

藏区农村公路冷拌冷铺沥青混合料配合比设计方法

邵 华¹, 柳久伟^{1*}, 普布扎西², 董 昭¹, 多级欧珠³, 徐书东¹

¹山东省交通科学研究院, 山东 济南

²西藏日喀则市交通运输局, 西藏 日喀则

³西藏珠峰交通工程检测有限公司, 西藏 日喀则

收稿日期: 2025年11月15日; 录用日期: 2025年12月6日; 发布日期: 2025年12月19日

摘 要

冷拌冷铺沥青混合料作为一种常温施工的绿色道路养护材料具有对环境污染小、可在常温下拌和与摊铺、适用温度范围广、成本低、便于储存运输等诸多优点, 具有广阔的应用前景。本文基于旋转压实成型方法进行冷拌冷铺沥青混合料配合比设计, 通过优选矿料级配组成、混合料初始及最终强度指标确定最佳沥青用量、混合料路用性能指标验证最终确定最优生产配合比。对于西藏高寒大温差地区, 施工季节短, 混合料降温快, 拌合站距离施工地点远, 热拌沥青混合料运至现场后已不能保证混合料的压实温度, 因此基于旋转压实成型方法设计高品质的冷拌冷铺沥青混合料用于解决温度对混合料性能因素, 对于藏区农村公路面层铺装具有重要的现实意义。

关键词

冷拌冷铺沥青混合料, 旋转压实成型方法, 配合比设计, 藏区农村公路

Method for Mix Proportion Design of Cold Mixed and Cold Laid Asphalt Mixture for Rural Roads in Tibetan Areas

Hua Shao¹, Jiuwei Liu^{1*}, Pubuzaxi², Zhao Dong¹, Duoji'ouzhu³, Shudong Xu¹

¹Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

²Transportation Bureau of Xigaze City, Xigaze Xizang

³Xizang Everest Traffic Engineering Testing Co., Ltd., Xigaze Xizang

Received: November 15, 2025; accepted: December 6, 2025; published: December 19, 2025

*通讯作者。

文章引用: 邵华, 柳久伟, 普布扎西, 董昭, 多级欧珠, 徐书东. 藏区农村公路冷拌冷铺沥青混合料配合比设计方法[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3014-3021. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412323

Abstract

Cold mixed and cold laid asphalt mixtures, as green road maintenance materials suitable for ambient-temperature construction, offer numerous advantages such as minimal environmental pollution, cold mixing and paving capabilities, wide applicable temperature ranges, low cost, and convenient storage and transportation, making them highly promising for practical applications. This study employs the rotational compaction method to design the optimal production mix ratio for cold mixed and cold laid asphalt mixtures. By optimizing aggregate gradation composition and determining the initial and final strength indicators of the mixture, the best asphalt content is identified. Subsequent verification of the mixture's road performance indicators finalizes the optimal production mix ratio. For Xizang's high-altitude, cold, and extreme temperature differential regions—where the construction season is short, mixtures cool rapidly, and mixing plants are far from construction sites—hot-mixed asphalt mixtures often fail to maintain adequate compaction temperatures upon arrival. Therefore, designing high-quality cold mixed and cold laid asphalt mixtures based on the rotational compaction method to address temperature-related performance factors holds significant practical importance for rural road pavement construction in Tibetan areas.

Keywords

Cold Mixed and Cold Laid Asphalt Mixture, Rotating Compaction Forming Method, Mix Proportion Design, Rural Roads in Tibetan Areas

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冷拌冷铺沥青混合料是一种在常温或较低温度下进行拌和与施工的沥青类材料，现阶段的研究将冷拌冷铺沥青混合料归为三类，第一类为乳化沥青型，乳化沥青与矿料拌合均匀形成冷拌沥青混合料，由于乳化沥青破乳前常温黏度低，因此混合料初期的强度较低，需要经过一定的养生破乳水分挥发时间才能形成较高的强度，但是普通乳化沥青的破乳时间不好控制，因而其储存性能及强度成型时间两方面均要碰到较大问题，因此乳化沥青型冷铺沥青混合料的关键在于可以精确控制破乳时间的乳化沥青[1] [2]。

第二类为液体沥青类，道路沥青通过稀释剂稀释后常温黏度较低即可与矿料进行拌合均匀形成冷拌沥青混合料，由于稀释剂的存在早期强度较低，需要经过一定养生时间将稀释剂挥发形成最终强度，因此液体类冷拌沥青混合料的关键在于可以长期储存并快速挥发的稀释剂[3]。

第三类为反应树脂类，采用环氧沥青及聚氨酯胶结料常温拌合而成的冷拌混合料，其强度成型机理为：借助添加剂不同组分间的化学反应，形成具有一定强度的固态化合物并以网状分散在混合料中增加冷铺沥青混合料的强度，这种类型的冷拌冷铺混合料可提高冷铺沥青混合料的成型强度，使修补路块快速地开放交通，但是由于环氧树脂的使用较为复杂，因此这种方式将增加成本和施工难度，也要求施工工人具有一定技术水平[4]。

本文研究的冷拌料是指集料与稀释沥青经过拌合而成，能在常温下施工的沥青混合料，它与我们

常见的传统热拌沥青混合料形成鲜明对比,作为一种常温施工的绿色道路养护材料具有对环境污染小、可在常温下拌和与摊铺、适用温度范围广、成本低与便于储存运输等诸多优点,具有广阔的应用前景[5]。然而,现阶段冷拌冷铺沥青混合料配合比设计方法不完善,混合料关键设计指标不明确等因素很大程度影响冷拌冷铺混合料推广应用,亟需通过科学的配合比设计确定混合料最佳工作性能[6]。

本文基于旋转压实成型方法进行冷拌冷铺沥青混合料配合比设计,通过优选矿料级配组成、混合料初始及最终强度指标确定最佳沥青用量、混合料路用性能指标验证最终确定最佳配合比。对于西藏高寒地区,施工季节短,混合料降温快,拌合站距离施工地点远,热拌沥青混合料运至现场后已不能保证混合料的压实温度,因此基于旋转压实成型方法设计高品质的冷拌冷铺沥青混合料,适用于藏区农村公路面层铺装具有重要的现实意义。

2. 原材料评价

2.1. 矿料

为了保证冷拌沥青与石料具备较好的粘附性能,综合考虑藏区原材料地域特性,本项目采用石灰岩进行矿料级配设计。粗集料采用 10~15 mm 石灰岩与 5~10 mm 石灰岩,细集料选用 0~3 mm 石灰岩机制砂。矿料技术指标及级配试验结果见表 1~表 3 所示。

Table 1. Main technical indicators of coarse aggregate
表 1. 粗集料主要技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果	
			10~20 mm	5~10 mm
表观密度	g/cm ³	≥2.6	2.728	2.731
吸水率	%	≤2.0	0.45	0.48
压碎值	%	≤25	15.1	-
与沥青粘附性	级	≥4	5	-

Table 2. Main technical indicators of fine aggregate
表 2. 细集料主要技术指标

物理技术指标	单位	技术要求	检验结果
表观密度	g/cm ³	≥2.6	2.712
吸水率	%	≤2.0	0.71
砂当量	%	≥60	62

Table 3. Mineral materials grading
表 3. 矿料级配

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
10~15 mm	100	92.6	7.3	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
5~10 mm	100	100	97.2	9.7	2.2	1.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0~3 mm	100	100	100	94.2	85.7	59.2	45.3	23.2	18.5	7.8

2.2. 填料

填料与冷拌沥青形成沥青胶浆,填料性能对于沥青胶浆与矿料粘附性具有显著影响,本项目选用石灰岩研磨过 200 目筛网生产的矿粉作为填料。填料主要技术指标试验结果见表 4 所示。

Table 4. Main technical indicators of mineral powder
表 4. 矿粉主要技术指标

物理技术指标		单位	技术要求	检验结果
视密度		g/cm ³	≥2.5	2.675
粒径范围	<0.6 mm	%	100	100
	<0.15 mm	%	90~100	93.8
	<0.075 mm	%	75~100	89.2

2.3. 冷拌沥青

将一定比例的稀释剂和添加剂掺入 110℃~150℃沥青中，经均匀搅拌后常温条件下具备一定流动性的胶结料。本文针对藏区材料特性和气候交通条件研发了专用冷拌沥青 I 型，专用冷拌沥青为化学改性沥青 + 稀释溶剂 + 外加剂，其中稀释溶剂为煤油，外加剂为抗剥落剂。冷拌沥青的制备工艺如下：将制备的化学改性沥青加热至流动状态(170℃~180℃)，将煤油缓慢加入到化学改性沥青中，并不断搅拌 45 min~60 min，使稀释溶剂与化学改性沥青充分混溶并搅拌均匀，最后加入抗剥落剂继续搅拌 10 min~15 min，添加比例为化学改性沥青:稀释溶剂:外加剂 = 87:12:1，直至沥青、煤油、抗剥落剂充分混合。此种冷拌沥青常温条件下为固态，在进行工程应用时需要先对冷拌沥青进行简单加热即可使用，本文对原样化学改性沥青与冷拌沥青进行了对比评价，检测结果见表 5 所示。

Table 5. Main technical indicators of asphalt
表 5. 沥青主要技术指标

检测项目		原样沥青	冷拌沥青
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1 mm		55	52
软化点(℃)		88	65
旋转薄膜	质量损失(%)	0.016	-0.065
老化试验 (163℃, 85 min)	针入度比(25℃, %)	80	69

3. 矿料级配设计

依据现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)规定冷拌沥青混合料级配完全参照热拌沥青混合料级配范围执行，本文依据试验验证及多项实体工程铺筑效果总结提炼出适应冷拌冷铺沥青混合料的级配范围，提出的级配范围增加粗集料的比重并对粉料的比例的进行规定，保证混合料具有更好的骨架结构，提高混合料的高温性能，同时保证冷拌沥青混合料中含有一定的粉料，可以与沥青形成胶浆，提高冷拌沥青与集料的粘附性，保证冷拌沥青混合料的水稳定性，根据原材料检测结果合成矿料级配曲线，冷拌沥青混合料级配范围见表 6 所示，矿料合成级配曲线见图 1 所示。

Table 6. Grading range of cold mixed and cold laid mixtures
表 6. 冷拌冷铺混合料级配范围

级配类型 筛孔/mm	细粒式 LB-10	中粒式 LB-13	粗粒式 LB-20
26.5	100	100	100
19	100	100	90~100
16	100	100	78~92
13.2	100	90~100	64~80
9.5	90~100	70~85	50~67

续表

4.75	40~55	35~50	30~45
2.36	10~25	10~25	18~32
1.18	8~20	8~20	12~25
0.6	6~16	6~16	8~18
0.3	5~12	5~12	5~12
0.15	3~8	3~8	3~8
0.075	2~5	2~5	2~5

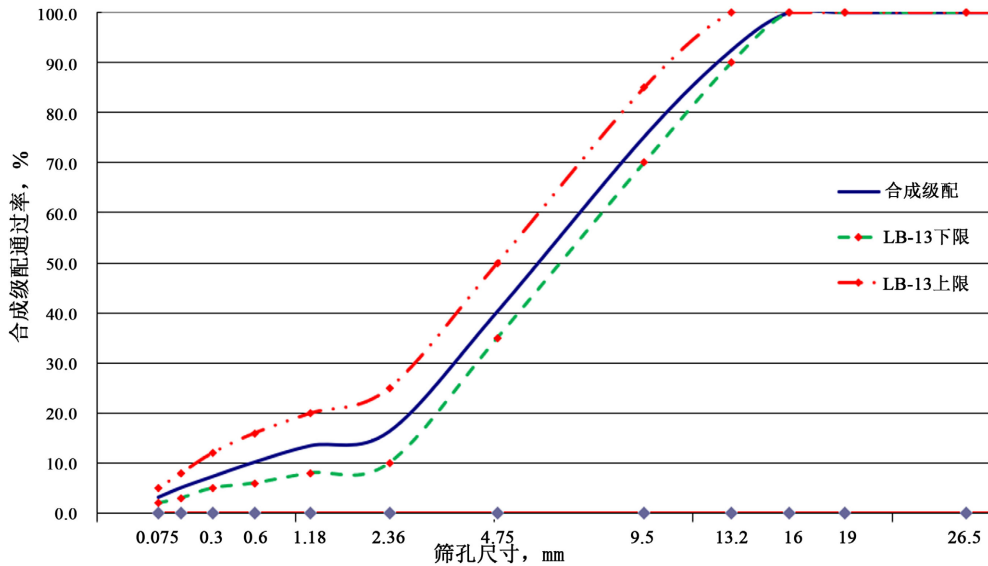


Figure 1. Composite gradation curve
图 1. 合成级配曲线

4. 旋转压实成型方法

对于冷拌沥青混合料强度的形成为两个阶段，一个为初始成型阶段，一个为最终强度形成阶段。初始阶段由于稀释剂尚未挥发完全，冷拌沥青混合料空隙率较大，沥青与集料黏附性较差，混合料强度较低。随着稀释剂的挥发和车辆荷载的进一步压实，冷拌沥青混合料的最终强度逐渐形成[7]。进行冷拌沥青混合料配合比设计时采用两阶段设计法。

进行冷拌沥青混合料配合比设计时，通常采用马歇尔击实法或旋转压实法。马歇尔成型最大的优势是在初始成型完成后试件经过养生，可以不用脱模直接进行最终强度的试验，试验操作较简便。但该方法不足是混合料的初始成型试件空隙率过高，与现场的压实空隙率差别较大，不能很好地反映材料的路用性能；另外此种方法的最终强度试件为非标准马歇尔试件[8]。旋转压实成型的初始成型试件空隙率与现场基本相同，能够更好地模拟冷拌沥青混合料现场的实际情况，本文采用旋转压实成型方法进行冷拌沥青混合料配合比设计。

旋转压实仪设备参数及成型方法，压力：600 kPa±18 kPa，内旋转角度：1.16°±0.02°，转速 30 rad/min±0.5 rad/min。试件采用直径 150 mm，按照固定装料质量 4000 g，旋转压实 100 次的方式成型。

初始指标测试方法：冷拌沥青混合料拌和均匀后，室温成型直接脱模，常温下养生 24 h 后采用计算法测定混合料空隙率，将试件置于已达到 25℃的恒温水浴中，保温 45 min~60 min，进行马歇尔稳定度试验，测定混合料的初始强度。

最终指标测试方法：冷拌沥青混合料拌和均匀后，将试样放入 110℃烘箱中养生 24 h ± 1 h，取出试样自然冷却至 60℃，成型后直接脱模，常温下养生 24 h 后采用表干法测定混合料空隙率，将试件置于已达到 15℃的恒温水浴中，保温 2 h，进行劈裂强度试验，将试件置于已达到 60℃的恒温水浴中，保温 45 min~60 min，进行马歇尔稳定度试验，测定混合料的最终强度。

5. 确定冷拌沥青用量

冷拌沥青用量直接决定着冷拌沥青混合料强度的大小和施工的和易性，沥青膜厚度如果过厚，那说明混合料中自由沥青较多，易结成团；如果沥青膜厚度过薄，则不能够完全裹附集料，混合料整体状态过于松散。通常来说沥青膜厚度在 4.5~6.5 μm 之间比较适宜。

本文参考热拌沥青混合料最佳沥青用量确定方法，基于空隙率和马歇尔稳定度指标确定冷拌沥青混合料的最佳沥青用量。在常温条件下(25℃)采用旋转压实法成型冷拌沥青混合料试件，分别测定每组冷拌沥青混合料试件的初始指标和最终指标，结合纸迹试验结果综合确定冷拌沥青混合料最佳油石比为 4.5%，试验结果见表 7 所示。

Table 7. Test results of optimal asphalt dosage
表 7. 最佳沥青用量试验结果

设计阶段	试验项目	单位	设计指标	实测指标
初始指标	空隙率	%	3~12	10.5
	25℃稳定度	kN	≥5	5.56
最终指标	空隙率	%	2~5	3.2
	60℃稳定度	kN	≥10	15.5
	15℃劈裂强度	MPa	≥0.3	≥0.65

6. 冷拌沥青混合料路用性能评价

冷拌沥青混合料初始成型阶段由于稀释剂的存在，冷拌沥青粘结力较小，在外力作用下，混合料间容易发生移动变形，造成混合料强度降低。随着时间的推移，在环境温度和行车荷载的逐渐作用下，冷拌沥青的粘度随着有机溶剂的挥发逐渐增大，并且混合料在荷载作用下逐渐密实，混合料的强度逐渐提高，其路用性能与普通的热拌沥青混合料无异。针对冷拌沥青混合料材料特性，通过修正车辙试验、修正冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验综合评价冷拌沥青混合料的路用性能，确定最终冷拌沥青混合料配合比。

水损害是沥青路面的主要病害之一，所谓水损害是指沥青路面在水和冻融循环的作用下，由于行车荷载的作用，进入路面空隙中的水不断产生动水压力或真空负压抽吸的反复循环作用，水分逐渐渗入沥青和集料的界面上，使沥青粘附性降低并逐渐丧失，沥青膜从集料表面脱落，继而形成沥青路面的松散、坑槽等损坏现象。抗水损坏能力是冷拌冷铺沥青混合料的薄弱环节，一方面是因为所用结合料本身粘度较低；另一方面是由于冷拌冷铺沥青混合料是随着行车荷载的作用逐渐压密，强度逐渐增大，即混合料初期空隙率较大，地表水容易渗入导致损坏，因此要求混合料有较强的抗水损能力。为了验证冷拌沥青混合料的抗水损害性能，采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验验证冷拌沥青混合料的抗水损害性能。

高温稳定性指的是在夏季温度较高的时候，在行车荷载的作用下沥青路面抵抗推移、车辙、拥包等永久变形的能力。冷拌沥青混合料在摊铺碾压完成通车后，由于沥青中稀释剂的存在，加上环境温度较高，结合料粘度较小，粘附性降低，因此混合料强度较低，这也使得混合料在环境温度较高的情况下极易产生车辙等病害，为了验证冷拌沥青混合料的抗车辙性能，采用修正车辙试验验证冷拌沥青混合料的抗车辙性能。

6.1. 浸水马歇尔试验

修正浸水马歇尔试验方法：根据最终指标试验方法成型冷拌沥青混合料试件，试件数量不应低于 6 个，将试件平均分为两组，一组试件置于 60℃ 恒温水浴中养生 48 h，然后进行 60℃ 马歇尔稳定度试验。另一组试件置于 60℃ 水浴中养生 45 min~60 min，进行 60℃ 马歇尔稳定度试验，计算浸水前后两组试件马歇尔稳定度的比值。试验结果见表 8 所示。

Table 8. Results of immersion Marshall test

表 8. 浸水马歇尔试验结果

试验项目	60℃ 马歇尔稳定度/kN	浸水马歇尔稳定度/kN	残留稳定度/%	技术指标/%
浸水马歇尔残留稳定度	15.55	12.32	79.2	≥75

由上述试验可知，依据确定的矿料级配及沥青用量，采用旋转压实成型方法，按照最终指标试验方法成型冷拌沥青混合料试件，进行浸水马歇尔稳定度试验测试结果满足设计技术指标要求，该冷拌沥青混合料具备一定的抗水损害性能。

6.2. 冻融劈裂试验

修正冻融劈裂试验方法：根据最终指标试验方法成型冷拌沥青混合料试件，试件数量不应低于 6 个，将试件平均分为两组，一组试件按照饱水试验方法进行饱水试验，然后把试件放入塑料袋中，加入约 10 ml 的水，放入温度为-18℃ ± 2℃ 的冰箱中，保持 16 h ± 1 h，然后将试件取出后放入 40℃ ± 0.5℃ 的恒温水槽中，保持 24 h。另一组试件于常温环境下保存备用，最后将两组试件放入 25℃ ± 0.5℃ 的恒温水槽中，保温 2 h，测得两组试件的劈裂强度，计算冻融前后两组试件劈裂强度的比值。试验结果见表 9 所示。

Table 9. Results of freeze-thaw splitting test

表 9. 冻融劈裂试验结果

试验项目	冻融前劈裂强度 /MPa	冻融后劈裂强度 /MPa	冻融劈裂强度比/%	技术指标/%
冻融劈裂强度	0.86	0.63	73.3	≥70

由上述试验可知，依据确定的矿料级配及沥青用量，采用旋转压实成型方法，按照最终指标试验方法成型冷拌沥青混合料试件，进行冻融劈裂试验测试结果满足设计技术指标要求，该冷拌沥青混合料具备优良的抗水损害性能。

6.3. 高温稳定性

修正车辙试验方法：根据测得混合料毛体积密度计算装料量，按照 JTG E20 车辙试件成型方法常温条件下成型冷拌沥青混合料车辙板试件，然后将碾压好的车辙板试件放置于 110℃ 烘箱中养生 24 小时，取出车辙板试件按照 JTG E20 车辙试件成型方法重新压实一遍，然后常温条件下养生两天，最后进行车辙试验，测定冷拌沥青混合料的高温性能。试验结果见表 10 所示。

Table 10. High-temperature stability test results

表 10. 高温稳定性试验结果

试验项目	d_1 /mm	d_2 /mm	DS/次/mm	技术指标/次/mm
动稳定度	3.529	4.081	1141	≥800

由上述试验可知,采用修正车辙试验方法可以较好地模拟冷拌沥青混合料的最终高温稳定性。随着稀释剂的挥发,冷拌沥青混合料最终高温稳定性能够满足设计技术指标要求,具备一定的高温抗变形能力。

7. 结论

(1) 创造性提出采用旋转压实成型方法进行冷拌沥青混合料配合比优化设计,综合考虑藏区气候环境及农村公路交通荷载情况,研发针对藏区农村公路专用化学改性冷拌沥青,根据原材料物理特性优选矿料级配,依据混合料初始及最终性能指标,最终确定矿料级配及最佳沥青用量。

(2) 提出了修正浸水马歇尔试验方法、修正冻融劈裂试验方法和修正动稳定度试验方法,修正的冷拌沥青混合料路用性能验证方法能够较好地反应混合料服役性能,旋转压实成型方法进行冷拌沥青混合料配合比设计能够更科学地指导藏区农村公路面层铺装。

参考文献

- [1] 耿立涛,王丽艳,姜成岭,等. 溶剂型冷补沥青及冷补沥青混合料的性能评价[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1177-1182+1191.
- [2] 张毅,李九苏,叶康,等. 溶剂型改性沥青冷补材料研制及性能研究[J]. 公路, 2016, 61(7): 284-289.
- [3] 费杰. 冷拌冷铺沥青混合料在路面修补中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.
- [4] 盖卫鹏. 冷补沥青混合料养护技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [5] 金晓晴. LB (冷拌冷铺)沥青及其路面修补技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2005.
- [6] 周玉利,等. AH 型冷补混合料的研制与施工质量控制[J]. 中外公路, 2011, 31(4): 274-277.
- [7] 李华旭. 沥青冷再生混合料性能与路面结构研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] 王争愿. 反应型冷拌再生沥青混合料制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.