DOI:10.20035/j.issn.1671－2668.2022.04.012

# PPA 等级对 PPA 改性沥青及沥青混合料技术特性的影响*

武铁征[1]，魏建国[2]
（1.河南交投沈皖高速公路有限公司，河南 郑州 450007；2.长沙理工大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410114）

**摘要：** 通过室内试验测定不同等级多聚磷酸（PPA）改性沥青及沥青混合料的路用性能，分析 PPA 等级对 PPA 改性沥青及沥青混合料技术特性的影响。结果表明，PPA 等级对沥青及沥青混合料路用性能影响显著，等级较高的 PPA 改性沥青及沥青混合料的高温性能及水稳定性较好，但低温性能变差；高温多雨地区宜采用等级较高的 PPA 改性沥青混合料，低温地区宜采用等级较低的 PPA 改性沥青混合料。

**关键词：** 公路；沥青混合料；多聚磷酸（PPA）；路用性能

**中图分类号：**U416.217 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－2668(2022)04－0047－04

高速公路沥青路面早期损坏严重，不仅造成行车安全性及舒适性严重下降，还使沥青路面服役寿命变短。为提高沥青路面的服役寿命，张争奇等将 SBS、橡胶粉等应用到沥青混合料中改善沥青混合料的路用性能，但该方法工程造价偏高。由于多聚磷酸（PPA）价格低廉，人们逐渐将其应用到沥青路面中。PPA 由正磷酸（$H_3PO_4$）加热脱水缩合或 $H_3PO_4$ 与五氧化二磷（$P_2O_5$）聚合而成，是一组含有 $H_3PO_4$、焦磷酸和三聚磷酸等含氧酸的无机聚合物。由于 PPA 组分比例不易测定，通常将其水解为 $H_3PO_4$，再根据 $H_3PO_4$ 所占百分比将 PPA 分成不同等级。丁海波等将 105％等级的 PPA 加入沥青中，发现 PPA 的加入使沥青稠度与黏度显著提高，沥青的高温性能得到显著改善。李彩霞等将 110％等级的 PPA 加入沥青混合料中，发现 PPA 的加入使沥青混合料的高温稳定性与水稳定性得到改善。宋聪聪等将 110％等级的 PPA 加入沥青胶浆中，发现 PPA 的加入使沥青胶浆的低温性能有所提高。刘斌清、刘红瑛等将 115％等级的 PPA 加入沥青混合料中，发现 PPA 的加入使沥青混合料的低温性能显著下降。可见，不同等级的 PPA 对沥青及沥青混合料性能的影响不同。而 PPA 生产厂家多，生产的 PPA 等级多样，给 PPA 等级选择带来困难。窦谦培等采用 PPA 改性不同标号沥青，发现其对 70# 基质沥青性能的提升较明显。张铭铭研究发现 PPA 掺量对沥青混合料路用性能影响显著，基于路用性能的均衡性，其掺量宜为沥青质量的 1％。该文采用 70# 基质沥青，以 1％沥青质量的掺量将不同等级 PPA 掺加到沥青及沥青混合料中，分析 PPA 等级对沥青及沥青混合料技术指标的影响，为 PPA 选型及应用提供参考。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

试验采用 70# 基质沥青，其技术指标见表 1。

**表 1 70# 基质沥青的技术性质**

| 试验项目 | 技术标准 | 试验结果 |
|---|---|---|
| 软化点（R&B）/℃ | ≥46 | 49.5 |
| 延度（5 cm/min，10 ℃）/cm | ≥20 | 24.5 |
| 延度（5 cm/min，15 ℃）/cm | ≥100 | 116 |
| 针入度（25 ℃，100 g，5 s）/（0.1 mm） | 60～80 | 63.5 |
| 闪点（COC）/℃ | ≥260 | 303 |
| 溶解度/％ | ≥99.5 | 99.8 |
| 密度（15 ℃）/（g·cm$^{-3}$） | — | 1.024 |
| 质量损失（TFOT，163 ℃，5 h）/％ | ≤±0.8 | －0.47 |

试验所用 PPA 分别来自川东化工集团（CD）、越洋化工实业集团（YY）、展云化工有限公司（ZY）和艾科试剂有限公司（AK），以 $H_3PO_4$ 含量确定其等级，不同等级 PPA 的技术指标见表 2。

试验用集料产自河南省洛阳地区，集料与矿粉

* **基金项目：** 湖南省自然科学基金资助项目（2020JJ4615；2022JJ30594）；长沙市自然科学基金资助项目（kq2014109）

表 2 不同等级 PPA 的技术指标

| PPA 等级 | 技术指标 | |
|---|---|---|
| | $H_3PO_4$ 含量/% | $P_2O_5$ 含量/% |
| CD－100% | 100.1 | 72.4 |
| CD－105% | 105.3 | 76.3 |
| YY－105% | 105.1 | 76.1 |
| CD－110% | 110.2 | 80.3 |
| ZY－110% | 109.4 | 80.1 |
| CD－115% | 115.3 | 83.6 |
| AK－115% | 116.8 | 84.4 |

均为石灰岩，其主要技术指标见表 3。

### 1.2 PPA 改性沥青制备与性能测试方法

将 70# 基质沥青加热到 150 ℃，再将 1% 沥青质量的不同等级 PPA 分别掺入沥青中，采用高速剪切机以 3 500 r/min 的速率剪切 6 min，分别制成不同等级的 PPA 改性沥青。依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》分别对不同等级 PPA 改性沥青进行 25 ℃针入度试验、软化点试验、10 ℃延度试验，测定其针入度、软化点、延度。

表 3 集料的物理性能指标

| 项目 | 洛杉矶磨耗损失/% | 压碎值/% | 表观相对密度 | 小于 0.075 mm 颗粒含量/% | 针片状颗粒含量/% | 砂当量/% | 亲水系数/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 粗集料 | 19.6 | 19.9 | 2.745 | 0.5 | 6.3 | — | — |
| 细集料 | — | — | 2.736 | 1.9 | — | 67.7 | — |
| 矿粉 | — | — | 2.705 | — | — | — | 0.48 |

### 1.3 PPA 改性沥青混合料制备与性能测试方法

采用表 4 所示集料级配 AC－20，油石比为 4.9%，依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》制备不同等级 PPA 改性沥青混合料车辙试件，在 60 ℃下分别进行车辙试验，测定其动稳定度；将车辙试件切成小梁试件，在－10 ℃下分别进行小梁低温弯曲试验，测定其最大弯拉应变。成型不同等级 PPA 改性沥青混合料马歇尔试件，分别进行浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验，测定其残留稳定度与冻融劈裂抗拉强度比。

表 4 集料级配设计

| 粒径/mm | 通过率/% | 粒径/mm | 通过率/% |
|---|---|---|---|
| 26.50 | 100 | 2.360 | 26 |
| 19.00 | 93 | 1.180 | 22 |
| 16.00 | 82 | 0.600 | 12 |
| 13.20 | 70 | 0.300 | 9 |
| 9.50 | 58 | 0.150 | 7 |
| 4.75 | 42 | 0.075 | 5 |

## 2 PPA 等级对沥青性能的影响

### 2.1 沥青针入度

不同等级 PPA 改性沥青针入度试验结果及针入度与 PPA 等级的关系见图 1。

由图 1 可知：随着 PPA 等级的提高，PPA 改性沥青的针入度降低，且降幅较大。表明 PPA 等级对沥青针入度影响显著，随着PPA等级的提高，沥青

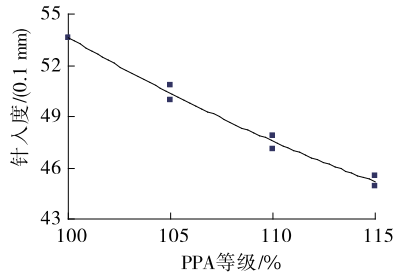


图 1 PPA 改性沥青针入度与 PPA 等级的关系

针入度降低。这主要是因为等级低的 PPA 以单体单元为主，与沥青组分反应后的化合物链较少；随着 PPA 等级的提高，PPA 单体单元减少，多聚合物增多，与沥青组分反应后的化合物链增多，链之间的交互作用增强，改性后沥青稠度增大。PPA 等级对沥青黏度影响显著，等级较高的 PPA 对沥青稠度的改善效果较好。

### 2.2 沥青软化点

不同等级 PPA 改性沥青软化点试验结果及沥青软化点与 PPA 等级的关系见图 2。

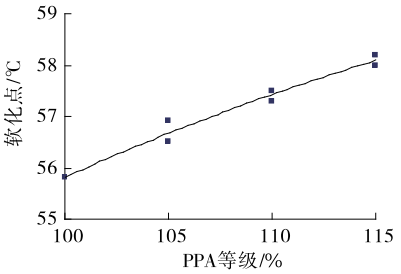


图 2 PPA 改性沥青软化点与 PPA 等级的关系

由图 2 可知：随着 PPA 等级的提高，PPA 改性

沥青的软化点升高，且增幅较大。表明 PPA 等级对沥青软化点影响显著，随着 PPA 等级的提高，沥青软化点提高。这主要是因为等级低的 PPA 以单体单元为主，与沥青组分反应后形成的“蜂状”结构较少；随着 PPA 等级的提高，PPA 单体单元减少，多聚合物增多，与沥青组分反应后形成的“蜂状”结构增多，改性后沥青高温性能增强。PPA 等级对沥青高温性能影响显著，等级较高的 PPA 对沥青高温性能的改善效果较好。

### 2.3　沥青延度

不同等级 PPA 改性沥青 10 ℃延度试验结果及沥青 10 ℃延度与 PPA 等级的关系见图 3。

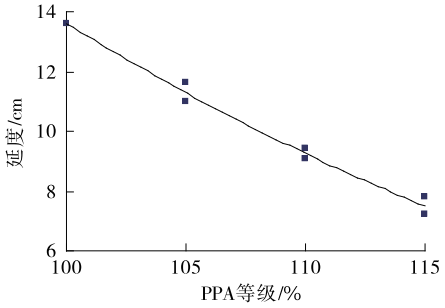


**图 3　PPA 改性沥青 10 ℃延度与 PPA 等级的关系**

由图 3 可知：随着 PPA 等级的提高，PPA 改性沥青的 10 ℃延度降低，且降幅较大。说明 PPA 等级对沥青延度影响显著，随着 PPA 等级的提高，沥青延度降低。这主要是因为等级低的 PPA 以单体单元为主，与沥青组分反应后化合物链较少，形成的“蜂状”结构也较少，对沥青延度的影响较小；随着 PPA 等级的提高，PPA 单体单元减少，多聚合物增多，与沥青组分反应后的化合物链增多，形成的“蜂状”结构也增多，对沥青延度的影响较大。PPA 等级对沥青低温性能影响显著，等级较高的 PPA 对沥青低温性能较为不利。

## 3　PPA 等级对沥青混合料性能的影响

### 3.1　沥青混合料高温稳定性

不同等级 PPA 改性沥青混合料车辙试验结果及动稳定度与 PPA 等级的关系见图 4。

由图 4 可知：随着 PPA 等级的提高，沥青混合料动稳定度增大，且增幅明显。说明 PPA 等级对沥青混合料高温稳定性影响显著，随着 PPA 等级的提高，沥青混合料的高温稳定性提高。这主要是因为随着 PPA 等级的提高，沥青稠度增大，表现为沥青混合料高温稳定性提高。PPA等级对沥青混合料

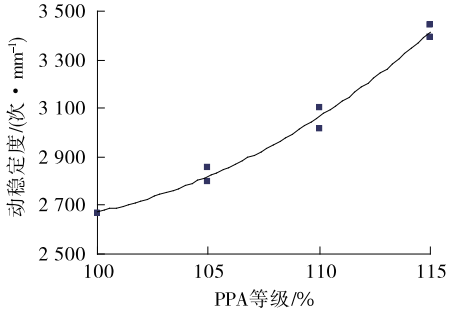


**图 4　PPA 改性沥青混合料动稳定度与 PPA 等级的关系**

高温稳定性影响显著，等级较高的 PPA 对沥青混合料高温稳定性的改善效果较好，高温地区宜采用等级较高的 PPA 改性沥青混合料。

### 3.2　沥青混合料低温抗裂性能

不同等级 PPA 改性沥青混合料小梁低温弯曲试验结果见图 5。

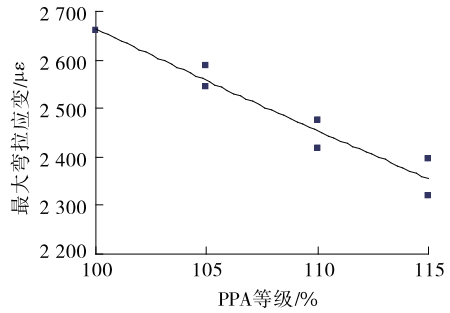


**图 5　PPA 改性沥青混合料最大弯拉应变与 PPA 等级的关系**

由图 5 可知：随着 PPA 等级的提高，沥青混合料最大弯拉应变降低，且降幅明显。说明 PPA 等级对沥青混合料低温抗裂性能影响显著，随着 PPA 等级的提高，沥青混合料低温抗裂性能降低。这主要是因为随着 PPA 等级的提高，沥青的延展性降低，表现为沥青混合料低温抗裂性能降低。PPA 等级对沥青混合料低温抗裂性能影响较大，等级较高的 PPA 对沥青混合料低温抗裂性能较为不利，低温地区宜采用等级低的 PPA 改性沥青混合料。

### 3.3　沥青混合料水稳定性

不同等级 PPA 改性沥青混合料浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验结果及残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比与 PPA 等级的关系见图 6、图 7。

由图 6、图 7 可知：随着 PPA 等级的提高，沥青混合料的残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比均提高，但增幅较小。说明 PPA 等级对沥青混合料水稳定性影响较大，随着 PPA 等级的提高，沥青混合料的水稳定性提高。这主要是因为随着PPA等级的提

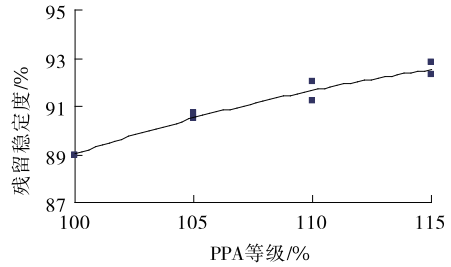


**图 6 PPA 改性沥青混合料残留稳定度与 PPA 等级的关系**

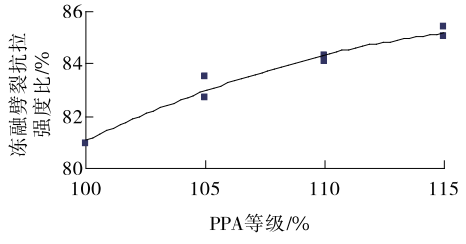


**图 7 PPA 改性沥青混合料冻融劈裂抗拉强度比与 PPA 等级的关系**

高，沥青稠度增大，表现为沥青混合料水稳定性在一定程度上提高。PPA 等级对沥青混合料水稳定性影响较大，等级较高的 PPA 对沥青混合料水稳定性的改善效果较好，多雨地区宜采用等级高的 PPA 改性沥青混合料。

## 4 结论

（1）PPA 等级对沥青及沥青混合料高温性能影响显著，等级较高的 PPA 对沥青高温性能及沥青混合料高温稳定性的改善效果较好，高温地区宜采用等级高的 PPA 改性沥青混合料。

（2）PPA 等级对沥青及沥青混合料低温性能影响显著，等级较高的 PPA 对沥青延展性与沥青混合料低温抗裂性能较为不利，低温地区宜采用等级低的 PPA 改性沥青混合料。

（3）PPA等级对沥青混合料水稳定性影响较大，等级较高的 PPA 对沥青稠度与沥青混合料水稳定性的改善效果较好，多雨地区宜采用等级高的 PPA 改性沥青混合料。

**参考文献：**

[1] 于玲，刘钢，周晓丹，等.高速公路沥青路面典型病害及分析[J].沈阳建筑工程学院学报(自然科学版)，2004，20(1)：36－38.

[2] 张争奇，张英楠，黄硕磊.SBS-PU 复合改性沥青及其混合料路用性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版)，2020，39(5)：80－88.

[3] 宋小金，樊亮.多聚磷酸与 SBS 复合改性沥青混合料的路用性能研究[J].中外公路，2016，36(4)：289－293.

[4] 李超，王岚.复合多聚磷酸改性沥青混合料疲劳性能[J].复合材料学报，2018，35(8)：2149－2157.

[5] 王永宁.多聚磷酸复配 SBS 改性沥青粘附性能及微观表征方法研究[D].兰州：兰州交通大学，2019.

[6] 丁海波，周刚，王火明.多聚磷酸对沥青化学组分与路用性能的影响[J].中外公路，2014，34(4)：327－330.

[7] 李彩霞，张苛，罗要飞.基于半圆弯拉试验的多聚磷酸改性沥青混合料低温性能改善研究[J].中外公路，2019，39(4)：234－239.

[8] 宋聪聪，张青，魏艳楠，等.多聚磷酸改性沥青胶浆性能[J].公路，2021(4)：268－273.

[9] 刘斌清，仵江涛，陈华鑫，等.多聚磷酸改性沥青的路用性能及机理分析[J].深圳大学学报(理工版)，2018，35(3)：292－298.

[10] 刘红瑛，常睿，张铭铭，等.多聚磷酸改性沥青及其混合料低温性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版)，2017，44(5)：104－112.

[11] 窦谦培，师阳.PPA 掺量对多聚磷酸改性沥青性能的影响[J].兰州工业学院学报，2020，27(3)：24－27.

[12] 张铭铭.多聚磷酸改性沥青微观结构及技术性能研究[D].西安：长安大学，2012.

收稿日期：2022－01－20

(上接第 46 页)

分析[D].长沙：长沙理工大学，2018.

[2] 谭海勤.不同类型纤维沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运，2021(3)：61－63.

[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.

[4] 蒋梦雅，刘颀楠，卢峰.玻璃纤维对沥青混合料路用性能的影响[J].公路，2021(7)：63－68.

[5] 周强.玻璃纤维长度对不同级配沥青混合料路用性能影响研究[J].中外公路，2021，41(1)：284－289.

[6] 赵普，李明，何唯平，等.增强 PAN 纤维在彩色沥青公交车道中的应用研究[J].施工技术，2018，47(20)：19－21＋25.

[7] 高丹盈，黄春水.纤维沥青混凝土低温性能试验及温度应力计算模型[J].中国公路学报，2016，29(2)：12－19.

收稿日期：2021－08－24