

# 隧道新型气拱式临时支撑数值模拟分析

李伟 梁长跃

沈阳建筑大学

DOI:10.12238/btr.v8i2.4635

**[摘要]** 本文通过数值模拟分析了新型气拱式临时支撑结构在隧道施工中的应用。首先,介绍了设计,包括气囊材料、机制及关键参数。利用ABAQUS软件建模,研究了应力分布、变形特性及对围岩稳定性影响,并对比了不同条件下的性能。结果显示,该支撑力学性能好,适应性强,能有效控制施工变形和应力。

**[关键词]** 隧道施工; 新型气拱式临时支撑; 数值模拟; 力学性能; 工程应用

中图分类号: U455 文献标识码: A

## Numerical simulation and analysis of new gas arch temporary support in tunnel

Wei Li Changyue Liang

Shenyang Jianzhu University

**[Abstract]** In this paper, the application of a new type of gas arch temporary support structure in tunnel construction is analyzed by numerical simulation. Firstly, the design is introduced, including the material, mechanism and key parameters of the airbag. By using ABAQUS software, the stress distribution, deformation characteristics and the influence on the stability of surrounding rock are studied, and the performance under different conditions is compared. The results show that the support has good mechanical properties, strong adaptability, and can effectively control construction deformation and stress.

**[Key words]** tunnel construction; New gas arch type temporary support; Numerical simulation; Mechanical properties; Engineering application

随着我国基建增速,隧道工程在交通建设中的作用日益凸显。隧道施工中,临时支撑技术对安全和效率至关重要<sup>[1]</sup>。传统支撑方法存在诸多不足,因此研发新型高效支撑结构十分必要。本文提出了一种新型气拱式临时支撑,并通过数值模拟分析了其力学性能。研究涉及结构设计、工作原理及工程应用前景,旨在为隧道施工提供创新支撑方案,提升安全性和效率,降低成本。

### 1 新型气拱式临时支撑的结构原理与特点

#### 1.1 结构组成

新型气拱式支撑的结构组成主要包括高强度、耐磨损、抗老化性能的聚氨酯橡胶气囊,其物理力学性能指标见表1。气拱的形状设计为半圆形,以提供均匀的支撑力,其尺寸设计基于隧道断面的几何参数,计算公式为:

$$R = \frac{B}{2} + \sqrt{H^2 + \frac{B^2}{4}}$$

其中为气拱半径,为隧道宽度,为隧道高度。连接与固定方式方面,气拱通过可调节的固定支架与隧道壁连接,固定支架的设计考虑了螺栓的承载力。

#### 1.2 工作原理

表1 气囊材料物理力学性能指标

| 性能指标  | 单位      | 数值   |
|-------|---------|------|
| 抗拉强度  | MPa     | ≥30  |
| 断裂伸长率 | %       | ≥400 |
| 耐磨性   | 磨损量/mg  | ≤50  |
| 耐老化性  | 强度保持率/% | ≥80  |

在研究隧道新型气拱式支撑中,气压调节是关键<sup>[2]</sup>。气压与承载力关系为:

$$P = \frac{4F}{\pi R^2}$$

其中  $P$  是气压(单位: kPa),  $F$  是气拱承载的力(单位: kN), 而  $R$  则是气拱的半径。调整气压可控制承载力。气拱支撑适应隧道变形,其应变计算公式为:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

来计算,其中 $\varepsilon$ 是气拱的应变, $\Delta L$ 是气拱长度的变化量,而 $L$ 是气拱的原始长度。这种设计使得气拱式支撑能够在隧道施工过程中,随着隧道变形而相应调整,确保施工安全。

### 1.3 设计参数的确定

在新型气拱式临时支撑的设计过程中,地质条件和隧道断面尺寸对稳定性系数的确定起着决定性作用。采用公式:

$$K = \frac{R_{eq}}{i}$$

来计算气拱的稳定性系数 $K$ ,其中 $R_{eq}$ 为等效半径, $i$ 为隧道侧压力系数。同时,为了确保施工安全,进行冗余设计,确保 $SF$ 大于1.5。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 有限元分析软件选择与模型建立

本研究采用ABAQUS进行有限元分析,利用其非线性分析能力处理复杂材料行为和大变形问题,并通过显式动态模块模拟隧道开挖的动态响应,以及耦合场分析功能研究气拱支撑的气压分布和结构相互作用<sup>[3]</sup>。基本方程为:

$$M \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C \frac{\partial u}{\partial t} + Ku = F(t)$$

隧道模型根据实际尺寸建立,采用混合网格划分,特别在气拱和土体区域细化网格。气拱模型用壳单元模拟,参数包括半径、厚度和初始气压,以模拟不同工作状态下的支撑性能。

### 2.2 材料参数与边界条件

土体采用Mohr-Coulomb模型,参数包括弹性模量 $f$ 、泊松比 $\sigma$ 、内摩擦角 $\phi$ 和粘聚力 $c$ ,屈服函数为:

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c N_\phi = 0$$

气拱支撑用弹性模型,参数 $f$ 和 $\sigma$ ,可能含塑性参数。边界条件模拟实际地质,底部固定,侧面水平约束,顶部自由。施工过程包括隧道开挖、气拱充气和衬砌施作,通过单元激活和钝化实现。

### 2.3 模拟工况设计

研究中分析了不同气压下的新型气拱支撑承载能力,包括0.1MPa至0.3MPa等工况,探究了气拱的应力、变形及最优气压范围。同时,模拟了隧道开挖过程中的动态响应,包括气拱内气压变化、土体位移和应力重分布,以及气拱结构的稳定性,通过监测关键点的位移和应力来评估稳定性和安全性<sup>[4]</sup>。此外,研究通过调整土体参数,考察了不同地质条件下气拱支撑的性能,评估其在软土、硬土、砂土中的适用性与安全性,重点关注承载力和稳定性。

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 气拱式支撑的应力与变形特性

3.1.1 气囊内部应力分布规律:数值模拟结果显示,气囊内部应力呈现明显的非均匀分布特征。靠近隧道顶部的气囊区域应力

较高,而两侧应力相对较低。这种应力分布规律与气囊的几何形状和内部气压密切相关。通过模拟不同气压下的应力分布,发现随着气压的增加,气囊内部的应力峰值也随之上升,但分布模式保持一致。气囊内部应力的分布可以用以下公式进行简化描述:

$$\sigma = \frac{P \cdot r}{t}$$

其中, $\sigma$ 为气囊内壁应力, $P$ 为气囊内部气压, $r$ 为气囊半径, $t$ 为气囊壁厚。从公式可以看出,气压 $P$ 和半径 $r$ 的增加会显著提高应力水平。

3.1.2 支撑结构的整体变形情况:在模拟中,气拱式支撑结构的整体变形表现为向隧道内部的收敛。通过对变形数据的分析,发现气拱在充气后能够有效地控制隧道的收敛变形,尤其是在隧道顶部和侧壁区域,变形量显著减小<sup>[5]</sup>。气拱支撑的变形控制效果可以通过以下公式进行量化:

$$\Delta = \frac{P \cdot L^3}{E \cdot I}$$

其中, $\Delta$ 为变形量, $P$ 为气压, $L$ 为气拱跨度, $E$ 为气囊材料的弹性模量, $I$ 为截面惯性矩。

3.1.3 关键部位的应力集中与变形协调:在气拱与隧道衬砌的连接处,出现了应力集中的现象。这些部位的变形协调性是评价支撑结构有效性的关键。模拟结果显示,通过优化连接设计,可以减少应力集中,提高结构的整体稳定性和耐久性。应力集中系数 $K_t$ 可以通过以下公式计算:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

其中, $\sigma_{max}$ 为最大应力, $\sigma_{nom}$ 为名义应力。

### 3.2 隧道围岩稳定性分析

3.2.1 围岩应力与位移变化:模拟结果显示,气拱式支撑在隧道工程中起到了关键作用,通过形成均匀分布的应力场,显著降低了围岩的应力集中,使得隧道顶部和侧壁的应力降低幅度达到30%左右。同时,气拱支撑有效控制了围岩位移,隧道顶部下陷量从30mm降至10mm,侧壁收敛量从20mm降至5mm。

3.2.2 塑性区发展与潜在失稳区域:在隧道开挖过程中,气拱式支撑对塑性区的发展具有显著影响。塑性区发展数据如表2所示:

表2 塑性区发展数据

| 阶段     | 无支撑塑性区体积(m <sup>3</sup> ) | 有支撑塑性区体积(m <sup>3</sup> ) | 塑性区体积降低率(%) |
|--------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 隧道开挖初期 | 150                       | 80                        | 46.7        |
| 隧道开挖中期 | 200                       | 120                       | 40          |
| 隧道开挖后期 | 250                       | 160                       | 36          |

潜在失稳区域:通过模拟分析,我们确定了潜在失稳区域的位置和范围。

3.2.3 支撑与围岩的相互作用机制：相互作用机制：气拱式支撑与围岩之间的相互作用主要体现在以下几个方面：

$$P = k \cdot \Delta u$$

其中， $P$  为支撑力， $k$  为支撑刚度， $\Delta u$  为位移变化量。整体稳定性提高：通过调整支撑参数，整体稳定性得到了显著提高。

### 3.3 不同工况下的性能对比

3.3.1 气压对支撑承载能力的影响：通过对比不同气压下的支撑承载能力，我们发现气压是影响支撑性能的重要因素。适当提高气压可以显著增强支撑的承载能力，但过高的气压可能导致气囊材料的应力超过其屈服极限，从而影响结构的安全性。

3.3.2 开挖步长与支撑效果的关系：模拟分析了不同开挖步长对气拱式支撑效果的影响。结果表明，较小的开挖步长有助于控制围岩的变形和应力分布，提高支撑的稳定性。然而，过小的步长可能会增加施工难度和成本，因此需要根据实际情况选择合适的开挖步长。

3.3.3 地质条件差异下的适应性分析。在不同地质条件下，气拱式支撑的适应性表现出显著差异。通过数值模拟分析，发现在软土条件下，气拱式支撑能够更好地控制变形和应力分布；而在硬土或岩层中，则需要通过调整设计参数来确保支撑的稳定性。地质条件对气拱式支撑的影响可以用以下公式进行量化：

$$\sigma_{rock} = \frac{E_{rock} \cdot \epsilon}{(1 - \nu_{rock})}$$

其中： $\sigma_{rock}$  为围岩应力； $E_{rock}$  为围岩弹性模量； $\epsilon$  为围岩应变； $\nu_{rock}$  为围岩泊松比。根据数值模拟结果，不同地质条件下的气拱式支撑性能如表3所示：

表3 不同地质条件下的气拱式支撑性能

| 地质条件 | 围岩弹性模量           | 围岩泊松比        | 气拱变形量 (mm) | 气囊最大应力 (MPa) |
|------|------------------|--------------|------------|--------------|
|      | $E_{rock}$ (GPa) | $\nu_{rock}$ |            |              |
| 软土   | 0.1              | 0.35         | 5.0        | 2.0          |
| 中硬土  | 1.0              | 0.30         | 3.0        | 2.5          |
| 岩层   | 30.0             | 0.25         | 2.0        | 3.0          |

从表3可以看出，在软土条件下，气拱式支撑的变形量较大，但气囊的最大应力较低，说明其适应性较好。而在硬土或岩层中，气拱的变形量较小，但气囊的最大应力较高，需要通过优化设计参数（如增加气压或调整气囊壁厚）来确保支撑的稳定性。

## 4 新型气拱式临时支撑的创新点与优势

### 4.1 结构创新点

新型气拱式临时支撑系统采用了优化的半圆形气拱设计，这种设计不仅能够更均匀地分布内部气压，提高支撑的稳定性和承载效率，而且其模块化的连接方式增强了节点的牢固性和可靠性，简化了现场安装与调整过程。同时，该系统具备可调节

气压的灵活性，允许根据隧道施工的具体需求和地质条件变化进行实时调整，通过精确控制支撑力，进一步优化了施工流程。

### 4.2 性能优势

新型气拱式支撑系统具有高承载能力，能有效抵抗隧道开挖过程中的土压力和水压力，其良好的变形适应性使得气拱能够与围岩共同变形，有效吸收外部荷载，减少对隧道结构的损伤。此外，该系统采用快速充气技术，实现了快速安装与拆除，大大缩短了施工周期，降低了施工成本。同时，新型气拱式支撑减少了传统支撑材料的使用，降低了材料消耗和废弃物的产生，符合绿色施工的理念，并且由于其施工效率的提高和材料成本的降低，展现出较高的经济性。

### 4.3 工程应用前景

新型气拱式支撑因其灵活性和高适应性，特别适用于复杂地质条件下的隧道施工，如软土、膨胀土、破碎岩层等地质环境，能够有效应对这些环境下的施工挑战。该支撑系统作为一种创新的临时支撑方式，不仅能够补充传统支撑的不足，而且在某些情况下可以替代传统的木支撑、钢支撑等，为隧道施工提供了一种新的解决方案。随着技术的不断完善和推广，新型气拱式临时支撑在未来的隧道施工中将具有广阔的应用前景。

## 5 结论

本文通过对新型气拱式临时支撑结构的数值模拟分析，验证了其在隧道施工中的优越性能和显著优势。新型气拱式支撑在力学性能、适应性和施工效率方面表现优异，能有效控制隧道施工过程中的变形和应力，提高隧道围岩的稳定性。同时，该支撑结构具有设计创新、安装简便、经济环保等优点，适用于多种地质条件下的隧道施工。因此，新型气拱式临时支撑在隧道工程领域具有广阔的应用前景，为我国隧道施工提供了新的技术支持。未来，需进一步优化设计参数，完善施工工艺，推动该技术在工程中的应用与发展。

## 参考文献

- [1] 李想, 张丽娟, 赵军, 等. 陶粒混凝土力学性能试验及数值模拟研究[J]. 混凝土, 2024(3): 111-118.
- [2] 王海静, 周博, 薛世峰, 等. 基于数值模拟和机器学习的岩石力学性能预测[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(7): 81-85.
- [3] 张晓华, 韩晨阳. 新型扭转弹簧摩擦阻尼器力学性能的理论分析与数值模拟[J]. 山西建筑, 2024, 50(24): 6-10.
- [4] 马臻臻, 黄波. 不同温度条件下水泥混凝土撞击后力学性能数值模拟研究[J]. 混凝土, 2024(5): 43-47.
- [5] 彭建新, 赵洋, 王贤基, 等. 锈蚀Q345C钢材疲劳性能试验研究及数值模拟[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 53-63.

## 作者简介:

李伟(1968—), 男, 蒙古族, 辽宁朝阳人, 三级教授, 博士, 主要从事地基处理、岩土数值分析等方面研究。