

粗集料形态对宽温度域下沥青混合料高低温性能影响

郭慧敏

(山西交通职业技术学院,山西 晋中 030031)

摘要:为了掌握粗集料形态对宽温度域条件下沥青混合料高低温性能影响,基于集料图像测量系统(AIMS),对5种粗集料棱角性、三维形状和表面纹理进行量化分析,进而制备SMA-13试件进行不同温度范围高温车辙试验和低温弯曲蠕变试验,分析集料棱角性指数、球度和表面纹理指数与高低温性能指标的相关性。结果表明:选用棱角性好、粒形饱满和表面纹理深度大的粗集料有利于改善沥青混合料高低温性能;随着试验温度增加,粗集料棱角性指数和球度对沥青混合料高温性能的影响程度逐渐增大,纹理指数对其影响程度则逐渐减小,且高温性能对棱角性指数和球度变化的敏感性增强;随着试验温度降低,粗集料棱角性指数、球度和纹理指数对沥青混合料低温性能的影响程度及低温性能对前述三指标变化的敏感性均逐渐降低。

关键词: 沥青混合料;粗集料;集料图形测量系统;高低温性能;宽温度域

1 引言

沥青路面因具有行车舒适、建养方便和可回收利用等特点在中国高速公路中被广泛使用。但沥青为温度敏感性材料,夏季高温条件下其黏度低,混合料抗剪强度下降,汽车重复荷载作用容易造成路面发生永久变形累积而形成车辙,而冬季低温条件下其黏度高,混合料硬脆特征明显,低温环境容易造成路面开裂。高温车辙和低温开裂是沥青路面常见病害,严重影响其使用寿命和行车安全,因而研究沥青路面高低温性能影响因素一直是学者们关注的热点。

现有关于沥青混合料高低温性能影响因素的研究多集中于所用沥青性能、集料力学特性、矿料级配和油石比等,较少涉及粗集料形态(棱角性、三维形状和表面纹理等),而沥青混合料中粗集料占50%以上,其颗粒形态对高低温性能均有重要影响。尽管部分学者已就粗集料形态对沥青混合料高低温性能的影响进行了研究,但其对集料形态的量化方法,及对试验中温度条件的考虑都尚存不足。为此,该文基于AIMS系统对粗集料形态进行量化,进而分析集料形态对不同温度条件下沥青混合料高低温性能的影响规律。

2 试验概况

2.1 原材料

2.1.1 沥青

选用SBS(I-D)改性沥青,根据JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对其主要技术指标进行检验,结果见表1。

表1 SBS(I-D)沥青主要技术指标

试验项目		单位	试验结果	技术要求
25℃针入度		0.1 mm	50	40~60
软化点		℃	76.4	≥60
5℃延度		cm	25.6	≥20
闪点		℃	319	≥230
溶解度		%	99.3	≥99
密度		g/cm ³	1.024	实测
RTFOT	质量变化	%	0.20	≤±1.0
后残	25℃残留针入度比	%	76	≥65
留物	10℃残留延度	cm	19.5	≥15

2.1.2 集料和级配

选用 5 种玄武岩粗集料 A、B、C、D 和 E,主要技术指标见表 2。细集料均为石灰岩,混合料级配采用 SMA-13(表 3),油石比为 5.0%。

表 2 5 种玄武岩粗集料主要技术指标

粗集料 类型	压碎值/ %	洛杉矶磨 耗值/%	表观相对 密度	针片状 含量/%
A	12.4	12.7	2.724	9.3
B	13.1	14.2	2.759	8.2
C	10.2	12.2	2.712	11.3
D	11.2	14.1	2.735	12.5
E	9.7	15.1	2.771	13.1
技术要求	≤26	≤28	≥2.60	≤15

表 3 SMA-13 集料级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16	100	1.18	17.0
13.2	95.2	0.6	15.2
9.5	68.1	0.3	13.4
4.75	26.2	0.15	11.2
2.36	19.1	0.075	10.2

2.2 粗集料形态量化

2.2.1 粗集料形态量化方法

JTG E42-2015《公路工程集料试验规程》采用松装间隙率和针片状颗粒含量分别表征集料棱角性和宏观形状,其试验过程简便,但结果误差较大,且对集料形态描述不全面,因而基于图像技术的集料形态定量分析方法被广泛使用,其中 AIMS 体系成熟,且应用较广,故该文采用其对粗集料形态进行量化。AIMS 通过获取集料三维图像,可获取表征集料宏观形态的棱角性指数和球度指标,及表征微观形态的表面纹理指数指标。

(1) 棱角性指数 GA

棱角性指数表征集料图像轮廓边缘线的角度变化情况,通过梯度法原理计算轮廓线每隔 3 点梯度向量的方位角差值之和表征,见式(1)。其值为 0~10 000,值越大代表集料棱角性越好。

$$GA = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \tag{1}$$

式中:θ 为图像轮廓线转折点的方位角;n 为计算点

数;i 为集料轮廓线的第 i 转折点。

(2) 球度 SP

球度表征集料形状与球体差异大小,通过测定集料三维方向尺寸根据式(2)计算。其值为 0~1,值越接近 1 代表集料形状越接近球体。

$$SP = \sqrt[3]{\frac{d_s d_l}{d_l^2}} \tag{2}$$

式中:d_s、d_l 和 d_L 分别为集料三维形状中的最短轴、中间轴和最长轴长度。

(3) 纹理指数 TX

纹理指数表征集料表面微观粗糙度,通过高倍率显微镜读取集料表面波长小于 0.5 mm 的纹理后使用小波分析量化而得,见式(3)。其值为 0~1 000,值越小代表集料表面越光滑,完全无微观纹理时为 0。

$$TX = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N [D_{i,j}(x,y)]^2 \tag{3}$$

式中:D 为分解函数;N 为图像中像素点总数;i 为具体像素点;j 为小波指数。

2.2.2 粗集料形态量化结果

采用 AIMS 对 A、B、C、D、E 5 种集料 4.75~9.5、9.5~13.2 和 13.2~16 mm 颗粒的棱角性指数、球度、扁平率(L/S)和纹理指数进行定量分析(每档粒径取样 50 颗,以平均值为代表值),并根据 3 档集料占级配中 4.75 mm 以上颗粒质量分数求取加权平均值,结果见表 4。

表 4 5 种玄武岩粗集料形态量化结果

集料类型	GA	SP	L/S	TX
A	3 015	0.65	2.67	587
B	2 877	0.64	2.54	631
C	2 933	0.80	2.76	534
D	2 654	0.62	2.88	453
E	2 729	0.63	3.01	501

3 粗集料形态对沥青混合料高温性能的影响

为分析粗集料形态对宽温度域条件下沥青混合料高温性能的影响,分别以 A、B、C、D 和 E 5 种粗集料制备尺寸 300 mm×300 mm×50 mm 的 SMA-13 沥青混合料试件进行 55、60、65 和 70 ℃下车辙试验,结果见表 5。

3.1 棱角性对高温性能的影响

将集料棱角性指数分别与 4 个温度条件下沥青混合料动稳定度进行相关分析,结果见图 1。

表 5 不同粗集料制备 SMA-13 试件车辙试验结果

粗集料 类型	不同温度(℃)时的动稳定度/(次·mm ⁻¹)			
	55	60	65	70
A	7 432	5 762	4 321	3 122
B	6 723	5 351	4 122	2 854
C	6 812	5 524	4 532	3 577
D	6 523	4 824	3 563	2 322
E	6 621	4 721	3 541	2 123

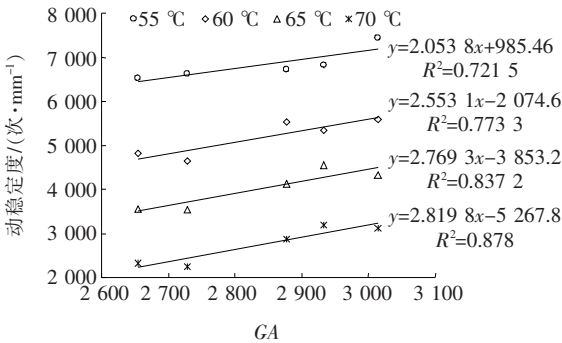


图 1 集料棱角性指数对沥青混合料高温性能的影响

由图 1 可知:

(1) 沥青混合料动稳定度与粗集料棱角性指数呈明显的线性正相关关系,表明选用棱角性较好的粗集料有利于改善混合料抗车辙性能,这是因为集料棱角特征明显时颗粒间更容易形成机械嵌合,此时形成的集料骨架稳定性更好,混合料抗剪强度提高,同时棱角性好的集料表面积大,能裹覆更多结构沥青,因而高温稳定性好。同时,随着试验温度的提高,相关性更加明显,表明沥青路面温度越高,粗集料棱角性对其高温稳定性影响越大。温度为 55 °C 时, R^2 值为 0.721 5,而温度上升到 70 °C 时, R^2 值提高到 0.878 0,这是由于温度提高时沥青黏度下降,此时胶结料对混合料高温性能的影响减弱,而集料形成的骨架对混合料高温性能决定性增强的缘故。

(2) 沥青混合料高温稳定性对粗集料棱角性指数变化的敏感性随试验温度的升高而提高,但提高速率逐渐降低。试验温度升高时相关分析中动稳定度随棱角性指数变化线的斜率逐渐增加,其中温度由 55 °C 升高至 60 °C 时,斜率增加 24.3%,而温度由 65 °C 升高至 70 °C 时,斜率增加 1.8%。

3.2 球度对高温性能的影响

将集料球度分别与 4 种温度条件下沥青混合料动稳定度进行相关分析,结果见图 2。

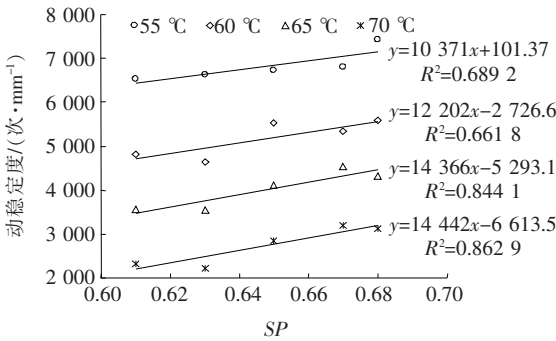


图 2 集料球度对沥青混合料高温性能的影响

由图 2 可知:

(1) 随着沥青混合料中粗集料球度值提高,其动稳定度整体呈线性上升趋势,表明采用三维尺寸相差较小的饱满粒形粗集料时有利于改善混合料高温稳定性,尤其路面温度达到 65 °C 以上时有效性更好,这是由于集料三维尺寸相差明显时表现为针片状,集料间不能形成有效接触,骨架稳定性差所致。试验温度为 55 °C 和 60 °C 时,线性相关分析中动稳定度和球度的 R^2 值分别为 0.689 2 和 0.661 8,两者较为接近,而温度增加到 65 °C 和 70 °C 时, R^2 值分别提高到 0.844 1 和 0.862 9。

(2) 随着试验温度的升高,沥青混合料高温稳定性对粗集料球度变化的敏感性逐渐提高,但温度高于 65 °C 后提高速率明显降低。试验温度由 55 °C 增加至 60 °C 及由 60 °C 增加至 65 °C 时,相关分析中动稳定度随球度变化线的斜率值均增加 17.7%,而由 65 °C 增加至 70 °C 时,斜率仅增加 0.5%。

3.3 表面纹理对高温性能的影响

将集料表面纹理分别与 4 种温度条件下沥青混合料动稳定度进行相关分析,结果见图 3。

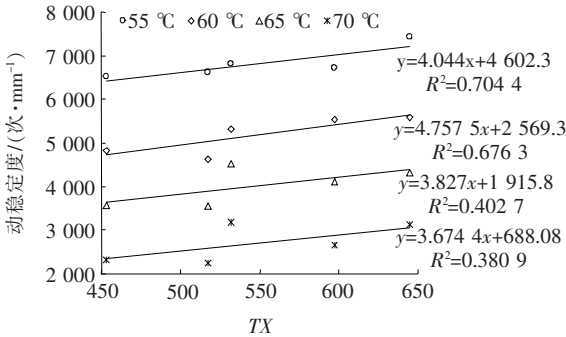


图 3 集料表面纹理对沥青混合料高温性能的影响

由图 3 可知:整体上随着粗集料表面纹理指数增加,沥青混合料动稳定度呈上升趋势,即采用纹理丰富且深度大的粗集料时其相互之间内摩擦角较大,能改善沥青混合料高温稳定性。但上述规律在试验温度为 55 ℃ 和 60 ℃ 时表现较明显,线性回归分析中动稳定度和纹理指数的 R^2 值分别达到 0.704 4 和 0.676 3,而试验温度增加至 65 ℃ 和 70 ℃ 时表现相对较弱, R^2 值分别仅为 0.402 7 和 0.380 9,分析原因可能为试验温度升高时沥青黏度降低,使集料间润滑作用增强,故弱化了表面纹理对沥青混合料抗剪强度的贡献。

4 粗集料形态对沥青混合料低温性能的影响

为分析粗集料形态对宽温度域条件下沥青混合料低温性能的影响,分别以 A、B、C、D 和 E 共 5 种粗集料制备 SMA-13 沥青混合料车辙试件,切割为 250 mm×30 mm×35 mm 小梁后进行 -5、-10、-15 和 -20 ℃ 下弯曲蠕变试验,结果见表 6。

表 6 不同粗集料制备 SMA-13 试件弯曲蠕变试验结果

粗集料 类型	不同温度(℃)时的最大弯拉破坏应变/ $\mu\epsilon$			
	-5	-10	-15	-20
A	4 325	3 842	3 342	2 565
B	4 211	3 523	3 021	2 232
C	4 127	3 542	2 933	2 212
D	3 877	3 322	2 921	2 243
E	3 921	3 543	2 873	2 312

4.1 棱角性对低温性能的影响

将集料棱角性指数分别与 4 种温度条件下沥青混合料最大弯拉破坏应变进行相关分析,结果见图 4。

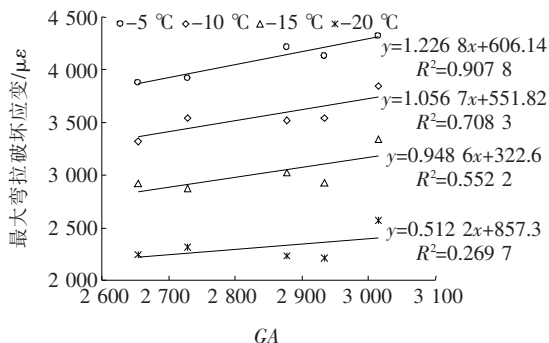


图 4 集料棱角性指数对沥青混合料低温性能的影响

由图 4 可知:

(1) 整体上随粗集料棱角性指数增加,沥青混合料低温最大弯拉破坏应变呈增加趋势,表明采用棱角丰富的粗集料有利于改善混合料低温性能,分析原因在于集料棱角丰富时能改善与沥青黏附性的缘故。

(2) 温度较高时沥青混合料低温性能与粗集料棱角性指数基本呈线性关系,而后随试验温度降低,相关性逐渐减弱,其中 -5 ℃ 时最大弯拉破坏应变与棱角性指数线性相关分析的 R^2 值达到 0.907 8,而 -20 ℃ 时 R^2 值仅为 0.269 7,分析原因随试验温度降低沥青硬脆性愈发明显,此时混合料低温性能主要决定于沥青性能,故受集料棱角性影响程度明显降低。此外,随着试验温度降低,线性相关分析中最大弯拉破坏应变随棱角性指数变化线的斜率逐渐减小,表明沥青混合料低温性能对粗集料棱角性变化的敏感性降低。

4.2 球度对低温性能的影响

将集料球度分别与 4 种温度条件下沥青混合料最大弯拉破坏应变进行相关分析,结果如图 5 所示。

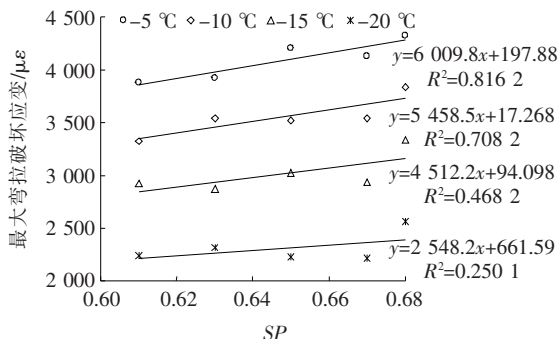


图 5 集料球度对沥青混合料低温性能的影响

由图 5 可知:和粗集料棱角性对沥青混合料低温性能影响类似,整体上随粗集料球度值增加,其制备沥青混合料低温最大弯拉破坏应变呈增加趋势,表明采用三维形状饱满的粗集料能改善混合料低温性能,同时温度较高时沥青混合料低温性能与粗集料球度基本呈线性关系,且斜率值较高,此时选用球度值较高的粗集料能有效改善混合料低温性能,而后随试验温度降低,相关性逐渐减弱,斜率也逐渐降低。

4.3 表面纹理对低温性能的影响

将集料表面纹理分别与 4 种温度条件下沥青混合料最大弯拉破坏应变进行相关分析,结果见图 6。

由图 6 可知:与粗集料棱角性及三维形状对沥青混合料低温性能影响类似,整体上随粗集料纹理指数增加,其制备沥青混合料低温最大弯拉破坏应变呈增加趋势,表明采用表面纹理丰富的粗集料能改善混合料低温性能,这是由于集料表面纹理丰富时沥青-集

料界面黏附力提高,集料表面沥青膜厚度增加,故受低温作用时沥青—集料界面黏结牢固,且有足够厚度沥青膜产生变形抵消温度应力,不易产生低温开裂。同时温度较高时沥青混合料低温性能与粗集料纹理指数基本呈线性关系,且斜率值较高,此时选用纹理指数较高的粗集料能有效改善混合料低温性能,而后随试验温度降低,相关性逐渐减弱,斜率也逐渐降低。

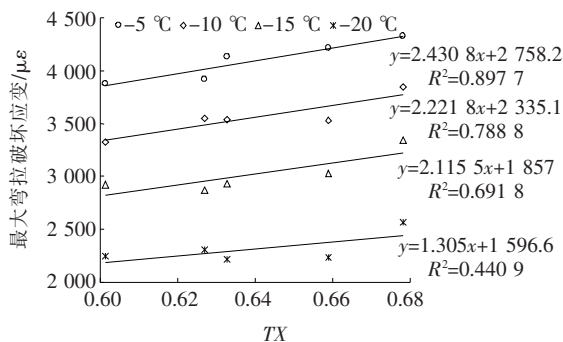


图6 集料表面纹理对沥青混合料低温性能的影响

5 结论

(1) 随着粗集料棱角性指数、球度和纹理指数增加,各个试验温度下沥青混合料动稳定度和最大弯拉破坏应变均呈逐渐增加趋势,故选用棱角性好、粒形饱满和表面纹理深度大的粗集料有利于改善沥青混合料高温性能。

(2) 随着试验温度升高,粗集料棱角性指数和球度对沥青混合料高温性能的影响程度逐渐增大,纹理指数对其影响程度则逐渐减小,且高温性能对棱角性指数和球度变化的敏感性增强,但温度越高敏感性增加速率越低。

(3) 随着试验温度降低,粗集料棱角性指数、球度和纹理指数对沥青混合料低温性能的影响程度逐渐降低,且三指标依次对应于路面温度低于-15、-10和-5 °C条件时影响程度出现明显下降;试验温度降低时沥青混合料低温性能对粗集料棱角性指数、球度和纹理指数变化的敏感性逐渐降低。

参考文献:

- [1] 钱璞,李俊. 硅藻土改性沥青混合料高温性能分析[J]. 中外公路,2017(5).
- [2] 成高立,李卓琳,罗要飞. 抗车辙剂对沥青混合料高温性能的影响分析[J]. 中外公路,2018(2).
- [3] 童中家,高东远,王乾,等. 沥青类型对紫外光老化沥青混合料高温性能研究[J]. 公路工程,2017(2).
- [4] 王岚,胡江三,陈刚. 聚合物改性沥青及混合料高温性能试验研究[J]. 公路工程,2014(4).
- [5] Li H B, An Y Q. High Temperature Stability of Asphalt Mixture Research[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 361—363:1 847—1 850.
- [6] Sun Z H, Yu Q B, Wang T B, et al. The Effect of Asphalt and Aggregate Gradation on the Low-Temperature Performance of Asphalt Mixtures for Intermediate and Underlying Course[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 505—506:251—254.
- [7] 郭鹏,韦万峰,唐伯明,等. 再生粗集料棱角性对混合料高温性能评价[J]. 公路,2017(9).
- [8] 刚增军. 集料颗粒形态特征对沥青混合料高温性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化,2017(1).
- [9] 魏建国,胡峻铭,王永胜. 集料形状特征及其对热拌沥青混合料性能的影响[J]. 中外公路,2018(2).
- [10] 袁峻,钱野. 粗集料形态特征及其对沥青混合料高温抗剪强度的影响[J]. 交通运输工程学报,2011(4).
- [11] 钱野. 不同性状粗集料对沥青混合料高温性能的影响研究[D]. 扬州大学硕士学位论文,2010.
- [12] 陈国明,周纯秀,谭忆秋. 粗集料表面纹理的分形评定及沥青混合料性能试验[J]. 交通运输工程学报,2009(4).
- [13] 谭忆秋,宋宪辉,纪伦,等. 粗集料性能对沥青混合料高温性能的影响[J]. 中国公路学报,2009(1).
- [14] 陈国明,谭忆秋. 基于粗集料表面纹理特性的沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技,2007(2).
- [15] 陈国明,谭忆秋,石昆磊,等. 粗集料棱角性对沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技,2006(3).
- [16] Luce A D. Analysis of Aggregate Imaging System (AIMS) Measurements and their Relationship to Asphalt Pavement Skid Resistance[D]. Texas: Texas A and M University,2006.