DOI：10.16799/j.cnki.csdqyfh.250783

城市水泥路面共振碎石化加铺沥青层方案探讨

何山清
（武汉轻工大学 土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430023）

摘　要：对旧水泥路面进行共振碎石化后加铺沥青层的技术，不仅不会使路面产生反射裂缝，还能保证路面较长的使用寿命，该技术已在公路水泥路面改造中得到广泛应用。然而，城市道路受现状人行道高程的限制，行车道路面加铺厚度一般不超过10 cm，以保证人行道高度比加铺后的车行道高5 cm以上，从而有利于排水和交通安全。因此，对城市水泥路面进行共振碎石化后，往往还需要对碎石表层进行适当的铣刨、铲除才能加铺沥青层。针对城市道路特点，结合祁阳大道改造工程实践，通过路面结构计算，分析并探讨城市水泥混凝土路面共振碎石化后加铺沥青层设计方案、碎石层的处理措施和质量控制标准，以及特殊路段的处理方案等，可供城市水泥路面黑色化改造设计和施工参考。

关键词：城市水泥路面；共振碎石化；沥青层设计方案；碎石层处理措施
中图分类号：U416；TU997　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-7716（2026）01-0170-05

Discussion on Scheme of Resonant Rubblized Asphalt Overlay for Urban Cement Pavements

HE Shanqing
(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: The technology of resonant rubblized asphalt overlay for existing cement concrete pavements not only does not cause reflective cracks on the pavement, but also ensures a longer service life of the pavement. This technology has been extensively implemented in highway cement pavement reconstruction projects. However, the overlay thickness of the carriageway pavement in urban roads generally does not exceed 10 cm due to constraints related to existing sidewalk elevations in order to ensure that the height of the sidewalk is more than 5 cm higher than that of the newly paved carriageway, which is conducive to drainage and traffic safety. Therefore, after the resonant rubblization of urban cement pavement, it is often necessary to appropriately mill and remove the surface layer of crushed stones before laying an asphalt layer. Aiming at the characteristics of urban roads, combined with the practice of the Qiyang Avenue Reconstruction Project, and through the calculation of pavement structure, the design scheme for adding asphalt layer after resonant rubblization of urban cement concrete pavement, the treatment measures and quality control standards for the crushed stone layer, and the treatment scheme of the special road section are analyzed and discussed, which provides the reference for the design and construction of urban cement pavement asphalt reconstruction.

Keywords: urban cement pavement; resonant rubblization; asphalt layer design scheme; crushed stone layer treatment measures

0 引　言

对旧水泥路面进行共振碎石化后加铺沥青层的技术，不仅不会使路面产生反射裂缝，还能保证路面较长的使用寿命，该技术已在公路水泥路面改造中得到广泛应用[1-2]。公路水泥路面在改造时路面抬高一般不受限制，但城市道路受两侧现状人行道高程的限制（路缘石高度一般为15 cm），行车道路面加铺厚度一般不超过10 cm，以保证人行道高度比加铺后的车行道高5 cm以上，从而有利于排水和交通安全。因此，城市道路水泥路面在进行共振碎石化后，往往还需要铣刨、铲除一定厚度的碎石表层才能加铺沥青层。

本文通过对旧水泥混凝土路面碎石化后加铺沥青层的结构计算分析，结合湖南省祁阳市祁阳大道提质改造工程实践，探讨城市道路水泥混凝土路面碎石化后加铺沥青层的设计方案、碎石层的处理措

收稿日期：2025-08-08
作者简介：何山清（1970—），男，硕士，高级工程师，从事道路、桥梁工程的教学、设计和科研工作。

施、质量控制标准，以及特殊路段的处理措施等，为城市道路水泥混凝土路面改为沥青路面设计和施工提供参考。

1　祁阳大道工程概况

1.1　道路状况

湖南省祁阳市祁阳大道是 G322 国道的组成部分，同时是贯穿祁阳市城区南北向的城市主干路，交通量大，重载车多。祁阳大道城区段路幅宽 56 m，为双向 8 车道，现状为水泥混凝土路面，路面结构组成为“24 cm 厚 C30 水泥混凝土+20 cm 厚水泥稳定碎石（水泥含量为 5%）上基层+20 cm 厚水泥稳定碎石（水泥含量为 4%）下基层+20 cm 碎石垫层”，结构总厚度为 84 cm。人行道路缘石外露高为 15 cm。该道路于 2011 年建成通车，现状路面破损较严重，其中，金盆西路至银岭路段有近 100 m 路面出现纵横向裂缝、板角断裂、断板、错台、唧泥等多种严重病害，为改善行车条件和城市环境，降低行车噪声，2019 年祁阳市政府决定对该道路进行路面黑色化提质改造[3]。

1.2　交通量情况

经调查，该道路 2019 年双向年平均日交通量为大型货车和客车 11 850 辆/日，其中，半挂式货车占比为 34%，整体式货车占比为 50%。根据《公路沥青路面设计规范》（JTG D50—2017）中表 A.2.6-1 的内容，该道路 TTC 分类为 TTC3 类[4]。各类型车辆满载车占比如表 1 所示。

表 1　2 类～11 类车辆满载车与非满载车占比情况

车型	满载车占比	非满载车占比
2类	0.17	0.83
3类	0.13	0.87
4类	0.37	0.63
5类	0.25	0.75
6类	0.45	0.55
7类	0.32	0.68
8类	0.55	0.45
9类	0.42	0.58
10类	0.45	0.55
11类	0.37	0.63

本道路为一级公路兼城市主干路，根据规范规定，沥青路面设计使用年限为 15 年[5]。根据交通量预测，使用年限内交通量增长率为 3%，方向系数为 0.51，车道系数取 0.35[3]。

根据《公路沥青路面设计规范》中附录 A 的有关规定，采用公路路面设计软件 HPDS—2017 对祁阳大道设计车道的交通量进行计算。在初始年（2020 年），祁阳大道设计车道大型货车和客车年平均日交通量为 2 115 辆/d，在设计使用年限内大型货车和客车累计交通量为 14.358×10^{6} 辆。根据《公路沥青路面设计规范》的规定，路面设计交通荷载等级为重交通[4]。当验算沥青混合料层疲劳开裂寿命和沥青混合料层永久变形量时，设计车道在使用年限内的当量轴载累计作用次数为 3.377×10^{7} 次；当验算原路面结构水泥稳定碎石层的疲劳开裂寿命时，设计车道在使用年限内的当量轴载累计作用次数为 2.532×10^{9} 次。

2　祁阳大道水泥路面改造为沥青路面方案

2.1　旧水泥混凝土路面碎石化技术比选

水泥板块碎石化技术按破碎原理不同，分为冲击式和共振式。冲击碎石化极易对水泥板底部的有机结合料稳定层造成破坏，使基层开裂，降低基层强度。因此，采用冲击碎石化施工，往往需要在碎化后的水泥混凝土路面上再增设 1 层有机结合料基层，不仅耗费筑路材料，施工周期长，还会造成原路面较大幅度抬高[6-10]。

共振碎石化是利用共振机械的工作频率与现状水泥混凝土板块的固有频率相近，通过现状水泥混凝土板吸收高频共振体的巨大能量而在瞬间发生碎裂、破坏。这种技术对现状水泥混凝土板下基层没有损害，且在路面加铺改造时工期短、造价低（见表 2），因此已在公路工程旧水泥路面加铺改造中得到广泛应用[6-10]。

表 2　水泥混凝土路面碎石化技术比较表

方案	冲击碎石化	共振碎石化
特点	板块破碎不充分、不均匀，会产生翘板反应； 冲击强烈，会对下部基层造成破坏和下陷，强度损失大； 碎石化层只能作为路面结构的底基层，加铺层厚度大、路面抬高多、工期长、造价高	旧水泥路面破碎后可直接加铺沥青层，无反射裂缝； 不扰动原路面基层，且碎石化层承载力高； 噪声小、振动小、不扰民； 工期短，经济效益和社会效应好
适用范围	不适用于邻近有建筑物和存在地下管线的道路； 不适合路面抬高有限制的道路	基本不影响路下管线和周边建筑； 对路面抬高有限制的，可通过铲除碎石表层进行处理

经过比选，共振碎石化技术的优势明显，祁阳大道旧水泥混凝土路面破碎采用该技术。

2.2　沥青加铺层方案设计

2.2.1　碎石化后直接加铺沥青层方案

考虑到祁阳大道人行道缘石外露高度为 15 cm，

在现状水泥路面上加铺沥青层最大厚度为10 cm。因此,沥青加铺层拟定为2层式:4 cm厚AC-13C改性沥青混凝土+6 cm厚AC-16C沥青混凝土。旧水泥混凝土板经碎石化后作为沥青路面的柔性基层。根据《公路沥青路面设计规范》的规定,路面结构设计指标为原水泥稳定碎石层层底拉应力、沥青加铺层层底拉应力、沥青加铺层的永久变形量,以及沥青加铺层的低温开裂[4]。旧水泥混凝土路面经过共振碎石化后,碎石相互之间的咬合紧密,裂而不散,其回弹模量比普通级配碎石高,一般为400~800 MPa[9-13]。考虑到本道路旧水泥混凝土路面破损较为严重,设计取低值400 MPa;其他各结构层回弹模量均取《公路沥青路面设计规范》规定范围的中值;温度调整系数和等效温度按规范中表G.1.2的相应地区取值。祁阳大道改造工程路面各结构层设计参数如表3所示。

表3　直接加铺沥青层结构及参数表

层位	材料类型	厚度/cm	回弹模量/MPa	泊松比	稳定类材料弯拉强度/MPa	车辙试验永久变形量/mm
1	AC-13C沥青混凝土	4	9 500	0.25		1.5
2	AC-16C沥青混凝土	6	11 000	0.25		1.5
3	共振碎石化层	24	400	0.35		
4	原5%水泥稳定碎石	20	10 000	0.25	1.6	
5	原4%水泥稳定碎石	20	9 000	0.25	1.4	
6	原级配碎石	20	300	0.35		
7	土基	—	50	0.4		

采用HPDS—2017路面软件,对新建路面结构进行验算,直接加铺沥青层方案的各项设计指标结果如表4所示。

表4　直接加铺沥青层结构设计指标验算表

验算内容	单位	计算值	设计值	是否满足
沥青加铺层的永久变形量	mm	8.9	15	是
沥青加铺层的疲劳开裂寿命	$\times10^7$,轴次	1.112	3.377	否
5%水泥稳定碎石层的疲劳开裂寿命	$\times10^9$,轴次	970.681	2.532	是
4%水泥稳定碎石层的疲劳开裂寿命	$\times10^9$,轴次	2.702	2.532	是
沥青加铺层的低温开裂指数		0.5	3	是

由以上验算结果可知,如果在旧水泥路面碎石化后直接加铺10 cm沥青层,其疲劳开裂寿命不能满足设计指标的要求,计算显示,沥青加铺层的厚度需加大至14 cm以上。

2.2.2　碎石化后铲除松散表层再加铺沥青层方案

由于在碎石化后直接加铺沥青层,厚度需要达到14 cm以上,设计方案将沥青加铺层调整为3层式结构:4 cm厚AC-13C改性沥青混凝土+5 cm厚AC-16C沥青混凝土+7 cm厚AC-25沥青混凝土,沥青加铺层总厚度拟定为16 cm。为保证人行道高于沥青加铺层顶面5 cm以上,需要将共振碎石化层表面6 cm松散层铣刨、铲除。路面各结构层设计参数如表5所示。

表5　铲除松散表层再加铺沥青层结构及参数表

层位	材料类型	厚度/cm	回弹模量/MPa	泊松比	稳定类材料弯拉强度/MPa	车辙试验永久变形量/mm
1	AC-13C沥青混凝土	4	9 500	0.25		1.5
2	AC-16C沥青混凝土	5	11 000	0.25		1.5
3	AC-25沥青混凝土	6	11 000	0.25		2.0
4	共振碎石化层	18	400	0.35		
5	原5%水泥稳定碎石	20	10 000	0.25	1.6	
6	原4%水泥稳定碎石	20	9 000	0.25	1.4	
7	原级配碎石	20	300	0.35		
8	土基	—	50	0.4		

采用HPDS—2017路面软件对新建路面结构进行验算,铲除6 cm碎石表层再加铺沥青层方案的各设计指标结果如表6所示。

由以上验算结果可知,旧水泥混凝土路面在共振碎石化后,先铲除6 cm表面松散层,再加铺16 cm沥青层的方案,能够满足路面结构各项设计指标的要求,祁阳大道城区段提质改造工程采用该方案[3]。设计路面结构的路表验收弯沉值计算为27.1(0.01 mm)。

3　城市水泥路面沥青加铺层典型方案

旧水泥混凝土路面在共振碎石化后,其沥青加铺层厚度设计应根据道路交通荷载等级、现状道路状况,按柔性基层沥青路面相关标准计算确定。结合多个城市水泥路面黑色化改造工程实践,建议沥青加铺层的典型方案如表7所示[11-15]。

表6　铲除松散表层再加铺沥青层结构设计指标验算表

验算内容	单位	计算值	设计值	是否满足
沥青加铺层的永久变形量	mm	11.3	15	是
沥青加铺层的疲劳开裂寿命	$\times10^{7}$,轴次	6.884	3.377	是
5%水泥稳定碎石层的疲劳开裂寿命	$\times10^{9}$,轴次	255.616	2.532	是
4%水泥稳定碎石层的疲劳开裂寿命	$\times10^{9}$,轴次	2.547	2.532	是
沥青加铺层的低温开裂指数		-0.2	3	是

表7　沥青加铺层典型方案表

道路等级	交通荷载等级	结构层组合	加铺层厚度/cm	加铺层结构	对碎石层处理措施
主干路与快速路	重、特重	上、中、下3层	16～18	4 cm厚AC-13改性沥青上面层+5 cm厚AC-16或6 cm厚AC-20中面层+7～8 cm厚AC-25下面层	铲除共振碎石层表面6～8 cm的松散层
次干路	中等	上、下2层	9～10	4 cm厚AC-13改性沥青上面层+5 cm厚AC-16或6 cm厚AC-20下面层	不需处理
支路	轻	上、下2层	8～9	3 cm厚AC-10或4 cm厚AC-13上面层+5 cm厚AC-16下面层	不需处理

在沥青加铺层与破碎层之间应按规范要求设置透层和封层,各沥青层之间应设黏层。

4　共振碎石层质量标准

对旧水泥路面进行共振碎石化后,为保证沥青路面结构质量,根据祁阳大道城区段改造工程具体情况,结合浙江等省相关地方标准,对碎石层破碎质量提出控制指标要求(见表8)[11-14]。旧水泥路面碎石化须经检测合格后方可进行沥青加铺层施工。

表8　碎石层破碎控制指标表

序号	指标		指标要求	保证率/%
1	粒径	上部(0～1/2H)	＜8 cm	75
2		下部(1/2H～H)	8～23 cm	
3	破裂深度		H	85
	顶部松散层厚度		＜1/3H,且＜7 cm	90
4	碎石层下部嵌锁状态		碎石层下部产生的裂缝为斜向裂缝,避免产生垂直贯通型裂缝	90
5			碎块结合状态呈现咬合、裂而不散的状态	90

注:H为旧水泥混凝土路面厚度,cm。

碎石化基层属于柔性基层范畴,其承载能力必须达到设计要求。对共振碎石化后的旧水泥路面进行洒水压实,并喷洒沥青透层油,稳定后应立即检测碎石层顶面的当量回弹模量值。回弹模量检测可采用承载板试验,或采用弯沉仪检测,弯沉值换算为当量回弹模量。回弹模量测点数量按每千米每个车道不小于1个控制,测完后,计算当量回弹弯沉代表值。代表值应满足设计回弹模量值的要求。不满足要求时,应采取调整施工参数,或添加水泥、石灰等材料改善碎石层的承载力等措施。

5　共振碎石化的破碎界限与隔振措施

城市道路具有地下管线多、道路两侧建筑密集且距离道路边缘近等特点。共振碎石设备虽然振动较小,影响范围较小,但施工时也需要与建筑物和地下管线保持一定的安全距离,以免施工作业对地下管线和两侧建筑造成破坏。

5.1　破碎界限

城市水泥路面在进行共振碎石化施工前,应明确不适宜破碎的区域。

(1)对于工程范围内的管线、建筑物等,如有特别安全距离标准规定,应按规定执行。

(2)共振碎石化施工作业面与建筑物和管线的最小净距不宜小于表9所示的标准要求,否则应采取隔震措施,或采用其他破损方法[11-14]。

表9　共振碎石化施工最小安全距离表

方向	建筑物和管线	最小净距/m
水平方向	桥梁及搭板	4.5
	涵洞	1.5
	挡土墙	1.0
	检查井	1.0
	两侧建筑物	6.0
	地下管线或地下构筑物	1.0
垂直方向	无压管线	0.5
	压力管线	1.0

5.2　隔振措施

在共振碎石化施工前,需对道路沿线的地下管线进行调查。当施工作业面与建筑物和管线的最小净距不满足表9的规定时,或者施工区域周边存在受震动影响敏感的建筑物和管线时,为减小或消除共振施工产生的不良影响,需采取以下隔振措施。

(1)在共振破损前,对道路边缘0~80 cm的水泥板预先打裂。

(2)在水泥板边缘开挖深度为50~80 cm、宽度为20~50 cm的隔振沟。隔振沟在共振碎石化完成后,应用低标号混凝土Cl5或级配碎石进行回填[11-14]。

6 旧水泥路面特殊路段的处理

6.1 破损较严重的路段

在共振碎石化施工时,对于路面破损较为严重的路段,应采取减小共振碎石化机械激振力、提高行进速度、增大相邻2次破碎施工间距等手段进行施工。若某路段水泥路面破损十分严重,沉陷较大,则不宜采用共振碎石化施工,可采用如下方法进行修复处理。

(1)挖除旧水泥混凝土路面,以及软弱的基层和土基,直至稳定层。

(2)用C15~C20低标号水泥混凝土,回填至旧水泥混凝土面板顶面以下15 cm左右。

(3)顶面剩余部分回填级配碎石。回填料级配需满足表10的要求,回填级配碎石与共振碎石层应整体压实[15-18]。

6.2 脱空路段

对于水泥混凝土板下脱空的路段,在共振碎石化完成后,需对路面脱空凹陷处进行开挖回填处理,建议如下。

(1)在碎石化层碾压完成后,对于碎石层表面高程比设计高程低3 cm以内的区域,通过加厚最下层沥青加铺层来处理。

(2)对于碎石层表面高程比设计高程低3~10 cm的区域,采用沥青碎石或级配碎石回填处理,回填料级配需满足表10的要求。

(3)若碎石层表面高程比设计高程低10 cm以上,则10 cm以下用早强水泥混凝土进行补强,强度不小于C15的强度,补强厚度不小于10 cm;10 cm以上部分可用沥青碎石或级配碎石回填,回填碎石的级配应满足表10的要求[16-20]。

此外,若水泥混凝土共振碎石化后粒径过大,明显大于其他路段,则应挖除该区域的破碎层,用沥青碎石或粒料回填并压实,回填料采用满足表10中级配要求的粒料或沥青碎石[16-20]。

7 结　论

祁阳大道提质改造工程于2020年完工,至今通车已5年多,经检查,现状路面使用状况良好,说明该道路的沥青加铺层设计方案和对共振碎石层的处理措施合理。基于此实践,本文对城市道路水泥混凝土路面改造为沥青路面提出以下建议。

表10　回填材料级配要求

筛孔尺寸/mm	通过各筛孔的质量/%			
	AM-40	粒 料	级配碎石1	级配碎石2
53	100	100		
37.5	75~98	75~95	100	
31.5	67~96	67~90	90~100	100
26.5	50~80	50~70	79~95	90~100
19	25~60	40~60	60~85	75~95
16	—	30~50	53~80	66~88
13.2	15~40	20~45	48~74	59~82
9.5	10~35	20~35	40~65	46~71
4.75	6~25	15~30	25~50	30~55
2.36	6~18	6~18	18~40	18~40
1.18	3~15	3~15	13~32	13~32
0.6	2~10	2~10	9~25	9~25
0.3	1~7	1~7	6~20	6~20
0.15	1~6	1~6	3~13	3~13
0.075	1~4	0~2	0~7	0~7

(1)对于旧水泥混凝土路面,相较于冲击碎石化处理,采用共振碎石化处理效果更好,其不会对旧路面基层造成损伤,且工期短、噪声低。

(2)对于重、特重交通荷载等级的城市主干路和快速路,将旧水泥混凝土路面共振碎石化后改造为沥青路面,为保证人行道比加铺后的车行道高5 cm以上,可在铲除共振碎石层5~8 cm的松散表层后再加铺沥青层。

(3)对于中等、轻交通荷载等级的城市次干路和支路,将水泥混凝土路面共振碎石化后改造为沥青路面,可以直接在碎石层上加铺8~10 cm的沥青层。

(4)城市道路在共振碎石化施工时,需注意保证共振作业面与周边建筑和地下管线的最小安全距离,不满足安全距离要求时,应采用隔振等措施。

(5)共振碎石层和回填材料质量应满足各项控制指标的要求。

参考文献:

[1] 张帆.城市道路水泥混凝土路面共振碎石化加铺沥青层技术研究[D].武汉:武汉轻工大学,2023.
[2] 杨森顺,周怀德,邓尚瑛.不同碎石化技术下旧水泥路面力学响应对比分析[J].公路与汽运,2024,40(2):51-54.
[3] 湖北建科国际工程有限公司.祁阳大道提质改造工程施工图设计[Z].武汉:湖北建科国际工程有限公司,2019.
[4] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].
[5] CJJ 169—2012,城镇道路路面设计规范[S].

(下转第180页)