

# 隧道初支白色结晶体形成原因简要分析及防治措施

胡俊龙

中交（昆明）建设有限公司 云南 昆明 650224

**【摘要】**：针对天麻高速那亮弯隧道初支排水系统结晶堵塞问题，我们对隧道初支拌合用水进行了成分和酸碱性分析、对初支面的白色结晶体进行了成分定性和定量分析检测；检测手段包括 XRD 定性分析、TG 分析、ICP 各组分的定量分析。对拌合用水的分析结果表明隧道初支渗水为强碱性水体，主要成分为可溶性  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，含少量的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ；XRD 和 ICP 分析结果表明结晶体的成分主要为  $\text{CaCO}_3$ 。针对上述分析检测结果并分析了该结晶体形成的机理提出了相应的解决措施：包括采用 U 型管密闭式排水系统、采用内壁光滑的 PVC 排水管增加排水界面的光滑性、采用中性水进行混凝土拌合、提高初支混凝土的密实度及初支混凝土和钢架架之间的结合密实度来缓解排水系统堵塞现象。

**【关键词】**：公路隧道；初支；排水管结晶；排水管堵塞；解决措施

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.043

## 1 不同类型速凝剂组分分析

有碱液体速凝剂：用氢氧化钠和氢氧化铝加热合成，反应后主要成份为偏铝酸钠；无碱速凝剂：用氟硅酸+氢氧化铝+硫酸铝反应合成，反应后主要成份为硫酸铝，氟硅酸铝；有碱速凝剂粉剂：其主要成分为铝氧熟料(即铝矾土、纯碱、生石灰按比例烧制成的熟料)经磨细而制成。不论是哪种类型的速凝剂从本质上讲都是加快了水泥的水化作用。

## 2 水泥组分

普通硅酸盐水泥组分：硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙、氧化镁等；水泥提供了结晶需要的大部分钙离子及镁离子。

## 3 晶体形成的几种假设

(1) 该白色晶体是隧道围岩本身就存在的，只是在开挖过程中破坏了某种平衡，导致该晶体的渗出；

(2) 隧道围岩中的渗水具有腐蚀作用，对初支喷射混凝土产生了腐蚀作用；

(3) 从速凝剂参与水化反应的角度出发假设白色的结晶体是在混凝土水化的过程中产生的，随着初支面的水流而迁移出来；

(4) 白色结晶体是后期形成的，即水化过程中没有生成白色结晶体，该晶体是喷射混凝土所析出的物质在隧道环境和综合作用下发生化学反应产生的次生物；

(5) 不同速凝剂的作用，在喷射混凝土水化的过程中产生了不同的反应，生成了不同的物质。

## 4 结晶体组成分析

从自然干燥后送检的隧道白色结晶体表征结果来看，样品基本都由碳酸钙组成，其它组分低于 2wt%。

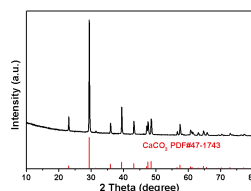


图 1: XRD 检测

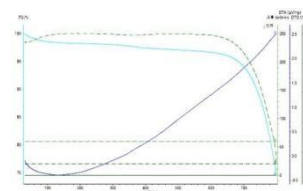


图 2: TG 检测

注：XRD 检测只能检测到  $\text{CaCO}_3$ ；TG 检测时样品基本都是 650 摄氏度上的分解，可能有极少量的氢氧化钙（400 摄氏度下有个小峰） $\text{CaCO}_3$  的分解温度通常在 650 摄氏度以上； $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的分解温度通常在 400-500 摄氏度。

表 2 ICP 检测结论发现 Ca 含量远高于 Mg 含量

| 样品编号                       | 2110113591-3 | 2110113591-3 |
|----------------------------|--------------|--------------|
| 样品质量 $m_0$ (g)             | /            | /            |
| 定容体积 $V_0$ (mL)            | /            | /            |
| 测试元素                       | Ca           | Mg           |
| 测试溶液元素浓度 $C_0$ (mg/L)      | 2.1068       | 0.1354       |
| 稀释倍数 $f$                   | 1            | 1            |
| 消解液/原样品溶液元素浓度 $C_1$ (mg/L) | 2.1068       | 0.1354       |
| 样品元素含量 $C_x$ (mg/kg)       | /            | /            |
| 样品元素含量 $W$ (%)             | /            | /            |

上述检测结果表明该白色结晶体主要成分是  $\text{CaCO}_3$ ；喷射混凝土在水化过程中会产生  $\text{CaCO}_3$ ，但该产物很稳定，不溶于水更不会随着水流迁移至喷射混凝土表面；所以“白色的结晶体是在混凝土水化的过程中产生的，随着初支面的水流而迁移”

出来”的假设不成立。

## 5 现场水质与结晶现状分析

### 5.1 采用 PH 值为 11.3 初支面渗水作为喷射混凝土用水

表 3 水质检测结果

| 序号 | 检测项目                          | 单位   | 技术要求 | 检测结果  |
|----|-------------------------------|------|------|-------|
| 1  | Mg <sup>2+</sup>              | mg/L | /    | 0.1   |
| 2  | Ca <sup>2+</sup>              | mg/L | /    | 337.9 |
| 3  | PH 值                          | /    | /    | 11.3  |
| 4  | Cl <sup>-</sup>               | mg/L | /    | <10   |
| 5  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/L | /    | 45    |
| 6  | 碱含量                           | mg/L | /    | 55    |

注：该水为那亮弯隧道反坡汇集到仰拱处的水；水中的钙离子主要以氢氧化钙的方式溶解于水中。

(1) 那亮弯隧道水质检测结果否定了“隧道围岩中的渗水具有腐蚀作用，对初支喷射混凝土产生了腐蚀作用”的假设；

(2) 隧道初支钻芯结果表明围岩表面并没有白色晶体，否定了“白色晶体是隧道围岩本身就存在的，只是在开挖过程中破坏了某种平衡，导致该晶体的渗出”的假设；

(3) 根据隧道初支结晶分析可知：结晶析出的部位主要是在工字钢与喷射混凝土的结合面和排水管出口附近；因为工字钢与喷射混凝土的结合性不好、不密实容易渗水，排水管出口水流缓慢极有利于结晶体地形成；

(4) 采用 PH 为 11.3 的拌合用水拌制喷射混凝土会使硬化后的喷射混凝土中的 Ca(OH)<sub>2</sub> 浓度极度饱和，在初支面渗水水压的作用下 Ca(OH)<sub>2</sub> 随着水流被带出；在隧道环境中遇空气中 CO<sub>2</sub>，发生反应：Ca(OH)<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>→CaCO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O；

(5) 在初支渗水段基本上初支表面都会产生相应的白色晶体；通过初支钻芯发现围岩与喷射混凝土的接触面虽然也是处于水环境中但芯样端部并未出现白色结晶体，这是由于该结合面处于一个相对密闭的环境中，没有空气地相对流动。

### 5.2 采用 PH 值为 7~8 的地下水作为初支喷射拌合用水

表 4 水质检测结果

| 序号 | 检测项目                          | 单位   | 技术要求 | 检测结果  |
|----|-------------------------------|------|------|-------|
| 1  | PH 值                          | /    | /    | 7.56  |
| 2  | Cl <sup>-</sup>               | mg/L | /    | 9.5   |
| 3  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/L | /    | 59.06 |
| 4  | 碱含量                           | mg/L | /    | 15.58 |

注：该水为那亮弯隧道掌子面渗出地下水，检测结果为中性水，不具备腐蚀性。

## 6 室内对比试验

在 2020 年中国铁道科学期刊《铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究》中对结晶做过详细地结晶模拟研究，本文引用了其相应的研究成果；在室温条件下，分别将水泥净浆试块浸泡于蒸馏水与 0.1mol·L<sup>-1</sup>NaOH 溶液中，模拟在不同环境（密封空气、流动空气、密封 CO<sub>2</sub>）工况下结晶情况，试验工况及结果见下表。

表 5 不同工况下的对比试验

| 工况编号 | 试验环境                        |                    | 试验结果 |       |
|------|-----------------------------|--------------------|------|-------|
|      | 溶液                          | 外界环境               | 结晶情况 | PH 值  |
| 1    | 蒸馏水                         | 密封空气               | 未结晶  | 12~13 |
| 2    | 蒸馏水                         | 流动空气               | 结晶明显 | 12~13 |
| 3    | 蒸馏水                         | 密闭 CO <sub>2</sub> | 轻微结晶 | 7~8   |
| 4    | 0.1mol·L <sup>-1</sup> NaOH | 密封空气               | 未结晶  | 12~13 |
| 5    | 0.1mol·L <sup>-1</sup> NaOH | 流动空气               | 结晶明显 | 12~13 |
| 6    | 0.1mol·L <sup>-1</sup> NaOH | 密闭 CO <sub>2</sub> | 轻微结晶 | 8~9   |



图 1：无碱速凝剂喷射砼浸泡 14d

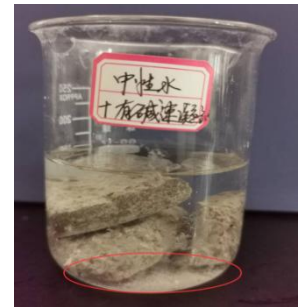


图 2：有碱速凝剂喷射砼浸泡 14d

该对比试验表明：

(1) 在密封的环境下无论在何种环境工况下都不会有结晶析出，只有在流动空气的作用下才会有结晶体的产生；

(2) 是否结晶与浸泡溶液是否为碱性和中性没有关系；

(3) 结晶程度受外界环境影响由高到低排序为：流动空气>密闭 CO<sub>2</sub>>流动空气。

(4) 图 1、图 2 室内对比试验表明无论采用有碱速凝剂还

是无碱速凝剂在流动空气中均会产生少量的白色晶体,说明白色晶体的产生与速凝剂的种类关系不大,并非主要因素。

## 7 形成原因及防治措施

### 7.1 形成原因分析

(1) 对那亮弯隧道喷射混凝土拌合用水进行了抽样检测,检测结果显示该水的 PH 值为 11.3,属于碱性很强的拌合用水。这种碱性很强的水是从喷射混凝土初支面渗出的水经过喷射混凝土后形成饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液,由于反坡作用汇集到仰拱掌子面处,再从掌子面处再回收利用。

(2) 从上述水的检测结果可知隧道原始拌合地下水 PH 值为 7.56,属于中性,随着隧道的往前推进,初支喷射混凝土拌合用水改为了初支渗出的汇聚于仰拱掌子面处的水;使用该拌合用水的初支渗出的白色结晶体越来越多,在隧道流动空气的作用下,水的强碱性加剧了白色结晶体产生。

### 7.2 防治措施

- (1) 使用 PH 值 6~8 的喷射混凝土拌合用水;
- (2) 严禁使用隧道初支面渗水作为喷射混凝土拌合用水

### 参考文献:

- [1] 张正安.无碱液体速凝剂的性能研究及其机理探讨[D].沈阳:沈阳建筑大学,2011.
- [2] 郭小雄.铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究.中国铁道科学,2020.
- [3] 汪志勇.液体速凝剂的制备及性能.广州化学,2018.

(属  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  饱和溶液);

(3) 那亮弯隧道横向排水管(光面 PVC 管)采用了 U 型(水封))的设计,其目的是阻断初支面排出的水与流动空气进行长期接触,形成结晶体;实践表明采用该排水措施时排水口未出现白色结晶体,说明该措施能有效地阻止结晶体的形成,该措施是防止结晶产生的一种经济、有效的措施。

## 8 结论

- (1) 隧道初支面的白色结晶体主要成分为  $\text{CaCO}_3$ ;
- (2) 隧道使用的水是反坡汇集的初支渗水,长期的积累沉淀使得收集的水呈强碱性,属饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液,这是初支面白色结晶体极易形成的最主要原因之一;
- (3) 该结晶体的产生与所使用的速凝剂种类并没有关联,在隧道流动空气和初支渗水的情况下,白色结晶体或多或少的都会产生;碱性拌合用水的参与提供了更多的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,加剧的白色结晶体的生成;
- (4) 采用 U 型排水管从原理上讲是水封,没有外界流动空气地参与,断绝了白色结晶体的生成必要因素。