



# 团 体 标 准

T/SDHTS XXXXX-XXXX

## 沥青路面深层病害注浆处治技术规程

Code of practice for grouting treatment of deep structural  
distresses in asphalt pavements

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

山东公路学会 发布

# 目 次

|                      |    |
|----------------------|----|
| 前言 .....             | 1  |
| 1 范围 .....           | 2  |
| 2 规范性引用文件 .....      | 2  |
| 3 术语和定义 .....        | 3  |
| 4 处治程序 .....         | 3  |
| 5 材料选择 .....         | 4  |
| 5.1 双组分聚氨酯注浆材料 ..... | 4  |
| 5.2 地聚物注浆材料 .....    | 5  |
| 6 方案设计 .....         | 6  |
| 6.1 病害检测 .....       | 6  |
| 6.2 注浆处治方案设计 .....   | 6  |
| 7 施工与验收 .....        | 9  |
| 7.1 注浆设备 .....       | 9  |
| 7.2 施工准备 .....       | 9  |
| 7.3 施工工艺 .....       | 10 |
| 7.4 过程质量管理 .....     | 12 |
| 7.5 验收 .....         | 12 |

# 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东高速股份有限公司提出。

本文件由山东公路学会归口。

本文件起草单位：山东高速股份有限公司、山东省交通科学研究院、山东远通公路工程集团有限公司、枣庄市公路和地方铁路事业发展中心、单县公路事业发展中心、山东省单县湖西路桥建筑有限公司。

本文件主要起草人：

# 沥青路面深层病害注浆处治技术规程

## 1 范围

本文件规定了公路沥青路面深层病害的调查与检测、注浆材料与设备的要求和质量验收标准，确立了施工工艺流程。

本文件适用于公路沥青路面深层病害注浆处治工程。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 5768.4—2017 道路交通标志和标线 第4部分：作业区
- GB/T 1040.2—2022 塑料 拉伸性能的测定 第2部分：模塑和挤塑塑料的试验条件
- GB/T 1041—2008 塑料 压缩性能的测定
- GB/T 1346—2024 水泥标准稠度用水量、凝结时间与安定性检验方法
- GB/T 4472—2011 化工产品密度、相对密度的测定
- GB/T 6343—2009 泡沫塑料及橡胶 表观密度的测定
- GB/T 8811—2008 硬质泡沫塑料 尺寸稳定性试验方法
- GB/T 8812.2—2007 硬质泡沫塑料 弯曲性能的测定 第2部分：弯曲强度和表观弯曲弹性模量的测定
- GB/T 8813—2020 硬质泡沫塑料 压缩性能的测定
- GB/T 9341—2008 塑料 弯曲性能的测定
- GB/T 9641—2025 硬质泡沫塑料 拉伸性能的测定
- GB/T 10007—2008 硬质泡沫塑料 剪切强度试验方法
- GB/T 11547—2008 塑料 耐液体化学试剂性能的测定
- GB/T 12008.7—2010 塑料 聚醚多元醇 第7部分：粘度的测定
- GB/T 12009.3—2009 塑料 多亚甲基多苯基异氰酸酯 第3部分：黏度的测定
- GB/T 12009.4—2016 塑料 聚氨酯生产用芳香族异氰酸酯 第4部分：异氰酸根含量的测定

GB/T 17219—2025 生活饮用水输配水设备、防护材料及水处理材料卫生安全评价

GB/T 22313—2008 塑料 用于聚氨酯生产的多元醇 水含量的测定

GB/T 50448—2015 水泥基灌浆材料应用技术规范

JC/T 2041—2020 聚氨酯灌浆材料

JTG H30—2015 公路养护安全作业规程

JTG 3420—2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程

JTG 3450—2019 公路路基路面现场测试规程

DB37/T 4870—2025 沥青路面无损检测 落锤式弯沉仪法和三维探地雷达法

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**深层病害 deep structural distresses**

发生在道路表面层以下的裂缝、唧浆、松散、脱空、路基强度不足等病害。

#### 3.2

**双组分聚氨酯注浆材料 two-component polyurethane grouting material**

由异氰酸酯组分与多元醇组分（可含助剂）组成的、用于填充孔隙裂缝或黏结松散的有机高分子注浆材料。

#### 3.3

**地聚物注浆材料 geopolymer grouting material**

由铝硅酸盐材料与碱性激发剂组成的、用于填充脱空或补强的无机聚合物注浆材料。

#### 3.4

**注浆处治 grouting treatment**

通过钻孔方式向路面结构层注入注浆材料，对深层病害进行处治的非开挖修复技术。

### 4 处治程序

处治程序包括材料选择、方案设计、施工与验收3个阶段，程序流程图如图1所示。

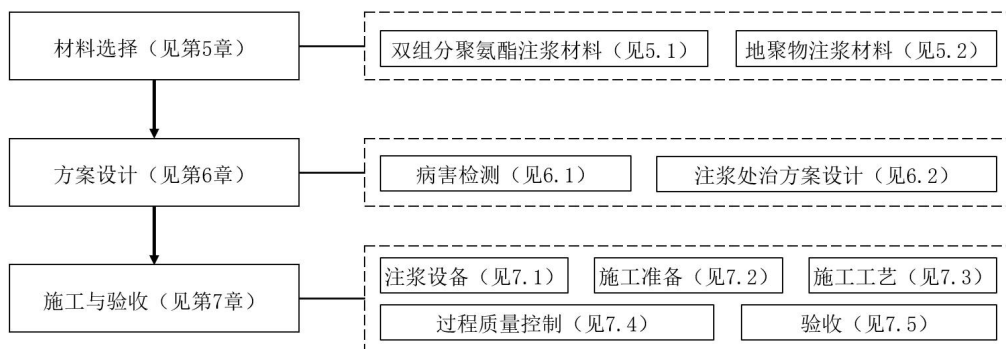


图1 深层病害注浆处治程序流程图

## 5 材料选择

### 5.1 双组分聚氨酯注浆材料

5.1.1 双组分聚氨酯注浆材料按使用性能分为 I 型与 II 型。I 型适用于裂缝、松散处治；II 型适用于唧浆处治。

5.1.2 原材料 A、B 组分的技术要求应分别符合表 1、表 2 的规定，A、B 组分混合后注浆材料技术要求应符合表 3（I 型）或表 4（II 型）的规定。

表 1 双组分聚氨酯注浆材料 A 组分技术要求

| 项目                           | 技术要求         | 试验方法              |
|------------------------------|--------------|-------------------|
| 外观                           | 均匀液体，无分层、无杂质 | 目视                |
| 黏度(25℃)/(Pa·s)               | 0.1~0.6      | GB/T 12009.3-2009 |
| 密度(25℃)/(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.20~1.25    | GB/T 4472-2011    |
| NCO 含量/(%)                   | 30.5~32.0    | GB/T 12009.4-2016 |

表 2 双组分聚氨酯注浆材料 B 组分技术要求

| 项目                           | 技术要求         | 试验方法              |
|------------------------------|--------------|-------------------|
| 外观                           | 均匀液体，无分层、无杂质 | 目视                |
| 黏度(25℃)/(Pa·s)               | ≤1.2         | GB/T 12008.7-2010 |
| 密度(25℃)/(g/cm <sup>3</sup> ) | 1.00~1.15    | GB/T 4472-2011    |
| 水含量/(%)                      | ≤0.1         | GB/T 22313-2008   |

表 3 I 型双组分聚氨酯注浆材料技术要求

| 项目                        | 技术要求   | 试验方法             |
|---------------------------|--------|------------------|
| 凝胶时间(25℃)/(s)             | 60~600 | JC/T 2041-2020   |
| 表观密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | ≥600   | GB/T 6343-2009   |
| 抗拉强度/(MPa)                | ≥3.0   | GB/T 1040.2-2022 |

|            |                |                 |
|------------|----------------|-----------------|
| 抗压强度/(MPa) | ≥5.0           | GB/T 1041-2008  |
| 剪切强度/(MPa) | ≥1.0           | GB/T 10007-2008 |
| 弯曲强度/(MPa) | ≥1.0           | GB/T 9341-2008  |
| 耐化学腐蚀      | 良好             | GB/T 11547-2008 |
| 水中凝胶状态     | 表面无粉化、无开裂、质地坚硬 | 目视              |
| 环保性        | 不对水质及周边土体造成污染  | GB/T 17219-2025 |

表 4 II 型双组分聚氨酯注浆材料技术要求

| 项目                            | 技术要求           | 试验方法             |
|-------------------------------|----------------|------------------|
| 凝胶时间(25℃)/(s)                 | 60~600         | JC/T 2041-2020   |
| 发泡率(%)                        | 150~500        | JC/T 2041-2020   |
| 自由发泡表观密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 200~600        | GB/T 6343-2009   |
| 低温尺寸稳定性(-30℃)/(%)             | ≤0.5           | GB/T 8811-2008   |
| 高温尺寸稳定性(80℃)/(%)              | ≤1.5           | GB/T 8811-2008   |
| 抗拉强度 <sup>a</sup> /(MPa)      | ≥1.5           | GB/T 9641-2025   |
| 抗压强度 <sup>a</sup> /(MPa)      | ≥3.0           | GB/T 8813-2020   |
| 剪切强度 <sup>a</sup> /(MPa)      | ≥0.6           | GB/T 10007-2008  |
| 弯曲强度 <sup>a</sup> /(MPa)      | ≥0.6           | GB/T 8812.2-2007 |
| 耐化学腐蚀                         | 良好             | GB/T 11547-2008  |
| 水中凝胶状态                        | 表面无粉化、无开裂、质地坚硬 | 目视               |
| 环保性                           | 不对水质及周边土体造成污染  | GB/T 17219-2025  |

注：a 指材料表观密度为 200kg/m<sup>3</sup> 时的指标，其余指标按自由发泡状态测定。

## 5.2 地聚物注浆材料

5.2.1 地聚物注浆材料技术要求应符合表 5 的规定。

表 5 地聚物注浆材料技术要求

| 项目         | 技术要求  |           | 试验方法            |
|------------|-------|-----------|-----------------|
|            | 初始值   | ≥290      |                 |
| 流动性/(mm)   | 30min | ≥260      | GB/T 50448-2015 |
|            | 初凝    | ≥1.0      |                 |
| 凝结时间/(h)   | 终凝    | ≤6.0      | GB/T 1346-2024  |
|            | ≤0.4  |           |                 |
| 泌水率/(%)    |       |           | JTG 3420—2020   |
| 抗压强度/(MPa) | 7d    | ≥20       |                 |
|            | 28d   | ≥40       |                 |
| 竖向膨胀/(%)   | 3h    | 0.1~3.5   | GB/T 50448-2015 |
|            | >3h   | 0.02~0.50 |                 |

## 6 方案设计

### 6.1 病害检测

6.1.1 开展现场调查，初步确定病害路段范围和主要病害类型。

6.1.2 雷达检测宜采用 3D 探地雷达；采用 3D 雷达检测时应符合下列规定：

- a) 检测按照 DB37/T 4870 的规定执行；
- b) 检测范围覆盖病害路段范围内全部车道；
- c) 雷达中心频率为 900MHz~1300MHz，带宽为 1.0GHz~1.5GHz；连续采集检测数据时，沿行车方向数据采样间隔不大于 0.05m；
- d) 分析探地雷达图像，确定病害类型、范围、层位与尺寸；为注浆深度与注浆量设计确定提供依据。

6.1.3 落锤弯沉检测应符合下列规定：

- a) 检测按照 JTG 3450 的规定执行，检测荷载采用 50kN 级；
- b) 测点覆盖病害路段内各车道轮迹带、表观病害典型部位或雷达异常位置；连续分布病害沿行车方向布设检测断面，断面间距不宜大于 10m；
- c) 分析弯沉检测数据，结合雷达检测结果，为处治范围校核、孔位布设参数和注浆控制参数确定提供依据。

### 6.2 注浆处治方案设计

6.2.1 存在大范围破碎、路基滑移或路基塌陷等结构失稳，或需开挖重建的情形，不宜采用注浆处治。

6.2.2 双组分聚氨酯注浆处治设计应符合表 6 的规定。

表 6 双组分聚氨酯注浆处治方案设计

| 设计参数   |       | 病害类型                |   |  |                      |
|--------|-------|---------------------|---|--|----------------------|
|        |       | 裂缝                  | 单点唧浆  | 裂缝伴随唧浆   | 松散                   |
| 注浆材料选择 |       | I 型聚氨酯注浆材料          | II 型聚氨酯注浆材料                                 |  | I 型聚氨酯注浆材料           |
| 布孔参数   | 布孔方式  | 沿缝均匀布设，孔距 0.5m，见图 2 | 以唧浆点为中心向外布孔至边界（可根据便携式弯沉检测设备确定），孔距 0.3m，见图 3 | 沿缝两侧 0.3m 交错布孔，缝中孔距 0.5m；唧浆点周边加密，孔距 0.15m，见图 4 | 采用梅花形布孔，孔距 0.5m，见图 5 |
|        | 打孔尺寸  | 10mm~16mm           | 10mm~16mm                                   |  | 10mm~16mm            |
|        | 打孔深度  | 至病害底端               | 至病害影响层                                      |  | 至病害底端                |
| 注浆参数   | 设计注浆量 | 按裂缝空隙、孔距及扩散半径估算     | 按空隙（空腔）体积及材料发泡率估算                           |  | 按空隙体积折算，折算系数 1.0~1.5 |

|                   |               |               |               |               |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 注入方式              | 常规起注, 按需连续注入  | 低速起注, 控量注入    | 常规起注, 唧浆点控量注入 | 低速起注, 分次注入    |
| 出料速率 <sup>a</sup> | 2L/min~6L/min | 1L/min~4L/min |               | 1L/min~2L/min |

注 a: 表中出料速率为注浆枪出口处混合液体的体积流量。

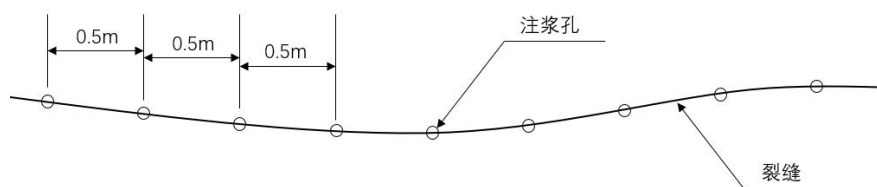


图 2 裂缝注浆孔布置示意图

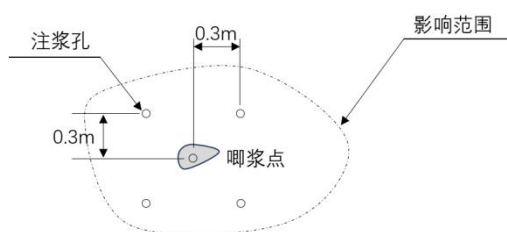


图 3 单点唧浆注浆孔布置示意图

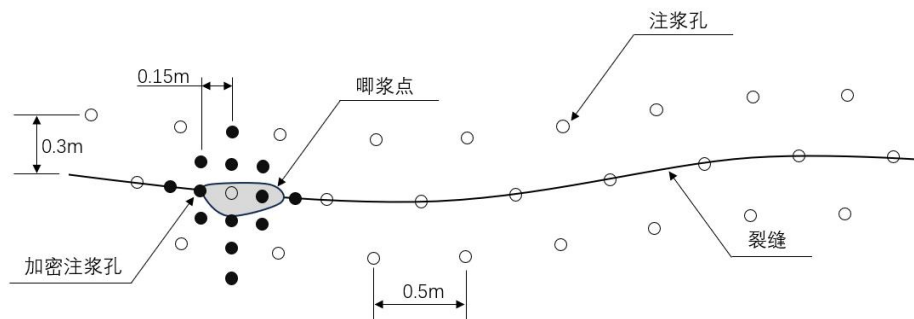


图 4 裂缝伴随唧浆注浆孔布置示意图

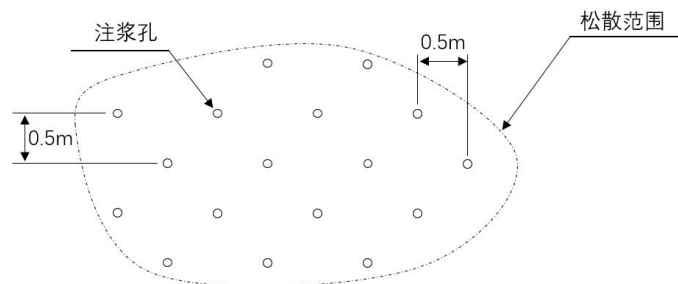


图 5 松散注浆孔布置示意图

6.2.3 地聚物注浆处治设计参数应符合表 7 的规定。

表 7 地聚物注浆处治设计参数

| 设计参数   |       | 病害类型                        |                             |
|--------|-------|-----------------------------|-----------------------------|
|        |       | 脱空                          | 路基强度不足                      |
| 注浆材料选择 |       | 地聚物注浆材料                     |                             |
| 布孔参数   | 布孔方式  | 矩形或梅花形布孔，孔距 1.0m，并设观察孔，见图 6 | 矩形或梅花形布孔，孔距 1.0m，并设观察孔，见图 7 |
|        | 打孔尺寸  | 38mm~50mm                   | 38mm~50mm                   |
|        | 打孔深度  | 至病害底端                       | 至设计加固深度                     |
| 注浆参数   | 设计注浆量 | 按脱空体积估算                     | 按加固范围与设计深度估算                |
|        | 出料压力  | 0.5MPa~1.5MPa               | 0.5MPa~2.0MPa               |
|        | 出料速率  | 50L/min~100L/min            | 50L/min~120L/min            |

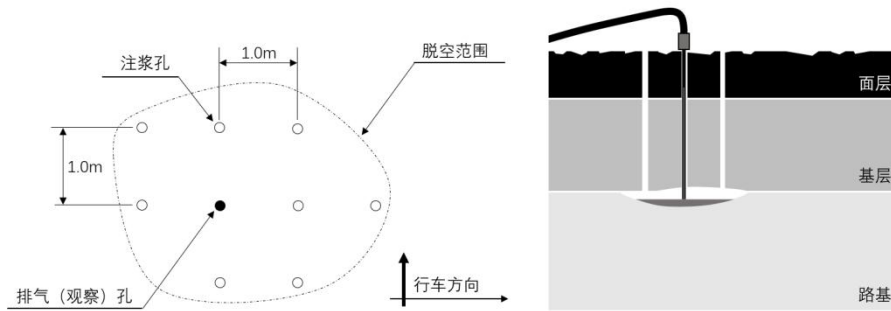


图 6 脱空注浆孔布置示意图

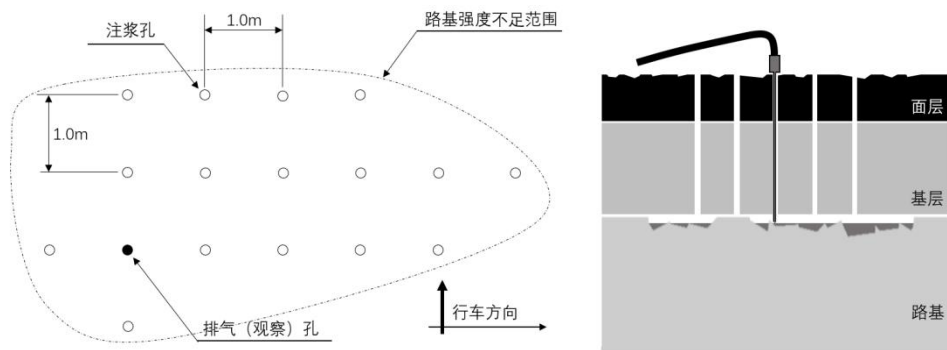


图 7 路基强度不足注浆孔布置示意图

## 7 施工与验收

### 7.1 注浆设备

7.1.1 双组分聚氨酯注浆设备包括双液注浆泵、注浆枪、注浆管、注浆接头、空压机和钻机等。注浆枪应启闭灵活，并具备出料速率调节功能；注浆管和注浆接头应连接可靠、密封良好。主要设备技术参数应符合表 8 的规定。

表 8 双组分聚氨酯注浆设备

| 设备名称  | 参数                | 技术要求                    |
|-------|-------------------|-------------------------|
| 双液注浆泵 | 工作压力 <sup>a</sup> | 8MPa~12MPa              |
|       | 输出流量              | 1L/min~10L/min          |
|       | 加热温度范围            | 0~80℃                   |
|       | A、B 组分混合比例        | 可调                      |
| 空压机   | 排气压力              | ≥0.7MPa                 |
|       | 排气量               | ≥1.0m <sup>3</sup> /min |
| 钻机    | 最大钻孔深度            | ≥1.5m                   |
|       | 钻头直径              | 10mm~16mm               |

注 a：双液注浆泵工作压力为设备供料和混合所需系统压力，不直接作为病害孔内注浆压力采用。

7.1.2 地聚物注浆设备包括注浆泵、搅拌机和钻机等，必要时宜配备清洗设备。主要设备技术参数应符合表 9 的规定。

表 9 地聚物注浆设备

| 设备名称 | 参数     | 技术要求               |
|------|--------|--------------------|
| 注浆泵  | 工作压力   | 0.5MPa~5MPa        |
|      | 输出流量   | 50L/min~200L/min   |
| 搅拌机  | 容积     | 100L~400L          |
|      | 转速     | 200r/min~1000r/min |
| 钻机   | 最大钻孔深度 | ≥2.0m              |
|      | 钻头直径   | 38mm~50mm          |

7.1.3 现场供电应满足注浆泵、搅拌机、空压机、加热装置及其他用电设备运行要求；无外接电源时，应配备发电机。

### 7.2 施工准备

7.2.1 施工宜在无降雨、无降雪天气条件下进行；环境温度、基层含水状态等不应影响材料正常反应、浆液扩散和施工操作。

7.2.2 施工前应按 GB 5768.4 和 JTG H30 的有关规定设置作业区标志和养护作业控制区，并完成交通组织和安全防护。

7.2.3 施工前应核查材料质量文件、材料状态及设备机具工作状态，并进行技术交底；不符合设计及本文件要求的材料和设备不得使用。

7.2.4 施工前应对病害范围、孔位及作业面状态进行复核；现场情况与设计不符时，应进行二次确认并调整参数，施工准备满足要求后方可施工。

### 7.3 施工工艺

7.3.1 注浆施工应根据病害类型和选用材料采用相应工艺，施工工艺流程宜按图 8 进行。

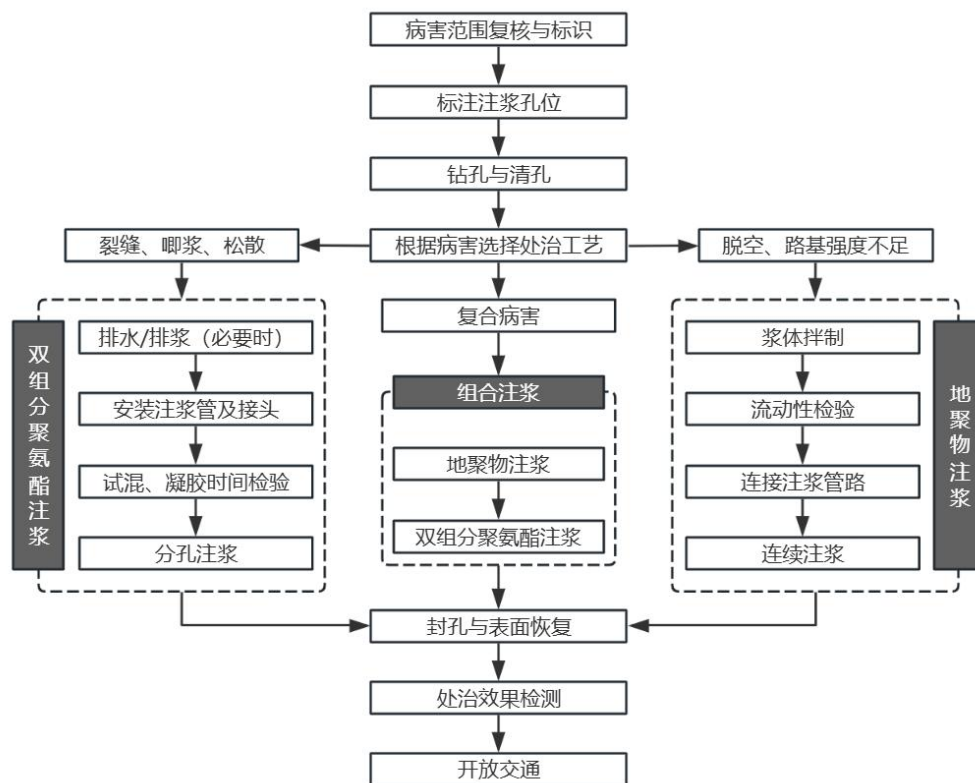


图 8 注浆施工工艺流程图

7.3.2 双组分聚氨酯注浆应满足下列要求：

- 按本文件表 6 确定的孔位、孔径、孔深进行钻孔，钻孔完成后清除孔内粉尘与杂物；
- 孔内存在游离水或泥浆时，先采用空压设备排水（排浆），排气压力不小于 0.7MPa，以孔口连续 30s 无明显水或泥浆挤出作为完成判据；
- 注浆管按设计深度安装并固定，孔口与注浆管之间封闭密实；注浆接头与注浆管、注浆枪连

接牢固，不可出现松动、堵塞或漏浆；

- d) 注浆前进行现场试混出料，检查材料混合状态、凝胶时间、固化状态和设备出料稳定性；出现异常时，不得进行注浆施工；
- e) 注浆起注阶段，以表 6 规定的出料速率下限短时注入，观察裂缝及相邻孔返浆情况、设备压力表读数及路表变化；确认无异常后，通过调节注浆枪控制阀开度及连续或间歇注入方式，控制出料速率、注入节奏和注浆量进行注浆。
- f) 施工推进顺序根据病害形态的情况确定；线状病害由低处向高处分段推进，点状、面状病害由影响区外围向中心推进。

#### 7.3.3 地聚物注浆应满足下列要求：

- a) 按本文件表 7 确定的孔位、孔径、孔深进行钻孔，钻孔完成后应清除孔内碎屑与杂物；
- b) 地聚物浆体按设计配合比采用机械搅拌制备，经现场流动度检验合格后方可使用；
- c) 地聚物浆体在注浆过程中保持匀速搅拌，并在 2h 内使用完毕；超过规定使用时间，或出现离析、结块、流动度不满足要求时，不得继续使用；
- d) 孔内允许存在少量积水或处于湿润状态，但不准许在持续流动水条件下注浆；
- e) 注浆阶段保持浆液连续注入，不可频繁启停设备；出料压力和出料速率按本文件表 7 规定的范围进行控制，过程中根据设备压力、观察孔（或排气孔）出浆情况及路表变化调整出料速率和注浆量；
- f) 脱空处治由低位向高位分段推进；路基强度不足处治先边界、后中部，并沿行车方向分段推进。

#### 7.3.4 出现下列情形之一时，应停止该孔注浆：

- a) 达到设计注浆量；
- b) 相邻孔、裂缝或观察孔（或排气孔）出现稳定返浆，且目标区域已形成扩散；
- c) 设备压力升至设计上限并稳定保持不少于 10s，进浆量明显减小；
- d) 路面出现拱起、开裂、漏浆；
- e) 设备或管路异常。

7.3.5 脱空或路基强度不足病害与裂缝、唧浆等病害并存时，宜采用地聚物与双组分聚氨酯组合注浆；组合注浆时应先实施地聚物注浆，后实施双组分聚氨酯注浆，间隔时间根据地聚物注浆材料凝结时间确定，一般为 2~4h。

7.3.6 注浆完成后应及时封孔，并恢复路表外观。

## 7.4 过程质量管理

7.4.1 施工过程中质量管理应按照表 10 规定的检测项目、要求及频率检查施工质量。

表 10 施工过程中质量管理要求

| 序号 | 检测项目             | 检测要求               |     |          |        |        | 检测频率 | 检测方法        |
|----|------------------|--------------------|-----|----------|--------|--------|------|-------------|
| 1  | 双组分聚氨酯注浆材料       | 出料混合均匀             |     | 凝胶时间 (s) |        |        | 每批次  | 目测、凝胶时间检测   |
|    |                  |                    |     | 60~600   |        |        |      |             |
| 2  | 地聚物注浆材料          | 拌合均匀               |     | 流动性 (mm) |        |        | 每次拌制 | 目测、流动度检验    |
|    |                  |                    |     | 初始值      | 30min  |        |      |             |
|    |                  |                    |     | ≥290     | ≥260   |        |      |             |
| 3  | 注浆量              | 符合设计要求的±5%         |     |          |        |        | 每处病害 | 施工记录        |
| 4  | 出料速率/<br>(L/min) | 裂缝                 | 唧浆类 | 松散       | 脱空     | 路基强度不足 | 每处病害 | 施工记录        |
|    |                  | 2~6                | 1~4 | 1~2      | 50~100 | 50~120 |      |             |
| 5  | 路表变化             | 无异常拱起、开裂、漏浆        |     |          |        |        | 每处病害 | 目测          |
| 6  | 路面弯沉             | 满足设计要求             |     |          |        |        | 每处病害 | JTG 3450    |
| 7  | 探地雷达             | 满足设计要求；异常反射范围减小或消除 |     |          |        |        | 每处病害 | DB37/T 4870 |

7.4.2 弯沉与雷达检测不满足设计要求时，对应部位应采取补注或其他处治措施，并重新检测。

7.4.3 弯沉与雷达检测满足设计要求且达到开放交通条件后，方可开放交通。

## 7.5 验收

7.5.1 工程完工 7d 后，按照表 11 规定组织交工验收。

表 11 质量验收要求

| 序号 | 验收项目     | 验收要求              | 验收方式 |
|----|----------|-------------------|------|
| 1  | 材料质量证明资料 | 符合设计及本文件要求        | 资料核查 |
| 2  | 施工记录资料   | 记录完整、数据真实、结论明确    | 资料核查 |
| 3  | 处治效果检测资料 | 弯沉和探地雷达检测结果符合设计要求 | 资料核查 |
| 4  | 病害复查情况   | 原处治部位无病害复发或发展     | 目测   |

# 沥青路面深层病害注浆处治技术规程

## 编制说明（征求意见稿）

### 一 工作概况

#### （一）任务来源

根据山东公路学会《关于发布第三批（2025年度）山东公路学会标准立项计划的通知》（鲁公学会〔2025〕12号），《沥青路面反射裂缝非开挖处治技术规程》列入山东公路学会团体标准制定项目，立项编号为2025-11。标准起草过程中，编制组根据工程应用需求和专家意见，对标准适用对象和技术内容进行了扩展完善，标准名称拟调整为《沥青路面深层病害注浆处治技术规程》。

本文件由山东高速股份有限公司提出，由山东公路学会归口管理。

#### （二）任务分工

本标准主编单位为山东高速股份有限公司，参编单位包括单县公路事业发展中心、山东省交通科学研究院、山东省单县湖西路桥建筑有限公司、山东远通公路工程集团有限公司、枣庄市公路和地方铁路事业发展中心。

山东高速股份有限公司作为主编单位，负责标准编制工作的组织协调、技术路线确定、工程应用资料汇总、标准文本统稿及修改完善等工作。山东省交通科学研究院主要负责标准总体技术框架、材料性能指标、检测评价方法、处治方案设计参数和施工控制要求的研究与论证。山东远通公路工程集团有限公司、枣庄市公路和地方铁路事业发展中心、单县公路事业发展中心、山东省单县湖西路桥建筑有限公司结合养护工程实践，参与病害调查、现场检测、施工工艺、过程质量管理和验收要求等内容的编写与校核。

#### （三）制定背景

沥青路面在长期交通荷载、温度变化、雨水侵入及基层材料性能衰减等因素作用下，除表面裂缝、坑槽等可见病害外，还容易出现道路表面层以下裂缝、唧浆、松散、脱空、路基强度不足等深层病害。此类病害具有隐蔽性强、发展速度快、表面表现与内部结构损伤不完全一致等特点，若仅采用表层封缝、铣刨重铺等常规处治方式，往往难以消除深层结构缺陷，易造成病害反复出现，增加养护频次和运营期维护成本。

随着公路养护向精细化、结构性和绿色低碳方向发展，采用弯沉检测、三维探地雷达等无损检测手段识别深层病害范围，并通过注浆方式进行裂缝封闭、空隙填充、松散黏结和支承恢复，已成

为公路沥青路面深层病害处治的重要技术路径。双组分聚氨酯注浆材料具有反应速度可控、成型快、封闭和黏结能力较好的特点，适用于裂缝、唧浆、松散等病害处治；地聚物注浆材料具有流动性好、充填能力强、强度发展稳定等特点，适用于脱空填充和路基强度不足补强。

现行公路养护、检测、材料和质量评定相关标准对弯沉检测、探地雷达检测、注浆材料试验方法、养护工程质量检验等作出了规定，但针对沥青路面深层病害注浆处治这一具体工程场景，仍存在材料适用边界不够清晰、病害类型与布孔参数对应关系不足、注浆压力和出料速率控制口径不统一、复合病害组合注浆顺序和停注判据不明确等问题。

因此，有必要制定《沥青路面深层病害注浆处治技术规程》，在现有标准体系基础上，形成覆盖“处治程序—材料选择—方案设计—施工与验收”的成套技术要求，明确不同病害类型对应的材料选择、检测方法、孔位布设、注浆参数、过程控制和验收方法，为公路沥青路面深层病害注浆处治工程提供可复制、可检查、可追溯的技术依据。

#### （四）起草过程

##### 1. 立项阶段

2024年12月，山东高速股份有限公司牵头向山东公路学会提出团体标准立项申请。期间，主编单位围绕沥青路面反射裂缝及相关深层病害注浆处治的工程需求与技术现状，梳理标准编制的总体目标、技术范围与章节框架，形成初步编制思路与工作分工建议。后续在标准起草和专家审查过程中，结合工程应用需求将适用对象进一步扩展为沥青路面深层病害注浆处治。

2025年3月，山东公路学会立项后成立本规程编制组，邀请行业内相关建设、施工与科研单位参与，明确编写大纲及成员任务分工，制定详细工作计划。在此基础上，编制组开展资料收集与调研工作，重点梳理现行国家标准、行业标准及山东省相关标准中与病害调查检测、注浆材料与设备、施工控制及质量验收有关的条款要求；同时对国内同类地方标准与团体标准的技术规定进行对照分析，归纳可借鉴的成熟做法与需进一步明确的关键问题，为技术条文提出提供依据。在调研与对照分析的基础上，编制组结合工程应用与试验验证经验，按照既定技术路线组织编写与讨论修改，形成标准初稿及配套编制说明。

##### 2. 初稿审查

2026年1月，山东公路学会组织召开团体标准初稿审查会，对标准初稿及编制说明进行了审查和讨论。与会专家认为标准框架基本完整、技术路线较为清晰，并围绕适用范围、章节结构、材料适用场景、施工工艺、注浆过程控制和验收要求等提出修改意见。会后，编制组逐项梳理专家意见，对标准名称、适用范围、术语定义、章节结构、材料技术指标及适用场景、方案设计参数、施工工

艺、过程质量管理和验收要求等内容进行了系统修改完善，形成《沥青路面深层病害注浆处治技术规程》征求意见稿及相应编制说明。

3. 征求意见
4. 送审稿审查
5. 报批、发布

## 二、标准编制原则、主要内容及其确定依据

### （一）编制原则

本规程的制订依据 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求起草，在充分调研现行国家标准、行业标准、地方标准和工程实践的基础上，遵循以下原则。

1. 协调衔接原则。标准内容与现行公路养护、检测、材料试验和质量检验相关标准保持协调，在不重复、不冲突的前提下，对沥青路面深层病害注浆处治中的关键技术环节进行细化。
2. 工程适用原则。标准围绕运营期公路沥青路面深层病害处治的实际需求，明确材料、检测、设计、施工和验收要求，条款表达力求清晰、具体，便于现场执行。
3. 成熟可靠原则。标准吸收已开展工程应用和材料试验验证成果，对材料性能、检测方法、注浆参数和质量验收等内容进行合理归纳，确保技术路线具有工程成熟度和可验证性。
4. 指标合理原则。标准中涉及的凝胶时间、发泡率、流动度、强度、孔距、孔径、注浆深度、出料压力、出料速率和验收检测项目等，综合考虑材料特性、病害类型、施工可控性和处治效果要求确定。
5. 技术引导原则。标准通过区分双组分聚氨酯I型和II型和地聚物材料适用场景，建立检测引导的处治设计和过程质量管理要求，引导深层病害处治由经验施工向标准化、精细化施工转变。

### （二）主要内容及其确定依据

本标准主要包括范围、规范性引用文件、术语和定义、处治程序、材料选择、方案设计、施工与验收七部分内容。各部分设置依据如下。

1. 范围。本部分明确标准适用于公路沥青路面深层病害注浆处治工程，规定调查与检测、注浆材料与设备、施工工艺、质量管理和验收要求。
2. 规范性引用文件。本部分列出材料性能试验、注浆材料、现场检测、养护工程质量检验及山东省无损检测等相关标准，作为本标准技术要求和试验方法的依据。

3. 术语和定义。本部分规定深层病害、双组分聚氨酯注浆材料、地聚物注浆材料、注浆处治等核心术语，统一本标准的适用对象和技术表达。

4. 处治程序。本部分提出深层病害注浆处治包括材料选择、方案设计、施工与验收三个阶段，体现先判明病害和材料适用性，再设计布孔和注浆参数，最后实施施工控制与验收评价的技术逻辑。

5. 材料选择。本部分分别规定双组分聚氨酯注浆材料和地聚物注浆材料的技术要求。其中，双组分聚氨酯材料按使用性能划分为 I 型和 II 型，I 型适用于裂缝、松散处治，II 型适用于唧浆处治；地聚物材料适用于脱空填充或路基强度不足补强。

6. 方案设计。本部分是将病害调查检测成果转化为注浆处治方案的核心章节，规定以现场调查、三维探地雷达检测和落锤弯沉检测结果为依据，综合分析病害类型、范围、层位及结构承载状态，确定处治范围、处治目标 and 设计控制指标。针对裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆、松散、脱空、路基强度不足等典型病害，分别明确材料选择、布孔方式、孔径、孔深、设计注浆量、出料压力和出料速率等设计参数，为施工交底、过程控制和质量验收提供依据。

7. 施工与验收。本部分规定双组分聚氨酯和地聚物注浆设备、施工准备、施工工艺、注浆终止判据、组合注浆顺序、过程质量管理、开放交通条件和交工验收要求。

### 三、主要技术内容

#### (一) 试验验证分析

##### 1. 材料性能与适用性论证

###### (1) 双组分聚氨酯注浆材料

双组分聚氨酯注浆材料 A 组分为异氰酸酯组分，B 组分为多元醇组分及相关助剂。原材料性能直接决定现场配比计量、泵送输送、枪头混合、反应速度和固结体成型质量。编制组结合多批次原材料检测、室内试配试验和现场试注验证结果，对 A、B 组分的外观、黏度、密度、NCO 含量和水含量提出控制要求，以保证原材料质量稳定、混合反应可控，并满足现场注浆施工对连续泵送、均匀混合、稳定反应和可靠成型的要求。

A 组分技术指标主要用于控制异氰酸酯原料的反应活性和施工适应性。

###### a. 外观

外观要求为均匀液体、无分层、无杂质，避免原料发生沉淀、结晶或杂质堵塞注浆设备，保证双液泵计量和注浆枪混合稳定。

###### b. 黏度

黏度控制在  $0.1\text{Pa}\cdot\text{s}\sim 0.6\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，主要依据原材料检测和现场泵送试验确定；该范围内材料流动

性较好，能够在常用双组分注浆设备中稳定输送，并在注浆枪内与 B 组分充分混合。黏度过高时，易造成泵送阻力增大、出料速率波动、混合不均匀甚至堵管；黏度过低时，浆液在病害空隙中的扩散和停留不易控制，不利于形成稳定的充填和黏结效果。

#### c. 密度

密度控制在  $1.20\text{g/cm}^3 \sim 1.25\text{g/cm}^3$ ，是为保证 A 组分组成稳定、与设备计量配比相匹配；密度偏离该范围时，通常表明原料组成或有效成分存在波动，可能导致实际反应配比偏差，影响凝胶时间、发泡状态和固结体强度。

#### d. NCO 含量

NCO 含量控制在  $30.5\% \sim 32.0\%$ ，主要为保证异氰酸酯基团含量满足与 B 组分中羟基组分反应的需要，使材料混合后能够形成稳定的聚氨酯网络结构。NCO 含量偏低时，反应交联程度不足，可能导致固结体强度、黏结性能和耐水稳定性下降；NCO 含量偏高时，反应活性过强，易造成反应速度过快、发泡失控或材料脆性增大，不利于现场注浆过程控制。因此，标准将 NCO 含量限定在上述范围内，有利于兼顾反应活性、施工可操作性和成型质量。

B 组分技术指标用于控制多元醇组分及助剂体系的流动性、稳定性以及与 A 组分的反应匹配性。

#### a. 外观

外观要求为均匀液体、无分层、无杂质，保证多元醇、催化剂、匀泡剂等组分分散均匀，避免因原料分层造成局部反应速度、发泡状态和强度性能不稳定。

#### b. 黏度

黏度控制为不大于  $1.2\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，主要根据室内试配和现场注浆设备适应性试验确定；该指标能够保证 B 组分在施工温度条件下具有良好的泵送性和混合性，满足连续注入和出料速率控制要求。黏度过高时，会造成双液泵输送阻力增大，A、B 组分混合不充分，进而影响凝胶时间和固结体均匀性。

#### c. 密度

密度控制在  $1.00\text{g/cm}^3 \sim 1.15\text{g/cm}^3$ ，保证 B 组分配方组成稳定，并与 A 组分形成稳定的体积计量关系，避免因密度波动造成实际反应比例偏差。

#### d. 水含量

水含量控制为不大于  $0.1\%$ ，主要考虑异氰酸酯对水分较为敏感，B 组分含水量过高会提前消耗 A 组分中的 NCO 基团，导致材料在混合后出现异常发泡、反应过快、孔隙率增大或强度下降等问题，严重时还可能影响储存稳定性和现场施工可控性。限制 B 组分水含量，可保证 A、B 组分按设计比例混合后反应稳定，凝胶时间、发泡状态和成型强度满足注浆处治要求。

I 型双组分聚氨酯注浆材料主要用于裂缝、松散等深层病害处治，其作用机理是材料在裂缝、

孔隙和松散区域内完成渗入、充填、黏结和固化成型，形成具有一定强度、韧性和耐久性的固结体。因此，I型材料技术指标的确定，重点考虑现场注浆施工操作窗口、浆液扩散与充填能力、固化体密实程度、界面黏结与抗破坏能力，以及潮湿环境下的成型稳定性。编制组结合室内试配试验、同类产品性能检测 results 和现场试注应用情况，对凝胶时间、表观密度、抗拉强度、抗压强度、剪切强度、弯曲强度、耐化学腐蚀、水中凝胶状态和环保性等指标提出要求，以保证材料既能满足现场注入和扩散需要，又能满足裂缝封闭、松散黏结和结构补强要求。

#### a. 凝胶时间

凝胶时间用于表征 A、B 组分混合后由可流动状态转变为凝胶固化状态的时间，是控制现场注浆施工窗口的关键指标。I型材料主要用于裂缝和松散病害，浆液需要在固化前完成管路输送、孔内注入、裂缝渗入和松散区扩散。凝胶时间过短时，材料尚未充分扩散即开始反应固化，容易造成注浆管路堵塞、注入不连续、裂缝深部充填不足等问题；凝胶时间过长时，材料固化成型慢，可能发生浆液流失、扩散范围不可控或影响交通恢复。根据室内凝胶时间试验、现场试混出料和试注验证结果，凝胶时间控制在 60s~600s，可为不同温度、不同病害深度和不同出料速率条件下的现场施工提供必要操作窗口，同时保证材料能够在注入后较快成型，满足裂缝封闭和松散黏结的施工需求。

#### b. 表观密度

表观密度用于反映 I 型材料固化体的密实程度和发泡控制水平，是区别于 II 型发泡充填材料的重要指标。I型材料用于裂缝和松散处治时，主要功能不是大倍率发泡填充空腔，而是形成相对密实的黏结固结体。如果表观密度过低，说明材料发泡过多或内部孔隙率偏大，固化体强度、黏结能力和抗水损害能力可能下降，不利于松散颗粒的胶结和裂缝两侧结构的连接；表观密度较高时，固化体更加密实，有利于提高抗压、抗拉和界面黏结性能。结合室内成型试验和裂缝、松散病害处治需求，标准将 I 型材料表观密度规定为不小于  $600 \text{ kg/m}^3$ ，以保证材料成型后具有足够的密实性和结构补强能力，避免材料因过度发泡而降低力学性能和耐久性。

#### c. 抗压/抗拉强度

抗压强度和抗拉强度分别反映 I 型双组分聚氨酯注浆材料固化体的承载补强能力和抗拉开裂能力，是评价材料是否适用于裂缝、松散等深层病害处治的重要力学指标。I型材料注入裂缝和松散区域后，一方面需要将松散颗粒或裂缝两侧结构胶结成整体，在车辆荷载作用下具备必要的抗压承载能力；另一方面，裂缝及松散区域受温度变化、轮载反复作用和结构层微变形影响，固化体还需要具备一定的抗拉和变形适应能力，避免因材料偏脆而发生拉裂、脱开或界面开裂。

在材料指标设定中，编制组注意到聚氨酯材料的抗压性能与抗拉性能并不一定同步提高。根据不同聚氨酯产品室内强度试验结果，部分产品抗压强度较高，但抗拉强度偏低，说明其刚度较大而

韧性不足；也有产品虽然具有一定抗拉性能，但抗压承载能力不足，难以满足松散区域补强要求。以表 1 试验结果为例，产品 1 抗压强度达到 10.8MPa，但抗拉强度仅为 1.2 MPa；产品 4 抗拉强度为 2.6MPa，抗压强度仅为 4.4MPa，均不能同时满足裂缝封闭、松散黏结和结构补强的综合需求。因此，本标准未采用单一抗压指标评价 I 型材料，而是同时提出抗压强度和抗拉强度要求。结合室内试验结果、同类材料性能水平和现场应用需求，标准将 I 型材料抗压强度规定为不小于 5.0 MPa、抗拉强度规定为不小于 3.0 MPa，既可保证固化体具有基本承载补强能力，又可筛除抗拉性能不足、易发生脆裂或界面开裂的材料，使材料性能能够满足裂缝、松散病害注浆处治对强度和韧性的综合要求。

表 1 不同聚氨酯产品强度试验

| 试验 (25°C) | 产品 1    | 产品 2   | 产品 3   | 产品 4   |
|-----------|---------|--------|--------|--------|
| 抗压试验      | 10.8MPa | 7.5MPa | 6.8MPa | 4.4MPa |
| 抗拉试验      | 1.2MPa  | 4.6MPa | 5.9MPa | 2.6MPa |
| 抗剪试验      | 4.4MPa  | 3.0MPa | 2.7MPa | 3.6MPa |
| 弯曲试验      | 0.7MPa  | 1.3MPa | 1.8MPa | 1.5MPa |

#### d. 剪切/弯曲强度

剪切强度和弯曲强度分别用于评价 I 型双组分聚氨酯注浆材料固化体抵抗剪切破坏和弯曲破坏的能力，是抗压、抗拉强度之外反映材料受力稳定性和变形适应性的重要补充指标。裂缝和松散病害区域在车辆荷载作用下，裂缝面、松散颗粒之间及结构层间可能产生相对位移和剪切应力；若材料剪切强度不足，固化体容易发生剪切破坏或界面滑移，导致裂缝重新贯通或松散区域再次破坏。同时，沥青路面结构在轮载作用下存在一定弯拉变形，若材料弯曲性能不足，固化体可能出现弯曲裂纹、局部碎裂或脆性断裂，影响处治效果的长期稳定性。

从不同聚氨酯产品室内试验结果看，材料的抗剪性能与弯曲性能同样存在差异，并不能简单由抗压或抗拉强度推断。例如，表 1 中产品 1 抗剪强度达到 4.4 MPa，但弯曲强度仅为 0.7 MPa，说明该材料虽然具有较好的抗剪能力，但弯曲变形适应能力不足，在反复荷载和结构变形作用下存在脆裂风险。因此，本标准同时设置剪切强度和弯曲强度指标，用于约束 I 型材料在裂缝面、松散区域和结构层局部变形条件下的整体稳定性。结合试验结果、工程应用反馈及材料可获得性，标准将 I 型材料剪切强度和弯曲强度均规定为不小于 1.0 MPa。该限值既能够保证固化体具备基本抗剪和抗弯破坏能力，又避免将指标设置过高而限制材料的韧性和施工适应性，有利于提高裂缝封闭、松散黏结和局部补强后的耐久稳定性。

#### e. 耐化学腐蚀性能

耐化学腐蚀性能用于评价材料在水、融雪剂、盐分、弱酸弱碱等运营环境介质作用下的稳定性。

沥青路面裂缝和松散区域通常伴随雨水下渗、潮湿环境或水损害，材料固化后长期处于水分和复杂介质作用下。如果材料耐化学腐蚀性能不足，可能出现软化、粉化、膨胀、开裂或强度衰减，导致封水和黏结效果下降。标准将耐化学腐蚀规定为“良好”，是为了保证 I 型材料在常见道路服役环境中保持稳定，不因环境介质侵蚀而降低裂缝封闭和松散补强效果。该项指标主要结合室内耐介质试验、同类材料应用经验以及道路水损害环境特点确定（图 1）。

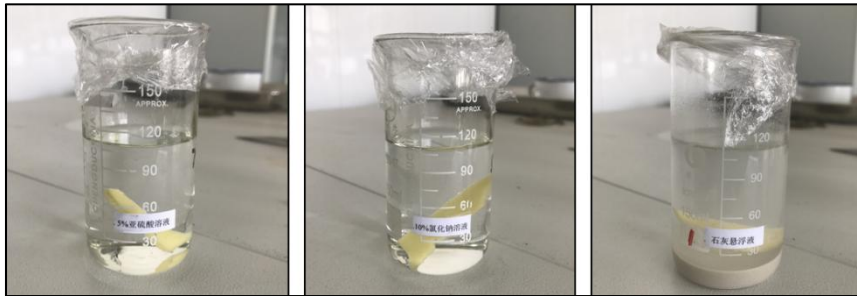


图 1 耐化学腐蚀试件

#### f. 水中凝胶状态

水中凝胶状态用于评价材料在潮湿、积水或含水病害环境中的反应成型稳定性。裂缝和松散病害内部常存在渗水或残余水分，材料实际注入后不可避免与水接触。如果材料遇水后出现粉化、开裂、质地疏松或不能稳定成型，会直接影响裂缝封闭、界面黏结和防水效果；如果遇水反应过于剧烈，也可能造成局部膨胀失控或路面异常抬升。因此，标准规定 I 型材料水中凝胶状态应为表面无粉化、无开裂、质地坚硬，主要是为了保证材料在潮湿病害环境下仍能正常反应和稳定成型，满足裂缝、松散病害处治对防水、黏结和补强的要求（图 2）。

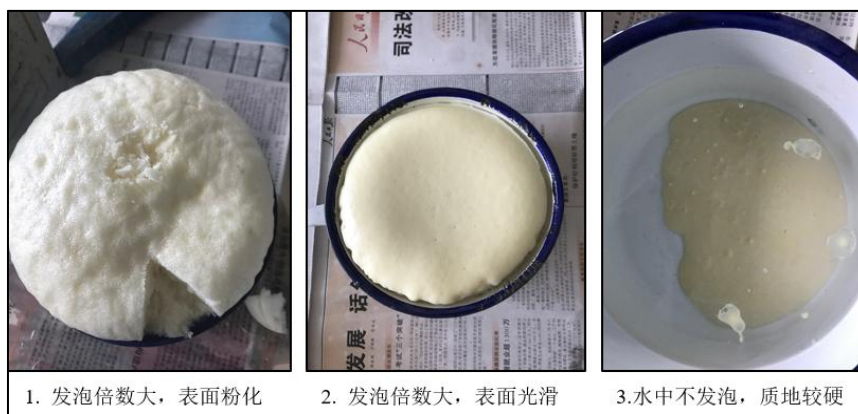


图 2 水中发泡状态

#### g. 环保性

环保性用于控制材料注入道路结构后对周边水体、土体和道路环境的影响。聚氨酯材料属于反应型高分子材料，施工中需保证 A、B 组分反应充分、固化稳定，避免未反应组分或有害物质迁移。

裂缝和松散病害常与雨水下渗通道相连，若材料环保性不满足要求，可能对周边土体或地下水环境造成不利影响。因此，标准规定 I 型材料不应对水质及周边土体造成污染，并采用相应卫生安全评价方法进行控制，主要是为了满足道路养护工程绿色施工和长期环境安全要求。

II 型双组分聚氨酯注浆材料主要用于唧浆病害处治。唧浆病害通常伴随基层或面层下部局部空隙、含水、泥浆迁移和细部通道发育，处治时材料需要在较短时间内进入病害通道和空隙部位，通过适度发泡实现充填、挤水、封闭和止浆，并形成具有一定强度和稳定性的固结体。因此，II 型材料技术指标的设置，重点考虑现场注浆施工操作窗口、发泡充填能力、自由发泡密度、温度变化下的尺寸稳定性、固化体基本力学性能、潮湿环境成型能力和环境安全性。编制组结合室内试配试验、不同材料性能检测 results 和现场试注情况，对凝胶时间、发泡率、自由发泡表观密度、尺寸稳定性、抗拉强度、抗压强度、剪切强度、弯曲强度、耐化学腐蚀、水中凝胶状态和环保性等指标提出要求，以保证 II 型材料能够满足唧浆病害处治中“可注入、可扩散、可发泡、可封闭、可稳定成型”的使用要求。

#### a. 发泡率

发泡率是 II 型材料区别于 I 型材料的核心控制指标，用于表征材料反应后的体积膨胀能力，直接影响唧浆通道、局部空隙和细部裂隙的充填效果。唧浆病害处治要求材料在进入病害区域后能够适度膨胀，利用发泡产生的体积增长填充空隙、挤排局部水分和泥浆，并封闭水分迁移通道。发泡率过低时，材料体积补偿能力不足，难以有效充填唧浆通道和局部空隙，可能出现封堵不严、处治后再次唧浆等问题；发泡率过高时，材料膨胀过程不易控制，可能造成路面局部抬升、开裂、相邻孔异常返浆或固化体密度、强度下降。因此，标准将 II 型材料发泡率规定为 150%~500%。该范围是结合室内自由发泡试验和现场试注效果确定的，既保证材料具有必要的发泡充填和封水能力，又对过度膨胀风险进行限制，便于施工中按设计注浆量、返浆现象和路表变化进行过程控制。

#### b. 自由发泡表观密度

自由发泡表观密度用于评价 II 型材料在自由发泡状态下的泡孔结构、密实程度和成型稳定性，是发泡率控制之外反映材料质量的重要指标。II 型材料用于唧浆处治时，需要通过发泡进入空隙和水通道，但固化体仍应具备一定密实性和力学性能。如果自由发泡表观密度过低，说明材料发泡过度、内部孔隙率偏大，固化体抗压、抗拉、抗剪和抗弯能力可能降低，长期受水和交通荷载作用后易发生压缩变形或破坏；如果自由发泡表观密度过高，则材料发泡能力不足，难以发挥对细部空隙和唧浆通道的填充、封堵作用。结合发泡率试验、密度—强度关系和现场应用情况，标准将 II 型材料自由发泡表观密度规定为  $200 \text{ kg/m}^3 \sim 600 \text{ kg/m}^3$ 。该范围能够在发泡充填能力与成型后基本强度

之间取得平衡，既避免材料过度发泡导致固化体疏松，也避免发泡不足影响唧浆通道封闭效果。

#### c. 低温/高温尺寸稳定性

尺寸稳定性用于评价 II 型材料固化体在温度变化条件下的体积稳定能力，是判断材料能否适应路面服役环境的重要耐久性指标。沥青路面服役过程中会经历冬季低温收缩和夏季高温作用，唧浆处治后形成的发泡固结体若尺寸稳定性不足，可能在低温条件下收缩脱开，形成新的水分通道；也可能在高温条件下发生过大变形、软化或体积变化，影响封堵和支承效果。考虑到 II 型材料具有发泡结构，温度变化对其泡孔形态和体积稳定性的影响更加明显，因此有必要分别设置低温和高温尺寸稳定性指标。标准将低温尺寸稳定性-30℃条件下规定为不大于 0.5%，高温尺寸稳定性 80℃条件下规定为不大于 1.5%，主要是为了保证材料在寒冷和高温服役环境下均能保持稳定形态，避免因收缩、膨胀或变形造成封水失效、界面脱开或病害复发。

#### d. 抗压强度/抗拉强度

与 I 型材料相比，II 型材料由于具有较高发泡率和较低表观密度，其强度指标不宜简单按密实型材料要求确定，否则会削弱发泡充填性能和现场适应性。因此，标准以表观密度为 200 kg/m<sup>3</sup> 时的力学性能作为控制基准，规定 II 型材料抗压强度不小于 3.0MPa、抗拉强度不小于 1.5MPa。该设置考虑了 II 型材料在较大发泡状态下的最低强度保障要求，能够筛除发泡后结构过于疏松、承载和抗裂能力不足的材料，同时保留材料必要的发泡扩散和封闭能力。

#### e. 剪切强度/弯曲强度

考虑 II 型材料的发泡特征，剪切强度和弯曲强度同样采用表观密度为 200 kg/m<sup>3</sup> 时的指标作为控制基准。标准将 II 型材料剪切强度和弯曲强度均规定为不小于 0.6 MPa，主要是为了保证材料在满足发泡充填功能的同时，具备基本的抗剪、抗弯和整体保持能力。该限值既避免指标过低导致固化体在重复荷载下易发生破坏，也避免指标设置过高造成材料过于密实、发泡扩散能力不足，从而影响唧浆通道封闭和空隙填充效果。

#### f. 水中凝胶状态

水中凝胶状态同样也是 II 型材料用于病害处治时必须重点控制的指标。唧浆部位通常存在游离水、泥浆或潮湿通道，材料实际注入后不可避免与水接触。如果材料遇水后不能正常凝胶，或出现粉化、开裂、成型体疏松等情况，将无法形成稳定的封堵体；如果遇水反应过于剧烈，则可能造成发泡失控、局部抬升、返浆异常或路面扰动。因此，标准同样规定 II 型材料水中凝胶状态应为表面无粉化、无开裂、质地坚硬。该要求主要用于验证材料在潮湿和含水病害环境下的反应成型可靠性，保证材料进入唧浆通道后能够稳定凝胶、有效封闭并形成具有一定强度的固结体。

### (2) 地聚物类注浆材料

地聚物注浆材料主要用于脱空和路基强度不足等深层病害处治，其作用机理是浆体在压力作用下进入脱空区域、结构层下部空隙或路基加固范围内，通过流动充填、凝结硬化和强度发展形成具有一定承载能力和体积稳定性的无机固结体。与双组分聚氨酯材料相比，地聚物注浆材料更适用于处治范围较大、注浆量较大、需要恢复支承或提高结构承载能力的病害场景。因此，地聚物注浆材料技术指标的确定，重点考虑浆体的可灌注性、施工操作时间、材料稳定性、早期及后期强度、体积补偿能力和成型后支承效果。编制组结合室内配合比试验、浆体性能检测、相关灌浆材料标准要求 and 现场注浆应用情况，对流动性、凝结时间、泌水率、抗压强度和竖向膨胀等指标提出要求，以保证材料能够满足脱空充填和路基补强的综合需求。

#### a. 流动性

流动性用于评价地聚物浆体在自重和压力作用下的流动、扩散和充填能力，是影响脱空区域填充密实程度和路基加固范围覆盖效果的关键指标。地聚物材料用于脱空和路基强度不足处治时，往往需要通过直径较大的注浆孔进入结构层下部或路基内部，并在一定范围内扩散、充填和包裹松散区域。若初始流动性不足，浆体黏滞性较大，容易造成管路输送阻力增大、注浆压力升高、扩散半径不足和脱空区充填不密实；若流动性过高，虽然有利于泵送和扩散，但可能导致浆体离析、泌水、跑浆或材料组分分布不均，影响成型后强度和支承效果。

因此，标准将地聚物注浆材料初始流动性规定为不小于 290mm，主要是为了保证浆体在拌合后具有较好的泵送性和扩散能力，能够满足现场较大范围脱空充填和路基补强注浆需要。同时，标准规定 30min 流动性不小于 260mm，是为了控制浆体在施工过程中的流动性保持能力。现场地聚物注浆通常需要经过拌合、转运、泵送和连续注入等过程，若浆体流动性随时间衰减过快，容易出现尚未完成注浆即变稠、堵管或扩散不足等问题。通过设置初始流动性和 30 min 流动性两个指标，可以同时控制浆体的初始可灌注性和施工过程中的保塑性能，保证材料在合理施工时间内保持稳定流动状态，为连续注浆和充填密实提供条件。

#### b. 凝结时间

凝结时间用于表征地聚物浆体由可流动状态逐渐转变为初步硬化状态的时间过程，是控制现场施工组织、连续注浆和成型效率的重要指标。地聚物浆体凝结过快时，可能在拌合、泵送或注入过程中提前失去流动性，导致管路堵塞、孔内充填不完整、观察孔未充分返浆或加固范围不足；凝结过慢时，浆体在注入后长时间不能稳定成型，可能发生沉降、离析、浆液迁移或跑浆，不利于脱空区形成稳定支承，也会影响后续交通组织和养护作业安排。因此，标准将初凝时间规定为不小于 1.0 h，主要是为了给现场拌合、泵送、注入和必要的过程调整留出足够操作时间，避免浆体过早凝结影响施工连续性和充填完整性。终凝时间规定为不大于 6.0 h，则是为了保证浆体注入后能够在较短时

间内完成硬化成型，尽快形成稳定支承体，减少浆体长时间处于可流动状态造成的离析、迁移或充填效果不稳定风险。该凝结时间范围能够兼顾施工操作窗口和成型效率，适应公路养护工程施工窗口较短、需要尽快恢复结构支承和开放交通的实际需求。

#### c. 泌水率

泌水率用于评价地聚物浆体在静置和凝结过程中的保水稳定性，是判断浆体是否容易发生水固分离、离析和成型不均匀的重要指标。地聚物注浆材料进入脱空区域或路基加固范围后，如果泌水率过高，浆体中的水分会从固体颗粒体系中析出，造成上部积水、下部沉积、局部浆体稀释或固结体孔隙率增大，进而影响充填密实性、界面接触效果和后期抗压强度。对于脱空处治，泌水还可能在充填体与结构层之间形成薄弱水膜，削弱支承连续性；对于路基强度不足处治，泌水和离析会导致加固体强度不均匀，影响整体补强效果。标准将地聚物注浆材料泌水率规定为不大于 0.4%。该指标主要用于保证浆体具有良好的均匀性和稳定性，使浆体在泵送、扩散和凝结过程中不发生明显水固分离，能够形成均匀、密实、连续的固结体。将泌水率控制在较低水平，有利于减少注浆后空隙再形成、界面脱开和强度不均匀等问题，提高脱空充填和路基补强的可靠性。

#### d. 抗压强度

抗压强度用于评价地聚物固结体在车辆荷载和结构层传力作用下抵抗压缩破坏的能力，是判断其能否恢复支承、提高承载能力和保持长期稳定的核心指标。地聚物材料用于脱空处治时，需要在基层或面层下部形成连续支承体，减少结构层悬空受力；用于路基强度不足处治时，则需要与周边土体或结构层共同形成加固区域，提高整体承载能力。若抗压强度不足，固结体在交通荷载反复作用下容易发生压碎、破裂、局部塌陷或强度衰减，导致脱空再次出现或路基承载能力恢复不足。

标准分别设置 7d 和 28d 抗压强度要求，其中 7d 抗压强度规定为不小于 20MPa，主要用于控制材料早期强度发展，保证注浆后较短时间内能够形成基本支承能力，满足养护工程施工组织和后续开放交通的需要；28d 抗压强度规定为不小于 40MPa，主要用于控制材料后期承载性能和长期服役稳定性，保证固结体在运营期交通荷载作用下具有足够的抗压承载能力。设置 7d 和 28d 两个龄期指标，可以同时评价材料早期成型效果和后期强度发展，避免只关注最终强度而忽视早期支承不足，也避免早期强度较高但后期发展不足的材料进入工程使用。

#### e. 竖向膨胀

竖向膨胀用于评价地聚物浆体凝结硬化过程中的体积变化特征，是控制充填密实性、界面接触效果和结构扰动风险的重要指标。地聚物材料注入脱空区域或路基加固范围后，理想状态是形成微膨胀或体积稳定的固结体，以补偿材料凝结硬化过程中可能产生的收缩，使充填体与上部结构层、下部基层或路基土体保持良好接触。如果竖向膨胀过小甚至发生收缩，容易在界面处形成微空隙，

影响支承连续性，造成脱空处治不彻底或后期再次形成空隙；如果竖向膨胀过大，则可能对上部结构层产生顶升扰动，引起路面异常抬升、开裂或局部变形，增加施工质量风险。标准将 3h 竖向膨胀规定为 0.1%~3.5%，主要是为了控制材料早期体积变化，使其在初期凝结和强度形成阶段具有一定微膨胀补偿作用，能够填满脱空区域并改善界面接触，同时限制过度膨胀对路面结构造成不利扰动。标准同时将 3 h 以后竖向膨胀规定为 0.02%~0.50%，是为了控制材料硬化后的后期体积稳定性，避免材料在已形成支承后继续发生较大膨胀，造成路表变形或结构层受扰。

## 2. 病害检测

在病害检测与处治方案设计方面，本规程采用“现场调查+三维探地雷达检测+落锤弯沉检测”的组合方式，将检测成果作为注浆处治方案设计的基础依据。现场调查主要用于初步确定病害路段范围和主要病害类型，记录裂缝、唧浆、松散、脱空、沉陷、水损害等表观特征及其分布情况；三维探地雷达检测主要用于判定病害类型、范围、层位与尺寸，为注浆深度、布孔范围和设计注浆量估算提供依据（图 3）。



图 3 雷达检测与分析

落锤弯沉检测主要用于识别结构承载能力异常区段，并结合雷达检测结果对处治范围、孔位布

设参数和注浆控制参数进行校核（图4）。通过现场调查、雷达检测和弯沉检测结果的综合比对，可将表观病害、内部异常和结构承载状态相互印证，减少仅依据外观调查或单一检测手段造成的处治范围偏小、孔位布设不合理、材料选择不准确或处治过度等问题，为裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆、松散、脱空、路基强度不足等不同病害类型的材料选择、布孔方式、孔径、孔深、设计注浆量、出料压力和出料速率等设计参数确定提供支撑。

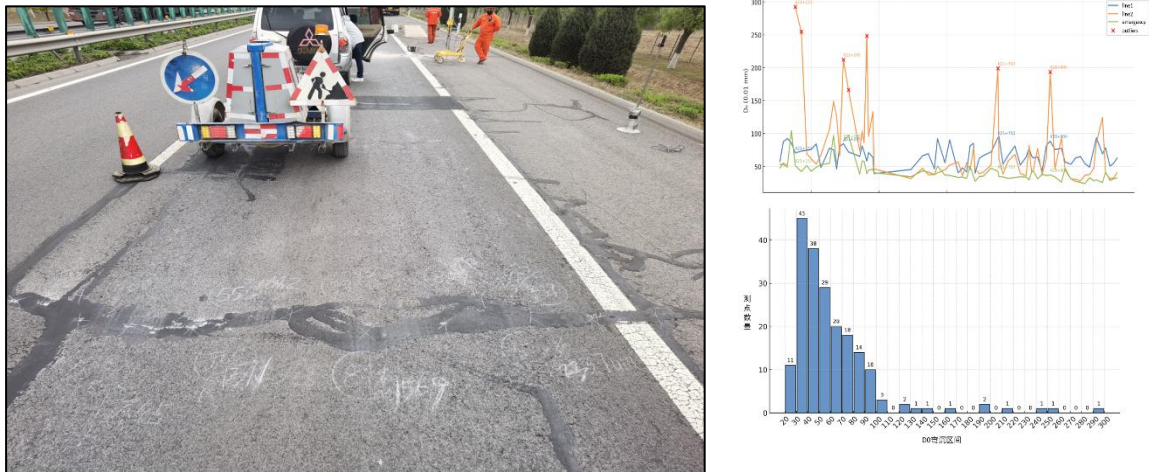


图4 弯沉检测与分析

### 3. 处治方案设计参数确定

本部分重点说明本规程表6、表7中注浆处治方案设计参数的确定依据。相关参数主要根据病害类型、检测识别结果、材料性能特点、注浆设备能力和现场试注经验综合确定，用于将病害检测成果转化为可施工、可控制、可记录的设计控制指标。

#### (1) 双组分聚氨酯注浆处治方案设计参数

本规程表6针对裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆和松散等病害类型，分别提出材料选择、布孔方式、打孔尺寸、打孔深度、设计注浆量、注入强度控制和出料速率等设计参数。参数主要依据病害形态、病害影响范围、聚氨酯材料反应特性、现场注浆设备能力及工程试注经验综合确定。材料选择方面，裂缝和松散病害以裂缝封闭、孔隙填充和松散颗粒黏结为主，因此采用密实性和黏结补强能力较强的I型聚氨酯注浆材料；单点唧浆和裂缝伴随唧浆病害通常存在含水通道、局部空隙或泥浆迁移，处治重点在于发泡充填、挤水封堵和止浆，因此采用II型聚氨酯注浆材料。

#### a. 布孔参数

裂缝病害呈线状发展，注浆孔沿裂缝均匀布设，孔距取0.5m，可保证浆液沿裂缝及其附近细部空隙连续扩散，同时避免孔距过密造成重复注浆和路表扰动；单点唧浆病害虽然表面表现为局部出浆点，但其下部往往存在一定范围的含水通道或空隙，因此以唧浆点为中心向外布孔至病害边界，

孔距取 0.3m，并可结合便携式弯沉检测设备进一步确定布孔边界；裂缝伴随唧浆病害兼具线状裂缝和局部富水唧浆特征，因此采用沿缝两侧交错布孔、缝中孔距 0.5m、唧浆点周边加密至 0.15m 的布孔方式，以兼顾裂缝连续封闭和唧浆点封堵；松散病害多呈局部面状分布，采用梅花形布孔、孔距 0.5m，有利于形成相互搭接的浆液扩散范围，提高松散区域整体黏结和补强效果。

#### b. 打孔尺寸和打孔深度

聚氨酯注浆孔径确定为 10 mm~16 mm，主要考虑该类材料黏度较低、反应速度较快，较小孔径即可满足注浆管安装和浆液注入要求，同时可减少在原路面结构和表面功能的扰动。裂缝和松散病害的孔深控制至病害底端，是为了保证浆液能够到达病害发育下边界，避免只处理表层而深部仍存在裂缝或松散；唧浆类病害孔深控制至病害影响层，是因为其处治重点是封堵含水通道和局部空隙，孔深应结合雷达异常层位、弯沉异常和现场钻孔情况确定，使材料能够准确进入主要病害层位。

#### c. 注浆参数

裂缝病害的设计注浆量按裂缝空隙、孔距和浆液扩散半径估算，主要用于保证裂缝及其附近空隙得到连续充填；唧浆类病害的设计注浆量按空隙或空腔体积及材料发泡率估算，是为了利用 II 型聚氨酯材料的发泡充填能力实现止浆和封水，同时避免过量注入造成路面抬升；松散病害按空隙体积折算，并采用 1.0~1.5 的折算系数，是考虑松散区孔隙不规则、浆液会向颗粒间隙渗入扩散，实际注入量通常高于理论空隙体积。出料速率则根据病害类型和施工风险分级确定：裂缝注浆采用 2L/min~6L/min，满足连续注入和沿缝扩散需要；单点唧浆和裂缝伴随唧浆采用 1L/min~4L/min，以控制发泡充填过程和路表抬升风险；松散病害采用 1L/min~2L/min 并分次注入，使浆液有足够时间渗入松散区域，避免局部集中注入导致返浆、拱起或扩散不足。

需要说明的是，双组分聚氨酯注浆过程受材料黏度、凝胶时间、发泡状态、孔内通道连通性和注浆设备出料状态影响较大，孔内实际压力难以作为单一稳定的设计控制指标。因此，表 6 主要采用设计注浆量、注入强度控制和出料速率作为设计控制参数，施工过程中再结合相邻孔或裂缝返浆、设备压力变化、路表拱起或开裂等现象进行动态调整。标准的施工条款中也规定，注浆起注阶段按表 6 出料速率下限短时注入，观察返浆、设备压力表读数及路表变化，确认无异常后再调整注入节奏和注浆量。

### (2) 地聚物注浆处治方案设计参数

本规程表 7 针对脱空和路基强度不足两类病害提出地聚物注浆处治设计参数，包括材料选择、布孔方式、打孔尺寸、打孔深度、设计注浆量、出料压力和出料速率。地聚物注浆材料具有流动性好、注浆量较大、凝结硬化后强度较高、适合形成连续支承体的特点，因此主要用于脱空充填和路基强度不足补强。与聚氨酯材料相比，地聚物材料不是依靠快速发泡封堵细部通道，而是通过较大

流量连续注入、流动扩散、凝结硬化和强度发展恢复结构支承，因此其设计参数重点围绕大范围充填、连续成型和承载恢复确定。

#### a. 布孔参数

脱空和路基强度不足均采用矩形或梅花形布孔，孔距取 1.0m，并设置观察孔。该布孔方式主要考虑地聚物浆体流动性较好、注浆量较大，1.0m 孔距能够在保证相邻孔扩散范围相互衔接的同时，兼顾钻孔数量、施工效率和路面扰动控制；设置观察孔是为了在注浆过程中观察排气、返浆和浆液扩散情况，辅助判断脱空区域是否充填到位或加固范围是否形成连续浆体。对于脱空病害，矩形或梅花形布孔有利于浆体在脱空区域内均匀扩散，减少未充填盲区；对于路基强度不足病害，该布孔方式有利于形成连续或半连续的加固范围，提高路基局部承载能力。

#### b. 打孔尺寸

地聚物注浆孔径规定为 38mm~50mm，主要依据浆体颗粒组成、流动性、注浆泵输出流量和现场钻孔施工条件确定。地聚物浆体不同于聚氨酯双液材料，其固体组分含量较高、注入流量较大，若孔径过小，容易造成孔口阻力增大、浆体堵塞或出料不连续；孔径过大则会增加路面结构扰动和封孔修复工作量。因此，38mm~50mm 的孔径范围能够较好匹配地聚物浆体的泵送与注入要求，同时控制钻孔对原路面的影响。打孔深度方面，脱空处治应钻至病害底端，以保证浆体进入脱空底部并自下而上充填；路基强度不足处治应钻至设计加固深度，使浆体进入需要补强的路基范围内，形成满足设计目标的加固体。

#### c. 注浆量

脱空病害按脱空体积估算，主要依据三维探地雷达识别的脱空范围、层位和厚度，结合现场钻孔核查结果确定理论充填量；路基强度不足病害按加固范围与设计深度估算，主要依据弯沉异常范围、雷达异常情况和设计补强深度确定目标加固体积。上述注浆量作为施工阶段的基础控制量，实际注浆过程中还需结合观察孔返浆、设备压力变化、路表变化和进浆量变化进行校核，避免因脱空形态不规则或路基孔隙差异造成欠注或过注。

#### d. 出料压力和出料速率

脱空处治出料压力控制为 0.5MPa~1.5MPa，出料速率控制为 50L/min~100L/min，主要考虑脱空区域一般为空腔或层间空隙，浆体进入阻力相对较小，较低压力即可满足充填要求；若压力过高，可能造成路面顶升、开裂或浆体沿薄弱通道外逸。路基强度不足处治出料压力控制为 0.5MPa~2.0MPa，出料速率控制为 50L/min~120L/min，是因为路基加固深度更大、土体或结构层孔隙阻力更高，需要适当提高压力和流量以保证浆体进入设计加固范围。压力和速率上限的设置用于控制施工安全风险，当出现压力持续升高、进浆量明显减小、观察孔稳定返浆或路表异常变化时，应及时

减小速率、暂停注浆或终止该孔注浆。标准施工条款也明确，地聚物注浆应保持连续注入，过程中根据设备压力、观察孔出浆情况及路表变化调整出料速率和注浆量。

#### 4. 施工工艺与过程控制

本规程施工工艺与过程控制内容主要依据双组分聚氨酯注浆材料和地聚物注浆材料的反应特性、设备工作能力、现场试注情况及工程应用反馈确定。与一般开挖修复不同，深层病害注浆处治属于隐蔽工程，浆液注入后难以直接观察其扩散、充填和成型状态，因此施工过程控制不能仅依赖单一指标，而应通过材料状态、设备运行、注浆量、出料速率、压力变化、返浆现象、路表变化和后续检测结果进行综合判断。本规程将施工过程划分为施工准备、现场调试、钻孔清孔、注浆施工、终止判定、组合注浆、封孔恢复和过程质量管理等环节，目的是将设计阶段确定的材料类型、孔位、孔深、注浆量和注浆控制参数落实到现场施工中，减少欠注、过注、堵管、返浆失控、路表异常抬升和处治效果不均匀等问题。

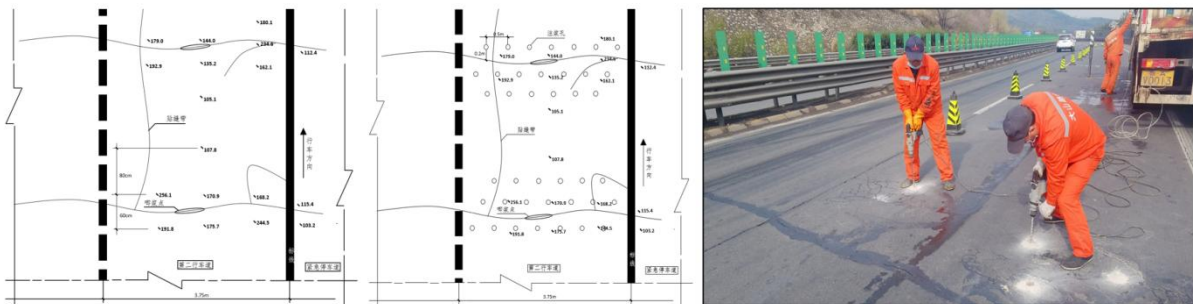


图 5 现场打孔

##### (1) 施工准备

施工准备阶段重点控制材料、设备、作业面和设计参数复核。注浆材料属于现场反应成型材料，材料批次、储存状态、温度条件和设备计量状态都会影响施工效果，因此施工前应核查材料质量证明文件、外观状态、设备机具工作状态和现场供电条件；对孔位、病害范围及作业面状态进行复核，是为了确认现场实际病害范围、含水状态和交通组织条件与设计方案一致。当现场情况与设计不符时，应进行二次确认并调整参数，避免按原设计机械施工造成孔位偏差、注浆层位不准或处治范围不足。施工宜在无降雨、无降雪条件下进行，也是考虑降水会影响孔内含水状态、材料反应稳定性、浆液扩散和封孔质量。

##### (2) 机械设备

设备参数的设置主要根据材料特性和设计注浆参数匹配确定。双组分聚氨酯材料反应速度快，需由双液注浆泵分别输送 A、B 组分，并在注浆枪内完成混合，因此设备应具备稳定供料、比例调节、出料速率调节和可靠密封能力。双液注浆泵工作压力为 8 MPa~12MPa，主要用于保证 A、B

组分在设备系统内稳定输送和混合，并不直接作为病害孔内注浆压力使用；输出流量 1L/min~10L/min 能够覆盖表 6 中不同病害类型 1L/min~6L/min 的出料速率控制需求；加热温度范围 0℃~80℃主要用于适应低温或材料黏度变化条件下的泵送和混合需要。空压机排气压力不小于 0.7 MPa、排气量不小于 1.0m<sup>3</sup>/min，是为了满足孔内排水、排浆和清孔需要，保证注浆前孔内无明显游离水或泥浆残留。地聚物浆体固体组分含量较高、注浆量大，需采用专用注浆泵和机械搅拌设备，注浆泵工作压力 0.5MPa~5MPa、输出流量 50L/min~200L/min，能够覆盖表 7 中的设计控制范围，并为现场压力损失和流量调节留有余量。

### (3) 双组分聚氨酯注浆施工

钻孔完成后清除孔内粉尘与杂物，是为了避免粉尘堵塞注浆管、影响浆液进入病害通道或削弱材料与孔壁及病害界面的接触效果。孔内存在游离水或泥浆时，先采用空压设备排水排浆，并以孔口连续 30 s 无明显水或泥浆挤出作为完成判据，主要是因为裂缝、唧浆和松散病害内部常存在水分和泥浆，如果不提前排除，可能造成浆液稀释、反应异常、界面黏结不足或局部返浆失控。注浆管按设计深度安装并固定，孔口与注浆管之间封闭密实，是为了保证浆液进入目标层位，减少孔口漏浆和压力损失。

聚氨酯注浆前设置现场试混出料要求，是为了验证 A、B 组分在当日施工温度、设备状态和实际配比条件下能否正常混合反应。现场试混应重点观察出料颜色和状态是否均匀、混合液是否存在明显分层或未混合条带，检测凝胶时间是否处于标准规定范围，观察固化体是否存在粉化、开裂、异常膨胀或长期不固化等现象。只有材料混合均匀、凝胶时间和固化状态满足要求、设备出料连续稳定时，方可进入正式注浆。该要求能够及时发现材料储存异常、比例失衡、管路堵塞、枪头混合不良等问题，避免问题材料直接注入路面结构内部后难以返工处理。

聚氨酯正式注浆时采用“低速起注、观察反馈、逐步调整”的控制方式。起注阶段按表 6 规定的出料速率下限短时注入，是为了先判断孔内通道连通性、材料扩散方向和病害区承受状态，避免一开始高流量注入造成局部集中发泡、路表拱起、裂缝扩大或异常返浆。施工过程中应同步观察相邻孔、裂缝和病害边界是否返浆，记录设备压力表读数、出料速率和单孔注浆量，并检查路表是否出现拱起、开裂或漏浆。确认无异常后，可通过调节注浆枪控制阀开度、连续注入或间歇注入方式控制注入节奏。线状裂缝宜由低处向高处分段推进，使浆液顺病害通道逐步扩散并减少低位积水影响；点状、面状病害宜由影响区外围向中心推进，有利于逐步封闭病害边界，减少浆液无序外逸。



图 6 注浆过程示意图

#### (4) 地聚物注浆施工

地聚物注浆强调连续注入，不宜频繁启停设备。脱空病害通常存在层间空隙，浆体需要连续进入脱空区并逐渐充满；路基强度不足病害则需要浆体在设计加固范围内扩散并形成连续或半连续加固体。频繁启停设备容易造成浆体在管路或孔内局部停滞、离析、堵塞，也会影响观察孔返浆和注浆量判断。脱空处治宜由低位向高位分段推进，是为了利用浆体流动性和重力作用，使脱空区域逐步充填并排出空气；路基强度不足处治宜先边界、后中部，并沿行车方向分段推进，是为了先控制加固范围边界，再对中部区域进行补强，减少浆液向非目标区域无序扩散。

注浆压力控制是本规程过程控制的重点之一。注浆压力并不是孤立指标，而是与材料黏度、浆体流动性、孔深、病害通道连通性、注浆速率、孔内阻力和设备状态共同作用。聚氨酯材料反应快、孔径小、注浆量相对较小，孔内实际压力受枪头混合、管路阻力、凝胶时间和裂缝连通性影响较大，因此不宜单纯以设备系统压力作为孔内注浆压力判据，而应重点控制出料速率、注浆量和现场现象。地聚物材料注浆量较大、连续注入时间较长，压力变化更能反映脱空或路基加固范围的充填状态，因此表 7 设置了出料压力控制范围。施工中如压力缓慢升高且观察孔或相邻孔出现稳定返浆，通常说明目标区域逐步充填；如压力快速升高但进浆量很小，可能存在孔道堵塞、孔深不到位、浆体流

动性不足或目标区已基本充满；如压力较低但浆液持续大量进入，则应结合观察孔、路表变化和设计注浆量判断是否存在脱空范围超出预估或浆液外逸风险。因此，本规程采用压力、进浆量、返浆和路表变化共同判定，避免单纯依靠压力造成误判。

#### （5）复合病害注浆施工

复合病害条件下采用组合注浆，是为了分别发挥地聚物和聚氨酯材料的功能优势。脱空或路基强度不足与裂缝、唧浆等病害并存时，如果直接采用聚氨酯处理表层裂缝或唧浆通道，深部脱空和支承不足问题可能仍然存在；如果只采用地聚物进行大范围充填，又难以对细小裂缝、富水唧浆通道和表层细部空隙形成快速封闭。因此，本规程规定组合注浆时宜先实施地聚物注浆，完成脱空充填和路基补强，恢复结构支承；再实施双组分聚氨酯注浆，对裂缝、唧浆通道和细部空隙进行封闭、止水和黏结。两种材料施工间隔一般为 2 h~4 h，主要根据地聚物材料凝结时间确定，既要保证地聚物已初步成型，避免后续聚氨酯注浆扰动其充填状态，也要满足养护工程施工窗口和连续组织要求。

#### （6）注浆终止判据

注浆终止判据采用综合控制方式确定。达到设计注浆量，说明该孔已完成设计阶段估算的基础注入目标；相邻孔、裂缝或观察孔出现稳定返浆，且目标区域已形成扩散，说明浆液已与周边孔位或病害通道连通，可作为充填到位的重要现象依据；设备压力升至设计上限并稳定保持不少于 10 s，且进浆量明显减小，说明孔内阻力增大、目标区域继续接收浆液能力降低，应停止该孔注浆，防止过注造成路面顶升；路面出现拱起、开裂、漏浆，或设备、管路异常时，应立即停止注浆，是为了防止材料继续注入引起结构扰动、表面破坏或施工安全问题。上述终止条件能够兼顾“注够”和“不过注”两个目标，使隐蔽工程过程控制更具可操作性。

### 5. 过程质量管理与交工验收

深层病害注浆处治属于隐蔽工程，浆液注入后的扩散、充填和成型状态难以通过开挖方式逐一检查，因此本规程将处治效果控制前置到施工过程质量管理中，采用材料状态检查、施工参数记录、路表状态观察、弯沉检测和探地雷达检测相结合的方式，对注浆处治过程和处治效果进行动态控制。该方法不是在工程完工后再进行病害复检，而是在施工过程中随施工、随检测、随调整；当弯沉或探地雷达检测结果不满足设计要求时，对应部位应及时采取补注或其他处治措施，并重新检测，直至满足设计要求。通过这种过程控制方式，可及时发现欠注、扩散不足、充填不密实或承载改善不足等问题，避免问题累积到交工验收阶段再处理。

#### （1）过程质量管理

主要包括双组分聚氨酯注浆材料出料混合均匀性和凝胶时间、地聚物注浆材料拌合均匀性和流

动度、注浆量、出料速率、路表变化、路面弯沉和探地雷达检测结果。其中，材料状态检查用于确认注入材料满足反应、流动和成型要求；注浆量和出料速率记录用于核实施工是否按照设计参数实施；路表变化检查用于及时发现异常拱起、开裂或漏浆等过注风险；弯沉检测用于判断处治区域结构承载状态是否达到设计要求；探地雷达检测用于判断病害区域内部异常反射范围是否减小或消除。上述项目覆盖了材料、施工参数、表观状态和内部处治效果四个层面，能够形成全过程质量控制闭环。

## (2) 交工验收

重点核查施工过程质量控制资料的完整性、真实性和结论一致性。工程完工后组织交工验收时，应核查材料质量证明资料、施工记录资料和过程质量管理检测资料，确认所用材料符合设计及本文件要求，孔位、孔深、注浆量、出料速率、压力变化、返浆情况和异常处置等施工记录完整真实，弯沉和探地雷达检测结果满足设计要求，补注或其他处治措施已形成闭环记录。通过资料核查确认施工过程受控、检测结论明确、处治结果满足设计要求，实现注浆处治工程质量的可评价和可追溯。

## (二) 关键技术条文说明

5.1.1 规定双组分聚氨酯注浆材料按使用性能分为 I 型与 II 型，其中 I 型适用于裂缝、松散处治，II 型适用于唧浆处治。本条是材料适用场景划分的关键条文。裂缝和松散病害的处治目标主要是裂缝封闭、孔隙填充、颗粒黏结和局部补强，要求材料固化后具有较好的密实性、黏结性和力学性能，因此采用 I 型双组分聚氨酯注浆材料。唧浆病害通常伴随水分迁移、泥浆通道和局部空隙，处治重点是挤水、发泡充填、封闭通道和止浆，因此采用具有适度发泡能力的 II 型双组分聚氨酯注浆材料。本条将聚氨酯材料按功能分型，而不是笼统规定“采用聚氨酯材料”，主要是考虑不同病害对材料性能的要求不同。I 型材料更强调密实成型、强度和黏结补强；II 型材料更强调发泡率、自由发泡密度、尺寸稳定性和潮湿环境成型能力。通过材料分型，可避免工程中将发泡型材料用于需要密实补强的松散病害，或将密实型材料用于需要封水止浆的唧浆病害，从而提高材料选择的针对性和处治效果稳定性。

6.2.1 规定存在大范围破碎、路基滑移或路基塌陷等结构失稳，或需开挖重建的情形，不宜采用注浆处治。本条用于明确注浆处治的技术边界。注浆处治属于非开挖修复技术，适用于裂缝、唧浆、松散、脱空、路基强度不足等尚可通过充填、封闭、黏结或局部补强改善的深层病害，但不适用于已经发生整体结构失稳或需要重建的路段。

设置本条主要是为了避免将注浆技术扩大化使用。对于大范围破碎、路基滑移、路基塌陷等病害，路面结构或路基整体稳定性已经受到严重影响，单纯注浆难以从根本上恢复结构安全。若仍采

用注浆处治，可能出现短期表观改善但长期病害继续发展的情况，甚至掩盖结构失稳风险。因此，本条要求在方案设计阶段先判断病害是否属于注浆处治适用范围，必要时应采用开挖重建或其他结构性处治措施。

6.2.2 规定双组分聚氨酯注浆处治设计应符合表 6 的规定。表 6 按照裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆和松散等病害类型，分别规定材料选择、布孔方式、孔距、孔径、孔深、设计注浆量、注入强度控制和出料速率。本条是将病害检测结果转化为可施工设计参数的核心条文。

裂缝病害通常呈线状分布，处治目标是封闭裂缝通道、填充裂缝附近细部空隙并提高裂缝两侧结构联系，因此采用 I 型聚氨酯注浆材料，沿缝均匀布设孔位，孔距取 0.5m。该布孔方式可保证浆液沿裂缝方向连续扩散，减少局部漏注或重复注浆。单点唧浆病害表面虽表现为局部出浆点，但其下部可能存在含水通道、局部空隙或泥浆迁移区，因此采用 II 型聚氨酯注浆材料，以唧浆点为中心向外布孔至病害边界，孔距取 0.3m，并可结合便携式弯沉检测设备确定影响边界。裂缝伴随唧浆病害兼具线状裂缝和点状富水通道特征，因此采用沿缝两侧交错布孔，并在唧浆点周边加密，兼顾沿缝封闭和重点止浆。松散病害多呈局部面状分布，采用 I 型聚氨酯材料和梅花形布孔，孔距取 0.5m，有利于浆液扩散范围相互搭接，形成整体黏结补强效果。

聚氨酯注浆孔径规定为 10mm~16mm，主要考虑该类材料黏度较低、反应速度较快，较小孔径即可满足注浆管安装和浆液注入要求，同时可降低对原路面结构的扰动。孔深按病害底端或病害影响层确定，是为了保证浆液进入目标病害层位，避免只处理表层而深部病害未被覆盖。设计注浆量按裂缝空隙、孔距、扩散半径、空隙体积或材料发泡率估算，目的在于形成可交底、可记录、可调整的基础控制量。出料速率按病害类型分级设置，裂缝注浆速率相对较高，满足连续扩散需要；唧浆和松散病害速率相对较低，便于控制发泡、渗入和路表抬升风险。表中明确出料速率为注浆枪出口处混合液体的体积流量，也有助于避免将设备系统压力、泵端流量和孔内实际注入状态混为一谈。

6.2.3 规定地聚物注浆处治设计参数应符合表 7 的规定。表 7 针对脱空和路基强度不足两类病害，规定材料选择、布孔方式、孔距、孔径、孔深、设计注浆量、出料压力和出料速率。本条主要用于指导大范围充填和承载恢复型病害的处治设计。

脱空病害的处治目标是填充结构层下部空腔，恢复上部结构支承连续性；路基强度不足的处治目标是通过浆体进入设计加固范围，提高局部承载能力。两类病害均采用地聚物注浆材料，是因为地聚物浆体流动性较好、可连续注入、注浆量较大，凝结硬化后能够形成具有一定强度和体积稳定性的无机固体。表 7 规定矩形或梅花形布孔，孔距取 1.0m，并设置观察孔，主要是为了使浆体扩散范围相互衔接，同时通过观察孔判断排气、返浆和充填状态。

地聚物注浆孔径规定为 38mm~50mm，是考虑地聚物浆体固体组分含量较高、注入流量较大，小

孔径容易造成孔口阻力增大、堵塞或出料不连续；但孔径过大又会增加路面扰动和封孔工作量。因此，该孔径范围兼顾了浆体泵送、连续注入和原路面扰动控制。脱空处治孔深至病害底端，是为了保证浆体自病害下部或目标空腔位置进入并充填到位；路基强度不足处治孔深至设计加固深度，是为了使浆体进入目标补强范围。出料压力和出料速率按病害类型分别确定，脱空处治压力和流量相对较低，以避免路面顶升和浆液外逸；路基强度不足处治可适当提高压力和流量，以克服较大注入阻力并保证浆体进入设计加固范围。

7.3.4 规定出现达到设计注浆量、相邻孔或观察孔稳定返浆、设备压力达到设计上限且进浆量明显减小、路面出现拱起开裂漏浆、设备或管路异常等情形时，应停止该孔注浆。本条是防止欠注和过注的关键控制条文。深层病害注浆处治属于隐蔽工程，浆液在结构内部的扩散、充填和成型状态难以直接观察，若仅依靠单一指标判断注浆终止，容易发生误判。

达到设计注浆量，说明该孔已完成设计阶段估算的基础注入目标；相邻孔、裂缝或观察孔出现稳定返浆，说明浆液已与周边孔位或病害通道连通，可作为充填扩散到位的重要现场现象；设备压力升至设计上限并稳定保持不少于10s，且进浆量明显减小，说明目标区域继续接收浆液能力降低，此时继续注浆可能造成过注和路表顶升；路面出现拱起、开裂、漏浆，或设备管路异常时立即停止，是为了防止结构扰动扩大和施工安全风险。

本条体现的是综合判定原则，即注浆终止不单纯依赖压力，也不单纯依赖注浆量，而是将设计注浆量、返浆现象、压力变化、进浆量变化、路表变化和和设备状态共同作为判断依据。该规定既能避免注浆不足导致充填不密实，也能避免过量注入造成路面异常抬升、开裂或浆液外逸。

7.3.5 规定脱空或路基强度不足病害与裂缝、唧浆等病害并存时，宜采用地聚物与双组分聚氨酯组合注浆；组合注浆时应先实施地聚物注浆，后实施双组分聚氨酯注浆，间隔时间根据地聚物注浆材料凝结时间确定，一般为2h~4h。本条是复合病害处治的关键条文。

深层病害往往不是单一类型存在，裂缝、唧浆、松散、脱空和路基强度不足可能相互伴生。地聚物材料适合较大范围脱空充填和路基补强，能够形成连续支承体；聚氨酯材料适合裂缝封闭、唧浆止水和细部空隙黏结。若对存在脱空或路基强度不足的路段直接采用聚氨酯处理裂缝或唧浆通道，深部支承不足可能仍未解决；若仅采用地聚物进行大范围充填，细小裂缝和富水唧浆通道又可能封闭不足。因此，本条规定组合注浆，并明确先后顺序。

先实施地聚物注浆，是为了优先完成脱空充填和路基补强，恢复结构支承；后实施双组分聚氨酯注浆，是为了在支承恢复后对裂缝、唧浆通道和细部空隙进行封闭、止水和黏结。间隔时间一般为2h~4h，主要根据地聚物材料凝结时间确定，既要保证地聚物浆体初步成型，避免后续聚氨酯注浆扰动其充填状态，又要满足养护施工窗口和连续组织要求。

7.4.1 规定施工过程质量管理应检查双组分聚氨酯注浆材料、地聚物注浆材料、注浆量、出料速率、路表变化、路面弯沉和探地雷达检测结果；弯沉与雷达检测不满足设计要求时，应采取补注或其他处治措施并重新检测；弯沉与雷达检测满足设计要求且达到开放交通条件后，方可开放交通。本条是本规程质量控制逻辑的核心条文。

本规程将弯沉检测和探地雷达检测定位为施工过程质量管理和处治效果动态控制手段，而不是单独的完工后病害复检项目。施工过程中随施工、随检测、随调整，当检测结果不满足设计要求时，对应部位及时补注或采取其他处治措施，并重新检测，直至满足设计要求。这样可以将质量问题消除在施工过程中，避免问题累积到交工验收阶段再集中处理。

表 10 中的检查项目覆盖材料、施工参数、路表状态和内部处治效果四个层面。聚氨酯材料检查出料混合均匀性和凝胶时间，是为了保证 A、B 组分现场反应稳定；地聚物材料检查拌合均匀性和流动度，是为了保证浆体可泵送、可扩散、不离析；注浆量和出料速率按每处病害记录，是为了核实施工是否按设计参数执行；路表变化检查用于及时发现过注、局部抬升、开裂或漏浆等异常；弯沉检测用于评价结构承载状态是否改善，探地雷达检测用于评价内部异常反射范围是否减小或消除。通过上述项目，可实现注浆过程可控、检测结果可判、质量资料可追溯。

7.5.1 规定工程完工后组织交工验收。结合本规程“随做随检、随检随补、检测结果作为过程控制”的质量管理逻辑，交工验收阶段宜重点核查材料质量证明资料、施工记录资料、过程质量管理检测资料及封孔和路表恢复情况，而不宜再将病害复检作为独立验收程序。交工验收以资料核查为主，主要是因为弯沉检测和探地雷达检测已在施工过程中完成，并在不满足设计要求时已要求补注或采取其他处治措施、重新检测。验收阶段应确认材料符合设计及本文件要求，施工记录完整、数据真实、结论明确，孔位、孔深、注浆量、出料速率、压力变化、返浆情况和异常处置等信息可追溯；同时核查弯沉和探地雷达检测结果是否满足设计要求，补注或其他处治措施是否形成闭合记录。

通过将交工验收定位为对过程控制资料和表面恢复情况的核查确认，可避免将深层病害注浆处治简单理解为“完工后再检测一次”的验收模式，更符合隐蔽工程随施工动态控制的特点，也有利于保证工程质量评价的完整性、真实性和可追溯性。

### **（三）综述报告**

本规程面向公路沥青路面运营期深层病害注浆处治工程，适用于裂缝、唧浆、松散、脱空、路基强度不足等发生在道路表面层以下病害的非开挖处治。规程围绕深层病害的工程特点，系统提出以病害检测为设计输入、以材料性能为适用边界、以处治方案设计为施工依据、以过程质量管理为

控制手段的注浆处治技术要求，明确了从材料选择、方案设计到施工与验收的完整技术框架。

技术路线方面，规程以现场调查、三维探地雷达检测和落锤弯沉检测为基础，构建了“病害识别—材料选型—方案设计—注浆施工—过程检测—资料验收”的技术路径。现场调查用于初步确定病害路段范围和主要病害类型，三维探地雷达用于判定病害类型、范围、层位与尺寸，落锤弯沉检测用于识别承载能力异常区段，并结合雷达检测结果校核处治范围、孔位布设参数和注浆控制参数。通过多源检测结果的综合分析，规程将表观病害、内部异常和结构承载状态相互印证，为注浆深度、布孔范围、设计注浆量和过程控制参数确定提供依据，减少仅凭外观或单一检测手段造成的欠处治、过处治或孔位布设不合理等问题。

材料选择方面，规程根据不同深层病害的处治目标，对双组分聚氨酯注浆材料和地聚物注浆材料的适用场景进行了分类规定。双组分聚氨酯注浆材料按使用性能分为 I 型和 II 型，其中 I 型适用于裂缝、松散病害处治，重点发挥裂缝封闭、孔隙填充、松散黏结和局部补强作用；II 型适用于唧浆病害处治，重点发挥发泡充填、挤水封堵和止浆作用。地聚物注浆材料适用于脱空和路基强度不足处治，重点发挥大范围充填、连续支承和承载恢复作用。通过对不同材料适用病害类型、原材料指标、混合后性能指标和现场施工控制要求进行统一规定，规程避免了工程中材料功能混用、适用边界不清和质量控制口径不一致等问题。

方案设计方面，规程将病害检测成果转化为可施工、可控制、可记录的设计参数，分别针对聚氨酯注浆和地聚物注浆提出处治方案设计要求。聚氨酯注浆处治方案按照裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆和松散等病害类型，明确材料选择、布孔方式、孔距、孔径、孔深、设计注浆量、注入强度控制和出料速率等参数；地聚物注浆处治方案按照脱空和路基强度不足两类病害，明确布孔方式、孔距、观察孔设置、孔径、孔深、设计注浆量、出料压力和出料速率等参数。上述设计内容将病害类型、病害范围、材料性能和设备能力结合起来，使注浆处治由经验性施工转变为有检测依据、有设计参数、有过程控制的系统化处治。

施工与过程控制方面，规程对注浆设备、施工准备、现场材料调试、钻孔清孔、排水排浆、材料混合、起注控制、注浆推进顺序、注浆终止判据、组合注浆等关键环节进行了规定。聚氨酯注浆强调现场试混出料、混合状态检查、凝胶时间控制、孔内排水排浆和低速起注；地聚物注浆强调按设计配合比机械搅拌、现场流动度检验、连续搅拌、连续注入、压力和观察孔返浆控制。对于脱空或路基强度不足与裂缝、唧浆等病害并存的情况，规程提出先实施地聚物注浆、后实施双组分聚氨酯注浆的组合处治思路，以先恢复支承、再封闭裂缝和唧浆通道的方式提高复合病害处治效果。

质量管理方面，规程将弯沉检测和探地雷达检测定位为施工过程质量管理和处治效果动态控制手段。施工过程中按照材料状态、注浆量、出料速率、路表变化、弯沉检测和探地雷达检测等项目

进行检查；当弯沉或雷达检测结果不满足设计要求时，对应部位应及时采取补注或其他处治措施，并重新检测，直至满足设计要求。交工验收阶段重点核查材料质量证明资料、施工记录资料和过程质量管理检测资料，确认施工过程受控、检测结论明确、补注或异常处置资料闭合，从而实现注浆处治工程质量的可评价和可追溯。

总体来看，本规程在吸收现行公路养护、无损检测、注浆材料和施工质量管理相关标准要求的基础上，结合沥青路面深层病害注浆处治工程实践，形成了覆盖“材料选择—方案设计—施工控制—过程质量管理—交工验收”的成套技术规定。规程系统明确了深层病害类型、注浆材料分类、检测方法、设计参数、施工流程、注浆终止条件和质量控制口径，为公路沥青路面深层病害非开挖注浆处治提供了可直接执行的技术依据，有利于提高处治方案的针对性、施工过程的可控性和工程质量评价的一致性，推动公路养护由表层修补向结构性、精细化和绿色化养护转变。

#### （四）技术经济论证

随着我国公路网络规模持续扩大和既有沥青路面服役年限增长，裂缝、唧浆、松散、脱空、路基强度不足等深层病害在运营期路面养护中日益常见。此类病害多发生于道路表面层以下，具有隐蔽性强、病害类型复合、表层修补易反复等特点。若仅采用表面封缝、局部铣刨修补等常规方式，往往难以准确处治内部空隙、富水通道、结构松散和承载不足等问题，易造成病害反复出现，增加养护频次和长期运维成本，并对路面使用性能、行车舒适性和通行安全产生不利影响。

本规程面向公路沥青路面深层病害注浆处治工程，系统规范了材料选择、方案设计、施工工艺、过程质量管理和交工验收等关键环节，可直接用于指导运营期沥青路面深层病害非开挖处治。规程通过现场调查、三维探地雷达检测和落锤弯沉检测综合识别病害类型、范围、层位及结构承载状态，并将检测成果转化为材料选型、布孔方式、孔径、孔深、设计注浆量、出料压力和出料速率等设计参数，有利于提高处治方案的针对性和施工参数的可执行性，减少仅凭经验施工造成的欠处治、过处治或材料使用不当等问题。

从技术可行性看，本规程所采用的双组分聚氨酯注浆材料和地聚物注浆材料均具有明确的适用病害类型和技术控制指标。I型双组分聚氨酯注浆材料适用于裂缝、松散处治，重点发挥裂缝封闭、孔隙填充和松散黏结作用；II型双组分聚氨酯注浆材料适用于唧浆处治，重点发挥发泡充填、挤水封堵和止浆作用；地聚物注浆材料适用于脱空和路基强度不足处治，重点发挥大范围充填、支承恢复和承载补强作用。通过对不同材料的适用边界、原材性能、混合性能、施工设备和过程控制要求进行统一规定，可提高材料选用的准确性和施工质量的稳定性，增强标准实施的技术可行性。

从经济效益看，本规程通过规范检测引导的方案设计和注浆过程控制，有利于提高深层病害一

次处治成效，减少因处治范围不足、孔位布设不合理、材料类型选择不当或注浆控制失准造成的重复维修。与传统开挖修复相比，非开挖注浆处治可在较小作业面条件下完成裂缝封闭、唧浆止水、脱空充填和局部补强，减少大面积铣刨、开挖、弃料外运和结构层重铺等工作量，降低材料消耗、机械投入和交通组织成本。对于养护窗口期较短、交通压力较大的运营路段，采用规范化注浆处治可缩短现场作业时间，降低因频繁维修和长时间占道施工带来的间接经济损失，有助于降低路面养护全寿命周期费用。

从社会效益看，本规程的实施有利于改善深层病害路段的结构状态和服务水平。裂缝、唧浆、松散、脱空和路基强度不足等病害若持续发展，可能导致路面局部沉陷、坑槽、结构层破坏及行车舒适性下降。通过注浆方式对病害内部进行封闭、充填、黏结和补强，可在不大规模破坏原路面结构的条件下改善病害区域的整体性和承载状态，减少病害继续扩展的风险。同时，非开挖处治减少了养护施工对交通运行的干扰，有利于降低拥堵、绕行和施工安全风险，提高道路通行安全性和公众出行服务水平。

从管理效益看，本规程统一了沥青路面深层病害注浆处治中的术语定义、材料类型、检测方法、设计参数、施工流程、终止判据和质量控制口径，为建设、养护、设计、检测和施工单位提供了统一的技术依据。规程将弯沉检测和探地雷达检测纳入施工过程质量管理，强调随施工、随检测、随调整；当检测结果不满足设计要求时，及时补注或采取其他处治措施并重新检测，交工验收阶段则重点核查材料质量证明资料、施工记录资料和过程质量管理检测资料。该质量管理方式有利于形成材料、设计、施工、检测和资料闭合的管理链条，提高工程质量的可评价性和可追溯性。

从绿色低碳效益看，非开挖注浆处治技术能够减少传统开挖修复带来的路面结构破除、废旧材料外运、新材料回填和长时间机械作业，降低施工扰动、资源消耗和能源消耗。对于具备注浆处治条件的深层病害，采用检测引导下的精准注浆，可在较小范围内实现病害封闭、充填和补强，避免不必要的大范围开挖和重复施工，符合节约资源、减少排放和绿色养护的发展方向。

综上，本规程的制定与实施具有较好的技术可行性、经济合理性和推广应用价值。规程通过构建“病害识别—材料选型—方案设计—注浆施工—过程质量管理—交工验收”的成套技术体系，能够提高沥青路面深层病害注浆处治的规范化、科学化和精细化水平，有利于推动公路养护由表层修补、被动维修向结构性处治、精准养护和绿色养护转变，符合交通基础设施高质量发展和绿色低碳养护的总体要求，具有良好的综合效益和应用前景。

#### 四、与国家标准、行业标准、地方标准同类标准技术内容的对比情况

本规程依据 JTG 1001—2017《公路工程标准体系》和 JTG A02—2013《公路工程行业标准制修

订管理导则》的有关要求编制，文本格式和结构按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》执行。规程所规定的内容主要面向公路沥青路面运营期深层病害注浆处治工程，属于养护工程中非开挖注浆处治技术规定，与现行国家标准、行业标准在适用对象和技术定位上保持衔接。规程引用现行材料试验、路基路面现场测试、养护工程质量检验评定、无损检测等相关标准，对现行标准中尚未针对沥青路面深层病害注浆处治作出系统规定的材料选择、方案设计、施工过程控制和质量管理要求进行细化和补充，与上位标准之间不存在重复或冲突。

从同类标准发布情况看，近年来国内多地已形成以高聚物、聚合物或地聚物注浆处治为核心的地方标准和团体标准。安徽省 DB34/T 3269—2018《高聚物注浆技术在高速公路养护工程中的应用实施指南》规定了高速公路养护工程高聚物注浆施工的术语和定义、路面检测、注浆材料、注浆设备和机具、注浆布孔方案、施工工艺、质量控制与验收等内容，适用于高速公路沥青路面养护工程高聚物注浆技术应用的设计、施工及验收。河北省 DB13/T 5996—2024《公路基层病害聚合物注浆处治技术规程》规定了公路基层裂缝、脱空、唧浆等病害聚合物注浆处治技术的病害调查和检测、注浆布孔、材料、设备和机具、高聚合物注浆施工工艺、地聚合物注浆施工工艺、质量控制与验收等内容。河南省 DB41/T 2877—2025《道路深层病害高聚物注浆处治技术规范》规定了道路深层病害采用高聚物注浆技术进行处治的检测与评价、材料、设计、施工和施工质量验收要求，适用于道路脱空、松散、沉陷、唧浆、裂缝等病害维修。江苏省团体标准 T/JSJTQX 69—2025《路面裂缝复合高强聚合物注浆处治施工技术规范》主要规定路面裂缝复合高强聚合物注浆处治施工的基本规定、路面病害调查、材料、设备、施工、质量控制与验收等内容。辽宁省相关基层注浆补强技术规范则重点围绕公路养护工程基层注浆补强，规定道路病害调查与检测、材料、施工工艺和质量检验项目等内容。上述标准为注浆技术在道路养护工程中的应用提供了重要参考。

从技术内容看，安徽标准较早形成了高速公路沥青路面高聚物注浆应用的成套要求，对路面检测、注浆材料、注浆压力、布孔和弯沉检测等作出了规定；河北标准同时涉及高聚合物和地聚合物两类注浆材料，覆盖基层裂缝、脱空、唧浆等病害，并对施工阶段质量控制和弯沉验收作出规定；河南标准体系较完整，提出道路深层病害检测与评价、材料分型、分类设计、施工和质量验收要求，并强调探地雷达、落锤弯沉和钻芯验证等检测手段的综合应用；江苏团体标准聚焦路面裂缝复合高强聚合物注浆处治，对裂缝调查、材料性能、注浆施工和芯样完好率、抗压强度恢复率等验收指标作出规定；辽宁相关标准则侧重基层注浆补强，重点规定地聚合物材料、弯沉检测、孔位布设、压力控制和养生开放交通等内容。上述标准在检测识别、材料控制、布孔施工、注浆终止和质量评价方面具有较强借鉴意义。

本规程在编制过程中充分吸收了上述同类标准的成熟做法。一是在病害识别方面，吸收了“表

观调查+无损检测+必要验证”的技术思路，将现场调查、三维探地雷达检测和落锤弯沉检测作为方案设计前的基础工作，用于判定病害类型、范围、层位、尺寸及结构承载状态。二是在材料控制方面，借鉴同类标准对高聚物、聚合物、地聚物注浆材料性能指标的设置思路，结合本规程材料体系，对双组分聚氨酯 A、B 原材料、I 型和 II 型聚氨酯混合后性能以及地聚物浆体性能分别提出控制要求。三是在方案设计方面，吸收同类标准按病害类型确定布孔方式、孔距、孔径、孔深和注浆量的做法，并结合本规程处治对象进一步细化为裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆、松散、脱空和路基强度不足等典型病害类型。四是在施工控制方面，借鉴同类标准关于施工准备、设备调试、钻孔清孔、注浆记录、返浆判断、压力控制和异常情况处理的规定，进一步明确现场材料调试、排水排浆、低速起注、连续注入、组合注浆、注浆终止和封孔恢复等要求。

与现有同类标准相比，本规程的补充和细化主要体现在以下几个方面。

一是适用对象更加聚焦于公路沥青路面深层病害注浆处治。本规程将处治对象明确为发生在道路表面层以下的裂缝、唧浆、松散、脱空、路基强度不足等病害，既不同于仅面向裂缝处治的施工类标准，也不同于主要面向基层注浆补强或一般道路深层病害高聚物处治的通用性标准。通过限定适用对象和工程场景，本规程能够更好地服务于运营期沥青路面深层病害非开挖处治需求。

二是材料适用边界更加清晰。同类标准多以“高聚物”“聚合物”“地聚合物”等材料类别进行规定，部分标准按膨胀型、渗透型或地聚合物进行划分。本规程结合沥青路面深层病害的实际处治需求，将双组分聚氨酯注浆材料分为 I 型和 II 型，其中 I 型适用于裂缝、松散处治，重点满足裂缝封闭、孔隙填充和松散黏结要求；II 型适用于唧浆处治，重点满足发泡充填、挤水封堵和止浆要求；地聚物注浆材料适用于脱空和路基强度不足处治，重点满足大范围充填、支承恢复和承载补强要求。通过按病害类型和处治功能划分材料适用场景，可避免工程中材料功能混用、适用边界不清和过程控制口径不一致等问题。

三是方案设计参数更加系统。同类标准普遍规定了布孔、孔距、孔径、孔深、注浆量或压力等内容，但部分标准更偏向施工工艺要求。本规程将“方案设计”作为独立章节，明确病害检测成果如何转化为处治范围、材料选择、布孔方式、孔径、孔深、设计注浆量、出料压力和出料速率等设计参数。聚氨酯注浆处治方案按裂缝、单点唧浆、裂缝伴随唧浆和松散分别规定；地聚物注浆处治方案按脱空和路基强度不足分别规定。该设置使注浆处治由经验性施工转变为以检测结果为依据、以病害分类为基础、以参数控制为手段的方案设计方法，更便于施工交底和过程调整。

四是对富水、含水和复合病害条件下的施工控制作了进一步细化。已有标准普遍关注注浆压力、返浆、路面抬升和异常停止等内容，但对孔内含水、泥浆残留、聚氨酯现场试混、地聚物现场流动性、材料混合状态等方面的规定不完全一致。本规程规定聚氨酯注浆前应进行现场试混出料，检查

混合状态、凝胶时间、固化状态和设备出料稳定性；孔内存在游离水或泥浆时，应采用空压设备排水排浆，并以孔口连续一定时间无明显水或泥浆挤出作为判据。地聚物浆体应按设计配合比机械搅拌，经现场流动度检验合格后使用，并在规定时间内完成注浆。对于脱空或路基强度不足与裂缝、唧浆并存的复合病害，本规程提出先实施地聚物注浆、后实施双组分聚氨酯注浆的组合处治顺序，以先恢复支承、再封闭裂缝和唧浆通道的方式提高处治效果。

五是质量管理口径更加符合隐蔽工程特点。部分同类标准将注浆后弯沉、填充率、钻芯或外观作为验收项目，能够反映注浆处治效果，但在实际养护工程中，深层病害注浆处治具有隐蔽性和动态调整特点，若仅在完工后集中验收，容易错过及时补注和参数调整的时机。本规程将弯沉检测和探地雷达检测定位为施工过程质量管理和处治效果动态控制手段，强调随施工、随检测、随调整；当检测结果不满足设计要求时，对应部位及时采取补注或其他处治措施，并重新检测，直至满足设计要求。交工验收阶段则重点核查材料质量证明资料、施工记录资料和过程质量管理检测资料，确认施工过程受控、检测结论明确，从而形成过程控制与资料验收相结合的质量管理体系。

综上，本规程与现行国家标准、行业标准和地方标准保持协调衔接，在吸收安徽、河北、河南、江苏、辽宁等同类标准成熟做法的基础上，结合山东省公路沥青路面深层病害注浆处治工程实践，进一步明确了材料分类及适用场景、检测成果向方案设计参数的转化方法、聚氨酯与地聚物不同材料体系的施工控制要求、复合病害组合注浆顺序，以及以过程质量管理为核心的检测与验收口径。规程形成覆盖“材料选择—方案设计—施工与验收”的成套技术规定，可作为现行标准体系在公路沥青路面深层病害非开挖注浆处治场景下的细化补充，为工程实施提供更明确、可执行的技术依据。

## 五、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本规程与国家、行业、地方标准的相关规定无冲突，是对国标、行标、地标的补充细化及完善。

## 六、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况

本规程未采用国际标准和国外标准。

## 七、重大分歧意见的处理经过和依据

本规程在编制过程中无重大分歧意见。

## 八、涉及专利情况说明

经编制组初步核查，本规程不涉及已知专利。

## 九、其他应当说明的事项

无。