

基于岩体破碎程度分级自动识别的爆破参数优化系统

木乃殷担 徐小雷 吕洪彬 高智勇 王啸天

中国水利水电第七工程局有限公司 甘肃 武威 733000

摘要：近年来，国内水电与新能源产业迅速发展，隧道工程数量显著增加。层状岩体在地质构造中广泛存在，其各向异性和结构面发育特性使爆破设计面临严峻挑战。传统爆破参数设计依赖经验，缺乏岩体状态的实时感知与反馈机制。本文基于YOLOv8深度学习模型，构建了围岩裂缝与层状岩体的自动识别系统，实现了岩体破碎程度与层理厚度的分级提取；结合Hoek-Brown强度准则对岩体力学参数进行动态折减，提出分区域精细化装药策略与半管爆破技术；通过ANSYS/LS-DYNA数值模拟验证了优化效果，并开发了爆破参数自动化布孔系统。结果表明，该系统显著改善了爆破轮廓成型质量，降低了超欠挖现象，为层状围岩隧道爆破提供了智能化解决方案。

关键词：层状围岩；YOLO模型；爆破参数优化；分区域装药；智能布孔

引言：层状围岩因成层性结构、力学各向异性及结构面发育等特点，在爆破过程中易出现弯曲失稳、张裂塌落等破坏模式，传统均匀装药方式难以适应其非均质特性。现有爆破设计依赖经验，缺乏岩体状态实时反馈机制。近年来，Gama^[1]针对层状围岩软弱结构面展开研究，发现岩层厚度增大时结构面对爆破影响减弱，反之则影响显著；Sadollah等^[2]通过神经网络构建了爆破参数与围岩特性的关联模型，实现参数优化与效果预测；余永强团队^[3]分析层状围岩粘结力对爆破应力波传播的影响，揭示爆轰气体与应力波共同作用导致岩体断裂的机制；周洪林^[4]研究结构面软弱层对爆破效果的影响，证实无软弱层时爆破效果更优；本文融合计算机视觉与爆破力学，构建岩体破碎程度自动识别与参数优化系统，旨在提升爆破精度与安全性。

1 基于YOLOv8的岩体特征识别模型

1.1 模型结构

本研究采用基于YOLOv8的改进分割模型，通过多尺度特征提取主干网络、跨层特征融合模块和像素级分割输出头三部分结构，实现对岩体裂缝与层理结构的精准识别。模型利用残差结构与空间金字塔池化提取多尺度岩体特征，借助注意力机制融合深浅层语义信息，最终输出高分辨率分割掩膜，并通过并行网格化处理将识别结果转化为破碎程度量化参数，为爆破参数优化提供数据支持。

1.2 岩体特征识别机制

裂缝识别分割：通过分割掩膜提取裂缝像素区域，计算裂隙面积比，按岩体破碎程度分级标准进行分级。而层理识别是识别层理界面并统计层数，结合岩体高度计算平均层厚，按照层状围岩分级标准进行厚度分级。

2 层状围岩爆破特性与优化原理

2.1 破坏模式分析

水平层状岩体隧道失稳主要呈现两种典型破坏模式：

弯曲失稳多见于薄层状地质结构，由岩层抗弯刚度不足引发拉伸失效，具体原因可以归结为：（1）层间结合面抗剪强度弱化导致错动离层；（2）薄板状脆性岩体（如页岩）抗弯性能不足；（3）开挖应力重分布行程悬臂梁结构，自重与构造应力联合作用导致挠曲断裂。典型特征为：（1）顶板张拉垮塌：拱顶岩层挠曲下陷形成放射状张裂隙；（2）侧壁鼓曲变形：临空面层状剥离或倾倒破坏；（3）渐进式损伤扩展：微裂纹沿弱面扩展引发连锁破坏。

张裂塌落常见于厚层或块状岩体顶部，因拉应力超过抗拉强度引发：垂直裂缝沿拉应力方向呈直立/放射状分布；岩层断裂形成板状/块状塌落体，断面平整；破坏过程较快，伴随“掉块”现象的渐进性发展。

2.2 爆破参数优化策略

（1）分区域精细化装药：根据yolo模型的识别结果，在破碎程度高的部分适量增加装药量，在破碎程度低的部分适量减少装药量，而不是如传统装药方式一样，整个区域采用统一装药标准。（2）半管爆破技术：应用半圆形/半管状装药装置（如PVC管），将炸药沿钻孔一侧布置，替代传统全孔均匀装药。另一侧通过“不耦合效应”（炸药与孔壁间预留空袭），使爆炸能量集中于目标岩体侧，另一侧冲击波强度显著降低，有效减少对围岩的损伤。（3）Hoek-Brown强度折减：该准则由该准则由Hoek等于1992年提出，通过地质强度指标（GSI）和扰动参数（D）量化岩体特征：其中 m_i 为岩石特性参数， $D=0$ 表示无扰动， $D=1$ 表示强扰动。相关岩体力学参数的

估算公式如下：

$$\begin{aligned}\sigma_{cm} &= \sqrt{s}\sigma_c \\ \sigma_{tm} &= \frac{1}{2}\sigma_c\left(mb - \sqrt{mb^2 + 4s}\right) \\ mb &= \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)mi \\ s &= \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)\end{aligned}$$

可估算岩体抗压强度（ σ_c ）和抗拉强度（ σ_t ）。示例中初始强度为80MPa（抗压）和6MPa（抗拉）的岩体，经GSI折减后左侧（完整程度2级）抗压强度降至15MPa、抗拉强度1MPa，右侧（3级）则降至30MPa和2MPa，实现基于破碎程度的精准强度调整。

表1 岩体折减强度计算结果

		左侧岩体	右侧岩体
轴向抗压强度	折减前	80MPa	80MPa
	折减后	15MPa	30MPa
轴向抗拉强度	折减前	6MPa	6MPa
	折减后	1MPa	2MPa

3 爆破参数优化系统构建与验证

3.1 数值模拟验证

在ANSYS/LS-DYNA爆破模拟中，主要采用Lagrange方法和多物质流固耦合方法：Lagrange方法通过Lagrange单元算法建模，可处理炸药、空气、水、岩石等全部构件，其优势在于能清晰界定物质边界且计算量较小，但炸药爆炸时网格严重变形可能导致计算失败；为此，多物质流固耦合方法被提出，该方法对炸药和空气采用Euler算法（避免网格变形且无需设定接触），对岩石采用Lagrange算法，通过流固耦合传递能量，但需空气与岩石存在重叠区域以实现能量传递，且重叠区域大小直接影响爆破效果，因此需合理选择空气域尺寸。

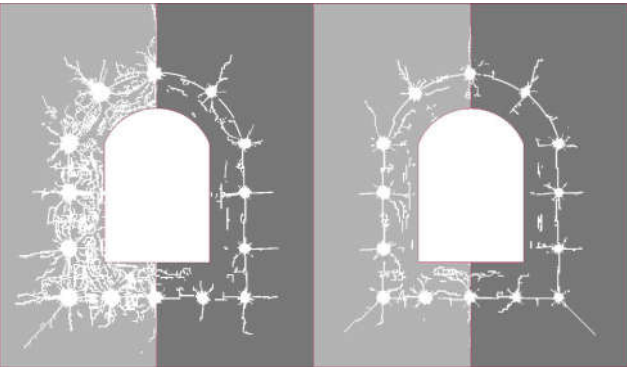


图1 工况1、2数值模拟结果

对比传统装药与分区域装药工况：工况1，岩体两侧采用统一炸药爆破参数，爆破效果如图1左边所示，可以

清晰的看到魏延两侧产生了完全不同的爆破效果，围岩右侧爆破效果较好，爆破轮廓与设计开挖轮廓吻合较好。反观左侧爆破效果，围岩爆破后破损严重，造成较多的超挖，不满足工程要求。工况2，岩体两侧采用分区域精细化装药，左侧岩体破碎程度高，炸药密度适量减小；右侧破碎程度低，炸药密度适量增加。数值模拟结果如图1右边所示，围岩两边取得了较好的爆破结果，爆破轮廓清晰，无明显的超欠挖，与设计开挖轮廓吻合较好。因此，采用分区域精细化装药能明显改善爆破轮廓成型效果。

3.2 自动化布孔系统开发

现在挖隧道主要使用钻爆法，但爆破设计环节遇到了技术难题。其中炮孔布置问题特别突出，主要有两个：第一，爆破参数选择主要靠经验，不同设计人员的经验不同，结果差别很大；第二，人工设计炮孔布局图很麻烦，修改起来很不方便。为了解决这些问题，本文在现有研究基础上开发了一套智能布孔系统，系统集成YOLO识别模块、参数计算模块与图形生成模块，输入掌子面图像以及断面参数后，自动输出布孔方案。结合深度学习模型的识别结果与爆破手册相关规范编写自动化布孔程序，系统包括四个主要部分：螺旋掏槽定位算法；楔形掏槽优化算法；周边孔智能生成算法；崩落孔精准分布算法。这套系统为隧道钻爆施工提供了新的解决方案，实现了通过一张开挖断面图片就能自动计算爆破参数并生成炮孔示意图，可以大为提高施工效率。流程如图2所示。

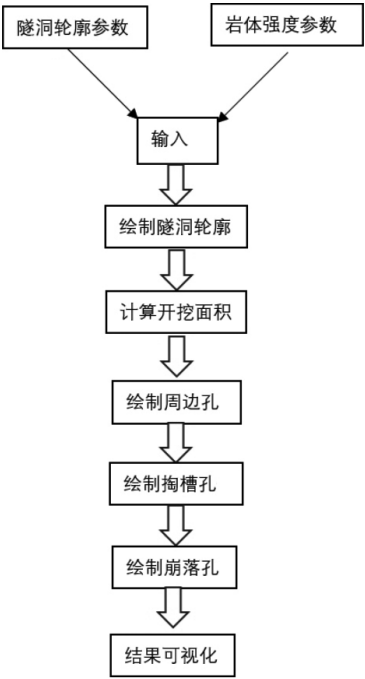


图2 自动化布孔流程图

结论：本研究成功构建了一套基于YOLOv8深度学习模型的岩体智能识别与爆破参数优化系统，有效解决了层状围岩爆破设计中依赖人工经验、缺乏地质自适应性的行业痛点。通过改进的多尺度特征提取网络与跨层特征融合机制，系统实现了对岩体裂缝与层理结构的精准识别与量化解析，准确率显著提升。结合Hoek-Brown强度准则的岩体参数动态折减方法，创新性地提出了分区域精细化装药策略与半管爆破技术，经数值模拟验证表明，该方案可降低超挖率，显著改善爆破轮廓成型质量。最终开发的自动化布孔系统将识别结果与爆破参数智能关联，实现了从地质识别到方案设计的全流程数字化，为复杂地质条件下的隧道爆破提供了科学可靠的解决方案，对推动岩土工程智能化转型具有重要实践价值。

参考文献

- [1]Da Gama C D.Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock masses subjected to blasting. Proc1st IntSymp on Rock Frag by Blasting, Lulea, Sweden, 1983: 565-579.
- [2]Sadollah A.Bahreininejad A,Eskandar Hetc.Mine blast algorithm;A now population based algorithm for solving constrained engineering optimization problems[J].Applied Soft Computing.2013,13(5);2592-2612.
- [3]余永强,邱贤德,杨小林.层状岩体爆破损伤断裂机理分析[J].煤炭学报,2004,29(4):409-412.
- [4]周洪林.岩体不连续性对应力波传播的影响——一种层理模型实验研究[D].北京科技大学硕士学位论文,1986.
- [5]耿伟卫.隧道钻爆开挖爆破方案智能设计方法与系统研究[D].山东大学,2021.DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2021.000993.
- [6]李海宁,王尚,梁庆国, et al. 层状岩体引水隧洞围岩稳定性数值模拟分析[J].水电能源科学,2021,39(09):145-8+4.