文章编号: 1001-1455(2014)05-0539-08 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)05-0539-08

地下坑道对其临界震塌爆距处钻地武器爆炸载荷的动力响应*

冯慧平,刘洪兵,左 兴,惠浪浪
(西北工业大学力学与土木建筑学院,陕西 西安 710129)

摘要: 利用非线性显式动力有限元程序,采用多物质流固耦合计算方法,就 GBU-28 钻地弹在地下坑道临界震塌爆距处爆炸时,对地下直墙拱坑道的动力响应进行数值模拟。根据围岩动力稳定性和混凝土动态强度判据,结合模拟结果,分析衬砌结构与围岩的相互作用。钻地弹在直墙圆拱断面的坑道临界震塌爆距处爆炸时:围岩处于临界破坏状态,但混凝土衬砌结构处于稳定状态;拱顶的应力峰值明显,且柱状装药情况下,爆炸近区的应力较集团装药情况下的大;拱肩位置出现应力集中;围岩与衬砌结构特征位置处的相互作用载荷与对应质点的振动速度相互耦合,基本成对应的关系。

关键词: 爆炸力学;动力响应;多物质流固耦合;直墙拱坑道;混凝土衬砌;围岩;爆炸载荷
中图分类号: O383.2 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

钻地武器是指那些能够钻入地层破坏地下目标的武器[1]。钻地武器作用下地下结构的动力响应一直是研究的热点。研究者们对爆炸荷载作用下,地下结构的动力响应和结构与围岩的相互作用,已做了大量研究。方秦等[2]运用有限元法分析了应力波与带软垫的地下结构相互作用问题;房营光[3]对岩土介质与结构的动力相互作用进行了详细研究。J. L. Drake 等[4]采用简化弹簧支撑衬砌结构,对地下结构物在内部爆炸荷载下的动力特性进行了模拟。J. P. Wolf[5]用直接法和子结构法对地震动荷载作用下土与结构的动力相互作用进行了系统研究。上述研究都是按集团装药进行的,得出的理论公式和相互作用规律等都未考虑装药的长径比。这与精确打击条件下越来越细长的现代高技术武器的发展[6]不相适应,从而可能对防护坑道的设计带来安全隐患。目前,对在坑道临界爆距处爆炸的模拟研究还未见报道。本文中,运用非线性显式动力有限元方法,模拟在地下坑道临界震塌爆距处柱状装药和集团装药爆炸作用时,地下坑道的动态过程,分析围岩和衬砌的稳定性及围岩与衬砌结构的相互作用,得到坑道不同位置处质点的有效应力峰值和速度响应,以期为地下坑道设计提供参考。

1 模型参数及稳定性判据

1.1 钻地弹侵彻深度

文献[7]根据微分面力模型对弹体侵彻受力情况进行了分析,并得出了射弹侵彻岩石深度的计算公式(Bernard Ⅲ公式)。针对国家标准围岩分类,采用该公式计算,得出 GBU-28 钻地弹侵彻Ⅴ类围岩侵彻深度≥15.68 m,本文中取 16 m。

1.2 临界震塌爆距

当坑道上部岩层厚度小于某个值时,在常规钻地武器的冲击爆炸作用下,围岩内表面出现震塌落石,围岩内表面至武器作用处的厚度即为坑道临界震塌爆距。目前,计算防护工程临界震塌爆距 R_0 一般采用中石质坑道震塌计算的经验公式进行计算。该公式中,爆距与洞跨比、爆心倾斜系数与比例爆距都为耦合关系,求解时要试算,反复迭代。王斌等[8]中用线性差值函数来表达爆距与洞跨比的影响系数,并求出临界震塌爆距的表达式。根据文中模型参数,算得临界震塌爆距为 6.65 m。

* **收稿日期**: 2013-03-27; **修回日期**: 2013-05-22
作者简介: 冯慧平(1985—),男,硕士研究生。

1.3 围岩动力稳定性和混凝土动态强度判据

工程上常用坑道表面的质点振动速度作为地下坑道对爆炸应力波作用的动力稳定性判据。岩石的振动速度可直接按岩石应力状态计算获得。我国长江研究院经过大量的实地统计和观测，总结出地下坑道质点振动速度 v 和工程岩体破坏状态的关系，如表 1 所示[9]。

表 1 质点振动速度与地下坑道状态[9]

Table 1 Particle vibration speeds and underground tunnel states[9]

破坏等级	v/(cm·s^{-1})	坑道破坏状态
1	5～10	土洞内有掉块，未支护松散岩洞内有小掉块
2	10～20	岩体中有裂隙，破碎岩体有掉块
3	20～30	岩洞内有大掉块，小规模塌方，岩柱有掉块
4	30～60	支护出现裂隙，顶板有塌方
5	60～90	地下工程或砌体破裂，硬岩中裂隙扩展严重
6	＞90	地下工程严重破坏

混凝土具有较高的抗压强度，在爆炸、冲击等瞬时荷载作用下的强度一般大于静荷载作用下的强度，需要考虑混凝土的动态损伤。混凝土的动态抗压强度与应变率有关，随应变率(或加载速率)增大而增大。欧洲国际混凝土学会建议，混凝土抗压强度动态增强系数 γ_c 按下式确定[10]：

$$\gamma_c=\begin{cases}1 & \dot{\varepsilon}\leqslant\dot{\varepsilon}_s\\ \left(\dfrac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right)^{1.026\alpha_s} & \dot{\varepsilon}_s<\dot{\varepsilon}\leqslant 30\ \mathrm{s}^{-1}\\ \beta\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right)^{1/3} & \dot{\varepsilon}>30\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{1}$$

式中：γ_c 为混凝土动态抗压强度与静态抗压强度之比，即 $\gamma_c=\sigma_d/\sigma_s$，$\sigma_d$ 为某应变率下的动态抗压强度，σ_s 为静态抗压强度；$\dot{\varepsilon}_s$ 为静态应变率，取 $3\times10^{-5}\ \mathrm{s}^{-1}$；$\alpha_s=1/(5+9\sigma_s/\sigma_0)$，$\beta=10^{(6.15\alpha_s-2.0)}$；$\sigma_0=10$ MPa，为参考值。

得到单元应变率后，可计算出混凝土的动态抗压强度增大系数，用该系数乘《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中相应的轴心抗压标准值，即可得到动态混凝土在爆炸荷载下的强度判据。

2 数值模拟

采用 ANSYS/LS_DYNA 有限元程序，计算地下直墙拱结构对 GBU-28 钻地弹在坑道顶部临界爆距处作用的动力响应。

2.1 数值模型

开挖坑道的应力应变仅在坑道中心的 3～5 倍洞径的范围内存在影响[11]，为地下坑道静力计算模型的岩石截取范围，而对成形坑道动力计算模型的截取范围为 2.5～4 倍跨度[12]。计算模型为：坑道纵向长 10 m，坑道横向宽30 m，高 40 m，埋深(弹体侵彻深度和临界震塌爆距之和)为 23 m。坑道结构为直墙圆拱，设计断面(跨度及侧墙高)尺寸为 10 m×8 m，矢跨比为 1∶2。岩石构造主要为砂岩，简化为单一匀质Ⅴ类围岩(国家标准)。数值模型由围岩、锚杆加固区、衬砌、空气和炸药 5 部分组成。锚杆加固区指初期支护，包括系统锚杆、喷射混凝土、格栅钢架等。为了模拟对坑道的作用，通过改变他们所影响范围内的岩石的物理力学参数来实现，即提高一级围岩。锚杆加固区为Ⅳ类围岩，加固区域取 3 m。初次支护承担全部基本荷载，二次模筑衬砌作为安全储备，

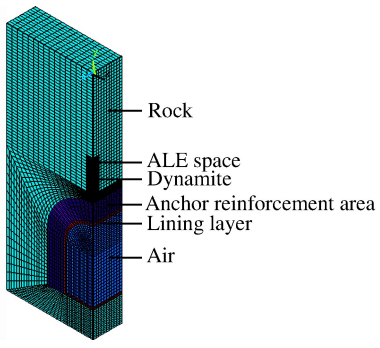

图 1 动力计算模型

Fig. 1 Dynamic analysis model

共同承担特殊荷载。衬砌为钢筋混凝土，并将钢筋和混凝土视为均匀混合体，弹性模量采用等效弹性模量。炸药铅直置于岩石内部，为封闭式爆炸，仅考虑钻地武器侵彻到一定深度后爆炸对岩石的破坏作用，未考虑爆炸与冲击的联合作用。

考虑到结构的对称性，为节省计算机时，取 1/4 模型，如图 1 所示。柱状装药等效炸药尺寸为 26 cm×26 cm×390 cm，集团装药等效炸药尺寸为 64 cm×64 cm×64 cm，装药质量为 306 kg，中心起爆。对称面上施加对称约束，上表面为自由面，其他面设置无反射边界模拟无限域。

2.2　单元选择和材料模型

单元类型为 3D Solid164。LS_DYNA 程序有 Lagrange、Euler 和 ALE 算法，采用流固耦合算法来描述爆炸过程。把空气和炸药看作流体，采用 ALE 算法，设置 ALE 初始空间，即炸药可能膨胀的空间（*INITIAL_VOID_PART）。对岩体、锚杆加固区、衬砌采用 Lagrange 算法，通过流固耦合方式（*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID）来处理炸药对岩体与结构的作用。建模时衬砌和围岩不共节点，两者之间采用接触算法（*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE）来模拟结构与围岩的相互作用[13]。岩体采用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 弹塑性随动硬化模型[14]，该模型可以考虑应变对屈服应力的影响，岩体的材料参数见文献[15]。钢筋混凝土采用 *MAT_JOHNSON_HOLMGUIST_CONCRETE，该模型综合考虑了大应变、高应变率、高压效应，其等效屈服强度是压力、应变率及损伤的函数，而压力是体积应变的函数，损伤积累是塑性体积应变、等效塑性应变及压力的函数，主要用于爆炸荷载作用下混凝土的模拟，混凝土的材料参数见文献[16]。空气采用 *MAT_NULL 材料模型以及 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程加以描述，空气的相关参数见文献[17]。炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型以及 *EOS_JWL 状态方程描述材料在压力作用下体积与内能之间的关系，材料参数见文献[15]。

2.3　模拟结果验证

研究人员基于大量爆炸实验数据，提出了一套计算炮航弹在结构周围岩土中爆炸所产生的自由场应力和地运动参数的经验公式（TM5-855-1）[18]，该公式是目前公开的较权威的计算公式之一：

$$\begin{cases} t_a = R/c \\ t_r = 0.1 t_a \\ \sigma_p = 160 f \rho c \left(\dfrac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-n} \\ v_p = 160 f \left(\dfrac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-n} \\ a_p \sqrt[3]{W} = 50 f c \left(\dfrac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-(n+1)} \end{cases} \tag{2}$$

式中：t_a 为冲击波到达时间，t_r 为升压时间，σ_p 为有效应力峰值，v_p 为质点速度峰值，a_p 为质点加速度峰值，W 为装药质量，R 为爆炸点到拱顶的距离，c 为爆炸冲击波速度，ρ 为岩石密度，f 为耦合系数，n 为拟合因数。现将坑道拱顶外侧自由场地冲击参数经验公式（TM5-855-1）和数值模拟计算结果进行对比，结果如表 2 所示。

表 2　不同方法得到的坑道拱顶外侧岩石自由场冲击参数

Table 2　Impact parameters in the free field outside the lateral rock of the tunnel vault by different methods

方法	t_a/μs	t_r/μs	σ_p/MPa	v_p/(m·s^{-1})	a_p/(m·s^{-2})
TM5-855-1	1 445.65	144.57	1.75	0.164	461
柱状装药	1 900.00	160.00	2.03	0.214	400
集团装药	1 800.00	130.00	1.95	0.130	424

由表 2 可以看出：(1)采用 TM5-855-1 公式计算得到的冲击波到达时间，与在 2 种装药条件下数值模拟得到的冲击波到达时间差别均较大。这是由于 TM5-855-1 公式中将冲击波到达时间简化为爆距

与岩体纵波波速的比值,纵波波速是将岩体视为弹性体所得,但爆炸近区的岩体处于塑性状态,且应力从岩体传播到锚杆加固区时发生反射和入射。(2)装药形状对速度峰值影响较大。(3)对于应力峰值和加速度峰值,数值模拟结果与经验公式计算结果接近。因此,本文中建立的数值模型、选用的材料模型和选择的算法是合理的,得到的计算结果可以用于后续分析。

3 结果分析

3.1 围岩及衬砌层的动态稳定性

分别取 2 种装药下岩石锚杆加固区及混凝土衬砌的特征位置(拱顶、拱肩和拱脚)处的单元进行分析。单元的选取,如图 2 所示。通过数值模拟得到坑道围岩内侧拱顶、拱肩和拱脚岩石质点最大振动速度 v_m,如表 3 所示。根据围岩动力稳定性判据,将表 3 中的质点振动速度与表 1 中的速度对比,可以判断坑道的破坏状态。即在拱顶处,破坏最严重,岩体中有裂隙扩展,破碎岩体有掉块。此破坏状态也对应于炸药的临界爆距,证明了临界爆距计算正确。

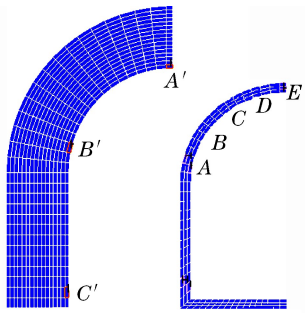

图 2 动力分析围岩及衬砌单元选取

Fig. 2 Dynamic analysis units for wall rock and lining

表 3 岩石质点振动速度的最大值

Table 3 The maximum particle-vibration speeds of rock

位置	v_m/(m·s^{-1})	
	柱状装药	集团装药
拱顶	0.214	0.160
拱肩	0.550	0.156
拱脚	0.223	0.416

由模拟结果得到在柱状装药和集团装药条件下,坑道衬砌内外侧拱顶、拱肩和拱脚质点有效应力最大值 σ_m,如表 4～5 所示。由式(1)得强度动态增强系数,分别求得在柱状装药和集团装药条件下,混凝土动态抗压强度为 15.03 和 14.83 MPa。由表 4～5 可知最大值有效应力均小于混凝土的动态抗压强度,故衬砌层不会破坏。

表 4 衬砌质点在柱状装药爆炸冲击下的最大有效应力

Table 4 The maximum effective stress of lining unit under strip charge explosion

位置	σ_m/MPa	
	外侧单元	内侧单元
拱顶	2.56	1.90
拱肩	1.56	1.31
拱脚	0.60	0.52

表 5 衬砌质点在集团装药爆炸冲击下的最大有效应力

Table 5 The maximum effective stress of lining unit under group charge explosion

位置	σ_m/MPa	
	外侧单元	内侧单元
拱顶	2.16	0.95
拱肩	4.51	0.48
拱脚	1.22	0.11

3.2 应力分析

图 3～4 所示为柱状装药和集团装药爆炸条件下,冲击波压力及岩体中有效应力分布云图。

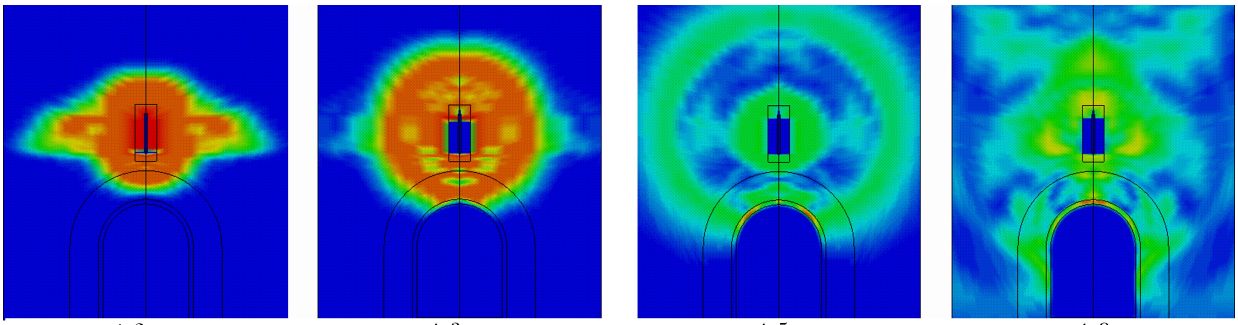

图 3 柱状装药爆炸,不同时刻的有效应力云图

Fig. 3 Effective stress contours for strip charge explosion at different times

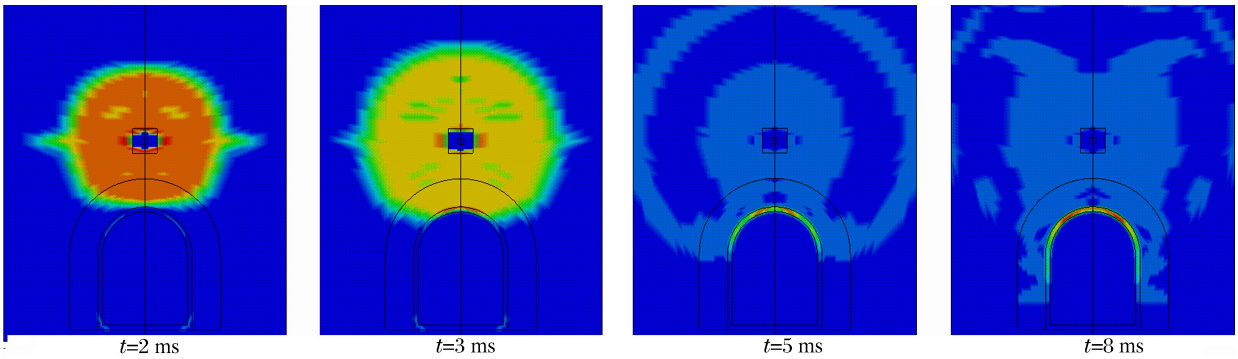

图 4　集团装药爆炸，不同时刻的有效应力云图

Fig. 4　Effective stress contours for group charge explosion at different times

由图 3～4 中可知：柱状装药爆炸后冲击波压力呈椭球形向外扩散，端部效应明显；而集团装药爆炸后冲击波压力呈球形向外扩散。在爆炸近区由柱状装药作用产生的有效应力较大（$t=3$ ms），作用明显；在较远区域，2 种装药作用相似（$t=8$ ms），柱状装药可简化为集团装药。冲击波传播到岩体与锚杆加固区、锚杆加固区与混凝土交界面时，会发生反射和入射。由图 3 可清晰得看到：反射波反向传播，与正向波相遇，波幅减小，出现卸载现象，但在拱肩处出现应力集中。波在衬砌自由表面反射后，对衬砌产生拉伸的作用，使混凝土表面出现裂缝，以至出现层裂。

为了比较，选取直墙拱衬砌外侧特征位置（拱顶、拱肩和拱脚）的单元，计算得到的有效应力时程曲线如图 5～6 所示。

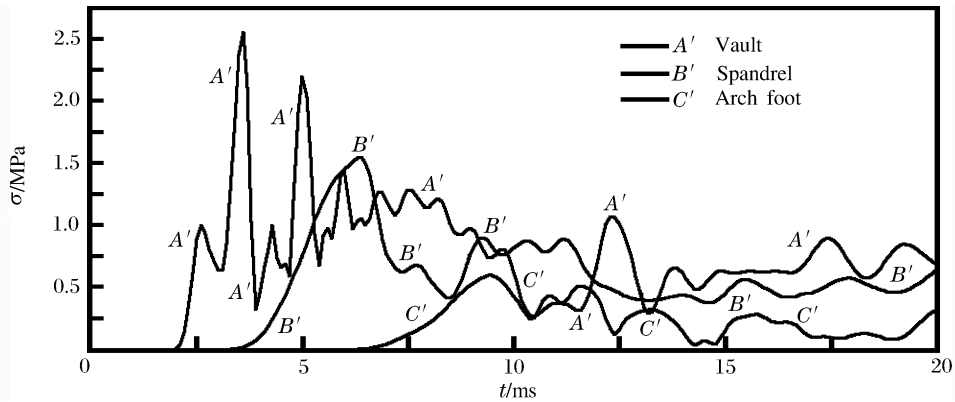

图 5　柱状装药爆炸时衬砌结构特征位置的有效应力时程曲线

Fig. 5　Effective stress-time curves at structural characteristic positions of tunnel lining subjected to strip charge explosion

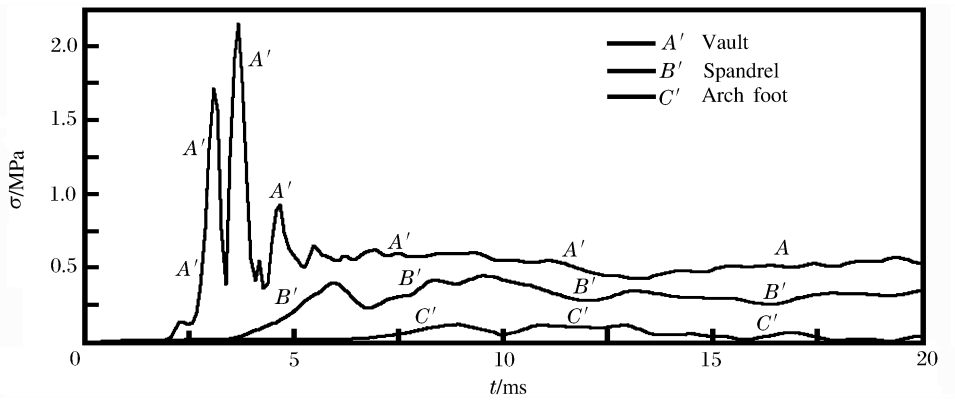

图 6　集团装药爆炸时衬砌结构特征位置的有效应力时程曲线

Fig. 6　Effective stress-time curves at structural characteristic positions of tunnel lining subjected to group charge explosion

从图 5～6 中可知，同一处特征位置，拱顶处 2 种装药爆炸后结构的有效应力时程曲线大致相同；拱肩处在柱状装药时的应力峰值为 1.56 MPa，大于集团装药时的应力峰值0.483 MPa，可知装药形状对拱肩的有效应力分布影响较大。曲线不断震荡，是受围岩与衬砌结构的相互作用的影响，应力波在 2 种介质之间不断反射、入射的结果。

3.3 结构与围岩相互作用分析

装药爆炸后，形成的应力波阵面开始在岩石中传播。当压缩波作用于衬砌结构时，由于结构的变形和结构的运动，结构表面的速度不为零。作用于衬砌结构上的相互作用荷载为入射波和反射波的压力之和，结构表面质点的运动速度与在入射波和反射波作用下岩石质点的速度有关。由此可见，作用在衬砌结构上的有效应力与衬砌结构的运动速度有关，而衬砌结构的运动速度显然又与衬砌结构所受的相互作用荷载有关。他们相互关联，相互作用。以柱状装药为例，分别选取衬砌外侧由拱肩到拱顶的 5 个质点 A、B、C、D、E 进行分析。从图 7 可知：拱顶的竖向位移(质点 E)最大，距拱顶一段距离的质点竖向位移较小。从图 8 可知：拱肩中部横向位移最大；拱肩中部质点(C、D)横向位移发生正负突变。说明拱肩中部结构与围岩相互作用明显。由图 9～10 可以看出：第 1 个峰值压力来临时，整个拱各质点的压力相差不大，拱肩中部质点 D 峰值压力最大，但对应的峰值速度拱顶最大；第 2 个峰值压力来临时，拱肩中部以上(质点 D、E)峰值反而减小，这是反射波的卸载造成的，对应的峰值速度也减小。质点接触力与速度相互关联，其相互作用机理还需进一步研究。

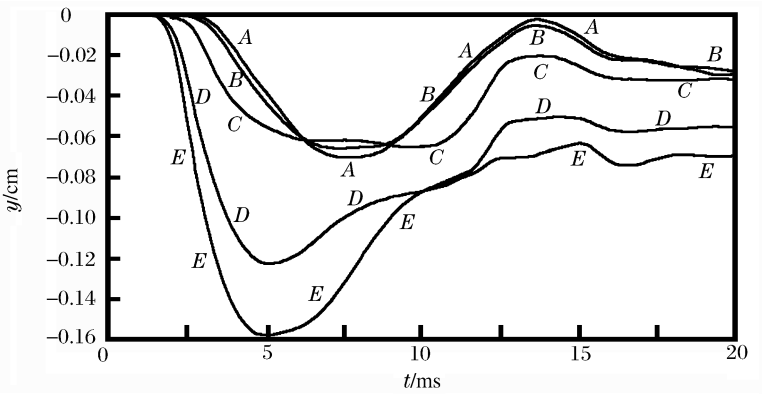

图 7 衬砌外侧特征质点 y 方向位移时程曲线

Fig. 7 y-direction displacement-time curves of lateral characteristic particles of tunnel lining

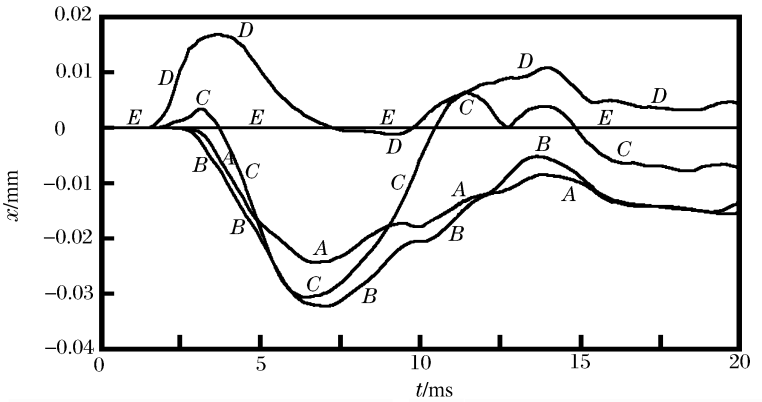

图 8 衬砌外侧特征质点 x 方向位移时程曲线

Fig. 8 x-direction displacement-time curves of lateral characteristic particles of tunnel lining

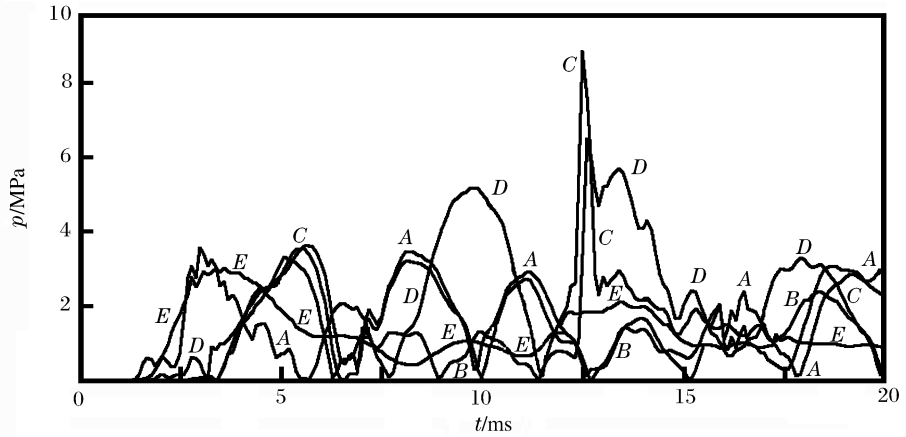

图 9 衬砌外侧特征质点接触力时程曲线

Fig. 9 Contact pressure-time curves of lateral characteristic particles of tunnel lining

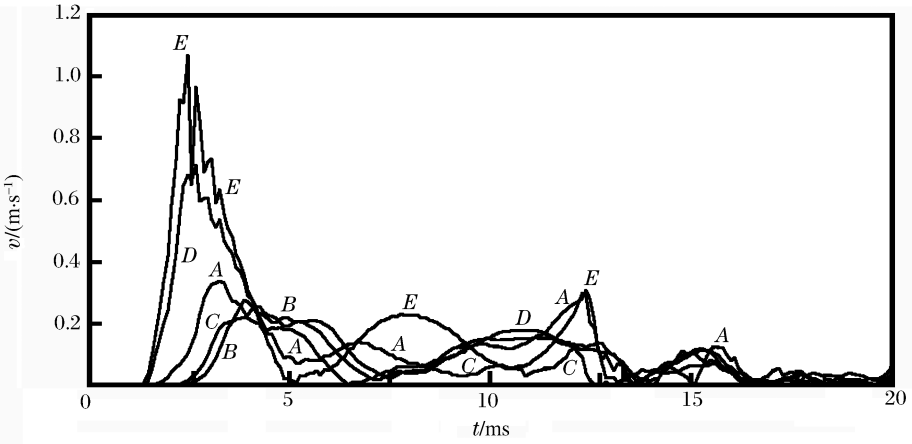

图 10　衬砌外侧特征质点振动速度时程曲线

Fig. 10　Vibrtation speed-time curves of lateral characteristic particles of tunnel lining

4　结　论

(1)GBU-28 钻地弹在直墙圆拱断面的坑道临界震塌爆距处爆炸时，围岩处于临界破坏状态，但混凝土衬砌结构处于稳定状态。对于其他的断面形式是否也有同样的规律，还需要分类分析。

(2) 钻地弹在直墙拱结构正上方垂直入射时，拱顶的应力峰值明显；且柱状装药情况下，爆炸近区的应力较集团装药情况下的大。若将在爆炸近区按集团装药情况下得到的参数，用于直墙拱防护结构设计，则该设计不安全。

(3) 钻地弹在结构上方爆炸时，直墙拱结构拱肩位置出现应力集中。对直墙拱防护结构设计时，应注重对拱肩的构造设计，防止该位置出现塑性铰而使结构失效。

(4)围岩与衬砌结构特征位置处的相互作用载荷与对应的质点速度相互耦合，基本上成对应的关系，在拱肩中部以上相互作用明显，但其相互作用机理，需要进一步研究。

参考文献：

[1]　宁建国. 方方面面话爆炸[M]. 北京：高等教育出版社，2011：108-114.

[2]　方秦，钱七虎. 应力波与带软衬垫的地下结构动力相互作用[J]. 爆炸与冲击，1988，8(4)：289-298.
Fang Qin，Qian Qi-hu. Dynamic interaction between stress waves and underground structure with crushable back packing[J]. Explosion and Shock Waves，1988，8(4)：289-298.

[3]　房营光. 岩土介质与结构动力相互作用理论及其应用[M]. 北京：科学出版社，2005.

[4]　Drake J L，Walker R E，Slawson T. Backfill effect on buried structure response[C]// Proceedings of the Fourth International Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures，1989.

[5]　Wolf J P. 土-结构动力相互作用[M]. 北京：地震出版社，1989.

[6]　王涛，余文力，王少龙，等. 国外钻地武器的现状与发展趋势[J]. 导弹与航天运载技术，2005(5)：51-56.
Wang Tao，Yu Wei-li，Wang Shao-long，et al. Present status and tendency of foreign earth-penetrating weapons [J]. Missiles and Space Vehicles，2005(5)：51-56.

[7]　钱七虎，王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京：国防工业出版社，2010.

[8]　王斌，金丰年，徐汉中，等. 装药爆炸临界震塌爆距的计算分析[J]. 辽宁工程技术大学学报，2006，25(4)：546-548.
Wang Bin，Jin Feng-nian，Xu Han-zhong，et al. Calculation method for critical distance of tunneling engineering exploded to collapse by charge explosion[J]. Journal of Liaoning Technical University，2006，25(4)：546-548.

[9]　谢和平，陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京：科学出版社，2004：130-131.

[10]　梁兴文，叶燕霞. 混凝土结构非线性分析[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007，24-65.

[11]　徐干成，白洪才，郑颖人. 地下工程支护结构[M]. 北京：中国水利水电出版社，2002：104.

[12] 杨阳,肖明. 地下洞室动力计算模型合理截取范围研究[J]. 中国农村水利水电,2011,1(1):111-114.
Yang Yang, Xiao Ming. Research on selecting rational intercepted range of dynamic analysis model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011,1(1):111-114.
[13] 白泽金. LS_DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社,2005:75-103.
[14] Livermore Software Technology Corporation. LS_DYNA keyword user's manual: Version971[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
[15] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
[16] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 2011,78(5):051003.
[17] 时党勇,李裕春. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
[18] U. S. Department of the Army. 美陆军技术手册 TM5-855-1:常规武器防护设计原理[M]. 方秦,译. 南京:中国人民解放军工程兵工程学院,1997.

Dynamic response of underground tunnel to explosive loading from penetration weapons in the critical collapse distance*

Feng Hui-ping, Liu Hong-bing, Zuo Xing, Hui Lang-lang
(*School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*)

Abstract: Based on ANSYS/LS_DYNA, the multi-material fluid-solid coupling method was adopted to numerically simulate the dynamic responses of an underground straight-wall-arch tunnel to the penetration and explosion of a guided bomb GBU-28. The explosion of the guided bomb GBU-28 was initiated at the critical collapse distance of the straight-wall-arch tunnel. The criterions were obtained for evaluating the dynamic stability of the surrounding rock and the dynamic strength of the lining concrete. The obtained criterions were used to analyze the simulated results and explore the interaction between the tunnel lining and the surrounding rock. When the guided bomb explodes at the critical collapse distance of the straight-wall-arch tunnel, the investigated results display the followings: (1) the surrounding rock is in the critical damage state, and the concrete lining is stable and safe; (2) the effective stress peak at the vault is obvious, and under the strip charge condition, the effective stress in the near field of the explosion is higher than that under the group charge condition; (3) the spandrel takes on a stress concentration phenomenon; (4) at the characteristic positions, the interaction pressures between the surrounding rock and the concrete lining are coupled with the vibration speeds of the particles.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; multi-material fluid-solid coupling; straight-wall-arch tunnel; concrete lining; surrounding rock; explosive loading

---

* Received 27 March 2013; Revised 22 May 2013
Corresponding author: Feng Hui-ping, fenghuiping_051351@126.com

(责任编辑 王易难)