

钢纤维喷射混凝土支护抗常规爆炸震塌能力研究

范新^{1,2}, 章克凌¹, 王明洋², 唐廷²

(1. 第二炮兵指挥学院, 湖北 武汉 430012; 2. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 采用一维震塌模型, 运用拉应力累积损伤破坏准则, 分析常规爆炸作用下坑道震塌剥落条件, 针对钢纤维喷射混凝土支护, 结合现行有关规范, 推导出震塌剥落层速度的实用计算方法, 并运用数值模拟手段对计算结果进行验证, 通过钢纤维喷射混凝土支护坑道的震塌剥落层速度与其他支护类型及毛洞的震塌剥落层速度对比, 量化说明钢纤维喷射混凝土支护抗爆炸震塌的能力。

关键词: 爆炸力学; 震塌; 钢纤维喷射混凝土; 坑道支护; 数值模拟

中图分类号: O 382

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)07 - 1437 - 06

STUDY ON SPALLING RESISTANCE PERFORMANCE OF STEEL FIBER SHOTCRETE INDUCED BY CONVENTIONAL EXPLOSIONS

FAN Xin^{1,2}, ZHANG Keling¹, WANG Mingyang², TANG Ting²

(1. The Second Artillery Command College, Wuhan, Hubei 430012, China;

2. Engineering Institute of Engineering Crops, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: According to the failure criterion of cumulating damage and one-dimensional spalling model, the condition of collapse induced by conventional explosion has been analyzed. According to correlative standards, the practical calculation method is achieved aiming at the steel fiber shotcrete support used in tunnel. The comparison between the calculated result and the numerical one shows that the calculation method is valid. In order to illuminate the resistance performance of steel fiber shotcrete induced by the conventional explosion quantitatively, the velocities of rockfalls from the top of tunnel supported by steel fiber shotcrete are compared with that of the tunnel supported by other kinds of support and that of the tunnel without support. The practical calculation methods offered can provide some references for design of steel fiber shotcrete support in tunnel.

Key words: explosion mechanics; spallation; steel fiber shotcrete; tunnel support; numerical simulation

1 引言

钢纤维混凝土作为一种新型材料在国内外坑(隧)道支护中得到了广泛的应用。钢纤维喷射混凝土压入开口的岩体节理、裂缝和开缝, 能够产生黏结作用, 相当于提高了岩体的黏聚力和内摩擦角;

能够消除洞室开挖后, 围岩表面的凸凹不平而带来的应力集中, 改善围岩力学性能, 有效控制围岩的过度变形; 其本身的抗剪能力能够降低爆炸荷载作用下坑道顶部松动岩块的塌落速度。在围岩条件较好的情况下, 厚层的钢纤维喷射混凝土衬砌甚至可以作为—个承载结构来支护围岩^[1]。目前, 国内外对于钢纤维喷射混凝土支护的抗爆炸震塌能力大都

收稿日期: 2004 - 12 - 20; **修回日期:** 2005 - 03 - 09

作者简介: 范新(1975 -), 男, 博士, 1998年毕业于解放军理工大学工程兵工程学院建筑工程系防护工程专业, 现任讲师, 主要从事防护工程方面的研究工作。E-mail: fannxin@126.com

只有定性的了解，而缺乏试验和定量的研究。本文在一维震塌理论的基础上，根据冲量转移规律，并结合现行有关规范，推导出了便于工程运用的常规爆炸作用下钢纤维喷射混凝土支护层的剥落速度计算方法，并运用数值模拟手段验证了该实用计算方法的合理性。通过将钢纤维喷射混凝土支护后的爆炸震塌落石速度与毛洞及其他支护类型进行对比，为钢纤维喷射混凝土支护抗爆能力提供了定量描述，可以在钢纤维喷射混凝土支护设计中加以借鉴和运用。

2 震塌过程基本理论

常规武器侵彻到距坑道一定范围内的岩石中爆炸，所产生的应力波传播到坑道内表面时，由于拉伸波从介质自由表面反射引起复杂的叠加动应力场。当坑道上方的岩石介质厚度很大时，由于应力波的衰减和扩散，到达自由面时其强度不足以使介质发生破坏变形；但当减小岩石介质的厚度而其他参数不变时，在坑道的背面出现辐射状裂缝，进一步减小介质的厚度造成背面震塌和层裂，当再进一步减小介质厚度，震塌即转为贯穿。对爆炸震塌破坏机制及破坏过程的动力学问题国内外研究很多，但仍不成熟，实际运用的多为经验公式^[2]。到目前为止，此问题仍然是工程亟待解决的课题之一。近期，岩石介质中因冲击或爆炸荷载直接作用下的曲面应力波复杂的应力-应变状态对其动力破坏的影响还没有完整的研究方法，然而此作用在对称轴附近的体积对称应力场以及在一系列其他情况下都可以当作一维弹脆性平面问题来加以分析。本文将采用一维震塌模型^[3]，运用拉应力累积损伤破坏准则，对坑道震塌破坏机制进行分析。

2.1 介质中爆炸参数确定

根据王明洋等^[4]的研究成果，在研究震塌问题时，可以假定荷载为突加衰减三角形荷载曲线。炸药在岩石中某一深度爆炸产生的总冲量为

$$J_s = 0.8\rho v_D \left(\frac{d}{2}\right)^{\frac{8}{3}} H^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中： J_s 为爆炸总冲量， ρ 为炸药密度， v_D 为爆轰速度， d 为装药直径， H 为炸药埋置深度。

在岩石中爆炸产生的应力场可将其简化为峰值为 σ_0 、作用时间为 T 的三角形波形。应力峰值 σ_0 可

由下式计算得到：

$$\sigma_0 = K / r_0^n \quad (2)$$

式中： r_0 为相对距离，且 $r_0 = r / R_0$ ； K 和 n 均为参数。对于岩石，当其强度小于 $(0.8 \sim 1.0) \times 10^2$ MPa时，通过对试验数据的统计整理，可有以下的拟合关系：

$$\left. \begin{aligned} K &= 6.31 \times 10^6 \exp[\sigma_s / (0.6 \times 10^7 + 0.26\sigma_s)] \\ n &= (5.1 \times 10^7 + 0.79\sigma_s) / (1.0 \times 10^7 + 0.577\sigma_s) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： σ_s 为岩石的抗压强度。

爆炸效应作用时间为

$$T = \frac{64J_s}{5\pi d^2 \sigma_0} \quad (4)$$

2.2 震塌剥落条件

化爆中，在爆炸区升压时间极短，在不考虑升压时间时假定爆炸荷载为突加三角形荷载， σ_0 为荷载峰值， t_m 为应力为 σ_m 时对应的时刻。

忽略开始时波在岩石介质中的衰减，要使岩石发生剥落破坏，必须满足累积损伤破坏准则，其具体表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &> \sigma_m \\ \int_0^{t_m} \sigma dt &\geq J_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： J_0 为拉应力的极限冲量值，且 $J_0 = \sigma_0 \tau_0$ ， τ_0 为延迟破坏极限的时间； σ_m 为静力极限。

根据一维波理论，当波传播到自由边界时发生反射，反射波波形和幅值不变，但方向相反。

研究距自由面 x 处，压缩波到达该点的时刻为： $t_1 = (b-x)/c$ ，其中， b 为研究岩石的厚度， c 为弹性波波速；反射拉伸波到达该点的时刻为： $t_2 = (b+x)/c$ 。剥落发生在 $0 < x \leq cT/2 = \lambda/2$ 之间。

反射拉伸波波头与入射压缩波波尾迭加后，可表示为

$$\begin{aligned} \sigma &= -\sigma_0 [1 - (t-t_1)/T] u(t-t_1) u(T+t_1-t) + \\ &\quad \sigma_0 [1 - (t-t_2)/T] u(t-t_2) u(T+t_2-t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $u(t)$ 为单位阶跃函数，且

$$u(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases}$$

t_2 时刻后，在一段时间内应力为常数，其值为

$$\sigma_1 = \frac{2x\sigma_0}{cT} = \frac{2x\sigma_0}{\lambda} \quad (7)$$

若 $\sigma_1 \leq \sigma_m$ ，则不满足累积损伤破坏条件，不会发生剥落破坏，故发生剥落时 x 需满足：

$$x > \frac{\lambda \sigma_m}{2 \sigma_0} \quad (8)$$

出现第一次剥落裂缝后，在未断裂物体中存储了一定的弹性势能，在突然卸载的情况下，卸载波传播到材料深部，若物体中储存的弹性势能足够大，位于卸载波前缘的剪切微裂纹将不稳定，其动力扩展导致物体的破坏。在破坏机制上，类同于弱爆炸，爆炸是物体中存储的化学能供给冲击波，而此处是物体中存储的弹性势能供给卸载波，形成持续断裂破坏。

3 支护层剥落速度计算

根据冲量转移规律，剥落速度计算公式为

$$v = (1/2\rho\delta) \int_0^{2\delta/c} \sigma(t) dt \quad (9)$$

式中： δ 为剥落层厚度；对于 $\sigma(t)$ ，有

$$\sigma(t) = (1 - t/T)\sigma_0 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)中有

$$v = \frac{\sigma_0}{\rho T c^2} (Tc - \delta) \quad (11)$$

其中，

$$\delta = \sqrt{\frac{J_0 \lambda c}{2\sigma_0}} = \sqrt{\frac{\sigma_0 \tau_0 \lambda c}{2\sigma_0}} \quad (12)$$

$$\tau_0 = e^{0.25 - \sqrt{0.25^2 + (9.091 \frac{\sigma_0}{\sigma_m} - 10)}} \quad (13)$$

所以剥落层速度 v 为

$$v = \frac{\sigma_0}{\rho T c} = T - \sqrt{\frac{e^{0.25 - \sqrt{0.25^2 + (9.091 \frac{\sigma_0}{\sigma_m} - 10)}} T}{2}} \quad (14)$$

式中： σ_0 ， T 根据式(1)，(2)，(4)确定。

式(14)对于剥落层的速度 v 的计算比较复杂，涉及到的参数较多，不便于工程上的应用，尤其是对于钢纤维喷射混凝土支护等多种支护类型，不能够明显体现支护类型对于落石速度的影响。为了给出更为方便实用的计算方法，结合有关标准，可以作如下推导。

由 $\sigma_0 = K/r_0^n = K/(2R/d)^n$ ， $C = \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3$ 及式(1)，(4)可得

$$T = \frac{K_t C^{\frac{2}{9}}}{\sigma_0} \quad (15)$$

其中，

$$K_t = \frac{32 \cdot 2^{1/3} \cdot 6^{2/9} \cdot \rho_* \cdot v_D \cdot H^{1/3}}{25 \cdot \pi^{11/9}} \approx 2.4 \frac{\rho_* \cdot v_D \cdot H^{1/3}}{\pi^{11/9}}$$

根据有关规范，坑道震塌的临界爆距为

$$R_0 = K_0 K \left(\frac{R}{D}\right) \bar{K} \left(\frac{h}{L}\right) K_\phi m C^{1/3} \quad (16)$$

式中： R_0 为临界震塌爆距， R 为装药(底部)距洞顶的距离， K_0 为围岩级别及坑道支护类型影响系数， $K\left(\frac{R}{D}\right)$ 为爆距与洞跨比影响系数， $\bar{K}\left(\frac{h}{L}\right)$ 为爆心倾斜影响系数， K_ϕ 为 ϕ 角影响系数， m 为堵塞系数， C 为武器装药量。

由式(1)，(4)及(16)可得

$$\sigma_0 = K \left(K_k \frac{R}{R_0}\right)^{-n} \quad (17)$$

其中，

$$K_k = \frac{1}{3} \frac{6^{2/3} m \bar{K} \left(\frac{h}{L}\right) K \left(\frac{R}{D}\right) K_0 K_\phi}{\pi^{2/3}}$$

将式(15)，(17)代入式(14)有

$$v = \frac{K}{\rho c} \left(K_k \frac{R}{R_0}\right)^{-n} - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} K^2}{\rho K_t c C^{2/9}} \left(K_k \frac{R}{R_0}\right)^{2n} \cdot \sqrt{e^{1/4} K_t C^{2/9} \left(K_k \frac{R}{R_0}\right)^n / e^{\frac{1}{K} \sqrt{-0.9375 + \frac{9.091 K}{\left(K_k \frac{R}{R_0}\right)^n \sigma_m}}}} \quad (18)$$

其中，

$$K = 6.31 \times 10^6 \exp[\sigma_s / (0.6 \times 10^7 + 0.26 \sigma_s)]$$

$$n = (5.1 \times 10^7 + 0.79 \sigma_s) / (1.0 \times 10^7 + 0.577 \sigma_s)$$

取岩石抗压强度为 $\sigma_s = 50$ MPa，可得到： $K = 9.01 \times 10^7$ ， $n = 2.33$ 。取 TNT 炸药的密度 $\rho_* = 1.56 \times 10^3$ kg/m³，岩石密度为 $\rho = 2.5 \times 10^3$ kg/m³，弹性波速 $c = 4.0 \times 10^3$ m/s，爆轰速度 $v_D = 6900$ m/s，可计算得到 $K_t = 0.11745 \times 10^8$ ；此时按有关标准， $\bar{K}\left(\frac{h}{L}\right) = 1$ ， $K\left(\frac{R}{D}\right) = 1$ ， $K_0 = 0.81$ ， $K_\phi = 1$ ，有 $K_k = 4.53$ 。可以得

当 $\frac{R}{R_0} = (0.15 \sim 1.00)$ 时:

$$\frac{K}{\rho c} \left(K_k \frac{R}{R_0} \right)^{-n} = 22.11 \sim 1.26$$

$$\frac{1}{2} \frac{\sqrt{2} K^2}{\rho K_t c C^{2/9}} \left(K_k \frac{R}{R_0} \right)^{2n}$$

$$\sqrt{e^{1/4} K_t C^{2/9} \left(K_k \frac{R}{R_0} \right)^n} / e^{\frac{1}{K} \sqrt{-0.9375 + \frac{9.091K}{\left(K_k \frac{R}{R_0} \right)^n}} \sigma_m} =$$

1.32~0.97

所以可以把式(18)近似取为

$$V = \frac{K}{\rho c} \left(K_k \frac{R}{R_0} \right)^{-n} - 1 \tag{19}$$

其中,

$$K_k = \frac{1}{3} \frac{6^{2/3} m \bar{K} \left(\frac{h}{L} \right) K \left(\frac{R}{D} \right) K_0 K_\phi}{\pi^{2/3}}$$

这样就得到了剥落速度 v 与 R/R_0 的关系, 对于钢纤维喷射混凝土支护, 根据不同的 R/R_0 值, 可以得到不同的震塌剥落速度, 为防护工程的结构设计提供有效依据, 计算结果见表 1, 图中其他支护类型结果取自相关标准。

表 1 震塌落石最大速度

Table 1 Maximal velocities of rockfall

R/R_0	$v/(m \cdot s^{-1})$				
	毛洞	喷射混凝土	喷锚、喷网支护	喷锚网支护	喷射钢纤维混凝土
0.15	31.0	28.0	26.5	25.0	21.1
0.20	23.0	20.4	18.5	17.0	11.3
0.30	15.0	12.0	10.5	9.0	6.5
0.40	10.0	7.0	5.5	4.0	3.8
0.50	7.0	4.1	2.9	1.5	2.6
0.60	5.0	2.2	1.4	0.5	1.4
0.70	3.2	1.0	0.4	0.0	0.9
0.80	1.7	0.1	0.0	0.0	0.5
0.90	0.8	0.0	0.0	0.0	0.3
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

4 震塌过程数值模拟

本节运用动力分析软件 LS-DYNA^{3D}, 采用 ALE

算法进行震塌过程的三维数值模拟。通过模拟可以得到坑道顶部距装药中心不同距离处的震塌剥落层速度, 并将数值模拟结果与通过解析法得到的剥落速度(见表 1)进行对比验证。

4.1 几何模型

坑道为直墙圆拱形构造, 净跨 3.6 m, 直墙高 2.0 m, 拱高 1.5 m, 钢纤维喷射混凝土的支护厚度为 0.15 m, 支护层上方的岩石厚度为 15.0 m, 其中有 2.0 m 厚的锚固区和 1.0 m 厚的松动岩体。炸药采用柱状装药, 装药半径 0.2 m, 装药高度 1.45 m, 装药量 306 kg, 装药中心距岩石上表面 10.7 m。模型宽 7.0 m, 沿坑道纵向厚度取 2.0 m。计算采用 1/4 模型, 在对称面施加对称约束, 其他面上设置透射边界。三维有限元模型见图 1。

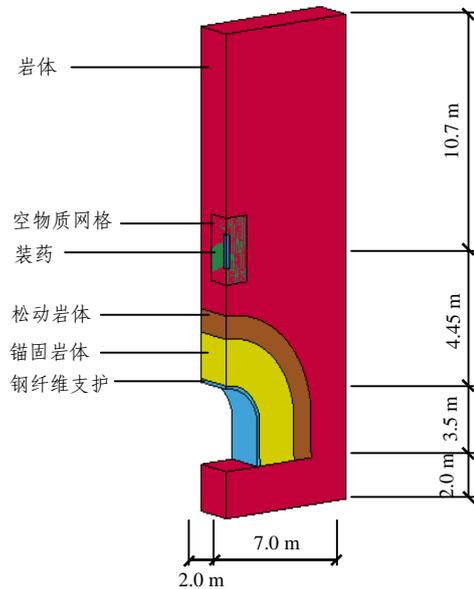


图 1 三维有限元模型

Fig.1 3D finite element model

模拟过程采用任意拉格朗日——欧拉(ALE)算法, 装药采用欧拉单元, 周围有一定区域的欧拉空物质网格, 以提供炸药物质在爆炸过程中的流动空间。其他材料采用六面体拉格朗日体单元, 模型节点数量为 321 761 个, 单元总数为 290 107 个。

4.2 材料模型及参数

炸药选“B”炸药, 用高能炸药本构关系和 JWL 状态方程描述(*MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 和 EOS-JWL), 其余所有材料均选用 LS-DYNA 自带的 3 号模型(MAT-PLASTIC-KINEMATIC)。模型描述及参数意义见相关研究^[5]。对于锚固岩体, 当岩体锚固以后, 其本构关系将发生改变, 在细观上与非均匀、多组分的物体相同, 但在工程上为了便于分析

和计算,常根据“等效材料”的概念^[6],在计算锚固岩体的力学指标时,在岩体原有的力学参数基础上,计入锚杆体的“贡献”。“B”炸药的物理力学参数见表 2,其他各材料参数见表 3。材料选取参照胡金华等^[7]的研究。

表 2 “B”炸药的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of explosive “B” used in calculation

A	B	R ₁	R ₂	OMEG	E ₀	R ₀	D	PCJ
5.242×10 ¹¹	7.678×10 ⁹	4.200	1.100	0.340	8.5×10 ⁹	1 717	7 981	2.95×10 ¹⁰

表 3 材料参数列表

Table 3 Parameters of materials used in calculation

材料类型	E/Pa	ν	ρ/(kg·m ⁻³)	σ _y /Pa
围岩	1.8×10 ¹⁰	0.30	2 300	5.0×10 ⁷
钢纤维混凝土	2.0×10 ¹⁰	0.15	2 650	6.5×10 ⁷
锚固岩体	1.0×10 ¹⁰	0.30	2 300	1.0×10 ⁷
松动岩体	6.5×10 ⁹	0.35	2 000	4.5×10 ⁶

4.3 数值模拟结果

整个爆炸作用的时间为 10 ms,图 2 为爆炸应力波作用下钢纤维喷射混凝土支护层的最终应力分布和震塌剥落情况。

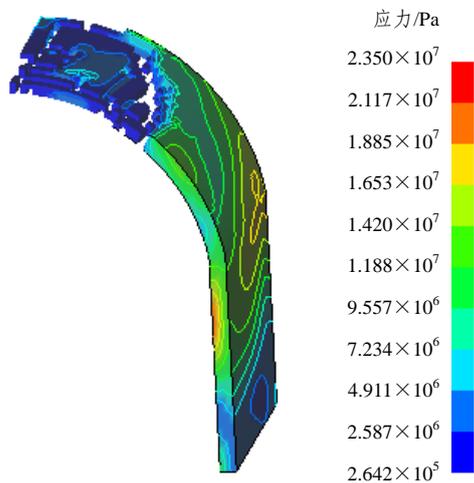


图 2 钢纤维喷射混凝土支护层最终应力分布和震塌剥落情况

Fig.2 Final status of stress distribution and rupture on sprayed layer of steel fiber shotcrete support

为了观察坑道在爆炸荷载作用下的震塌落石速度,在坑道顶部沿纵向距爆心投影点每间隔 0.5 m 取点记录,得到了不同位置的震塌落石速度曲线,

见图 3。图中节点 171776,172508,173423,174338 和 175253 分别为坑道顶部距爆心投影点 0.0,0.5,1.0,1.5,2.0 m 处的位置。

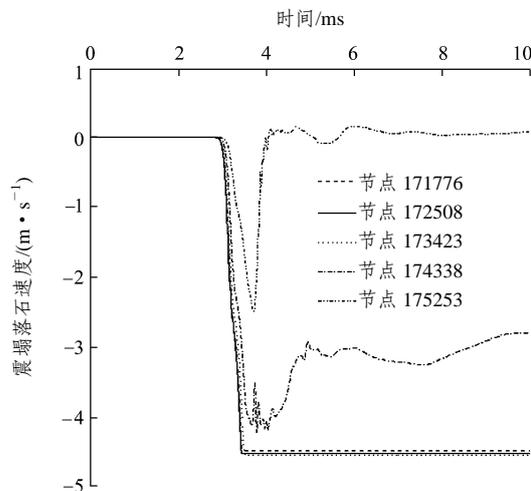


图 3 钢纤维喷射混凝土支护坑道顶部震塌落石速度
Fig.3 Velocities of rockfalls from the top of tunnel supported by steel fiber shotcrete

从图 3 可以看出,最大震塌落石速度发生在坑道顶部爆心投影点位置(节点 171776),其大小为 4.5 m/s,震塌落后速度随着距爆心投影点的距离增加而减小,在坑道纵向距爆心投影点 2 m 处只发生较强烈的震动,而没有落石产生。

图 4 给出了坑道在无支护情况下对应相同测点的震塌落石速度曲线,从图中可看出,最大震塌落后速度仍然发生在坑道顶部爆心投影点位置(节点 171776),其大小为 7.1 m/s,剥落范围扩大至距爆心投影点 1.5 m 处(节点 172508)。

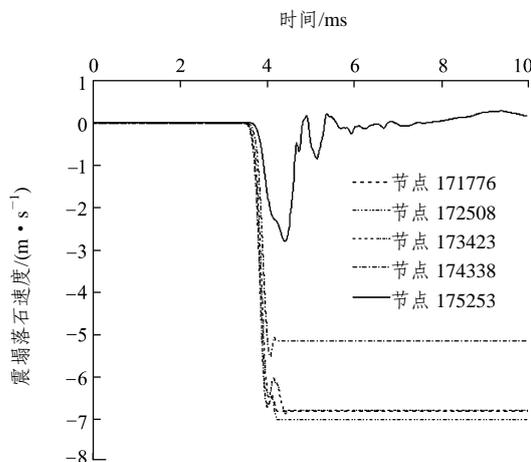


图 4 无支护坑道顶部震塌落石速度
Fig.4 Velocities of rockfalls from the top of tunnel without support

4.4 结果分析

根据数值模拟所采用的计算模型(支护层上方的岩石厚度 15 m, 装药高度 1.45 m, 装药量 306 kg, 装药中心距岩石上表面 10.7 m, 结合式(16)~(19)可知, 装药(底部)距洞顶的距离 $R = 3.75$ m; 坑道的临界震塌爆距 $R_0 = 11.02$ m; 由 $R/R_0 = 3.75/11.02 = 0.34$, 查表 1 内插得最大剥落速度 $v_{\max} = 5.42$ m/s, 该值与数值模拟结果之间的误差为 0.92 m/s, 符合较好。

5 结 论

通过前文分析, 可以得到以下结论:

(1) 钢纤维喷射混凝土支护改善了围岩性能, 增加了岩体的强度和稳定性, 有效抵抗常规装药爆炸所产生的震塌破坏效应, 与无支护及其他支护类型相比(见表 1, 图 3, 4), 很大程度上降低了震塌落石的速度。

(2) 通过理论推导值与数值模拟结果的对比验证, 说明了文中对钢纤维喷射混凝土抗爆震塌能力的量化是合理的。同时, 该实用设计计算方法能够为钢纤维喷射混凝土支护设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] Nnankorn P, Horii H. A fracture-mechanics-based design method for SFRC tunnel linings[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(1): 39 - 43.
- [2] 李晓军, 张殿臣, 李清献, 等. 常规武器破坏效应与工程防护技术[R]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 2001.(Li Xiaojun, Zhang Dianchen, Li Qingxian, et al. *Damage effects of conventional weapons and engineering protection techniques*[R]. Luoyang: The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, 2001.(in Chinese))
- [3] 戚承志, 钱七虎. 考虑到时效的一维剥离破坏及损伤破坏机制[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2000, 1(5): 1 - 6.(Qi Chengzhi, Qian Qihu. One-dimensional spallation with consideration of time characteristic and the mechanism of damage and fracture[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science)*, 2000, 1(5): 1 - 6.(in Chinese))
- [4] 王明洋, 国胜兵, 邓国强. 岩石覆盖层抗震塌机制研究[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2001, 2(4): 53 - 57.(Wang Mingyang, Guo Shengbing, Deng Guoqiang. Studies on mechanism of spalling of rock cover[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, 2001, 2(4): 53 - 57.(in Chinese))
- [5] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [6] 张玉军, 刘谊平. 锚固正交各向异性岩体的本构关系和破坏准则[J]. *力学学报*, 2002, 34(5): 812 - 819.(Zhang Yujun, Liu Yiping. Constitutive relationship and failure criterion for bolted orthotropic rockmass[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(5): 812 - 819.(in Chinese))
- [7] 胡金华, 周早生, 赵跃堂. 整体式头部结构爆炸毁伤数值模拟[J]. *防护工程*, 2003, 25(4): 26.(Hu Jinhua, Zhou Zaosheng, Zhao Yuetang. Numerical simulation of unitary structure damaged by explosions[J]. *Protective Engineering*, 2003, 25(4): 26.(in Chinese))