

低温环境施工中沥青路面材料组成设计

滕继达

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要:为解决热拌沥青混合料在低温环境下难以压实,确保沥青路面的施工质量,基于沥青混合料的压实机理,结合沥青温拌技术,进行沥青路面材料组成设计研究。利用旋转压实成型方法,通过不同矿料级配组成、不同沥青含量以及温拌剂对沥青混合料压实特性的影响研究,构建出具有易于压实特性及良好的路用性能的沥青混合料。这种混合料骨架分界筛孔通过率为 35.7%,油石比 4.5%,同时掺入表面活性型温拌剂,可使沥青路面的施工温度降低 13℃。本研究成果可为沥青路面的低温施工提供科学的材料组成设计方法和理论支持,降低生产能耗及施工过程中的环境污染,有助于提高沥青路面的施工质量和使用寿命。

关键词: 沥青路面; 低温施工; 压实特性; 温拌剂

0 引言

在道路建筑施工中,沥青混合料作为路面材料被广泛应用。由于其良好的力学性能、耐久性和防滑性,能有效抵御车辆载荷和气候变化的挑战。但沥青混合料展现出明显的黏温敏感性,这一特性导致沥青混合料在不同温度下的施工性能和路用性能差异显著。在高温条件下,沥青混合料易于摊铺和压实。然而,在低温环境中,沥青混合料的施工难度显著增加,容易出现离析和压实度不足等问题,进而导致路面早期损害。JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》规定沥青路面不得在气温低于 10℃(高速公路和一级公路)或 5℃(其他等级公路),以及雨天、路面潮湿的情况下施工。但由于工程建设的实际需求,有时必须在温度低、运距远等不利条件下进行路面施工。在较低的温度下如何保证沥青路面的压实质量是道路建筑中的一大挑战,为此,不少学者进行了深入研究。周书友等^[1]借助 Pavement 软件计算摊铺后沥青混合料的降温曲线,并以有效碾压时间 30 min 和容许最低碾压温度作为临界条件,确定了低温施工措施。王璟等^[2]针对低温条件下施工工况,从碾压机理入手,提出了新式组合式碾压工艺,显著提高沥青路面的施工质量。本文从沥青混合料的压实机理出发,通过对比分析不同矿料级配组成、不同沥青用量及温拌剂对沥青混合料压实特性的影响,采用沥青混合料温拌技术,得到了具有优良压实特性的沥青混合料材料组成,

可以有效地降低沥青路面的施工温度,保证路面施工质量。

1 沥青混合料压实机理

沥青混合料是由适当比例的粗集料、细集料及填料组成的符合规定级配的矿料,与沥青结合料拌和、压实后剩余空隙率小于 10%的混合料;沥青混合料的压实过程是利用重型机械对摊铺开的沥青混合料进行反复碾压,减少沥青的空隙,使得各种颗粒更加紧密结合,形成一道密实的沥青路面层同时保证压实度和平整度达到规范要求。碾压的最终目的是保证沥青混合料达到适宜的空隙率,使路面具有良好的路用性能及耐久性能。路面在高温压实的过程中,沥青可以起到润滑作用,使粗、细集料更容易找到自己合适的位置,形成适宜的骨架结构,合理的矿料级配以及适宜的沥青用量可以使混合料在相同的温度及压实功的作用下,保证沥青混合料性能的同时获得易于碾压的特性^[3-6]。

2 温拌剂作用机理

温拌剂常被用于隧道中的路面铺筑,通过降低施工温度减少烟尘排放,达到节能环保的目的,在西宝改扩建工程及宝鸡过境公路沥青路面试验段铺筑过程中,采用温拌沥青技术,在 0~10℃低温施工条件下仍可以满足路面施工的压实效果,沥青混合料的水稳定性与高低温性能均满足规范要求,路用性能良好。温拌剂是一种添加到沥青或沥青混合料中,通过物理或化学作用,使沥青

混合料能在相对较低的温度下正常施工，满足热拌沥青混合料技术要求的添加剂^[3]。常用的温拌剂分为降黏型温拌剂和表面活性剂型温拌剂。降黏型温拌剂通过改变沥青分子间的相互作用力，降低沥青在热拌施工温度附近的黏度，使其在较低的温度下仍能保持良好的流动性，实现较低温度下施工、顺利压实。表面活性剂型温拌剂以表面

活性剂为主要材料，通过降低沥青表面张力，使沥青更容易润湿集料表面，实现温拌效果^[7-9]。

3 试验材料及方案

3.1 原材料

1) 沥青
采用产自盘锦的 SBS(I-C)类聚合物改性沥青，具体参数见表 1。

表 1 SBS(I-C)类聚合物改性沥青技术参数

针入度/(0.1 mm)	针入度指数 PI	5 ℃延度/cm	软化点/℃	闪点/℃	弹性恢复率/%	135 ℃表观黏度/(Pa·s)	储存稳定性离析(48 h 软化点差)/℃	溶解度/%
66	0.91	42	76.0	245	94.0	2.104	2.0	99.75

2) 粗集料
采用产自金州龙王的石灰岩碎石，碎石规格为 10~20 mm 碎石、10~15 mm 碎石、5~10 mm 碎石，具体参数见表 2。

表 2 粗集料技术参数

规格/mm	针片状颗粒含量/%	水洗法<0.075 mm 颗粒含量/%	软石含量/%	石料压碎值/%	坚固性/%	吸水率/%
10~20	4.7	0.9	1.6	—	1	0.6
10~15	4.6	0.6	1.4	17.6	1	0.6
5~10	—	1.0	1.5	—	1	0.7

3) 细集料

采用龙王北山产的石灰石石屑，规格为 0~5 mm，砂当量为 63%，亚甲蓝值为 2.8 g/kg，棱角性(流动时间)为 33 s，表观相对密度为 2.752，毛体积相对密度为 2.735，吸水率 0.9%。

4) 填料

采用产自大连甘井子的石灰石矿粉，含水率为 0.6%，亲水系数为 0.9，塑性指数为 3.0，表观相对密度为 2.762，0.6 mm 筛孔通过率为 100.0%，0.15 mm 筛孔通过率为 97.6%，0.075 mm 筛孔通过率为 86.4%。

3.2 试验方案

3.2.1 材料组成设计

试验采用 AC-20C 密级配沥青混凝土结构，通过调整各规格矿料间的比例构建 4 种典型的级配曲线，合成级配 1 各筛孔通过率接近级配范围下限，骨架分界筛孔通过率 30.0%，混合料整体偏粗；合成级配 2 各筛孔通过率接近级配范围中值，骨架分界筛孔通过率 41.1%；合成级配 3 各筛孔通过率接近级配范围上限，骨架分界筛孔通过率 51.2%，混合料整体偏细；合成级配 4 适当减少公称最大粒径附近颗粒含量，同时减少细集料用量，形成平滑的 S 形曲线，骨架分界筛孔通过率 35.7%，各筛孔通过率接近级配范围中值。

合成级配曲线见图 1—图 4，同时分别采用 3.5%、4.0%、4.5%、5.0%及 5.5% 共 5 种不同的油石比。

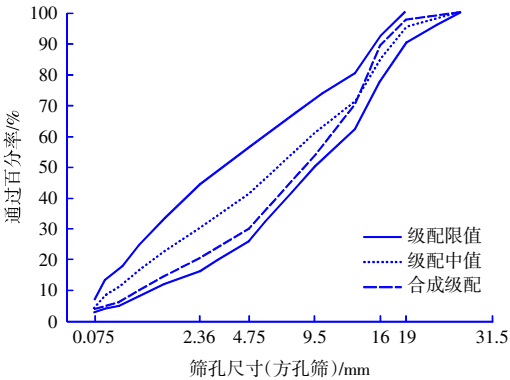


图 1 合成级配曲线 1

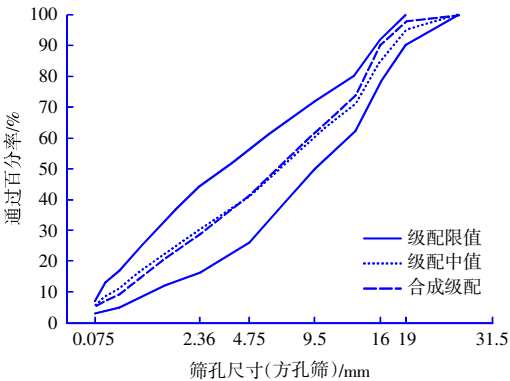


图 2 合成级配曲线 2

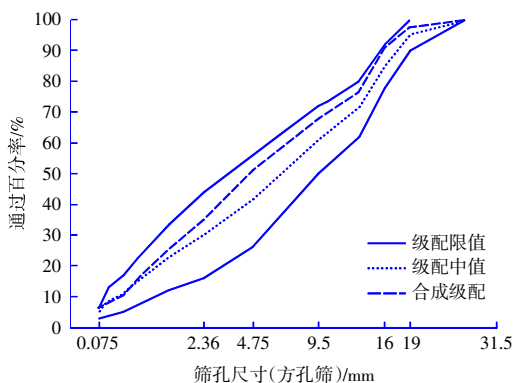


图3 合成级配曲线3

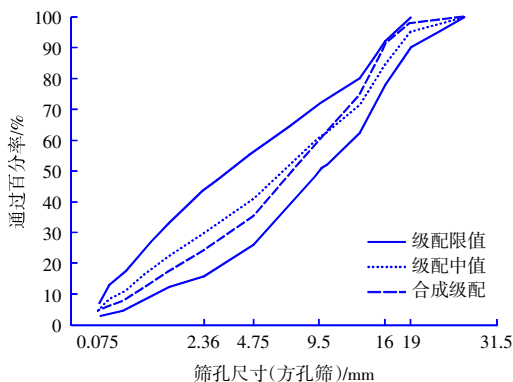


图4 合成级配曲线4

3.2.2 温拌剂的选取及性能验证

为确定温拌剂对沥青混合料路用性能及压实特性的影响,选取2种降黏型温拌剂及2种表面活性剂型温拌剂,温拌剂掺量为沥青质量的0.6%,对温拌沥青混合料的马歇尔稳定度、浸水残留稳定度及动稳定度进行试验,验证温拌剂对沥青混合料各项路用性能的影响。同时采用等空隙率法确定每种温拌剂的降温效果,以不掺温拌剂的沥青混合料为空白对照,成型温度为165℃,温拌沥青混合料的成型温度分别降低10℃、20℃、30℃(即155℃、145℃、135℃),测定试件空隙率,绘制空隙率与成型温度关系图,以空白沥青混合料空隙率为基准,通过内插得到不同温拌剂成型温度的限值,并以此评价不同温拌剂的降温效果及相应温拌沥青混合料的压实特性。

3.2.3 试验方法

试件的成型采用JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料旋转压实试件制作方法(SCC方法),在相同温度、压力及旋转角下成型不同矿料组成及沥青用量的试件,对比成型后的试件高度、空隙率、压实度等参数,

评价各种材料组成下混合料的压实特性,并分析得到易于碾压的材料组成用量。成型试样质量均为7 500 g,有效内旋转角为1.16°,垂直压力为600 kPa,旋转速率为30 r/min,旋转压实次数均为100次。

沥青混合料的空隙率、毛体积密度采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中压实沥青混合料密度试验(表干法)进行检测。沥青混合料路用性能采用《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》马歇尔稳定度、浸水马歇尔试验残留稳定度比及动稳定度试验进行检测。

4 试验结果与分析

4.1 矿料级配对沥青混合料压实特性的影响

采用旋转压实法对不同矿料级配组成的沥青混合料成型,测试成型后试件的高度、空隙率及压实度等指标,测试结果见表3。

表3 不同矿料级配组成的沥青混合料测试结果

矿料组成	成型后试件高度/mm	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率/%	压实度/%
矿料级配1	175.42	2.539	2.383	6.1	93.9
矿料级配2	171.21	2.531	2.420	4.4	95.6
矿料级配3	172.58	2.525	2.394	5.2	94.8
矿料级配4	171.04	2.535	2.427	4.3	95.7

通过表3测试结果可以看出,不同矿料级配组成的沥青混合料在相同压实作用下的试件高度、空隙率及压实度均不同,其中合成级配1沥青混合料成型后试件高度最高,为175.42 mm,室内压实度为93.9%;合成级配4沥青混合料成型后试件高度最低,为171.04 mm,压实效果最好,压实度达到95.7%。当矿料合成级配曲线平滑,且骨架分界筛孔通过率接近级配范围的中值时,混合料展现出良好的压实特性。合成级配4沥青混合料与合成级配2沥青混合料相比,合成级配4沥青混合料在减少粗骨料含量的同时,适当减少了细集料用量,这有效减少了压实过程中的离析现象,同时,由于骨架间的孔隙得到了细集料的良好填充,混合料的路用性能得以显著提升。综上所述,合成级配4沥青混合料在相同的压实功及温度下,更容易碾压成型,确保路面施工质量。

4.2 沥青用量对混合料压实特性的影响

针对矿料级配4沥青混合料,选取3.5%、

4.0%、4.5%、5.0%及 5.5% 共 5 种不同的油石比，采用旋转压实法成型，测试成型后试件的高度及压实度等指标，测试结果见图 5、图 6。

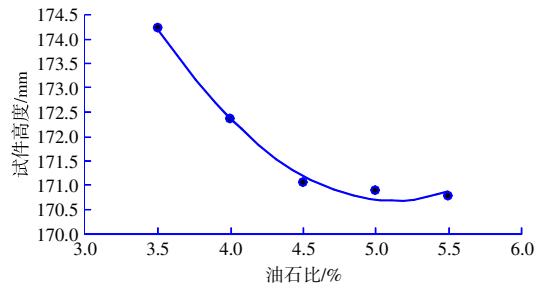


图 5 不同沥青含量混合料成型后试件高度

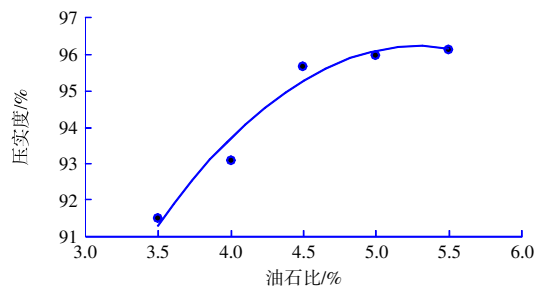


图 6 不同沥青含量混合料压实度

由试验结果可以看出，不同沥青用量的混合料在成型后具有不同的高度和压实度。油石比越大，压实后试件的空隙率越低，压实度越大，试件的高度也越低。这表明在给定的矿料组成下，随着油石比的增加，混合料的压实效果逐渐增强，但当油石比达到 4.5% 时，曲线趋于平缓，压实度和试件成型高度变化不明显。由于沥青是一种温度敏感性的黏弹性材料，在高温拌和和压实过程中起润滑作用，有助于粗细骨料的重新排列和填充。在温度降低、路面成型后，沥青起到胶结和填充的作用。为了使沥青混合料更易于压实，需要保证一定的沥青含量，然而当沥青用量超过某一限值时，继续增加沥青用量对混合料的压实性能贡献不大，反而会增加成本。综合混合料压实特性及各项性能，选取 4.5% 为最佳油石比。

4.3 温拌剂对沥青混合料压实特性的影响

4.3.1 不同温拌剂沥青混合料性能

选取 2 种降黏型温拌剂及 2 种表面活性剂型温拌剂进行沥青混凝土性能比对，采用合成级配 4 矿料组成，油石比为 4.5%，测试结果见表 4。

表 4 不同温拌剂沥青混合料性能测试结果

温拌沥青混合料种类	马歇尔稳定度/kN		残留稳定度比/%		动稳定度/(次·mm ⁻¹)	
	技术要求	实测值	技术要求	实测值	技术要求	实测值
空白对照(未掺温拌剂)	≥8	12.5	≥80	99.7	≥2 000	6 871
W ₁ (掺入 1 号降黏型温拌剂)		9.8		87.9		5 987
W ₂ (掺入 2 号降黏型温拌剂)		9.0		85.7		5 568
W ₃ (掺入 3 号表面活性剂型温拌剂)		11.9		94.7		6 545
W ₄ (掺入 4 号表面活性剂型温拌剂)		10.8		91.8		6 258

由表 4 可知，4 种温拌沥青混合料的路用性能均满足原热拌沥青混合料技术要求。4 种掺温拌剂沥青混合料较基准沥青混凝土相比，马歇尔稳定度降低了 5%~28%，其中 2 种降黏型温拌剂较表面活性剂型温拌剂对马歇尔稳定度影响更大，分别降低了 22%、28%；48 h 浸水马歇尔残留稳定度比降低了 5%~14%，其中降黏型温拌剂降低最多，为 14%，温拌剂的掺入也会使混合料的抗车辙性能略微降低。测试结果说明温拌剂的掺入会降低沥青混合料的部分性能，不同种类的温拌剂影响程度也不同，表面活性剂型温拌剂较降黏型温拌剂对混合料性能影响较小，考虑温拌剂对沥青混合料性能的影响，选取 3 号表面活性剂型温拌剂作为沥青混合料温拌剂。

4.3.2 温拌剂对沥青混合料压实特性影响

选取 3 号表面活性剂型温拌剂，温拌剂掺量为沥青质量的 0.6%，采用不同的击实温度成型马歇尔试件，测定空隙率，绘制空隙率与成型温度关系图，采用等空隙率法内插确定温拌剂降温效果的限值，测试结果见图 7、表 5。

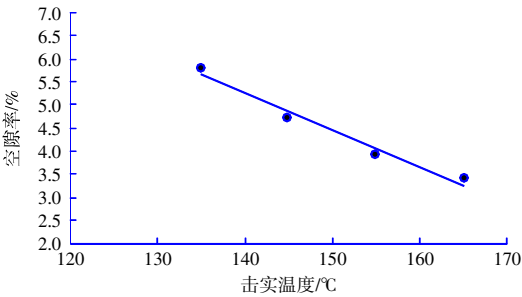


图 7 沥青混合料击实温度与空隙率关系图

表5 不同击实温度成型马歇尔试件空隙率测试结果

试件	成型(击实)温度/℃	空隙率/%
空白对照试件(未掺温拌剂)	165	4.3
温拌沥青混合料(掺3号表面活性剂型温拌剂)	135	5.8
	145	4.7
	155	3.9
	165	3.4

与空白对照试件相比,掺入温拌剂后,在相同的温度(165℃)和击实功的作用下,沥青混合料空隙率降低,得到了更密实的沥青混合料,说明温拌剂的掺入提高了沥青混合料的压实特性,可以使路面更易于碾压成型;由击实温度与空隙率关系图内插得到,成型温度为152℃时,对应温拌混合料空隙率为4.3%,在得到相同空隙率的情况下,掺入温拌剂可以使沥青混合料的成型温度降低13℃。

4.4 材料组成的确定及混合料性能验证

采用合成级配4配制沥青混合料,选取油石比4.5%,3号温拌剂掺量为沥青质量的0.6%,成型温度152℃,对沥青混合料各项路用性能进行验证,测试结果见表6。

表6 沥青混合料路用性能测试结果

测试结果	空隙率/%	马歇尔稳定度/kN	流值/mm	冻融劈裂抗拉强度比/%	残留稳定度比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
技术要求	3~6	≥8	2~4	≥75	≥80	≥2 000
实测值	4.3	11.31	3.1	91.3	93.2	6 377

通过以上测试结果可以看出,该沥青混合料的各项路用性能均符合相关技术要求,综合考虑混合料的压实特性及各项路用性能,该AC-20C密级配沥青混凝土材料组成为:

1) 矿料级配

混合料组成采用合成级配4。通过调整各矿料间的比例,骨架分界筛孔通过率为35.7%,在保证混合料稳定性的前提下,适当减少公称最大粒径附近的粗集料含量,可以降低混合料在摊铺碾压过程中的离析,适当减少细集料用量,保证了骨架间孔隙的填充,能够获得密实稳定的沥青混合料。该种矿料级配组成使沥青混合料具有易于压实的特性。

2) 油石比

适当的沥青含量可以起到润滑与填充作用,使混合料中粗集料重新排列,使路面易于压实成型,同时保证路面具有适宜的空隙率,使成型后的路面具有良好的路用性能。过多的沥青用量对

于提高混合料的压实特性效果不明显,反而会增加施工成本。综合考虑,选取4.5%为最佳油石比。

3) 温拌剂

考虑温拌剂对沥青混合料性能的影响,选取3号表面活性剂型温拌剂,在保证沥青混合料各项性能的情况下,掺入温拌剂可以使沥青混合料的生产施工温度降低13℃,减少沥青混合料因高温老化造成的性能损失,有利于保证沥青路面的低温施工质量。

5 结语

针对于AC-20C密级配沥青混凝土结构,设计出一种具有易于压实特性及良好路用性能的沥青混合料,骨架分界筛孔通过率为35.7%,油石比4.5%,同时掺入表面活性剂型温拌剂,采用等空隙率法确定沥青混合料施工的温度限值,使沥青路面的施工温度可降低13℃。本研究成果可为沥青路面的低温施工提供科学的材料组成设计方法和理论支持,降低生产能耗及施工过程中的环境污染,有助于提高沥青路面的施工质量和使用寿命。针对低温环境下沥青路面施工,在混合料材料组成设计的过程中,应重点考虑混合料的压实特性,同时还需从施工温度的严格把控、碾压工艺的优化及特殊保温措施等多方面考虑,确保沥青路面的施工质量。

参考文献:

- [1] 周书友,谭学章. 天定高速公路沥青路面冬季低温施工技术[J]. 公路交通科技(应用技术版),2011,7(7):124-126,135.
- [2] 王璟,祖国家,杜华钊. 新式组合式碾压工艺在低温条件下沥青路面施工中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(7):33-35.
- [3] 王慧博,王黎明. 单组分油性表面活性剂对沥青及混合料性能的影响研究[D]. 黑龙江:东北林业大学,2021.
- [4] 江照伟. 几种常用道路温拌剂的路用性能评价[J]. 山东交通科技,2019(2):46-48.
- [5] 董泽蛟,肖桂清,龚湘兵,等. 重载沥青路面结构组合的抗车辙性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(6):72-78.
- [6] 邹晓龙,沙爱民,蒋玮. 高温多雨地区高模量沥青混合料性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(10):1381-1386.
- [7] 姚新宇,周胜波,朱云升. 旧水泥混凝土路面沥青混凝土罩面层混合料变异性分析[J]. 公路,2016,61(7):19-24.
- [8] GENG H, CLOPOTELCS C S, BAHIA H U. Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical asphalt pavement structures[J]. Construction and Building Materials,2013,44(7):207-213.
- [9] 李世华,胡鹏飞,陈春. 基于现场钻芯取样的车辙形成机理研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2015,32(8):63-65.