

混凝土喷射技术在隧道施工过程中的应力与变形特性研究

文 / 陈国轩 济南城建集团有限公司

摘要：混凝土喷射技术作为隧道施工中的关键支护手段，其应力分布与变形特性直接影响隧道结构的稳定性和安全性。文章基于隧道施工过程中围岩-喷射混凝土支护系统的相互作用，分析喷射混凝土在复杂应力环境中的受力机制与变形规律，并结合数值模拟与室内试验验证了喷射厚度、材料性能及施工参数对支护效果的影响。研究中建立了围岩应力场演化模型，推导喷射混凝土层的变形控制方程，进一步明确不同围岩等级下的支护优化策略。结果表明，喷射混凝土支护性能与施工参数之间存在非线性关系，合理优化喷射参数能提高支护系统的承载能力和变形控制能力。

关键词：隧道施工；混凝土喷射技术；应力特性；变形分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.025

引言

混凝土喷射技术以其快速成型、高强度、良好适应性的特点成为隧道支护的重要手段。施工过程中，围岩的应力场和变形特性受地质条件和施工工艺的综合影响，喷射混凝土的支护效果在复杂条件下表现出显著的非线性特征。支护系统的优化需要深入研究喷射混凝土与围岩之间的力学行为，量化应力与变形的时空分布规律，以满足稳定性和经济性的双重需求。本研究聚焦隧道施工中喷射混凝土的应力传递机制与变形特性，结合试验与数值模拟技术，从理论模型与工程实践两方面对施工参数和支护效果进行系统分析，以揭示不同围岩等级下的优化路径，并为隧道工程设计提供有效指导。

一、混凝土喷射技术的原理与施工工艺

（一）混凝土喷射技术的基本原理

混凝土喷射技术利用高压气流将拌合均匀的混凝土浆体高速喷射到基面，依靠喷射过程中气流的动能和混凝土的流变特性，形成喷射混凝土层。喷射混凝土的喷射速度 v 与气压 P 和混凝土的密度 ρ 之间存在一定关系，这可以通过以下公式进行表示：

$$v = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

其中， v 为喷射流速， P 为气压， ρ 为混凝土的密度，该公式描述了喷射过程中气流的速度与气压和混凝土密度之间的关系，喷射速度是影响喷射质量、喷射混凝土黏结性和厚度的关键因素之一。喷射过程中的速度、喷射角度以及喷嘴与基面之间的距离都会影响最终喷射混凝土层的质量和结构稳定性。在实际施工中，这些参数的选择需要根据具体的施工环境和地质条件进行调整，以保证喷射混凝土的良好性能。

（二）常见施工工艺

混凝土喷射技术在隧道施工中的应用涵盖多个关键环节。施工工艺主要包括基面处理、喷射参数控制、分层施工及质量监测等方面。

1. 基面处理

基面处理包括清理松散岩体、去除粉尘和预湿作业，以增强喷射层与基面的黏结强度。在高水压隧道或断层带等复杂环境下，采用界面剂或速凝剂调节混凝土的初始黏结能力，可减少喷射层的脱落风险，提高支护的整体性^[1]。

2. 喷射参数控制

喷射压力、喷射距离及材料配比决定了混凝土的成型质量。提高喷射速度有助于增强混凝土颗粒间的压实度，但过高的喷射压力会导致回弹率增加，造成材料浪费。优化喷嘴设计，调整喷射角度至 $85^\circ \sim 2.0\text{m}$ 范围内，有助于降低回弹率，提高混凝土利用率。此外，在喷射过程中，通过智能监测系统调整水灰比及速凝剂掺量，以平衡凝结时间和抗压强度，提高施工稳定性。

3. 分层施工

一次性喷射过厚易导致喷射层表面裂缝和内应力集中，影响支护稳定性。采用分层喷射工艺，每层厚度控制在 $5 \sim 8\text{cm}$ ，通过逐层叠加增强黏结效果，并减少裂缝的产生。喷射顺序按照“先拱后墙”的原则进行，有助于均匀分配围岩应力，提升整体承载能力。针对围岩稳定性较差的区域，可增加加强层喷射厚度或使用纤维增强混凝土，提高耐久性与抗剪性能。

4. 质量监测

施工过程中采用实时监测技术，对喷射厚度、回弹率及固化强度进行动态反馈，以优化施工参数。结合激光扫描系统测量喷射层均匀性，并通过物联网平台调整喷射压力和材料配比，使施工过程更加精准化。对于高应力区域，可采用智能喷射机械臂进行自动化施工，确保喷射厚度均匀，减少人为误差，提高支护可靠性。

二、隧道施工过程中应力与变形特性分析

（一）隧道围岩与喷射混凝土的相互作用机制

喷射混凝土作为支护层，其作用不仅是防止围岩松动和脱落，还能有效分担围岩的应力，调整应力分布，从而减小围岩变形。喷射混凝土与围岩的相互作用机制

可用简单的力学模型进行描述，假设喷射混凝土层和围岩之间发生弹性接触，其接触应力的平衡可表示为：

$$\sigma_r + \sigma_c = \sigma_0$$

其中， σ_r 为围岩的径向应力， σ_c 为喷射混凝土的径向支撑力， σ_0 为初始地应力。公式表明，围岩和喷射混凝土之间的接触应力需满足平衡条件，喷射混凝土在支护过程中承担着一定的应力传递作用。

围岩和喷射混凝土的黏结强度也是影响二者相互作用的关键因素，若界面黏结强度较低，喷射混凝土层可能会发生脱落，从而影响支护效果^[2]。所以，在支护设计中需要合理选择喷射混凝土的厚度、强度以及施工参数，以确保围岩和喷射混凝土之间的有效合作，避免发生支护失效的现象。

(二) 施工过程中围岩应力场的演化规律

隧道开挖后，围岩的应力场从初始均匀分布逐渐演化为受扰动状态，表现为应力重新分布和集中效应^[3]。围岩中主应力的分布可用弹性力学理论计算，其径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 表达式如下：

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 \sigma_0}{r^2}, \quad \sigma_\theta = \sigma_0 \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right)$$

其中， r_i 为隧道半径， r 为任意位置到隧道中心的距离， σ_0 为初始地应力。施工过程中，围岩应力场的变化可以根据数值模拟和现场监测进行分析。

表 1：不同施工阶段围岩应力场变化

施工阶段	径向应力 (MPa)	切向应力 (MPa)	应力集中系数
初始阶段	15	15	1
开挖后 1 天	8.5	22.5	1.5
喷射支护后	10	20	1.33
二次衬砌后	13	17	1.13

数据表明，喷射混凝土支护能有效降低围岩应力集中程度，控制应力场重新分布，避免局部应力过大导致的破坏现象。围岩应力的演化规律与围岩的物理力学性质密切相关。对于软弱围岩，应力重分布较为显著，而硬质围岩中应力场变化幅度较小。

(三) 喷射混凝土层的变形特性与影响因素

喷射混凝土在支护过程中不仅承受围岩的径向压力，还需要适应围岩的变形。其变形特性主要表现为受压缩变形与剪切变形的耦合作用，应变-应力关系描述如下：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

其中， ε 为应变， σ 为喷射混凝土层内的应力， E 为弹性模量。喷射混凝土层的总变形量可分为弹性变形和塑性变形两部分，具体变形取决于材料性能、喷射厚度和施工参数。影响喷射混凝土变形的主要因素包括材料性能、施工参数和围岩条件。材料性能方面，高弹性模量和纤维增强能显著降低变形量；施工参数方面，喷

射厚度与喷射质量直接影响支护效果；围岩条件方面，软弱围岩通常导致更大的喷射混凝土变形。表 2 总结了不同因素对喷射混凝土变形性能的影响试验数据。

表 2：喷射混凝土变形性能试验数据表

影响因素	参数范围	变形量 (mm)	备注
弹性模量 (GPa)	25 ~ 35	0.5 ~ 0.8	模量越高，变形量越小
喷射厚度 (cm)	5 ~ 15	0.6 ~ 1.5	厚度越大，变形量越小
围岩级别	III ~ V	1.0 ~ 2.5	级别越低，变形量越大

试验表明，在弹性模量从 25GPa 提高到 35GPa 时，变形量由 0.8mm 降低到 0.5mm，表明材料的刚度对控制变形具有关键作用。喷射厚度对变形的影响也较为明显，当喷射厚度从 5cm 增加到 15cm 时，变形量从 0.6mm 增加到 1.5mm，突显了较厚喷射层对变形控制的效果。围岩级别对变形量的影响较大，软弱围岩 (V 类) 中的变形量明显高于坚硬围岩 (III 类)，这说明在复杂地质条件下喷射混凝土的变形特性需要结合围岩特性进行优化设计。

三、数值模拟与试验研究

(一) 数值模拟方法与模型参数选取

数值模拟方法采用有限元分析技术，基于围岩与喷射混凝土的相互作用规律，建立二维轴对称模型模拟隧道开挖及喷射混凝土支护的全过程。模拟采用弹塑性模型描述围岩的力学行为，并使用线性弹性模型表示喷射混凝土的变形特性。围岩的初始地应力场设定为均匀分布，隧道周边采用合理的边界条件，以确保计算稳定性。

模型中参数选取结合实际工程条件与材料实验数据，围岩的物理力学性质采用莫尔-库仑屈服准则描述，其弹性模量 E_r 、内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 等参数通过岩样实验获得。喷射混凝土的弹性模量 E_c 、泊松比 ν 和压缩强度 f_c 根据材料实验数据确定。

模型采用增量加载法，模拟围岩开挖过程中的应力场演化与喷射混凝土支护作用，重点分析围岩变形、喷射混凝土应力分布以及支护系统的协同性能。

(二) 喷射混凝土支护性能的试验研究

试验研究采用标准尺寸试件模拟喷射混凝土支护层的受力情况，试验设备包含加载装置和应力应变监测系统，加载方式为单轴压缩试验，测试喷射混凝土的承载能力和变形特性。试验选取了三种不同厚度的喷射混凝土层 (5cm、10cm、15cm)，并对每种厚度的试件进行 3 组平行试验，试验结果如表 3 所示。

表 3：喷射混凝土支护性能试验数据

厚度 (cm)	平均抗压强度 (MPa)	平均弹性模量 (GPa)	平均破坏应变 (%)
5	30.5	25.3	0.15
10	35.8	28.5	0.13
15	38.7	32.1	0.11

试验结果显示喷射混凝土厚度增加后，其抗压强度和弹性模量均有提升，破坏应变呈现出下降趋势，这说明较厚的喷射层可以提供更强的承载能力，同时减少材料的塑性变形。但需要注意的是厚度增加后，材料的刚度提高，会导致在某些高应力区域出现较大的局部应力集中。所以在实际施工中，喷射混凝土的厚度需要结合围岩应力状态和变形需求进行合理选择。从表 3 的数据可以看出，喷射混凝土的弹性模量在厚度增加时提高幅度相对较小，从 10cm 增加到 15cm 时，弹性模量仅增加了 3.6GPa，而抗压强度增加了 2.9MPa，黏结强度为 1.8MPa，表明喷射混凝土与围岩之间具有较强的黏结力，有助于确保支护层的稳定性。

(三) 数值模拟与试验结果的对比分析

数值模拟与试验结果的对比显示，喷射混凝土的力学特性参数基本符合实验测量值，支护层应力分布规律也较实际情况吻合。在模拟中获得的最大承载能力与试验结果偏差小于 5%，说明模型可信度高，数值模拟与试验结果的对比数据如表 4 所示。从数据表可以看出，数值模拟与试验结果的误差均在 5% 以内，表明数值模型能较为准确地预测喷射混凝土的承载能力和变形特性，其中抗压强度的误差仅为 1.12%，说明数值模拟在预测喷射层的承载能力方面表现良好；而弹性模量和破坏应变的误差稍大，是由于材料内部微观结构的不均匀性或实验误差引起的。模拟结果表明在高围岩应力区，喷射混凝土的变形集中于接近隧道壁的区域，而远离支护层的部分受力较小，这与试验观察结果相符，进一步验证了支护系统的非线性力学特性。

表 4：数值模拟与试验结果对比表

项目	试验结果	数值模拟结果	相对误差 (%)
抗压强度 (10 cm)	35.8 MPa	36.2 MPa	1.12
弹性模量 (10 cm)	28.5 GPa	29.1 GPa	2.11
破坏应变 (10 cm)	0.13%	0.14%	3.85

(四) 喷射混凝土施工的动态优化方法

为保证喷射混凝土在复杂施工环境下的稳定性与适应性，施工过程中的动态优化方法至关重要，采用以下动态优化方式可以提高施工质量还能降低施工成本，进而减少材料浪费。

1. 实时监测与反馈调整：喷射施工过程中采用高精度传感器和激光扫描技术实时监测喷射厚度、应力分布以及回弹率等关键参数。建立数据反馈系统，让施工人员可以实时调整喷射混凝土的喷射速度、角度和压力，以保证施工的均匀性和稳定性。

2. 智能预测与参数自适应调整：结合机器学习和大数据分析技术，建立喷射混凝土的施工参数优化模型。分析历史施工数据来预测最优施工参数，使喷射设备能够根据现场环境和围岩特性自动调整喷射角度、厚度和材料配比，减少人为误差。

3. 环境适应性优化：高水压、断层带等复杂地质环境中，喷射混凝土的黏结性能和抗渗能力可能受到影响。优化混凝土配合比（加入抗渗外加剂、增加纤维增强材料）以及调整施工顺序（分层喷射、预喷界面剂），可以提高喷射混凝土的耐久性。

4. 动态优化施工顺序：根据围岩变形监测数据，动态调整喷射支护的施工顺序，围岩变形较大的区域可优先进行初期支护并采用加厚喷射层；而在变形较小的区域则减少喷射厚度，以降低材料浪费，提高施工效率。

5. 智能化喷射装备应用：应用自动化喷射机械手和机器人喷射系统，提高施工精度和减少人工误差，这些设备能结合激光扫描数据自动调整喷射方向和厚度，保证喷射混凝土层的均匀性，以提高支护效果。

结语

研究表明，混凝土喷射技术在隧道施工中的支护效果依赖于围岩与喷射层的力学协同作用，合理设计支护参数是实现稳定性的关键。围岩应力场在隧道开挖过程中发生重分布，喷射混凝土层能够有效调控应力集中，降低围岩变形量。试验结果显示，喷射厚度的增加显著提高了抗压强度和弹性模量，厚度对支护性能的优化效果符合弹性力学规律。数值模拟验证了喷射层的承载能力和变形特性，计算结果与试验数据的相对误差低于 5%，表明模型具有较高的准确性和工程指导价值。支护层厚度、材料强度及围岩等级对支护效果的影响呈现出非线性关系，优化设计需要结合围岩初始应力状态与施工条件动态调整。

参考文献

[1] 韩向明, 韩鹏举, 马富丽. 高性能隧道喷射混凝土配合比优化设计与性能研究 [J]. 混凝土, 2024, (12): 153-156+169.

[2] 周袁凯, 王禹淮, 杨磊, 等. 考虑喷射混凝土龄期特性的隧道施工力学行为研究 [J/OL]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2024, (04): 37-44 [2025-03-04].

[3] 罗明睿, 陶亮亮, 曾艳华, 等. 考虑喷射混凝土耐热性能的高地温隧道支护结构研究 [J]. 铁道学报, 2024, 46(11): 170-179.