

# 水利隧洞工程泡沫（轻质）混凝土的应用

朱澄浩 吴建保

浙江省第一水电建设集团股份有限公司 浙江 杭州 310052

**摘要：**本文探讨了泡沫混凝土在水利隧洞工程的应用，介绍了其轻质、保温隔热、隔音和良好流动性等特性及原理。详细阐述了泡沫混凝土在回填、衬砌修复和防渗堵漏等方面的应用场景与工艺，并通过实例验证了其在提升工程质量、缩短工期和降低成本上的效果。同时分析了应用中的挑战如强度控制和耐久性问题，提出了技术解决方案。

**关键词：**水利隧洞工程；泡沫（轻质）混凝土；应用；优势；发展前景

## 1 引言

水利隧洞工程在防洪、供水等领域作用关键，但常面临复杂地质与高水压等挑战，传统材料与工艺在不规则回填、衬砌修复及防渗堵漏等方面存在局限，亟需新型高效材料。泡沫混凝土因其轻质、保温隔热、良好流动性及耐火性，在水利隧洞中应用潜力大，可提升工程质量与安全性，降低成本，具有重要研究与应用价值。

## 2 泡沫（轻质）混凝土的基本特性及形成原理

### 2.1 基本特性

泡沫混凝土因其轻质、优良的保温隔热和隔音性能、良好的流动性和耐火性，在水利隧洞工程中应用广泛。其密度在 $300\text{--}1600\text{kg/m}^3$ 之间，可通过物理或化学发泡调整，有效减轻结构自重并降低地基处理成本，特别适用于软土地基区域减少沉降。导热系数低至 $0.08\text{--}0.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，有助于减少温度裂缝和能源消耗，确保供水管线等隧洞内特定温度环境的需求。多孔结构赋予其优秀的吸音能力，能有效降低噪音污染，改善周边居民生活质量。泡沫混凝土的流动性使其适合复杂形状部位施工，保证回填质量。作为无机不燃材料，它具有出色的耐火性能，遇火不会产生有害气体，保障工程安全。

### 2.2 形成原理

泡沫混凝土的形成主要有物理发泡和化学发泡两种方式。物理发泡是将发泡剂用水稀释成一定浓度的溶液，通过发泡机产生大量均匀、细密的泡沫，然后将泡沫与水泥浆体充分混合，形成泡沫混凝土浆体。化学发泡则是在水泥浆体中加入化学发泡剂，在浆体硬化过程中，发泡剂分解产生气体，使浆体内部形成大量气孔，从而形成泡沫混凝土<sup>[1]</sup>。不同的发泡方式会影响泡沫混凝土的性能，如物理发泡形成的泡沫混凝土气孔分布相对均匀，而化学发泡形成的泡沫混凝土气孔大小和分布可能存在一定差异。

## 3 泡沫（轻质）混凝土在水利隧洞工程中的应用场

## 景及优势

### 3.1 隧洞回填

#### 3.1.1 应用场景

在水利隧洞工程中，隧洞开挖后往往需要对隧洞周边与围岩之间的空隙进行回填，以确保隧洞结构的稳定性。传统的回填材料如砂石、土等存在自重大、施工不便等问题。对于一些形状不规则、空间狭窄的回填部位，传统材料难以充分填充，可能导致回填不密实，影响隧洞结构的安全性和稳定性。而泡沫混凝土具有良好的流动性，可适应各种复杂形状的回填部位。

#### 3.1.2 施工工艺

首先，根据隧洞周边空隙的尺寸和形状，进行泡沫混凝土配合比设计。确定水泥、水、泡沫剂等原材料的比例，以及是否需要添加矿物掺合料和外加剂。然后，在现场制备泡沫混凝土。若采用物理发泡方式，将发泡剂稀释后通过发泡机产生泡沫，再将泡沫与水泥浆体在搅拌设备中充分混合；若采用化学发泡方式，将化学发泡剂加入水泥浆体中搅拌均匀。接着，通过泵送设备将泡沫混凝土浆体注入到隧洞周边空隙中。在注入过程中，要控制泵送压力和速度，确保浆体能够充分填充空隙。最后，对回填部位进行养护，养护时间根据泡沫混凝土的强度要求和环境条件确定，一般不少于7天。

#### 3.1.3 优势

泡沫混凝土的轻质特性可大幅降低回填部分的重力，减少对隧洞衬砌的压力，降低衬砌结构的设计厚度和配筋量，从而降低工程造价。例如，在一些大型水利隧洞工程中，采用泡沫混凝土回填可节约大量的钢材和水泥用量。泡沫混凝土良好的流动性使其能够充分填充隧洞周边的不规则空隙，确保回填密实，避免出现空洞或不均匀沉降等问题，提高回填质量。在隧洞的拱脚、侧壁等复杂部位回填时，泡沫混凝土可轻松填充到各个角落，保证回填的均匀性和密实性<sup>[2]</sup>。泡沫混凝土可通过

现场制备或预制的方式进行施工,采用泵送技术可快速完成回填作业,大大缩短工期,提高施工效率。与传统回填材料相比,泡沫混凝土的施工速度可提高数倍,减少了施工对周边环境的影响。

### 3.2 衬砌修复

#### 3.2.1 应用场景

水利隧洞在长期运行过程中,由于受到水流冲刷、地质变化、温度应力等多种因素的影响,衬砌结构可能会出现裂缝、剥落等病害,影响隧洞的正常使用和安全。传统的修复方法如喷射混凝土、挂网锚喷等存在施工难度大、修复层重量大等问题。而泡沫混凝土具有轻质、良好的粘结性和施工灵活性等优点,适用于衬砌修复工程。

#### 3.2.2 施工工艺

首先,对衬砌病害部位进行清理和处理。清除病害部位的松动混凝土、杂物等,对裂缝进行扩缝处理,使其宽度和深度满足修复要求。然后,在裂缝和剥落部位涂抹界面剂,以增强泡沫混凝土与原有衬砌结构之间的粘结力。接着,根据病害部位的尺寸和形状,定制相应形状和尺寸的泡沫混凝土模块。若采用现场浇筑方式,根据配合比设计制备泡沫混凝土浆体,将其浇筑到病害部位;若采用预制模块方式,将预制好的泡沫混凝土模块安装到病害部位,并进行固定和密封处理。最后,对修复部位进行养护,养护时间根据泡沫混凝土的强度要求确定,一般不少于14天。

#### 3.2.3 优势

泡沫混凝土的轻质特性可减少修复层对原有衬砌结构的附加荷载,避免因修复层过重而导致原有衬砌结构进一步损坏。在一些老旧水利隧洞的衬砌修复中,采用泡沫混凝土可降低修复层对隧洞结构的压力,延长隧洞的使用寿命。泡沫混凝土与原有衬砌结构之间具有良好的粘结性能,能够确保修复层与原有结构紧密结合,形成一个整体,提高修复效果。通过涂抹界面剂和合理的施工工艺,可使泡沫混凝土与原有衬砌结构之间的粘结强度达到较高水平,有效防止修复层脱落。泡沫混凝土可根据衬砌病害的具体情况进行定制施工,对于一些不规则的裂缝或局部损坏部位,可方便地进行填充和修复,施工操作简单易行。在隧洞的弯曲部位或狭窄空间内的衬砌修复中,泡沫混凝土的施工灵活性优势尤为明显。

### 3.3 防渗堵漏

#### 3.3.1 应用场景

水利隧洞的防渗堵漏是保障工程安全运行的关键环节。隧洞在运行过程中可能会因为地质条件变化、施工

缺陷等原因出现渗漏问题,影响隧洞的正常使用和周边环境的安全。传统的防渗堵漏方法如化学灌浆、涂抹防水涂料等存在施工难度大、效果不稳定等问题。而泡沫混凝土在防渗堵漏方面具有独特的优势,适用于各种类型的隧洞渗漏处理。

#### 3.3.2 施工工艺

对于较小的裂缝渗漏,可采用直接注浆的方式。首先在裂缝处钻孔,钻孔深度根据裂缝情况确定,一般穿透裂缝至围岩一定深度。然后将泡沫混凝土注浆管插入孔中,通过注浆泵将泡沫混凝土浆体注入到裂缝中。在注浆过程中,要严格控制注浆压力和注浆量,确保泡沫混凝土能够充分填充裂缝<sup>[3]</sup>。对于较大的渗漏部位或孔隙,可采用先设置止水带或止水环,再进行泡沫混凝土填充的方式。先在渗漏部位周围安装止水装置,然后制备泡沫混凝土浆体,将其填充到渗漏部位,形成一道可靠的防水屏障。

#### 3.3.3 优势

泡沫混凝土内部的气孔结构使其具有较低的渗透性,能够有效阻止水分的渗透。将其应用于隧洞防渗堵漏工程中,可形成一道可靠的防水屏障,减少隧洞渗漏水。在一些高水压的隧洞防渗堵漏中,泡沫混凝土的防渗性能可得到有效发挥。泡沫混凝土可通过注浆等方式注入到隧洞的裂缝、孔隙等渗漏部位,填充缝隙,堵塞渗漏通道。其良好的流动性和可注性使得注浆施工更加容易进行,能够确保注浆效果。对于一些狭窄的裂缝或复杂的渗漏通道,泡沫混凝土可轻松注入并填充密实。泡沫混凝土具有一定的弹性变形能力,能够适应隧洞结构因温度变化、地质运动等引起的变形,在变形过程中仍能保持良好的防渗性能,减少因结构变形而导致的渗漏问题。在地质条件复杂的隧洞防渗堵漏中,泡沫混凝土的适应变形能力可提高防渗效果的持久性。

## 4 案例分析:南水北调中线工程某隧洞回填工程

### 4.1 项目背景

南水北调中线工程是我国重要的跨流域调水工程,旨在缓解北方地区水资源短缺问题。在某段隧洞施工过程中,由于地质条件复杂,隧洞局部出现塌方和超挖现象,需要采用轻质材料进行回填,以减少对隧洞结构的压力,并确保工程安全。

### 4.2 泡沫混凝土应用

选用密度等级为A06(干密度600kg/m<sup>3</sup>左右)的泡沫混凝土,具有良好的轻质、隔热和自立性。水泥用量为300kg/m<sup>3</sup>,粉煤灰用量为100kg/m<sup>3</sup>,水灰比为0.5,发泡剂掺量为水泥用量的3%。采用现场发泡、泵送浇筑的施

工方法。通过发泡机将发泡剂与水混合形成泡沫，再与水泥浆混合搅拌，形成泡沫混凝土浆体，最后通过泵送设备将其泵送至回填部位。在施工过程中，严格控制泡沫混凝土的密度、流动性和抗压强度。通过现场取样检测，泡沫混凝土的干密度控制在580-620kg/m<sup>3</sup>之间，28天抗压强度达到0.8-1.2MPa，满足设计要求。

#### 4.3 技术效果：

泡沫混凝土回填后，有效减轻了隧洞结构的荷载，提高了隧洞的稳定性。泡沫混凝土的隔热性能良好，有助于减少隧洞内外温差引起的应力变化。施工效率高，缩短了工期，降低了工程成本。

### 5 泡沫（轻质）混凝土在应用过程中可能面临的问题及解决措施

#### 5.1 强度控制问题

##### 5.1.1 问题表现

泡沫混凝土的强度相对较低，在一些对结构强度要求较高的水利隧洞工程中，可能难以满足设计要求。例如，在承受较大水压或外部荷载的隧洞衬砌或回填部位，泡沫混凝土的强度不足可能导致结构变形或破坏。

##### 5.1.2 解决措施

通过调整水泥、水、发泡剂等原材料的比例，以及添加适量的矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣粉等）和外加剂（如减水剂、早强剂等），改善泡沫混凝土的微观结构，提高其强度。例如，增加水泥用量可提高泡沫混凝土的早期强度，添加适量的粉煤灰可改善泡沫混凝土的工作性能和后期强度。将泡沫混凝土与其他强度较高的材料（如普通混凝土、钢材等）结合使用，形成复合结构。例如，在泡沫混凝土回填层表面设置一层钢筋混凝土保护层，以提高整体结构的强度和耐久性。

#### 5.2 耐久性问题

##### 5.2.1 问题表现

虽然泡沫混凝土具有一定的耐久性，但在长期的水下环境或化学腐蚀环境中，其耐久性可能会受到影响。例如，在水下环境中，泡沫混凝土可能会受到水的侵蚀，导致内部气孔结构破坏，强度降低；在化学腐蚀环境中，泡沫混凝土中的水泥水化产物可能会与腐蚀介质发生反应，影响其性能。

##### 5.2.2 解决措施

选用质量稳定、性能良好的水泥、发泡剂等原材料，确保泡沫混凝土的初始质量。例如，采用低碱水泥可减少碱-骨料反应的发生，提高泡沫混凝土的耐久性。在泡沫混凝土中添加适量的防水剂、抗腐蚀剂等耐久性外加剂，提高其抗渗、抗腐蚀能力。防水剂可减少

水分对泡沫混凝土的侵蚀，抗腐蚀剂可中和或抑制化学腐蚀介质对泡沫混凝土的破坏<sup>[4]</sup>。对暴露在水下或化学腐蚀环境中的泡沫混凝土表面进行防护处理，如涂刷防水涂料、设置防护层等，减少外界因素对泡沫混凝土的侵蚀。防水涂料可形成一层致密的保护膜，阻止水分和腐蚀介质的渗入；防护层可采用耐腐蚀的金属或非金属材料，进一步提高泡沫混凝土的耐久性。

#### 5.3 收缩裂缝问题

##### 5.3.1 问题表现

泡沫混凝土在硬化过程中可能会出现收缩裂缝，影响其性能和外观质量。收缩裂缝的产生主要是由于泡沫混凝土内部水分蒸发、水泥水化收缩等原因引起的。收缩裂缝会导致泡沫混凝土的强度降低、渗透性增加，影响其在水利隧洞工程中的应用效果。

##### 5.3.2 解决措施

合理调整水灰比，避免水灰比过大导致泡沫混凝土收缩加剧。在保证泡沫混凝土工作性能的前提下，尽量降低水灰比，减少内部水分含量。在泡沫混凝土中添加适量的膨胀剂，使其在硬化过程中产生微膨胀，补偿收缩，减少裂缝的产生。膨胀剂的种类和用量要根据泡沫混凝土的配合比和工程要求进行合理选择。在泡沫混凝土施工完成后，及时进行养护，保持表面湿润，养护时间不少于规定期限，以减少水分蒸发引起的收缩裂缝。可采用覆盖保湿材料、喷水养护等方式进行养护，确保泡沫混凝土在硬化过程中有足够的水分。

#### 结语

泡沫混凝土因其轻质、保温隔热、良好流动性等特性，在水利隧洞工程的回填、衬砌修复、防渗堵漏等方面应用优势显著，实际工程案例也验证了其提升质量、缩短工期、降低成本的效果。尽管存在强度控制、耐久性问题，但通过技术手段可有效解决。随着技术创新和标准化推进，泡沫混凝土在水利工程建设中将发挥更大作用，助力实现高质量发展。

#### 参考文献

- [1]钱浩.泡沫轻质混凝土在水利工程桥台后填土路基处理中的应用[J].建筑科技,2024,8(06):80-84.
- [2]林慧先.泡沫轻质混凝土在南冲水闸加高加固工程中的应用[J].水利科技与经济,2022,28(12):144-147+162.
- [3]周宇航,罗如平,朱碧堂,等.轻质泡沫混凝土泡沫剂的性能优选与配比试验研究[J].华东交通大学学报,2024,41(02):41-47.
- [4]梅艳婷.河流冲刷段泡沫混凝土轻质路堤施工探讨[J].交通建设与管理,2023,(04):53-55.