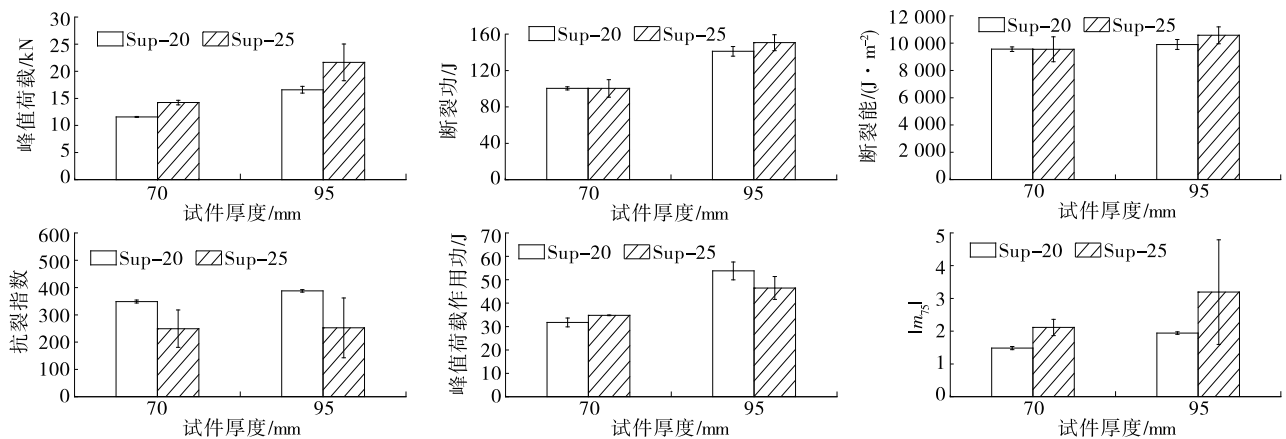


图 15 Sup-20 和 Sup-25 的抗裂性能试验结果对比

### 3.3 试验数据离散性分析

以变异系数为指标,分析试验数据的离散性,结果见图 16、图 17。从图 16、图 17 可以看出:试件厚

度为 30 mm 时,抗裂性能指标的变异系数较高;试件厚度为 50 mm、62 mm 时,峰值荷载作用功的变异系数大于 20%;试件厚度为 30 mm、62 mm 时,

$|m_{75}|$  的变异系数大于 20%; 试件厚度为 30 mm、50 mm、62 mm 时, 抗裂指数的变异系数显著高于其他指标。综合比较, 峰值荷载、断裂能或断裂功的离散性较低, 可将它们作为抗裂性能评价指标。其中峰值荷载反映混合料的整体强度; 断裂能或断裂功反映混合料加载过程中的抵抗能力, 更能反映混合料的抗裂性能。

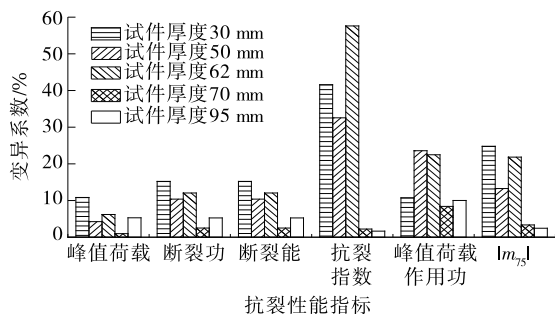


图 16 不同试件厚度下抗裂性能指标的变异系数

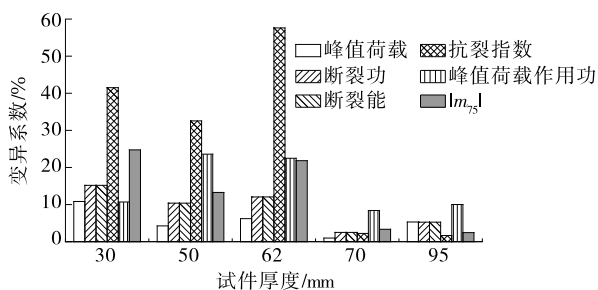


图 17 相同试件厚度下抗裂性能指标的变异系数

## 4 结论

(1) 采用 IDEAL-CT 试验评价沥青混合料的抗裂性能时, 不同指标的试验结果均存在尺寸效应。随着试件厚度的增加, 所有抗裂性能指标均呈上升趋势, 且试件厚度小于 62 mm 时, 试验结果的变异性较高。

(2) 除抗裂指数与试件厚度相关性较差外, 峰值荷载、 $|m_{75}|$ 、断裂功、断裂能及峰值荷载作用功均与试件厚度呈现良好的相关性。不同厚度试件的断裂功变异系数维持在较低水平, 对于芯样尺寸受限的养护工程, 可以断裂功作为 IDEAL-CT 试验的评价指标。

建议增加现场取芯芯样评估, 结合路面裂缝等数据, 进一步论证评价指标与路面性能的相关性, 提出不同区域的养护分级标准。

## 参考文献:

- [1] ZHOU F J, NEWCOMB D, GURGANUS C, et al. Experimental design for field validation of laboratory tests to assess cracking resistance of asphalt mixtures[R]. NCHRP Project 9-57, Transportation Research Board, Washington D C, 2016.
- [2] WEST R, RODEZNO C, LEIVA F, et al. Development of a framework for balanced mix design[R]. Project NCHRP 20-07/Task 406, Transportation Research Board, Washington D C, 2018.
- [3] 黄卫东, 张家伟, 吕泉, 等. 基于间接拉伸开裂方法评价超薄磨耗层混合料抗裂性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 1588-1594.
- [4] MANDAL T, LING C, CHATURABONG P, et al. Evaluation of analysis methods of the semi-circular bend (SCB) test results for measuring cracking resistance of asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2019, 12(5): 456-463.
- [5] ZHOU F J, IM S, HU S. Development and validation of the IDEAL cracking test[J]. Transportation Research Circular, 2019, EC-251: 1-21.
- [6] YAN C Q, ZHANG Y, BAHIA H U. Comparison between SCB-IFIT, un-notched SCB-IFIT and IDEAL-CT for measuring cracking resistance of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119060.
- [7] 刘莹. 掺钢渣再生沥青混合料性能研究[J]. 公路与汽运, 2023(4): 57-60.
- [8] MARASTEANU M, ZOFKA A, TUROS M, et al. Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study 776[R]. MN/RC 2007-43, Minnesota Department of Transportation, 2007.
- [9] ZHOU F J, IM S, SUN L J, et al. Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18: 405-427.
- [10] IM S, ZHOU F J. New and simpler cracking test method for asphalt mix designs[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2631(1): 1-10.

收稿日期: 2023-10-27