

瓦斯爆炸对隧道衬砌应力影响的数值模拟

陈雷, 叶青*

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:以云南省某隧道瓦斯爆炸事故为背景,基于等效爆源理论对隧道内的瓦斯爆炸进行量化,采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件中 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 算法,建立隧道内瓦斯爆炸的流固耦合模型,选用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (JHC) 材料模型模拟衬砌,分析瓦斯爆炸冲击波传播特征及其对隧道衬砌应力的影响。结果表明:(1)爆炸后隧道内冲击波压强会瞬间增大并持续一段时间;(2)爆炸后的冲击波受到衬砌和围岩的约束,会在隧道内循环发生无规则反射,导致冲击波大幅度增强,并使隧道内的流场复杂化,减缓冲击波强度衰减的时间,且在衬砌墙角和底板处反射效应最强;(3)爆炸后衬砌的有效应力达到最大值后迅速衰减,但是在衰减过程中反复波动,加剧了爆炸对衬砌的破坏。

关键词:瓦斯隧道; ALE 算法; 流固耦合模型; 冲击波传播; 动力响应

中图分类号: U458 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2021)03-0040-08

Numerical Simulation of the Influence of Gas Explosion over Lining Stress of Tunnel

CHEN Lei, YE Qing

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In this paper, the quantitative research of gas explosion is carried out on a tunnel accident in Yunnan Province based on equivalent explosive energy theory, and the fluid-solid coupling model of gas explosion in tunnel is established by means of Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) algorithm of ANSYS/LS-DYNA software, the tunnel lining is simulated by *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (JHC) model, the characteristics of explosive shock wave are studied and its effects on lining stress of tunnel are analyzed. Results show that: (1) After the explosion, the pressure of shock wave in the tunnel increases instantly and lasts for a period of time; (2) The shock wave after the explosion is constrained by the lining and surrounding rock, and will circulate irregularly in the tunnel, causing the shock wave to be greatly enhanced, complicating the flow field in the tunnel, and reducing the time for the strength of the shock wave to decay, the reflection effect is strongest at the lining of the corner and bottomplate; and (3) After the explosion, the effective stress of the lining will reach the maximum value, and then the effective stress will decay rapidly, but it will fluctuate repeatedly during the attenuation process, which intensifies the damage to the lining by the explosion.

Keywords: gas tunnel; ALE algorithm; fluid-solid coupling model; shock wave propagation; dynamic response

隧道内瓦斯爆炸不仅会造成严重的人员伤亡和财产损失,而且也会对隧道衬砌造成损伤,影响隧道的稳定性,还会造成不良的社会影响。例如,在 2017 年 5 月 24 日,贵州毕节成贵铁路七扇岩隧道施工中发生

瓦斯爆炸事故,造成12人死亡,12人受伤,直接经济损失达2100万元。瓦斯爆炸的破坏作用主要体现在爆炸冲击波的传播过程中,因此,研究隧道内瓦斯爆炸问题,尤其是爆炸冲击波在隧道内的传播特征和隧道衬砌对爆炸的应力响应过程,具有极大的科研价值和社会意义。

对于瓦斯爆炸问题,许多学者通过不同的方法进行了大量的研究,并取得了显著的成就。叶青等^[1]在对管状空间内气体爆炸所产生的爆炸冲击波传播特征分析的基础上,进一步阐述管状空间内瓦斯爆炸产生的火焰阵面加速机理;杨科之等^[2]对抗道内爆炸实验结果进行分析,并用计算的方式拟合实验数据得到了爆炸冲击波在拱形隧道内的传播规律;司荣军^[3]探究了在一定空间内瓦斯爆炸所产生的冲击波的传播规律与不同点火能量、瓦斯预混气体的填充量和预混气体中瓦斯的体积分数3个因素的关系;龚顺风等^[4]利用LS-DYNA软件建立流固耦合模型,分析了相邻爆源下钢筋混凝土圆柱的动力响应过程以及爆炸对圆柱的破坏机理;卢芳云等^[5]利用LS-DYNA软件研究了钢筋混凝土楼板在爆炸载荷作用下的破坏模式,采用CONWEP算法分析了不同钢筋混凝土的抗压强度、比例距离及爆心与楼板之间的相对位置对楼板破坏程度的影响;张秀华等^[6]利用LS-DYNA软件对室内燃气爆炸进行了数值模拟,分析瓦斯体积分数对爆炸的影响,结果表明当瓦斯的体积分数为9.5%时化学反应最为剧烈,所产生的冲击波的强度和破坏力也是最大的;黄家蓉等^[7]结合实验与数值模拟分析了在内部爆炸作用下混凝土结构中的应力波的传播特征;孙宁新等^[8]采用ANSYS/LS-DYNA软件中的ALE算法对含软弱夹层岩体爆破动态过程进行数值模拟,分析了软弱夹层的几何结构对应力波的传播影响;石立旺^[9]采用LS-DYNA中的72号材料模型模拟分析了内爆作用下抗暴室墙的动力响应,并提出了相应的防护措施;李志鹏^[10]采用RHT材料模型模拟隧道衬砌在瓦斯爆炸后的动力响应过程,并结合隧道爆炸案例分析衬砌的防护措施。

本文以云南省某隧道瓦斯爆炸事故为背景,在以上学者的研究成果基础上,确定了对受限空间内爆炸的研究方法及材料模型,采用LS-DYNA有限元分析软件中ALE算法建立隧道瓦斯爆炸流固耦合模型,对瓦斯在隧道内爆炸进行仿真分析,研究瓦斯爆炸冲击波在隧道内的传播特征以及爆炸对衬砌的应力影响,为隧道结构抗爆设计和安全性研究提供理论参考。

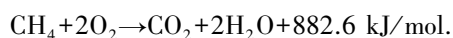
1 瓦斯爆炸过程数值模拟

1.1 隧道工程背景

隧道位于云南昭通境内。该隧道设计为分离式隧道,左线隧道全长3600m,右线隧道全长3615m,总长为7215m,属特长隧道。该隧道的最大埋深为494m,大部分埋深为100~300m。根据隧道前期的设计报告,该隧道穿越众多煤层,甚至穿越煤层采空区、溶洞、断层等复杂的地质构造。经前期勘察测得在隧道穿越的所有煤层中瓦斯压力最大为1.28MPa,瓦斯含量为0.53~15.00m³/t,瓦斯的绝对涌出量大约为2.51m³/min。根据DB51/T2243—2016《公路瓦斯隧道技术规程》可以判定该隧道为煤与瓦斯突出隧道,且左线桩号ZK22+850~ZK23+450和右线桩号K22+850~K23+450为瓦斯突出段。

1.2 等效爆源理论

由于在数值模拟中很难建立气体爆源模型,特别是在隧道这种内部结构比较复杂的受限空间,这就导致难以准确计算瓦斯爆炸前隧道内瓦斯的体积分数。因此,对瓦斯爆炸过程进行数值模拟比较困难,必须考虑一种等效方法来量化隧道内瓦斯爆炸。目前最常用的等效方法是TNT当量法。TNT当量法就是运用等效爆源理论,将瓦斯爆炸产生的能量转化为一定当量的TNT。其化学反应式为



TNT当量法计算公式为

$$M_{\text{TNT}} = \alpha \frac{Q_c}{Q_{\text{TNT}}} V_c \rho_c. \quad (1)$$

式中: M_{TNT} 为隧道内瓦斯爆炸的等效TNT当量; α 为瓦斯中甲烷的体积分数,本文取9.5%; Q_c 为甲烷爆热,取值55.64MJ/kg; Q_{TNT} 为TNT爆热,在数值模拟中一般取4.5MJ/kg; V_c 为瓦斯的体积,m³; ρ_c 为甲烷

的密度,取 0.716 kg/m^3 .

经式(1)计算, 1 m^3 瓦斯爆炸产生的能量相当于 0.84 kgTNT 炸药爆炸.

1.3 数值模型

图 1 为隧道的标准施工图.根据图 1 构建“空气-衬砌-围岩”流固耦合模型,参数为长 20 m ,宽 8.78 m ,高 15.72 m .基于三维空间模型的计算量较大,为了简便计算,利用模型的轴对称性,本次模拟仅建立隧道的 $1/4$ 模型.流体场和固体场采用不同的网格,Euler 网格适合炸药和空气组合成的流体场,Lagrange 网格适合围岩和衬砌组成的固体场.

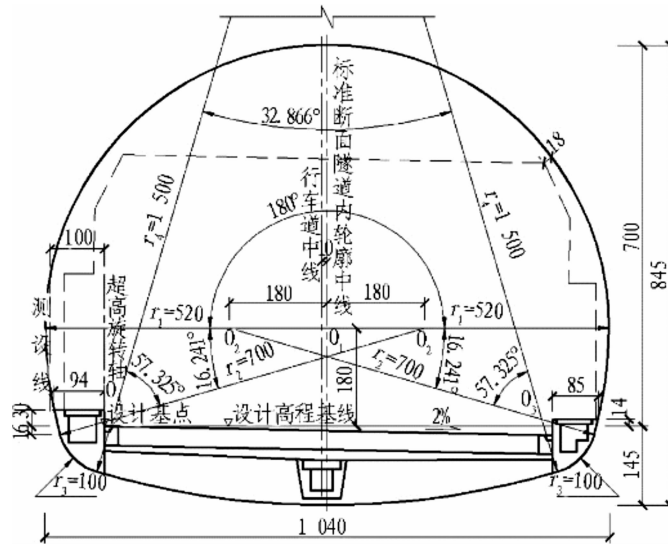


图 1 隧道标准施工(单位:cm)

1.3.1 网格的划分

由于建立的围岩和衬砌的模型是不规则的,难以用映射法来划分网格,所以本文选择扫掠法进行网格划分.对于复杂的几何实体,经过简单的分割处理,可以自动形成正六面体网格^[11],数值模型与网格划分如图 2 所示.



图 2 数值模型与网格划分

1.3.2 边界条件和爆炸初始条件

瓦斯爆炸是一个很复杂的过程,由于瓦斯是一种混合气体,其与氧气反应是分阶段进行,这就造成有许多的中间产物和瞬时产物.在实际隧道爆炸事故中,爆源位置不确定.因此为了简化计算,对本次的数值模拟做出假设:

- 1) 忽略瓦斯燃烧反应中的中间过程.
- 2) 隧道内只存在一个瓦斯爆炸源.
- 3) 隧道中空气的压强为大气压强,且衬砌的壁面光滑绝热.
- 4) 隧道的横截面和纵截面定义为对称边界,其余表面定义为非反射边界.

1.4 材料参数的选择

1.4.1 瓦斯材料参数

选择用 TNT 爆炸替代体积分数为 9.5%的瓦斯爆炸,瓦斯的体积 220 m^3 换算成 TNT 为 184.3 kg .炸药

采用 LS-DYNA 中的 * INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 关键字和 * ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 关键字,以球形填充在空气网格中,半径为 0.3 m,位置为隧道中心.其本构模型及状态方程分别选用 LS-DYNA 材料中的 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 和 * EOS_JWL^[12].

JWL 状态方程为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: P 为爆轰压力, Pa; V 为相对体积, m^3 ; E_0 为初始内能, MJ/m^3 ; A, B, R_1, R_2, ω 为状态方程系数.

由爆轰实验确定材料参数.具体计算参数见表 1.

表 1 TNT 及其状态方程参数值

材料密度 $\rho_w/(kg/m^3)$	爆炸速度 $D/(m/s)$	爆炸压力 P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(MJ/m^3)$
1 630	6 930	28	371	3.747	4.15	0.9	0.35	7 000

1.4.2 空气介质参数

空气介质模型材料选用 LS-DYNA 中的 * MAT_NULL, 状态方程选用 * EOS_LINER_POLYNOMIAL.

状态方程为

$$P_0 = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) \rho_0 E \quad (3)$$

式中: P_0 为计算压力, Pa; μ 为黏度系数, $\mu = \frac{1}{V} - 1$; ρ_0 为气体的初始密度, kg/m^3 ; E 为单位体积初始内能, J/m^3 ; $C_i (i=0, 1, 2, \dots, 6)$ 为状态方程参数, 定义为常数.具体计算参数见表 2.

表 2 空气及其状态方程参数值

$\rho_0/(kg/m^3)$	$E/(MJ/m^3)$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	V
1.292 9	0.25	0	0	0	0	0.4	0.4	0	1

1.4.3 围岩材料参数

该隧道地质情况较为复杂,为构造剥蚀中低山、丘陵地貌区,隧道穿越多达 10 个地层年代.隧道围岩多为灰岩、砂岩、砂岩夹页岩及煤层,基本呈东西走向.

模型围岩材料选用 LS-DYNA 中的 003 号材料 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC.该模型经证明适用于模拟爆炸载荷下围岩特性^[13],采用 Cowper-Symonds 模型计算其应变率,该材料应变率与屈服强度的关系式为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{M} \right)^{\frac{1}{S}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (4)$$

式中: σ_y 为静态屈服强度, MPa; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; M 和 S 为 Cowper-Symonds 模型的应变参数; σ_0 为初始屈服强度, MPa; β 为模型的硬化参数, $\beta = 1$ 为各向同性模型, $\beta = 0$ 为塑性随动硬化模型; E_p 为围岩的塑性硬化

模量,由 $E_p = \frac{E_{tan} G}{G - E_{tan}}$ 计算; ϵ_{eff}^p 为等效塑性应变.具体计算参数见表 3.

表 3 围岩模型计算参数

围岩密度 $\rho/(kg/m^3)$	弹性模量 G/GPa	泊松比 P_r	屈服强度 σ_0/MPa	切向模量 E_{tan}/MPa	β	M	S	围岩失效应变 F_t
2 730	23	0.22	5.6	7	1	2.5×10^{-6}	4	0.01

1.4.4 衬砌材料参数

衬砌材料选择用 LS-DYNA 中的 111 号 JHC 材料模型,该模型可用于承受大应变、高应变率和高压的混凝土.该材料的塑性体积应变、等效塑性应变和压力可以作为材料的损伤依据^[14].JHC 模型参数分为 5 类:材料基本参数、材料强度参数、材料压力参数、材料损伤参数及软件参数共 21 项,见图 3.

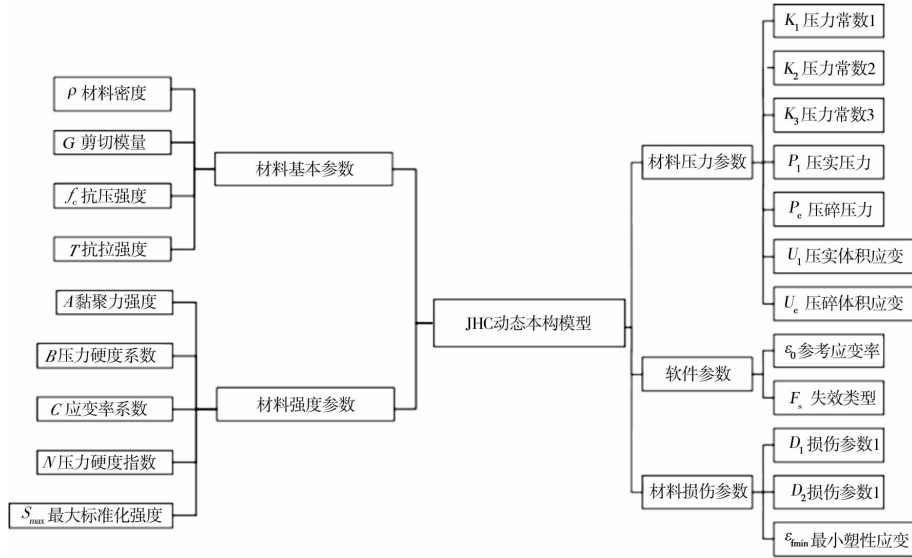


图3 JHC 动态本构模型参数

详细参数见表4.

表4 JHC 模型的计算参数

材料基本参数				材料强度参数					软件参数		
$\rho/\text{kg}/\text{m}^3$	G/GPa	f_c/MPa	T/MPa	C	N	A	B	S_{\max}	F_s	ϵ_0	
2 400	14.86	30	4	0.007	0.61	0.79	1.6	1	0.67	1	
材料损伤参数			材料压力参数								
D_1	D_2	ϵ_{\min}	U_1	U_c	P_1/GPa	P_c/MPa	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa		
0.04	1	0.01	0.1	0.001	0.8	16	85	-171	208		

2 数值模拟结果与分析

2.1 隧道内爆炸冲击波流场特征

隧道内爆炸冲击波流场特征如图4所示.从图4可以看出:爆炸后冲击波阵面呈球状,以爆心为起点向四周扩散(见图4a~图4c).由于隧道衬砌的形状,冲击波首先到达衬砌底板并开始产生反射波,随后到达衬砌拱顶,最后传播至衬砌两边(见图4d~图4f).由于反射波的形成和传播,隧道内冲击波的波阵面不再是球形,这种影响随着传播距离的增加更加明显.在爆炸冲击波与隧道衬砌的相互作用过程中,由于隧道构造的不规则性,隧道内由衬砌产生的反射波的传播方向各不相同,最终反射波与爆炸产生的冲击波汇合,随着原来的方向沿隧道的纵向传播,并逐渐衰减.

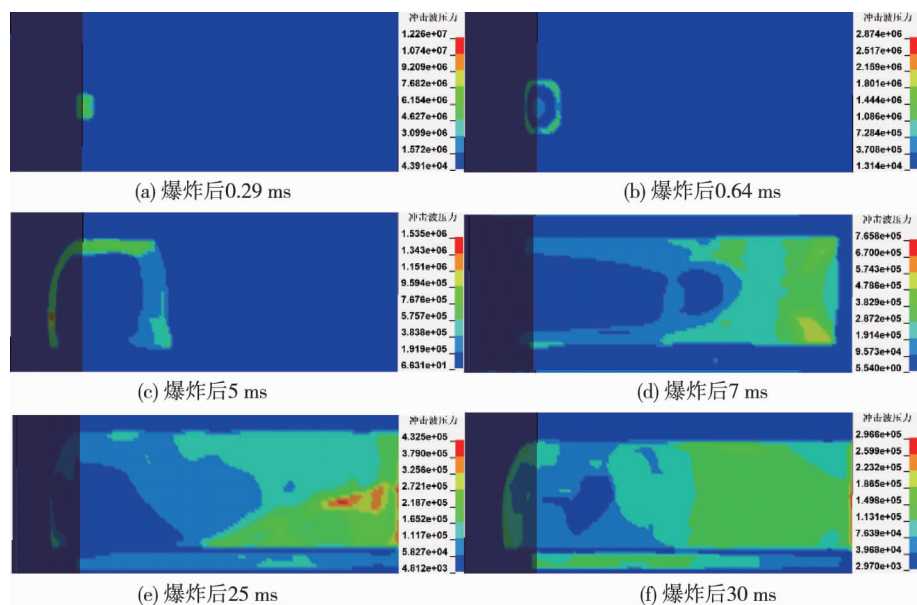


图4 爆炸冲击波的流场特征

如图5所示在隧道的径向和纵向布置若干测点.其中,径向测点沿起爆点以1 m的间距分布,纵向测点在起爆点后2 m等比例分布.

基于流固耦合数值模型,得到爆炸过程中各测点的超压时程曲线如图6所示.从图6a可以看出:随着时间的推移,冲击波超压依次达到峰值.在爆炸的瞬间压力高达15 MPa,但是传播到衬砌时只有1.6 MPa.这是因为爆炸后冲击波阵面是以球面的形式传播,随着传播距离的增加,冲击波波阵面积增大,使得单位面积内冲击波的能量不断减小.这说明

即使在冲击波传播过程中没有能量损失,能量也会迅速衰减.需要注意的是,5号测点的冲击波超压突然增大,峰值仅次于1号测点,这是入射波与反射波相互作用的结果.因为衬砌拱股有倾斜角度,拱股与底板存在夹角,使得爆炸冲击波在此处发生多次反射、入射,导致超压大幅增大,使得此处的冲击波流场变得复杂,因而,冲击波在此处的反射效应最强,造成的破坏也最大.从图6b可以看出:随着距离的增加各测点依次达到最大超压峰值,过了最大峰值之后各测点又出现若干峰值并呈现出不同程度的振幅.相比于图6a径向各测点,纵向测点冲击波超压时程曲线的波动幅度更为明显.因为随着冲击波的传播,当冲击波阵面的压力等于大气压力时,冲击波会在惯性作用下继续向前推移,此时就会在冲击波后方形成一个小于大气压的负压区,于是冲击波会逐渐停止并反向运动.随着冲击波的反向运动,负压区压力又逐渐增大,直至再次因惯性作用而停止,之后会随着最初爆炸冲击波的方向再次运动,此时冲击波压力峰值会大幅增强.这表明冲击波是一种强压缩波,其波阵面前后介质的状态参数是非连续的跳跃式不间断变化.

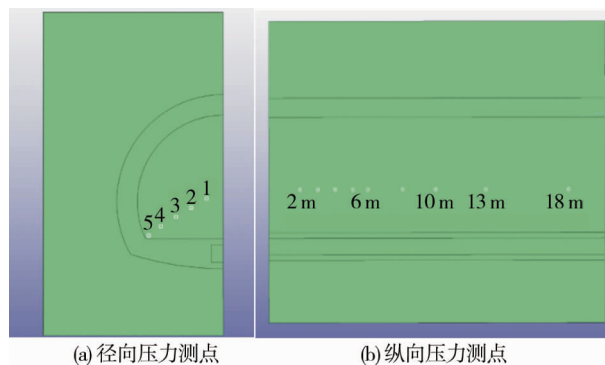


图5 测点布置位置

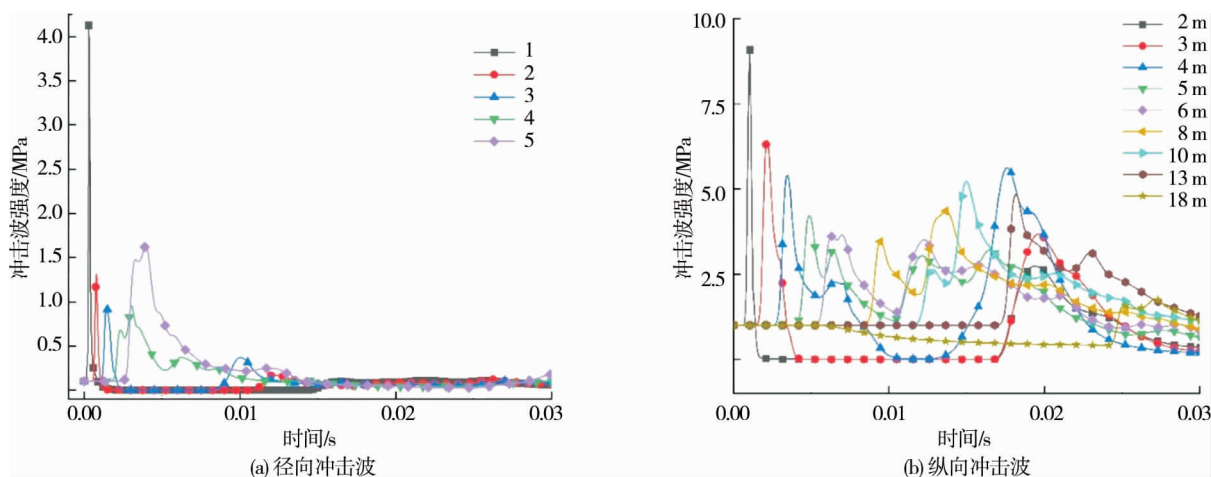


图6 爆炸冲击波超压时程曲线

2.2 隧道内衬砌动力响应

当隧道内发生爆炸时,在冲击波传播及波系演化过程中,冲击波与隧道结构相互耦合,导致隧道结构产生动力响应而发生破坏.图7为爆炸后隧道衬砌的有效应力响应云图.从图7a~图7c可以看出:爆炸产生的第一次冲击波压力最大,在离爆心最近的衬砌底板最先产生应力波,且此处应力最大.随着爆炸冲击波逐渐作用于衬砌内壁,衬砌的结构应力会随着冲击波的传播方向运动,带动相邻区域应力向前运动,随着时间的推移,衬砌的动力响应会逐渐减小,图7d显示出在爆炸后期衬砌的有效应力会聚集在墙角处并向前方传播.在应力波传播过程中,其形成的破坏具有很大的复杂性,除了冲击波的影响,还受到被作用衬砌的形状、厚度、混凝土强度等特点的影响,由于衬砌墙角与底板的结构复杂,导致了在这两处出现应力集中.随着时间的推移爆炸冲击波逐渐减小,但爆炸产生的有效应力在惯性作用下继续波动.

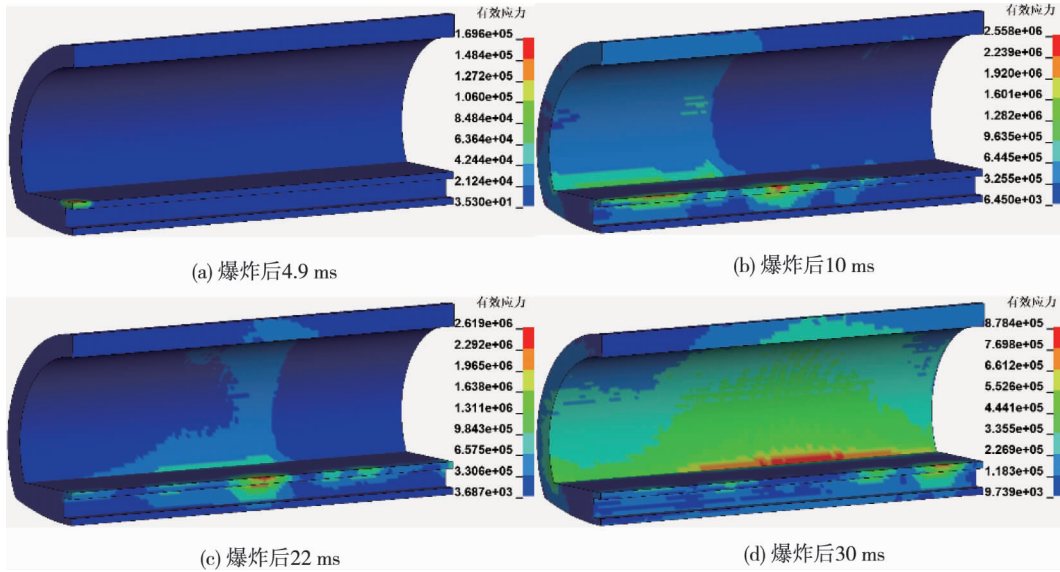


图7 衬砌有效应力云图

如图8所示在隧道衬砌的横截面和衬砌纵向顶板布置测点.

测得爆炸之后各测点的有效应力时程曲线如图9所示.从图9a可以看出:爆炸发生时,冲击波携带大量能量作用于衬砌,使得衬砌应力瞬间达到峰值,随后迅速衰减并逐步趋于稳定.距爆心最近的测点A最先出现有效应力的峰值且为应力的最大值.但是在距离稍远的测点C的应力要大于测点B的应力,这是由于其“犄角结构”造成此处的爆炸冲击波反射效应最强,导致墙角的应力激增,也进一步加剧了衬砌的损伤,最终导致衬砌失去应有的承载能力.经过一段时间后,A,C两测点处仍存在较大的应力值,这是因为爆炸冲击波与衬砌壁面接触后形成能量较多的反射超压,反射超压与冲击波共同作用于隧道衬砌,在反射波汇聚的冲击波及其反复作用下,使得衬砌墙角和底板处的应力集中.这证明了爆炸在这两处造成的破坏效应是最强的.从图9b可以看:爆炸后在极短的时间内应力波便扩散至整个模型,测点F,G,H,I依次出现峰值.最大值出现在测点F处,爆炸产生的第一次冲击波超压最大,随后应力迅速衰减,并在衰减过程中上下波动出现若干峰值,这是因为冲击波在隧道内发生反射和叠加,使得隧道内的冲击波流场变得复杂,作用于衬砌上的应力也会突然增大,对衬砌造成了更严重的损伤.

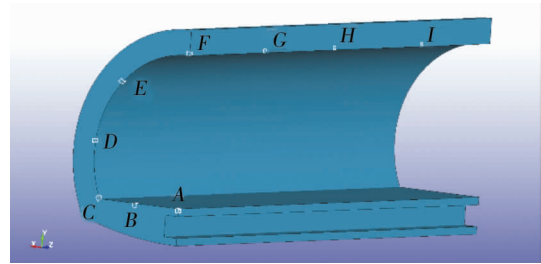


图8 有效应力测点布置

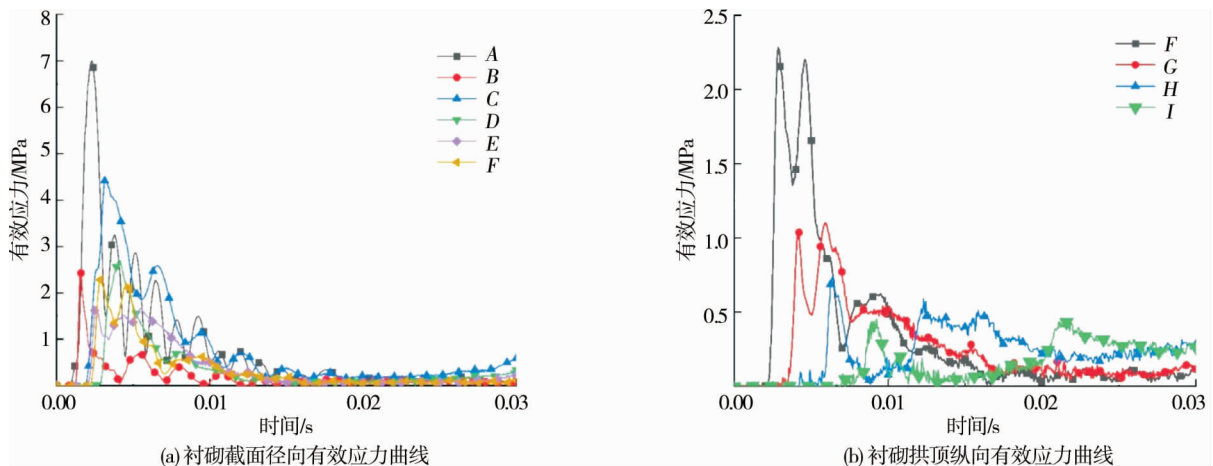


图9 有效应力时程曲线

3 结论

1)隧道内瓦斯爆炸产生的冲击波在自由传播之后进入规则反射与不规则反射状态,在传播过程中对衬砌产生破坏.衬砌墙角和底板处冲击波反射效应最强,也是衬砌损伤最严重的位置.爆炸冲击波在纵向传播时反射作用最强,导致隧道内的冲击波流场更加复杂,隧道内在一段时间内都是高压状态,加剧爆炸对衬砌的损伤.

2)爆炸后衬砌的有效应力呈上下波动变化.距离爆源位置越近的衬砌结构应力变化越大,应力的衰减并无特定的衰减规律,在衬砌墙角和底板处应力波动幅度最大.爆炸之后,隧道衬砌的底板与墙角是损伤最严重处,应加强这些结构的抗爆性能.

参考文献:

- [1] 叶青,贾真真,林柏泉,等.管内瓦斯爆炸火焰加速机理分析[J].煤矿安全,2008(1):78-80.
- [2] 杨科之,杨秀敏.坑道内化爆冲击波的传播规律[J].爆炸与冲击,2003(1):37-40.
- [3] 司荣军.管道内瓦斯爆炸传播试验研究[J].煤炭科学技术,2009,37(2):47-49.
- [4] 龚顺风,邓欢,朱升波,等.近爆作用下钢筋混凝土板动态破坏的数值模拟研究[J].振动与冲击,2012,31(2):20-24.
- [5] 汪维,张舵,卢芳云,等.钢筋混凝土楼板在爆炸荷载作用下破坏模式和抗爆性能分析[J].兵工学报,2010,31(s1):102-106.
- [6] 张秀华,王钧,赵金友,等.室内燃气爆炸冲击波的特性及传播规律[J].工程力学,2014,31(s1):258-264.
- [7] 黄家蓉,刘光昆,吴飏,等.爆炸冲击作用下混凝土中动态应力波测试与仿真[J].防护工程,2020,42(4):23-28.
- [8] 孙宁新,雷明锋,张运良,等.软弱夹层对爆炸应力波传播过程的影响研究[J].振动与冲击,2020,39(16):112-119.
- [9] 石立旺.内爆炸作用下抗爆间室动力响应及防护措施研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [10] 李志鹏.瓦斯爆炸作用下隧道衬砌致损机理及修复技术研究[D].北京:北京科技大学,2019.
- [11] 石少卿,康建功,汪敏,等.ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coefficient for high explosives[R]. Lawrence Livermore Laboratory report UCID-16189.1973.
- [13] 刘优平,龚敏,黄刚海.深孔爆破装药结构优选数值分析方法及其应用[J].岩土力学,2012,33(6):1883-1888.
- [14] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5):051003. DOI:10.1115/1.4004326.