

# 基于 PCG 的 GB4 沥青混合料旋转压实特性研究

蒋勇<sup>1</sup>, 马华宝<sup>2,3\*</sup>, 孟会林<sup>2,3</sup>, 周兴业<sup>4</sup>

(1. 中国路桥工程有限责任公司, 北京市 100011; 2. 河北省交通规划设计院;  
3. 交通运输行业公路建设与养护技术材料及装备研发中心; 4. 交通部公路科学研究院)

**摘要:**PCG 旋转压实试验是法标沥青混合料四级试验关键的第一步, 该文结合实体工程需求, 基于 PCG3 旋转压实设备, 对法标中 GB4 沥青混合料的压实特性进行了研究。通过 A、B、C 3 种级配的旋转压实试验, 提出了 GB4 沥青混合料最佳油石比的确定方法, 分析了级配类型、胶结料类型及胶结料用量对混合料压实特性的影响, 并对 PCG 的适用性以及试验方法的改进进行了探讨。

**关键词:**PCG3; 旋转压实特性; 最佳油石比; 级配类型; 胶结料类型

## 1 前言

以塞内加尔捷斯图巴高速公路工程(简称 TT 高速)为研究背景, 与以往在非洲地区承建的公路工程项目不同, TT 高速是项目公司承担的第一条完全按照法标设计、施工、监理的高速公路项目, 对工程质量、技术指标有着很高要求。捷斯图巴项目的路面结构层为 24 cm 的 GB4 和 12 cm 的 BBSG3, 均要满足法标中四级试验的要求, 即 PCG 旋转压实、多烈土水稳定性试验、一定空隙率下的车辙变形率、动态模量以及两点弯

曲疲劳。

与中国习惯的马歇尔设计法相比, 法国的沥青混合料设计方法具有几个突出特点: ① 法标非常重视沥青混合料的耐久性, 早期法标中规定的丰度系数  $K$ , 以及现行法标、欧标中的经验设计中的最低沥青用量和对疲劳应变的要求, 就是要保障沥青混合料的疲劳性能, 即耐久性; ② 法标的沥青混合料级配多使用悬浮密实型结构, 且对级配范围的要求较为宽松, 沥青稳定碎石 GB、高模量沥青混凝土 EME、半粗式沥青混凝土 BBSG 等沥青混合料大多使用连续式级配、悬浮密实型结构, 细集料的含量接近一半; ③ 法标广泛采用

- \*\*\*\*\*
- [8] 王江营, 曹文贵, 张超, 等. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(10).
- [9] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite Element Analyses of Retaining Wall Behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(12).
- [10] DESAI C S, MA Y. Modelling of Joint and Interfaces Using the Disturbed — State Concept[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(9).
- [11] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面三维本构关系及数值模型[J]. 岩土力学, 2007(2).
- [12] 曹文贵, 王江营, 翟友成. 考虑残余强度影响的结构面与接触面剪切过程损伤模拟方法[J]. 土木工程学报, 2012(4).

- [13] LEMAITRE J. How to Use Damage Mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(3).
- [14] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] SL 237—1999 土工试验规程[S].
- [16] KRAJCINOVIC D, SILVA M A G. Statistical Aspects of the Continuous Damage Theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 1982, 18(7).
- [17] 曹文贵, 张超, 贺敏, 等. 考虑空隙压密阶段特征的岩石应变软化统计损伤模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2016(10).
- [18] ZHAO H, ZHANG C, CAO W G, et al. Statistical Meso—Damage Model for Quasi—Brittle Rock to Account for Damage Tolerance Principle[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(10).

收稿日期: 2020—03—07(修改稿)

作者简介: 蒋勇, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: jiangy1@crbc.com

\* 通信作者: 马华宝, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 328882300@qq.com

体空隙率作为混合料设计、性能试验以及施工检验的依据。

目前中国使用的旋转压实仪以 SGC、GTM 以及澳大利亚旋转压实仪为主,PCG3 旋转压实仪作为法国 LCPC 研发的最新一代旋转压实设备,在中国国内使用还比较少。PCG 旋转压实试验作为法标四级试验体系的第一步,主要用于对选定级配进行旋转压实特性分析,根据不同级配类型对给定旋转次数下混合料的体积空隙率要求,初步确定最小油石比,在整个沥青混合料设计流程中起着至关重要的作用。

该文结合现场工程需求,基于 PCG3 旋转压实设备,对法标中 GB4 沥青混合料的压实特性进行研究,一方面对影响沥青混合料旋转压实特性的因素进行分析;另一方面,积累法标级配设计经验,并与中国沥青混合料设计体系相结合,为今后类似的工程提供借鉴。

2 试验情况

2.1 试验设备

采用法国的 PCG3 沥青混合料旋转压实仪进行试验,PCG3 主要由压力机、微型计算机、角度调整装置、测力装置、装卸绞盘、圆筒试模、圆形上下压盘等组成。PCG3 旋转压实仪的基本原理:旋转压实过程中,机械压头对试样施加轴向压力  $F$ ,试模的轴线以作用力  $F$  的方向为中心做圆锥曲面运动,由此对试件产生同步的剪切力,模拟现场压实中的揉搓作用,设备及工作示意图见图 1。PCG3 的有效内部旋转角为  $(0.82 \pm 0.02)^\circ$ ,采用  $\phi 150$  mm 试模时,压力取 11 700 N。

2.2 试验材料

试验采用工程中使用的 ERES 品牌 35/50 和 20/30 沥青,两种沥青的主要技术指标检测结果见表 1。试验结果表明:两种沥青的针入度、软化点满足法标要求,但 35/50 沥青的针入度数值偏高。

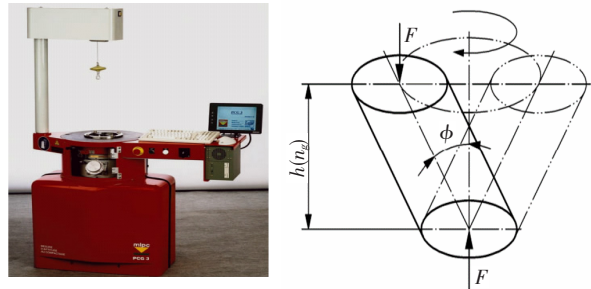


图 1 PCG3 旋转压实仪及工作原理示意图

试验采用项目现场运回的塞内加尔石料,石料有如下 3 个特点:① 矿料的密度较大,表观密度接近  $3.0 \text{ g/cm}^3$ ;② 矿料的吸水率较大,1 mm 以下矿料的吸水率大于 2%;③ 矿料中扁平料形的石料较多。

2.3 试验方案

按照法标级配设计要求,并结合中国沥青混合料设计经验,调整了 GB4—A/B/C 3 种级配,不同级配的各筛孔通过率如表 2 所示。为保证试验的可靠性,采取单档配料的方式,每个级配试验采用 5 个油石比,每个油石比制备 4 个试件。

表 1 沥青主要性能指标测试结果

试验项目	单位	20/30 沥青	35/50 沥青
针入度(25 ℃,5 s,100 g)	0.1 mm	24	45
针入度指数 $PI$		2.1	0.1
直线回归相关系数 $R$		0.999 5	0.997 2
当量软化点(公式计算法)	℃	76.6	56.4
当量脆点(公式计算法)	℃	-18.9	-14.8
15 ℃ 延度	cm	5	26
10 ℃ 延度	cm	3	8
软化点(环球法)	℃	63.5	54.5
60 ℃ 动力黏度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	3 445	434
蜡含量(蒸馏法)	%	1.3	1.3
闪点(开口杯法)	℃	318	295
溶解度	%	99.54	99.63
密度(25 ℃)	$\text{g/cm}^3$	1.025	1.042
密度(15 ℃)	$\text{g/cm}^3$	1.031	1.046
质量变化	%	-0.012	-0.052
TFOT 后	残留针入度比	83	71
	残留延度(10 ℃)	1	5
	残留延度(15 ℃)	4	8

3 结果与讨论

3.1 PCG 试验结果

采用 PCG3 旋转压实仪成型  $\phi 150$  mm 试件,旋转次数均为 120 转,35/50 沥青混合料成型温度为  $155 \sim 160$  ℃,20/30 沥青混合料成型温度为  $170 \sim 175$  ℃,PCG 试验的结果如表 3 所示。

对 GB4—A/B/C 3 种水平的混合料,法标要求旋转次数 120 次时,试件的体积空隙率应小于 9%,从表 3 可以看出:GB4—A 级配在 4.4% 油石比下即可满足

表 2 GB4 不同级配各筛孔通过率

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	100	99.9	92.9	82.1	75.9	66.9	47.5	37.0	25.3	17.6	12.9	9.8	6.7
B	100	100	79.2	70.2	61.4	48.7	30.0	22.2	16.4	12.3	9.1	6.7	5.0
C	100	100	90.7	78.0	68.1	54.8	30.2	20.2	14.6	11.3	8.9	7.1	5.2

表 3 PCG 试验结果

混合料类型	油石比/ %	旋转 120 次时体积 空隙率/%
GB4—A+35/50	3.8	12.1
	4.1	10.0
	4.4	9.0
	4.7	8.3
	5.0	7.4
GB4—A+20/30	3.8	10.5
	4.1	9.5
	4.4	7.2
	4.7	6.6
	5.0	5.5
GB4—B+35/50	3.1	15.2
	3.5	13.5
	3.9	12.8
	4.3	11.7
	4.7	9.7
GB4—C+35/50	3.5	14.3
	3.9	14.1
	4.3	13.4
	4.7	10.9
	5.1	10.7

法标旋转压实特性的要求,而 GB4—B 和 GB4—C 级配在油石比为 5%左右时仍不能满足要求,而此时无论从拌和过程及最终成型试件的状态来看,这两种混合料均呈现明显的富油状态,显然不能再增加用油量,因此可判断 GB4—B 和 GB4—C 级配不能满足法标对其旋转压实特性的要求。

此外,从试验过程中的混合料状态及最终压实空隙率可以看出:在单档配料的情况下,沥青混合料温度的均匀性对压实结果有较大影响,适当提高混合料的拌和及压实温度可有效提高成型试件的密实程度。

3.2 GB4 沥青混合料最佳油石比的确定

对于 GB4 沥青混合料最佳油石比的确定,法标中并没有明确规定,或者说作为四级试验的第一步,PCG 旋转压实得到的只是满足压实特性要求和最小丰度系数的最小油石比,而并不代表沥青混合料达到了最密实的状态。而最终合适的油石比还要根据之后三级试验的结果,尤其是模量疲劳的结果进行调整,这就导致在油石比的选择上存在一定的盲目性,且整个试验周期过长。

中国学者近几年的研究认为,对于一种固定矿料和级配的混合料,在某一标准的压实功作用下,油石比不断变化过程中,混合料应存在,且唯一存在一种最紧密状态。即当混合料的油石比较小时,混合料中的矿料之间存在一种排列状态,随着油石比逐渐增加,沥青在矿料间润滑作用逐渐增加,导致矿料间的排列状态越来越紧密,而出现一个最为紧密的状态,但随着沥青进一步的添加,矿料中自由沥青偏多,导致矿料间的紧密状态被逐渐撑开。研究认为,当矿料结构被撑开之前的状态为混合料的最紧密状态,此时对应的油石比为混合料最紧密状态下的最佳油石比。

基于集料最紧密嵌挤状态的沥青混合料油石比确定方法,其核心原理是:研究发现沥青混合料的干密度、矿料间隙率 VMA、粗集料矿料间隙率 VCA 与油石比具有良好的相关性,随着油石比的增加,干密度先增加后减小,同时 VMA 和 VCA 先减小后增加,可以通过二次曲线回归分析,利用二次曲线极值唯一的特点求得曲线极值点对应的油石比,该油石比下混合料对应着集料之间相互嵌挤的最紧密状态。

以满足法标旋转压实特性要求的 GB4—A 为例,根据 120 次旋转后试件体积空隙率小于 9%,以及最小丰度系数 2.9 的要求,确定的最小油石比为 4.36%,而根据最紧密状态原理得到的最佳油石比为 4.52%。从最终的疲劳试验结果看,4.52%的油石比满足法标要求,而 4.36%则不满足,说明处于最紧密状态的混合料,其综合耐久性能更能接近目标要求,因此在确定 GB4 沥青混合料的最佳油石比时,可将上述

3 个限制条件综合考虑,以得到相对合理的数值。

3.3 级配类型对 GB4 沥青混合料压实特性的影响

(1) GB4-A 级配:完全符合法标要求,其特点:  
① 粗集料含量较少,细集料含量较高,以 5 mm 为界(中国一般以 4.75 mm 为界),5 mm 以上的碎石含量仅 51.6%;  
② 虽然为 0/20 型级配,但仍使用一定比例的 16/25 规格的矿料,20 mm 以上的粗碎石有 4% 左右。

(2) GB4-B 级配:是按照粗集料断级配的级配构成原理对 GB4-A 进行优化级配,按照三控制点、双曲线模式构造出来的;4.75 mm 通过率 30%,相当于法国 5 mm 通过率 31.1%,以 5 mm 作为级配中粗、细集料的分界点,与 GB4-A 级配相比,GB4-B 粗集料含量增加约 17%。

(3) GB4-C 级配:是以 GB4-B 的优化级配为基础,按照实际各档矿料级配掺配而成的级配,其碎石含量和矿粉含量基本保持不变。

从级配类型上看,3 种级配的主要区别是粗集料含量的不同,GB4-A 属于典型的连续级配,而 GB4-B 和 GB4-C 则属于粗集料断级配。虽然从试验结果来看,GB4-B 和 GB4-C 不满足法标要求,但是同样的级配,当采用 SGC 进行压实,则完全能满足空隙率要求,这就让人不禁产生疑问,是不是 PCG3 压实功不足,并不适用于评价粗集料断级配的压实特性。但根据近几年应用 PCG3 的经验,PCG3 在采用规格较好、料形合理的石料进行粗集料断级配压实时,是可以满足法标对压实特性要求的,而如果采用料形较差、针片状含量较高的石料,或相邻两档石料干涉较为严重时,连续级配也不一定能满足压实空隙率的要求。

综上可认为:级配的 5 mm(4.75 mm)和 20 mm 通过率对 GB4 沥青混合料的压实特性影响明显;如果使用料形较差、针片状含量较高的石料,或相邻两档石料干涉较为严重时,采用 PCG3 进行级配压实特性分析并不一定合适,尤其是针对粗集料断级配,这种混合料粗集料之间的摩擦力较大,要形成良好的骨架嵌挤结构,需要较大的压实功,而此时 PCG 可能存在压实功较小的问题,不足以促使这种混合料形成良好的、密实的骨架嵌挤结构。

3.4 胶结料类型及用量对 GB4 沥青混合料压实特性的影响

一般认为,法标采用的连续悬浮密实型级配提高了混合料的密实性,相对较多的细集料含量增加了沥青用量,进而带来了更好的疲劳性能,而其连续型级配

抗车辙能力的天然不足又被低标号沥青所带来的高温稳定性所弥补,因此法标的 GB4 在混合料密实性、耐疲劳性能、抗车辙能力之间达成了良好的协调性。针对工程中使用的 35/50 和 20/30 沥青,对其表面能与塞内加尔石料的黏附功进行了对比,具体见表 4、5。

表 4 20/30、35/50 沥青与塞内加尔石料的表面能

试验材料	表面能/ (mJ · m <sup>-2</sup> )	色散分量/ (mJ · m <sup>-2</sup> )	极性分量/ (mJ · m <sup>-2</sup> )
20/30 沥青	20.9	18.3	2.7
35/50 沥青	15.0	12.8	2.2
塞内加尔石料	64.8	21.8	43.0

表 5 20/30、35/50 沥青与塞内加尔石料的黏附功

沥青种类	与塞内加尔石料的黏附功/(mJ · m <sup>-2</sup> )	
	无水	有水
20/30	20.9	18.3
35/50	15.0	12.8

结果表明:20/30 沥青的黏附性要明显好于 35/50 沥青。而从旋转压实结果中也可以看出,对于相同级配的混合料,当采用 20/30 代替 35/50 沥青后,由于沥青与石料的黏附性提高,混合料的最佳油石比增加 0.37%,试件空隙率降低约 0.5%,矿料间隙率增加约 0.72%,饱和度增加约 4.6%,由此看来,当采用 20/30 沥青替代 35/50 沥青,对混合料的体积指标影响是显著的。

图 2 为各级配 PCG 试件体积空隙率随油石比变化的趋势图。

从图 2 可以看出:采用 20/30 沥青时,GB4-A 级配试件的体积空隙率随着油石比的增大逐渐减小,采用 35/50 沥青时,在油石比 4.4% 以上时满足旋转压实特性的要求,油石比 4.7% 以后空隙率变化不大;GB4-B 级配试件的体积空隙率随着油石比的增大逐渐减小,但油石比达到明显富油的 4.7% 时,仍不满足旋转压实特性的要求;GB4-C 级配试件的体积空隙率在油石比 4.0% 以上时变化不大,为 4.0%~4.7% 时随油石比的增大逐渐减小,4.7% 以后空隙率基本不再变化。因此,可以认为采用连续级配时,在一定范围内,GB4 沥青混合料的体积空隙率随油石比增大而逐渐减小,采用粗集料断级配时,则可能出现“台阶”式的特殊情况。

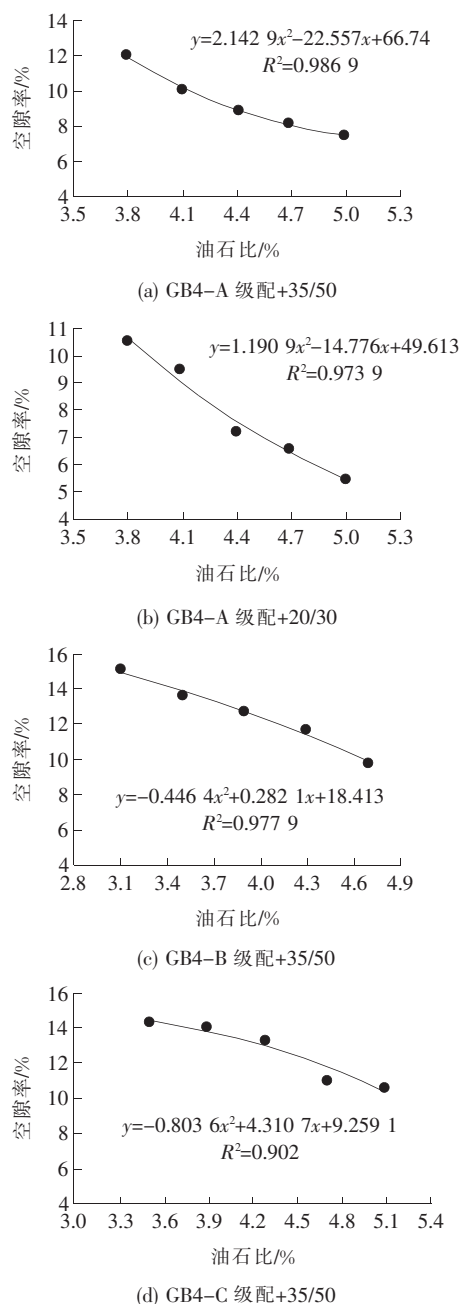


图2 GB4各级配试件体积空隙率随油石比变化趋势图

## 4 结论

(1) PCG 旋转压实得到的只是满足压实特性要求和最小丰度系数的最小油石比,而并不代表沥青混合料达到了最密实状态,可结合最紧密状态原理,综合计算最佳油石比。

(2) 级配的 5 mm(4.75 mm)和 20 mm 通过率对 GB4 沥青混合料的压实特性影响明显;如果石料料形较差,针片状含量较高,或相邻两档石料干涉较为严重时,采用 PCG3 进行级配压实特性分析,尤其是针对粗集料断级配,可能存在压实功较小的问题。

(3) 采用 20/30 代替 35/50 沥青后,对混合料的体积指标影响显著,混合料的最佳油石比增加 0.37%,试件空隙率降低约 0.5%,矿料间隙率增加约 0.72%,饱和度增加约 4.6%。

(4) 采用连续级配时,在一定范围内,GB4 沥青混合料的体积空隙率随油石比增大而逐渐减小,采用粗集料断级配时,则可能出现“台阶”式的特殊情况。

法国的沥青混合料设计虽自成体系,但也是根据数十年来的经验演变总结而来,中国工程师们在应用法标的过程中,还需要理清方法与指标的来龙去脉,并根据实际工程的特点,与中国的沥青混合料设计经验相结合,以更好地实现中法标准的融合。

## 参考文献:

- [1] 法国 RST“沥青混合料的设计”工作组,江苏省交通科学研究院股份有限公司. 法国沥青混合料设计指南[Z], 2010.
- [2] European Standard (French Standard). NF EN 13108-1-2007. Bituminous Mixtures - Material Specification - Part 1: Asphalt Concrete[S]. Paris: AFNOR, 2007.
- [3] Corté, J-F. Development and Uses of Hard Grade Asphalt and of High Modulus Asphalt Mixes in France[C]. Perpetual Bituminous Pavements - Part 1, Washington: TRB, 2001.
- [4] Virginia Transportation Research Council. Design of a High-Binder High-Modulus Asphalt Mixture[R], 2006.
- [5] 河北省交通规划设计院. 高模量沥青混合料组成设计优化研究[R], 2016.
- [6] P. J. Sanders, M. Nunn. The Application of Enrobé a Module Elevé in Flexible Pavements[R], 2005.
- [7] 黄优,刘朝晖,王旭东,等. 基于骨架最紧密状态的沥青混合料配合比设计方法[J]. 中外公路, 2016(5).
- [8] 彭勇,范亮平,周建华,等. 集料分布状态及其与沥青混合料性能研究进展[J]. 中外公路, 2014(4).