DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2026.03.007
文章编号:1671-2579(2026)03-0056-09

基于纤维弹性模量的沥青混合料压实特性影响研究

邹泽西[1],罗恺彦[2*],林志明[2],邱祥[3],陆旭东[4],姚晓阳[5],王耀龙[6]

(1.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011;2.交通运输部公路科学研究院,北京市 100088;3.长沙理工大学土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;4.交通运输部科学研究院 环境保护与水土保持研究中心,北京市 100029;5.中交基础设施养护集团有限公司,北京市 100011;6.中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:为研究纤维掺加对沥青混合料压实特性的影响机制,该文选取聚酯纤维、聚丙烯腈纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维、聚丙烯纤维及聚乙烯醇纤维共6种典型路用纤维,基于AC-20级配混合料开展旋转压实度试验,以压实系数为核心评价指标(压实系数越大,越易压实)。结果表明:纤维弹性模量是关键影响因素,当纤维模量低于集料模量50%时(如聚酯纤维和聚丙烯腈纤维),压实系数显著降低(空白组为4.43%,聚酯纤维为3.94%,聚丙烯腈纤维为4.04%),压实难度增大;当纤维模量接近或高于集料模量时(如芳纶纤维为4.41%,玄武岩纤维为4.45%),压实性能未出现明显变化;纤维长度的影响受模量调控:增加低模量纤维长度有助于提高压实系数(如聚丙烯腈纤维),而减小高模量纤维长度则有利于压实(如芳纶纤维);纤维掺量存在阈值效应,压实系数随掺量呈非线性变化,并在特定掺量下达到峰值;施工压实工艺需进行差异化设计,混合料达到4%目标空隙率所需压实次数排序为:聚乙烯醇纤维<玄武岩纤维<聚丙烯纤维<芳纶纤维<空白组<聚丙烯腈纤维<聚酯纤维,除聚酯纤维和聚丙烯腈纤维外,其余纤维对常规压实工艺无显著影响。

关键词:道路工程;纤维沥青混合料;压实系数;压实次数;弹性模量

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Study on Influence of Elastic Modulus of Fiber on Compaction Characteristics of Asphalt Mixtures

ZOU Zexi[1], LUO Kaiyan[2*], LIN Zhiming[2], QIU Xiang[3], LU Xudong[4], YAO Xiaoyang[5], WANG Yaolong[6]

(1. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 4. Research Center for Environmental Protection and Soil and Water Conservation, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 5. CCCC Infrastructure Maintenance Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 6. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: To investigate the influence mechanism of fiber incorporation on the compaction characteristics of asphalt mixtures, six types of typical road fibers (polyester fiber, polyacrylonitrile fiber, aramid fiber, basalt fiber, polypropylene fiber, and polyvinyl alcohol fiber) were selected in this paper, and gyratory compaction tests were conducted based on AC-20 graded mixtures. The compaction coefficient (a larger compaction coefficient indicates easier compaction) was used as the core evaluation index. The results indicate that the elastic modulus of the fiber is the key influencing factor. When the fiber modulus is 50% lower than the aggregate modulus (such as polyester fiber and polyacrylonitrile fiber), the compaction coefficient decreases significantly (4.43% for the blank group, 3.94% for the polyester fiber, and 4.04% for the polyacrylonitrile fiber), and the compaction difficulty increases; when the fiber modulus is close to or higher than the aggregate modulus (such as 4.41% for the aramid fiber and 4.45% for the basalt fiber), the compaction performance does

收稿日期:2025-04-24 **修回日期:**2025-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278439)

作者简介:邹泽西,男,高级工程师. E-mail:zouzx@crbc.com

***通信作者:**罗恺彦,男,硕士,助理研究员. E-mail:luokaiyan05@163.com

not change significantly. The influence of fiber length is regulated by the modulus: Increasing the length of low-modulus fibers helps improve the compaction coefficient (such as polyacrylonitrile fiber), while reducing the length of high-modulus fibers is beneficial to compaction (such as aramid fiber). A threshold effect exists in fiber dosage; the compaction coefficient changes nonlinearly with the dosage and reaches a peak at a specific dosage. The construction compaction process is required to be designed differentially; the order of the number of compaction passes required for the mixture to reach the target void content of 4% is polyvinyl alcohol fiber < basalt fiber < polypropylene fiber < aramid fiber < blank group < polyacrylonitrile fiber < polyester fiber. Except for the polyester fiber and polyacrylonitrile fiber, the other fibers have no significant effect on the conventional compaction process.

Keywords: road engineering; fiber asphalt mixture; compaction coefficient; number of compaction pass; elastic modulus

0　引言

将纤维掺入沥青混合料，最早是为了防止沥青路面产生反射裂缝。但随着研究不断深入，人们发现加入纤维不仅能减少路面的反射裂缝，还可以使沥青混合料获得更好的高温性能、水稳定性和耐久性[1-2]。李振霞等[3]发现，木质素纤维和玉米秸秆纤维能有效提升沥青混合料的低温抗裂性能，在初始开裂时起到拉伸作用，防止裂纹扩展；荀家正等[4]指出，聚酯纤维、芳纶纤维-聚丙烯纤维混合纤维通过纤维桥接作用，能有效提高沥青混合料的低温抗裂性能；Li等[5]将聚丙烯腈纤维进行表面粗糙处理，发现能够改善沥青混合料的整体性能；李俊峰等[6]、吴靖江等[7]发现，玄武岩纤维能够改善沥青混合料的高温性能、低温性能；赵阳等[8]、张伟等[9]认为，聚乙烯醇纤维经表面处理后，能够改善沥青混合料的疲劳性能或高温流变性能。纤维还可以用于改善特种沥青混合料的路用性能。刘福明等[10]研究发现，添加聚酯纤维和玄武岩纤维能明显提升浸水环境下排水沥青混合料的抗剥落性；顾晓燕等[11]研究发现，掺加聚酯纤维可以提升环氧沥青混合料的低温变形能力和抗疲劳能力。

SHRP计划的A-408报告[12]指出，沥青混合料的设计和压实是影响沥青路面耐用性能的两个主要指标，如果没有充分的压实，最优设计的混合料的路用性能也将降低。虽然纤维能够有效改善沥青混合料的路用性能，但沥青混合料中掺入纤维是否会增加成型难度，以及在相同的压实次数下能否达到需要的压实度，目前尚不明确，相关的研究较少。

目前，研究沥青混合料压实特性的方法主要有两种。一是以马歇尔试验抗压系数为评价指标，抗压系数越大，沥青混合料压实越困难；二是以旋转压实试验压实系数为评价指标，压实系数越小，沥青混合料压实越困难。美国SHRP计划指出，旋转压实次数对数和空隙率有着良好的线性关系，斜率k表征了沥青混合料压实的难易程度[12]。欧盟规范EN 12697-10提出了基于马歇尔击实试验、旋转压实试验、振动压实试验评价沥青混合料压实性能的方法[13]。Santagata等[14]提出了旋转压实试验压实度和压实次数的拟合方程，并将其斜率与试验路取芯数据对比，建立了旋转压实次数和施工碾压次数的线性关系模型，但是这个模型在磨耗层的拟合效果较差，在基层和下面层的拟合效果较好。

针对纤维沥青混合料的压实性能，Viktor通过对比相同压实次数的纤维沥青混合料和普通沥青混合料的压实系数和压实度，认为压实度主要由压实系数决定。Yucel[15]研究了通过马歇尔击实试验分别成型钢纤维和玻璃纤维沥青混合料的情况，在相同的击实次数下，随着纤维掺量的增大，沥青混合料的空隙率均变大；Tapkin[16]采用马歇尔击实法和旋转压实法分别成型聚丙烯纤维沥青混合料，相同成型条件下，发现聚丙烯纤维掺量为0.55%时空隙率最大，压实难度最高。

Wang等[17]在SMA-13中掺入0.34%的玄武岩纤维，采用旋转压实成型法确定最佳油石比，发现压实系数随着沥青用量的增大先增大后减小，在沥青用量5.5%时压实系数最大；Toraldo等[18]在沥青混合料AC-16中掺入了木质素纤维、木质素纤维＋玻璃纤维、木质素＋再生的合成纤维3种纤维，计算纤维沥青混合料压实次数对数和压实度曲线斜率，发现木质素纤维＋玻璃纤维组合最容易压实，而且压实性能受沥青用量的影响也最小；Giustozzi等[19]研究了聚酯纤维和木质素纤维的沥青混合料体积性能，发现掺入这两种纤维后，压实难度均增大。

总结上述学者的研究，采用压实系数评价纤维沥青混合料压实性能是主流，但是，采用的沥青混合料类型不同，沥青混合料拌和温度也不尽相同，导致目前尚未能为不同类型纤维的压实性能做一个排序，为设计和施工纤维沥青路面提供参考依据。为解决这个问题，本文选择AC-20级配，采用SBS改性沥青，研究沥青路面常用的6种纤维的压实性能。

1 原材料及沥青混合料设计

1.1 沥青

本研究使用的是SBS(I-D)改性沥青，按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对沥青的相关性能指标进行检测，如表1所示，所有指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求。

1.2 矿料

本研究采用的粗集料、细集料、矿粉，按照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)进行试验，均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求。粗集料和细集料均为石灰岩石料。

1.3 纤维

本研究采用的纤维类型有聚酯纤维、玄武岩纤维、芳纶纤维、聚丙烯纤维、聚丙烯腈纤维和聚乙烯醇纤维，均按照《沥青路面用纤维》(JT/T 533—2020)对纤维的性能进行检测，纤维均满足规范要求。纤维的主要技术参数如表2所示。

1.4 沥青混合料

本文研究的AC-20采用马歇尔设计方法进行配合比设计，采用的级配见表3，最佳油石比为4.5%。采用的6种类型纤维，根据长度、掺量的不同，形成21种组合，编号和纤维参数如表4所示。根据相关学者的经验，纤维掺量每增加0.1%，油石比增加0.05%[20]。为研究纤维对压实性能的影响，采用控制变量法，除纤维外的其他试验参数均相同。每种纤维掺量对应的最佳油石比，见表5。

在进行纤维沥青混合料拌和时，采用干拌法：首

表1 SBS改性沥青的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of SBS modified asphalt

检测项目		单位	技术要求	检测值	单项判定	试验方法
针入度(25 ℃,5 s,100 g)		0.1 mm	40～60	58.1	合格	T0604
针入度指数I_{PI}			＞0	0.8	合格	T0604
延度(5 cm/min,5 ℃)		cm	＞20	39	合格	T0605
软化点(环球法)		℃	＞60	88.5	合格	T0606
布氏旋转黏度		Pa·s	＜3	2.38	合格	T0625
闪点		℃	＞230	314	合格	T0611
密度(25 ℃)		g/cm^3	实测记录	1.021		T0603
溶解度		%	＞99	99.57	合格	T0607
弹性恢复		%	＞75	96	合格	T0662
离析(软化点差)		℃	＜2.5	1	合格	T0661
薄膜加热试验(163 ℃,5 h)	质量变化	%	＜±1.0	0.079	合格	T0609
	残留针入度比(25 ℃)	%	＞65	91.4	合格	T0604
	残留延度(5 cm/min,5 ℃)	cm	＞15	18	合格	T0605

表2 纤维的主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of fibers

序号	纤维类型	纤维代号	长度/mm	直径/μm	模量/GPa	密度/(g·cm^{-3})	熔点/℃
1	聚酯纤维	PES	9、12、15、19	23	8.35	1.331	＞240
2	玄武岩纤维	BF	12、18	16	85.00	2.752	＞1 000
3	芳纶纤维	AR	12、19	11	96.00	1.451	＞240
4	聚丙烯纤维	PP	12、19	30	4.20	0.932	165
5	聚丙烯腈纤维	PAN	9、12、19	19	17.00	1.194	275
6	聚乙烯醇纤维	PVA	9、12、19	18	39.10	1.293	230

表3　设计级配

Table 3　Design gradation

级配类型		通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%											
		26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
选定级配		100	94.5	88	80.4	67.8	41.7	22.8	13.8	9	7.1	6.1	4.7
设计要求	上限	100	100.0	92	82.0	72.0	56.0	44.0	33.0	24	17.0	13.0	7.0
	下限	100	90.0	74	62.0	50.0	26.0	16.0	12.0	8	5.0	4.0	3.0

表4　纤维沥青混合料编号及纤维参数

Table 4　Numbers of fiber asphalt mixtures and fiber parameters

序号	编号	纤维类型	纤维长度/mm	纤维掺量/%	长径比	纤维模量/GPa
1	NO	空白组				
2	PES-1	聚酯纤维	9	0.25	412	8.35
3	PES-2	聚酯纤维	12	0.25	509	8.35
4	PES-3	聚酯纤维	15	0.25	681	8.35
5	PES-4	聚酯纤维	19	0.25	854	8.35
6	PES-2-1	聚酯纤维	12	0.20	509	8.35
7	PES-2-3	聚酯纤维	12	0.30	509	8.35
8	BF-2	玄武岩纤维	12	0.30	788	85.00
9	BF-3	玄武岩纤维	18	0.30	1 199	85.00
10	BF-2-1	玄武岩纤维	12	0.20	788	85.00
11	BF-2-3	玄武岩纤维	12	0.40	788	85.00
12	AR-1	芳纶纤维	12	0.05*	1 054	96.00
13	AR-2	芳纶纤维	19	0.05*	1 676	96.00
14	PP-1	聚丙烯纤维	12	0.05	431	4.20
15	PP-2	聚丙烯纤维	19	0.05	683	4.20
16	PAN-1	聚丙烯腈纤维	9	0.25	470	17.00
17	PAN-2	聚丙烯腈纤维	12	0.25	611	17.00
18	PAN-3	聚丙烯腈纤维	19	0.25	1 000	17.00
19	PVA-1	聚乙烯醇纤维	9	0.25	508	39.10
20	PVA-2	聚乙烯醇纤维	12	0.25	627	39.10
21	PVA-3	聚乙烯醇纤维	19	0.25	989	39.10

注:*0.05%为纤维总的掺量,芳纶纤维和聚丙烯纤维按1:3的比例混合,即芳纶纤维和聚丙烯纤维的掺量分别为0.012 5%、0.037 5%。

表5　各纤维掺量对应的最佳油石比

Table 5　Optimum asphalt-aggregate ratios corresponding to different fiber dosages

纤维掺量/%	最佳油石比/%	纤维掺量/%	最佳油石比/%
0	4.50	0.25	4.63
0.05	4.53	0.30	4.65
0.10	4.55	0.35	4.68
0.15	4.58	0.40	4.70
0.20	4.60		

先将纤维平均分为2份,先将1/3矿料倒入拌锅,然后将1份纤维均匀撒布在矿料上方,再倒入1/3矿料,将第2份纤维再均匀撒布,最后倒入剩下的矿料,进行干拌,拌和时间不少于120 s,若纤维出现大量结团,适当延长干拌时间至150 s。因拌和时间延长,将矿料加热温度提高5 ℃,为185 ℃,SBS改性沥青加热温度为175 ℃,拌锅温度为175 ℃。其余步骤和普通沥青混合料拌和方法相同。

2　试验方法和评价指标

2.1　试验方法

在进行压实试验前,首先将松散混合料在烘箱(165 ℃)短期老化2 h,而后将混合料装入试模中,为确保压实温度的一致,混合料从烘箱中取出到放置在旋转压实仪上的时间,不超过3 min,这是因为压实温度的变化对混合料压实度的影响显著[21]。

采用美国Pine公司生产的AFG2旋转压实仪,如图1所示,试模的直径为150 mm,垂直压强为600 kPa,转速为30 r/min,有效内旋转角为1.25°,试验设置的旋转压实次数为70次,试件目标高度为170 mm。当旋转压实次数或压实达到要求的试件高度时,旋转压实试验结束。成型的试件如图2所示。为保证压实系数的可靠性,表4中每个编号纤维沥青混合料均成型至少3个试件。

图1　旋转压实仪图

Figure 1　Gyratory compactor

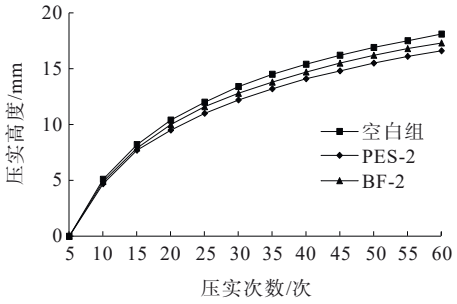
2.2　评价指标

为了探究纤维的加入对沥青混合料压实性能的影响,记录试件成型过程中试件高度和压实次数的数据。为了消除装料顶面不均匀带来的影响,以第5次压实后的试件高度为参照,计算不同压实次数下

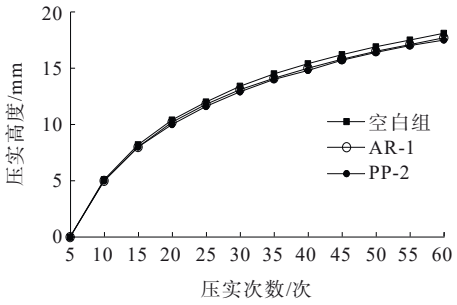
的压实高度值，如图3所示。

图2 旋转压实试件

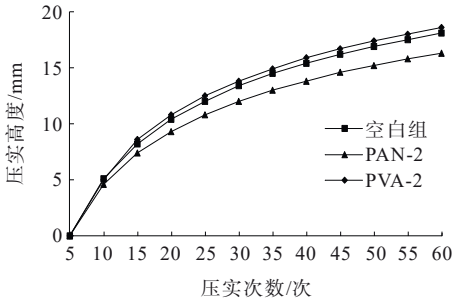
Figure 2 Gyratory compaction specimens



（a）聚酯纤维和玄武岩纤维



（b）芳纶纤维和聚丙烯纤维



（c）聚乙烯醇纤维和聚丙烯腈纤维

图3 不同类型纤维的压实次数和压实高度

Figure 3 Number of compaction passes and compaction heights of different types of fibers

由图3可知：在相同的压实次数下，不同类型纤维的压实高度不同，说明不同类型纤维的沥青混合料，在压实过程中，所需要的压实功不同。欧盟标准EN 12697-10指出，采用旋转压实法计算沥青混合料的压实系数，用以评价沥青混合料的压实性能。压实系数越大，表示达到目标空隙率所需的压实功越小。本文采用压实系数作为压实特性的评价指标。

压实次数和空隙率曲线的线性回归模型如式(1)所示，旋转压实次数与空隙率关系见图4。

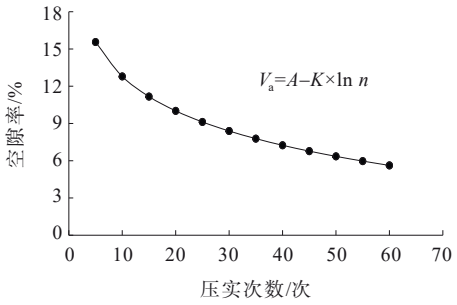


图4 压实次数和空隙率图

Figure 4 Number of compaction passes and void content

$$V_a = A - K\ln n \tag{1}$$

式中：V_a为试件空隙率(%)；A为回归常数(%)；K为压实系数(%)；n为旋转压实次数。

每组纤维沥青混合料的压实系数和回归常数的平均值分别按照式(2)和式(3)计算。

$$\bar{K} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N} K_i \tag{2}$$

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N} A_i \tag{3}$$

式中：$\bar{K}$为一个编号试件的压实系数平均值(%)；$\bar{A}$为一个编号试件的回归常数平均值(%)。

当目标空隙率V_{ob}确定后，通过每组试件的计算$\bar{K}$和$\bar{A}$估算对应压实次数N_0。

$$N_0 = e^{\frac{\bar{A} - V_{ob}}{\bar{K}}} \tag{4}$$

式中：N_0为目标空隙率需要的压实次数；V_{ob}为目标空隙率(%)。

3 纤维沥青混合料压实性能评价

3.1 基于压实系数的压实性能评价

在设计纤维沥青混合料时，参考压实系数值有利于选择出适合的纤维类型、长度和掺量。因此，本文采用压实系数来评价不同编号沥青混合料的压实性能。

根据每组旋转压实数据，按式(1)拟合压实系数K和回归常数A，计算每组压实系数的平均值、压实系数的变异系数C_V、回归常数的平均值，结果见表6。

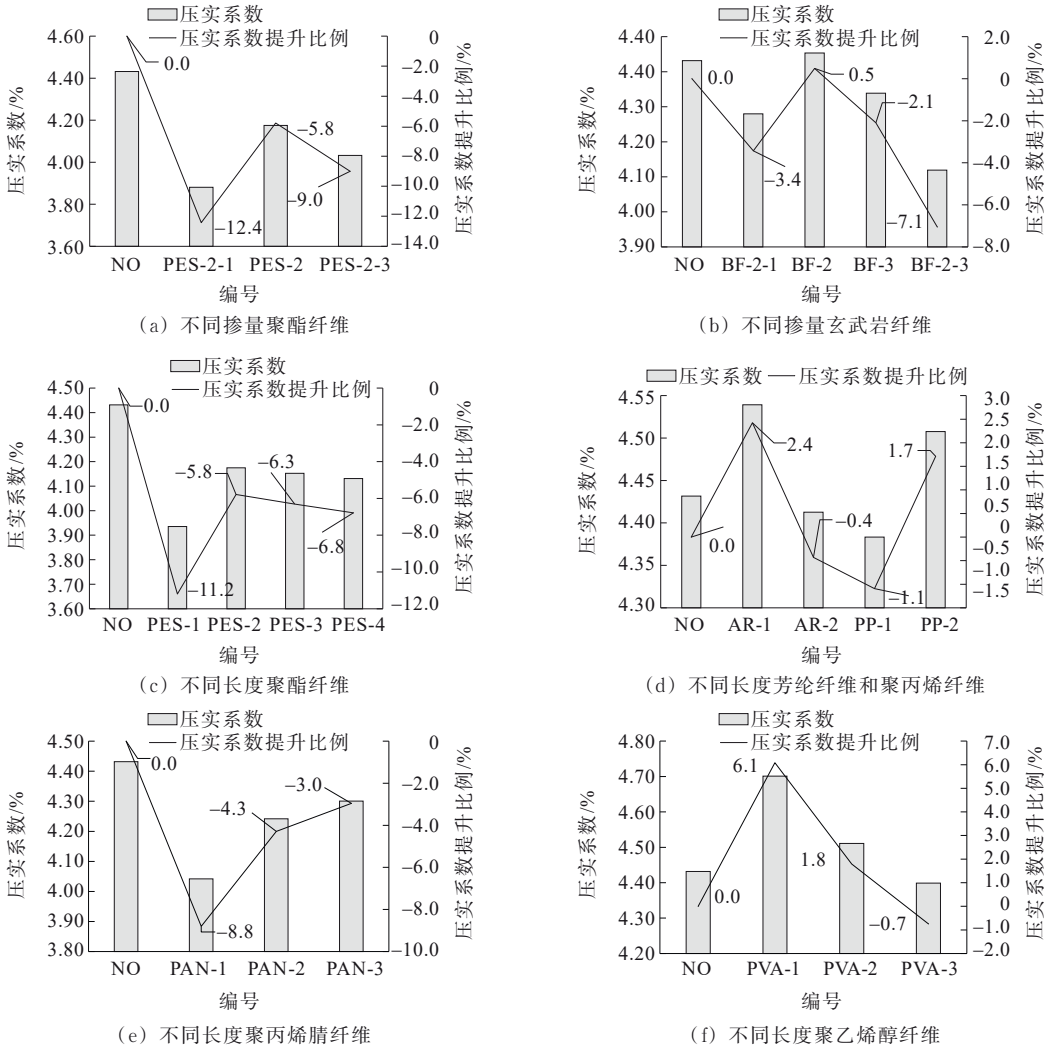
从表6可以看出：不同编号的纤维沥青混合料的压实系数为3.80%～4.70%。其中，压实系数的变异性小于3%的编号占比超过90%，表明本次试验具有良好的重复性。

不同纤维沥青混合料的压实系数如图5所示。

表6　纤维沥青混合料的压实系数

Table 6　Compaction coefficients of fiber asphalt mixtures

序号	编号	$\bar{K}$/%	C_V/%	$\bar{A}$/%	序号	编号	$\bar{K}$/%	C_V/%	$\bar{A}$/%	序号	编号	$\bar{K}$/%	C_V/%	$\bar{A}$/%
1	NO	4.43	1.4	22.31	8	BF-2	4.45	2.9	22.04	15	PP-2	4.51	2.2	22.48
2	PES-1	3.94	3.8	22.70	9	BF-3	4.34	1.2	22.27	16	PAN-1	4.04	0.9	22.61
3	PES-2	4.18	2.1	21.90	10	BF-2-1	4.28	0.5	22.29	17	PAN-2	4.24	0.0	22.06
4	PES-3	4.15	1.2	22.35	11	BF-2-3	4.12	0.4	22.55	18	PAN-3	4.30	0.8	21.81
5	PES-4	4.13	0.7	21.23	12	AR-1	4.54	0.1	22.68	19	PVA-1	4.70	1.4	21.62
6	PES-2-1	3.88	3.4	21.01	13	AR-2	4.41	0.5	22.70	20	PVA-2	4.51	1.0	22.15
7	PES-2-3	4.03	2.3	22.14	14	PP-1	4.38	2.5	22.76	21	PVA-3	4.40	0.8	22.17



(a) 不同掺量聚酯纤维　(b) 不同掺量玄武岩纤维

(c) 不同长度聚酯纤维　(d) 不同长度芳纶纤维和聚丙烯纤维

(e) 不同长度聚丙烯腈纤维　(f) 不同长度聚乙烯醇纤维

图5　不同纤维沥青混合料的压实系数

Figure 5　Compaction coefficients of different fiber asphalt mixtures

从图5(a)可知:掺入不同掺量的12 mm聚酯纤维后,压实系数均小于空白组,且随着掺量的增大先增大后减小。当掺量为0.25%时,压实系数最大。与此类似,从图5(b)可知:掺入玄武岩纤维后,压实系数随着掺量的增大先增大后减小,当掺量为0.30%时,压实系数最大。由此可见,选择合适掺量的纤维,也能减小所需的压实功。

从图5(c)可知:掺入聚酯纤维后,压实系数均小于空白组,且随着纤维长度的增大,压实系数先增大后趋于平稳。其中,纤维长度为9 mm时压实系数最小,为3.94%,比空白组的4.43%降低了11.2%,纤维长度为12 mm时,压实系数最大,为4.18%,比空白组

4.43%降低了5.8%。

从图5(d)可知:掺入芳纶纤维和聚丙烯纤维后,压实系数的变化均较小,这与纤维掺入量小有关。但是,排除聚丙烯纤维的影响,12 mm芳纶纤维的压实系数大于19 mm长度的,说明芳纶纤维越长,压实系数越小。

从图5(e)可知:掺入聚丙烯腈纤维后,压实系数均小于空白组的,且随着纤维长度的增大,压实系数逐渐增大。其中,纤维长度为9 mm时压实系数最小,为4.04%,比空白组4.43%降低了8.8%。从图5(f)可知:掺入聚乙烯醇纤维后,纤维长度为9 mm时压实系数最大,为4.70%,比空白组的4.43%提升了6.1%,随着纤维长度的增大,压实系数逐渐减小。

压实系数和纤维长度之间的变化趋势还与纤维的模量有关。根据相关资料可知,石灰岩的弹性模量为50 GPa[22],以石灰岩弹性模量的50%和1.5倍为节点,将纤维分为3类,如表7所示。A类纤维的压实系数普遍小于空白组,且随着纤维长度增大而增大;B类纤维的压实系数普遍大于空白组,压实系数随着纤维长度的增大而减小;C类纤维的压实系数与空白组接近,压实系数随着纤维长度增大而减小。

表7 纤维按模量分类

Table 7 Classification of fibers by modulus

纤维分类	弹性模量范围/GPa	纤维类型
A类	0～<25	聚丙烯纤维、聚酯纤维、聚丙烯腈纤维
B类	25～75	聚乙烯醇纤维
C类	>75	玄武岩纤维、芳纶纤维

出现上述情况的原因是,当纤维的弹性模量远大于石灰岩的弹性模量时,碾压时纤维的弹性变形量比矿料小,压实效果好,对压实过程影响小。当纤维的弹性模量远小于石灰岩的弹性模量时,碾压时纤维的弹性变形量大于矿料,压实难度增大;当纤维的弹性模量与石灰岩的弹性模量接近时,纤维和矿料同步变形,纤维越短,更容易填充进粗集料间隙中,纤维长度越长,越不容易填充进粗集料间隙中,导致压实系数增大。

从微观层面应力传递和分布的角度来看,高模量纤维通过桥接效应在集料间形成刚性连接,将压实力更均匀地传递至周围沥青和集料,减少局部应力集中;低模量纤维的应力传递效率较低,导致压实能量更多消耗于沥青黏滞流动而非颗粒密实。当纤维模量与集料接近时,应力传递效率高且容易进入集料颗粒间隙,提升了压实效率。

3.2 基于压实次数的压实性能评价

在施工阶段,压实系数过于抽象,很难确定钢轮式压路机和轮胎式压路机的碾压遍数。根据目标空隙率,计算所需的压实次数,能给施工组织提供参考。

以AC-20的目标空隙率为4.0%为例,对所需的压实次数进行研究。根据式(4)和表4中每种编号纤维沥青混合料计算的压实系数平均值$\bar{K}$和回归常数平均值$\bar{A}$,计算目标空隙率对应的压实次数,如图6所示。

根据AASHTO R35[23],当量累计轴载作用次数0.3×10^6～3×10^6次对应的是《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中的轻交通等级,设计旋转压实次数为75次,最大旋转压实次数为115次。如图6所示,PES-1、PAN-1所需的压实次数均超过了100次,说明压实困难,因此建议选用聚酯纤维或聚丙烯腈纤维时,长度应大于最大公称粒径的一半。

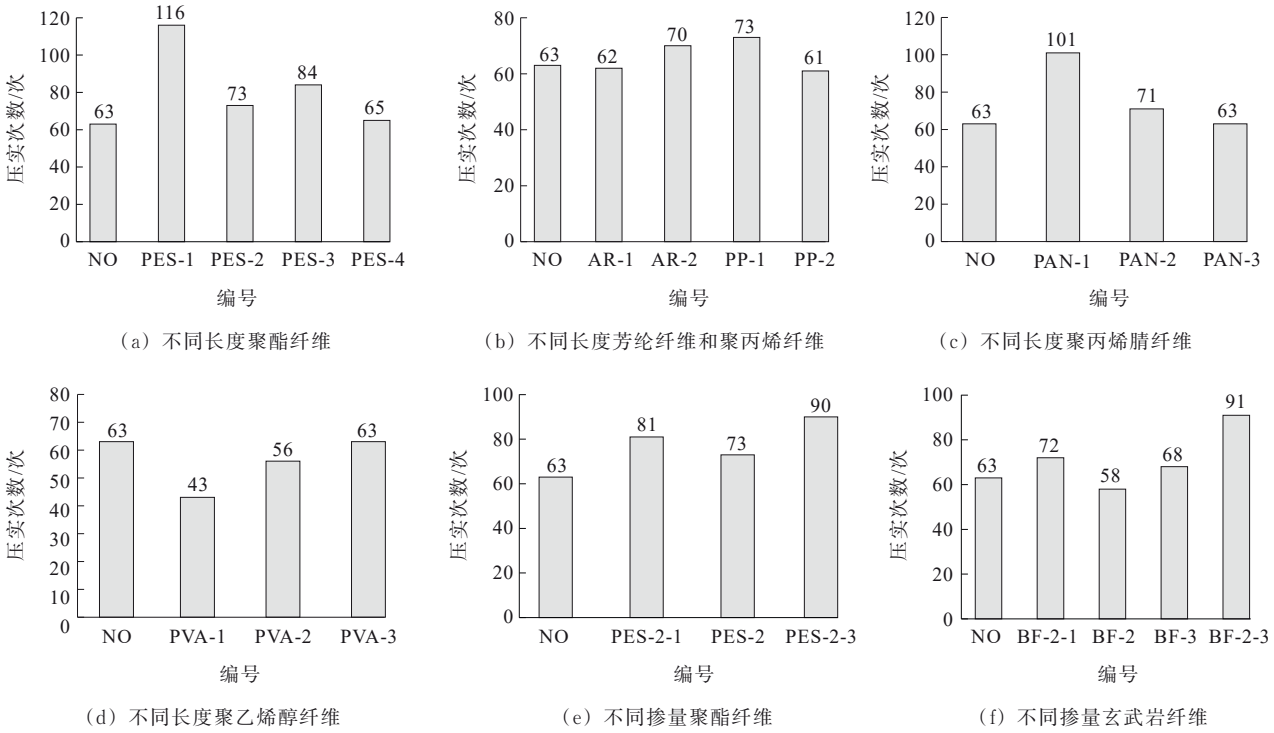
分析纤维的长度对压实次数的影响,从图6(a)可见:掺入聚酯纤维后,压实次数均大于空白组,且随着纤维长度的增大,压实次数呈降低趋势。其中,纤维长度为9 mm时,压实次数最大,为116次,远大于空白组压实次数63次;从图6(b)可知:芳纶纤维越长,对应的压实次数越大;聚丙烯纤维越长,压实次数越小;从图6(c)可知:聚丙烯腈纤维越长,压实次数越小,特别地,长度为9 mm时,压实次数高达101次;从图6(d)可见:聚乙烯醇纤维长度越长,压实次数越大,特别地,当长度为9 mm时,压实次数为43次。

从图6(e)、图6(f)可见:聚酯纤维掺量为0.25%或者玄武岩纤维掺量为0.30%时,压实次数最小,最容易压实。

4 结论

压实性能作为沥青路面耐久性能的核心控制指标,本文基于旋转压实试验,量化了纤维特性对压实系数及目标空隙率对应的压实次数的影响规律。研究成果可为纤维选型与施工工艺参数设计提供理论依据。主要结论如下:

(1)纤维弹性模量是影响压实性能的主要因素,当纤维弹性模量显著低于集料模量(石灰岩50 GPa)时,如聚酯纤维和聚丙烯腈纤维的弹性模量分别为8.35 GPa和17 GPa,应力传递效率低,压实系数降幅



(a) 不同长度聚酯纤维　(b) 不同长度芳纶纤维和聚丙烯纤维　(c) 不同长度聚丙烯腈纤维

(d) 不同长度聚乙烯醇纤维　(e) 不同掺量聚酯纤维　(f) 不同掺量玄武岩纤维

图6　不同类型纤维目标空隙率对应的压实次数

Figure 6　Number of compaction passes corresponding to target void content of different types of fibers

分别为5.6%、4.3%;当纤维弹性模量显著大于集料模量时,如芳纶纤维和玄武岩纤维的弹性模量分别为96 GPa和85 GPa,应力传递效率高,压实系数增幅分别为2.4%、0.5%;当纤维弹性模量接近集料模量时,如聚乙烯醇纤维弹性模量为39.1 GPa,纤维的应力传递效率高且起到填充空隙作用,压实效率增幅高达6.1%。

(2) 纤维长度对压实系数的影响受弹性模量调控,低模量纤维,越长压实系数越大,如聚丙烯腈纤维,纤维长度为19 mm的压实系数比12 mm时增加6.4%;高模量纤维,越短压实系数越大,如芳纶纤维,纤维长度为12 mm的压实系数比19 mm时提升了2.9%。

(3) 纤维掺量对压实系数的影响不是线性的,存在临界掺量,临界掺量时压实系数最大,如12 mm的聚酯纤维和玄武岩纤维,分别在2.5%和3.0%时,压实系数最大。

(4) 在施工阶段,目标空隙率4%对应的不同类型纤维的压实次数,从小到大排序分别为:聚乙烯醇纤维、玄武岩纤维、聚丙烯纤维、芳纶纤维、空白组、聚丙烯腈纤维、聚酯纤维,前4种纤维对碾压过程不提出要求,而聚丙烯腈纤维和聚酯纤维需要增加碾压次数或提升压实设备功率。

参考文献:

References:

[1] 梁波,张海涛,刘政,等.纤维改性沥青混合料性能研究进展[J].中外公路,2023,43(3):1-16.
LIANG Bo, ZHANG Haitao, LIU Zheng, et al. Research progress on properties of fiber modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 1-16.

[2] 朱洪洲,谭祺琦,杨孝思,等.纤维改性沥青混合料性能的研究现状与展望[J].科学技术与工程,2022,22(7):2573-2584.
ZHU Hongzhou, TAN Qiqi, YANG Xiaosi, et al. Research status and prospect of fiber modified asphalt mixture performance[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7): 2573-2584.

[3] 李振霞,陈渊召,周建彬,等.玉米秸秆纤维沥青混合料路用性能及机理分析[J].中国公路学报,2019,32(2):47-58.
LI Zhenxia, CHEN Yuanzhao, ZHOU Jianbin, et al. Analysis of road performance and fiber mechanism for corn stalk fiber asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 47-58.

[4] 荀家正,封基良.纤维增强沥青混合料低温性能及增强机理试验[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(7):45-49.
XUN Jiazheng, FENG Jiliang. Experimental study on low temperature properties and enhancement mechanism of fiber reinforced asphalt mixture[J]. Design and Test, 2016, 33(7): 45-49.

[5] LI J, SU Z B, HUANG J X, et al. Performance of biomimetic coating modified fiber incorporated styrene

butadiene styrene modified asphalt[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(10): 49967.

[6] 李俊峰, 李文凯, 李正强, 等. 玄武岩纤维排水高黏沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(9): 1-8.
LI Junfeng, LI Wenkai, LI Zhengqiang, et al. Study on performance of basalt fiber porous high viscosity asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(9): 1-8.

[7] 吴靖江, 张聪, 吴正光, 等. 玄武岩纤维沥青混合料高温性能研究[J]. 公路, 2022, 67(7): 9-13.
WU Jingjiang, ZHANG Cong, WU Zhengguang, et al. Research on high temperature performance of basalt fiber asphalt mixture[J]. Highway, 2022, 67(7): 9-13.

[8] 赵阳, 贾晓东, 梁乃兴, 等. 基于分散技术的聚乙烯醇纤维沥青胶浆疲劳性能分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13886-13892.
ZHAO Yang, JIA Xiaodong, LIANG Naixing, et al. Fatigue performance analysis of polyvinyl alcohol fiber asphalt mortar based on dispersion technology[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(32): 13886-13892.

[9] 张伟, 张钊, 曹晖, 等. 表面预处理PVA纤维改性沥青的高温流变特性[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(4): 409-416.
ZHANG Wei, ZHANG Zhao, CAO Hui, et al. High temperature rheological properties of surface pretreated PVA fiber modified asphalt[J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2022, 39(4): 409-416.

[10] 刘福明, 吴迪, 何庆德, 等. 纤维稳定剂对排水沥青混合料抗水温循环损伤能力的影响[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 194-198.
LIU Fuming, WU Di, HE Qingde, et al. Study on effect of fiber stabilizers on water temperature cycle damage resistance of drainage asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 194-198.

[11] 顾晓燕, 高剑飞, 李惠翔. 聚酯纤维用于环氧树脂沥青混合料增柔及增韧技术研究[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 247-250.
GU Xiaoyan, GAO Jianfei, LI Huixiang. Study on technology of toughening and toughening of epoxy resin asphalt mixture with polyester fiber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 247-250.

[12] COMINSKY R, LEAHY R B, HARRIGAN E T. Level one mix design: Materials selection, compaction, and conditioning[R]. Washington: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.

[13] BSI. EN 12697-10:2017 Bituminous mixtures–Test methods–Compactability[S]. London: BSI, 2017.

[14] SANTAGATA E, BASSANI M. Full-scale investigation on the volumetric relationship between laboratory and in-situ compaction[C]//Thessaloniki, Greece: Proceedings of the 3rd International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, 2002.

[15] YUCEL A O. An evaluation of the cracking resistance of steel and glass-fiber-reinforced asphalt mixtures produced at different temperatures[J]. Sustainability, 2023, 15(18): 13356.

[16] TAPKIN S. Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 399-410.

[17] WANG W S, CHENG Y C, ZHOU P L, et al. Performance evaluation of styrene-butadiene-styrene-modified stone mastic asphalt with basalt fiber using different compaction methods[J]. Polymers, 2019, 11(6): 1006.

[18] TORALDO E, MARIANI E, MALVICINI S. Laboratory investigation into the effects of fibers on bituminous mixtures[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 21(1): 45-53.

[19] GIUSTOZZI F, CRISPINO M, TORALDO E, et al. Mix design of polymer-modified and fiber-reinforced warm-mix asphalts with high amount of reclaimed asphalt pavement: Achieving sustainable and high-performing pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2523(1): 3-10.

[20] 林志明. 纤维沥青混合料的抗裂性能和设计方法研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究所, 2024.
LIN Zhiming. Research on cracking resistance and design method of fiber reinforced asphalt mixture[D]. Beijing: Ministry of Transport, Highway Research Institute, 2024.

[21] 朱慧芳, 王亮. 沥青路面智能压实及其关键影响因素研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 47-55.
ZHU Huifang, WANG Liang. Intelligent compaction of asphalt pavement and its key influencing factors[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 47-55.

[22] 刘明攀, 邵玉, 夏雨, 等. 花岗岩与石灰岩骨料混凝土性能对比研究[J]. 混凝土世界, 2024(4): 25-28.
LIU Mingpan, SHAO Yu, XIA Yu, et al. Comparative study of concrete performance between granite and limestone aggregates[J]. China Concrete, 2024(4): 25-28.

[23] AASHTO. Standard practice for superpave volumetric design for asphalt mixtures: AASHTO R35[S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022.