文章编号：1000-5773(2012)02-0221-06

核爆聚变电站发电时的冲击波超压传播规律*

陶俊林[1]，黎泽朋[1]，陈小伟[1,2]

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院，四川绵阳 621010；
2. 中国工程物理研究院结构力学研究所，四川绵阳 621900)

摘要：核爆聚变电站在发电时会产生冲击波，其超压传播规律是核爆聚变电站洞壁设计的重要基础。现有公式在描述冲击波峰值超压时存在一定的不足(如相对误差大等)。通过理论分析得到新的冲击波峰值超压公式、正压作用时间 τ_+ 和冲击波传播系数 ω，最终得到冲击波超压的传播规律。通过对比分析表明，新公式比现有公式更加适合求解核爆聚变电站发电时所产生的冲击波峰值超压。

关键词：核爆聚变电站；冲击波；超压；传播规律
中图分类号：O38 **文献标识码**：A

1 引 言

核爆聚变电站由爆洞、发电厂、核装置生产厂和核燃料回收处理厂 4 部分组成，其中爆洞半径选取 60～80 m，洞壁内衬一定厚度的防钠腐蚀的不锈钢，在内衬与岩体之间填充耐冲击的预制件。核装置的爆炸威力为 10 kt TNT 当量，爆炸核装置于洞壁间分布有足够数量的钠，当核爆发生后，几万吨的钠将吸收冲击波大部分能量，再将钠液输送到发电厂，通过热交换进行发电。爆洞和钠循环系统构成核爆电站中的第一回路，如图 1 所示[1-2]。

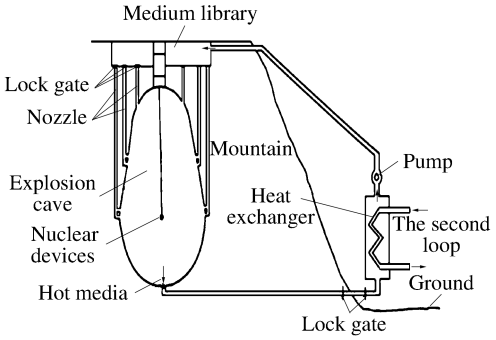


图 1 核爆聚变电站第一回路

Fig. 1 The first loop of nuclear explosion fusion power plant

核爆聚变电站中爆洞的设计(洞径大小、洞壁选材和结构设计)至关重要：要求爆洞有足够的尺寸降低爆炸冲击波的强度；要求洞壁设计有足够的强度经受 10^5 次核爆炸冲击。核爆聚变电站每次爆炸所产生的冲击波超压是爆洞设计的重要依据，本工作研究核爆聚变电站中的冲击波超压传播规律。

2 冲击波超压传播规律的确定

目前，冲击波超压的传播规律主要通过冲击波超压峰值、冲量、持续时间等冲击波参数进行描述，其关系式可以拟合为[3-4]

$$\Delta p(t) = \Delta p_s\left(1-\frac{t}{\tau_+}\right)\mathrm{e}^{-\omega t/\tau_+} \tag{1}$$

式中：Δp_s 为冲击波超压峰值，t 为冲击波到达时算起的时间，τ_+ 为正压作用时间，ω 为无量纲系数。

* **收稿日期**：2010-10-18；**修回日期**：2011-02-18
作者简介：陶俊林(1972—)，男，博士，副研究员，主要从事材料和结构瞬态力学响应研究. E-mail：junlintao@126.com
通讯作者：黎泽朋(1984—)，男，硕士，主要从事材料和结构瞬态力学响应研究. E-mail：lizepeng2008@126.com

2.1 冲击波峰值超压的确定

核爆炸通常采用两种物理模型进行逼近:一种是将爆炸源看成一个点源;另一种是按真实情况,将爆炸源近似成一个有一定体积的球源[4]。在核爆聚变电站中核装置的体积比爆洞的体积小得多,故可以将核爆看作点爆。在强爆炸理论中,爆炸所产生的冲击波传播仅与爆炸的能量和传播的距离有关,在研究空气中爆炸时常采用爆炸相似律,引进有量纲的比例距离

$$Z = R/Q^{1/3} \tag{2}$$

式中:R 为测点与爆心之间的距离,m;Q 为等效 TNT 药量,kg。冲击波超压仅依赖于这个比例距离,即[4]

$$\Delta p_s = f(Z) \tag{3}$$

根据 Π 定理并引入无量纲量,将公式(3)展开为

$$\Delta p_s = \frac{A_1}{Z} + \frac{A_2}{Z^2} + \frac{A_3}{Z^3} + A_0 \tag{4}$$

式中:A_1、A_2、A_3 的取值与爆心距有关。不少学者通过实验研究和理论推导并结合(4)式总结出不少空气中强爆炸产生的冲击波峰值超压公式,其中包括在理想气体和真实空气两种不同气体介质中的点爆炸结果。

Brode 用人造粘性法对无限大理想气体的点爆炸进行过数值计算,得到冲击波阵面上的最大峰值超压[5]

$$\Delta p_s = \begin{cases} \dfrac{0.67}{Z^3} + 1 & Z \geqslant 1 \\ \dfrac{0.0975}{Z} + \dfrac{0.1455}{Z^2} + \dfrac{0.585}{Z^3} - 0.0019 & 0.01 \leqslant Z < 1 \end{cases} \tag{5}$$

Henrych 列出了纳乌缅科、彼特罗夫斯基和萨多夫斯基利用模型相似理论建立的无限大理想气体点爆炸冲击波超压公式[6]

$$\Delta p_s = \begin{cases} \dfrac{1.07}{Z^3} - 0.1 & Z < 1 \\ \dfrac{0.076}{Z} + \dfrac{0.255}{Z^2} + \dfrac{0.65}{Z^3} & 1 \leqslant Z \leqslant 15 \end{cases} \tag{6}$$

亨利奇进行实验研究后,得到在无限大理想气体中点爆炸的冲击波超压公式[6]

$$\Delta p_s = \begin{cases} \dfrac{1.407\,17}{Z} + \dfrac{0.553\,97}{Z^2} - \dfrac{0.035\,72}{Z^3} + \dfrac{0.000\,625}{Z^4} & 0.05 \leqslant Z < 0.3 \\ \dfrac{0.619\,38}{Z} - \dfrac{0.032\,62}{Z^2} + \dfrac{0.213\,24}{Z^3} & 0.3 \leqslant Z < 1 \\ \dfrac{0.066\,2}{Z} - \dfrac{0.405}{Z^2} + \dfrac{0.328\,8}{Z^3} & 1 \leqslant Z \leqslant 10 \end{cases} \tag{7}$$

杨鑫等人介绍了米尔斯(Mills,1987)给出的 TNT 在真实空气中点爆炸冲击波超压表达式[7]

$$\Delta p_s = \frac{0.108}{Z} + \frac{0.114}{Z^2} + \frac{1.772}{Z^3} \tag{8}$$

文献[3]根据大量的实验结果,给出了 TNT 球形装药在真实空气中爆炸时的冲击波峰值超压表达式

$$\Delta p_s = \frac{0.084}{Z} + \frac{0.27}{Z^2} + \frac{0.7}{Z^3} \qquad 1 \leqslant Z \leqslant 10 \sim 15 \tag{9}$$

Wu 等人认为,高爆炸药在真实空气中点爆炸的冲击波峰值超压(单位 MPa)可通过下式求得[8]

$$\Delta p_s = \begin{cases} \dfrac{1.059}{Z^{2.56}} - 0.05 & 0.1 \leqslant Z < 1 \\ \dfrac{1.008}{Z^{2.10}} & 1 \leqslant Z \leqslant 10 \end{cases} \tag{10}$$

杨鑫、石少卿和程鹏飞对真实空气中 TNT 爆炸冲击波峰值超压的已有研究成果((5)式~(10)式)

进行比较分析,拟合总结出关系式(11)[7],并利用 LS-DYNA 软件对空气中 TNT 爆炸进行了数值模拟,结果表明:相对误差随着比例距离的增大而减小。当 $Z<1$ 时,相对误差在 70%以上。

$$\Delta p_s=\begin{cases}\dfrac{0.084}{Z}+\dfrac{0.27}{Z^2}+\dfrac{0.7}{Z^3} & Z<1\\ \dfrac{0.076}{Z}+\dfrac{0.255}{Z^2}+\dfrac{0.65}{Z^3} & 1\leqslant Z\leqslant 15\end{cases}\tag{11}$$

亨利奇在文献[6]中对(5)式～(7)式进行分析后认为:当 $Z<1$ 时,(5)式和(6)式的超压值大于(7)式的超压值,并与核爆炸实际情况相符合[6]。

乔登江[4]对在理想气体和真实空气中核爆炸的计算结果进行了对比分析,结果表明,真实空气冲击波超压略低于理想气体冲击波的超压,两条衰减曲线大体平行,如图 2 所示,分析其原因是,在真实空气中爆炸由于存在分子分解和分子、原子电离等耗散能量的因素,使得爆炸产生冲击波的效率低于理想气体[4]。

核爆聚变电站的爆洞空腔内充满了氩气和汽化的钠,其密度、定容比热等参考值都不确定,不能通过理论求解其冲击波超压。但考虑到爆洞空腔中分子分解等因素,为保守起见,本研究选取在标准大气压下,等效 1 kt TNT 当量,理想气体点爆理论的计算结果作为参考,具体数据见表 1。文献[4]根据表 1 中的数据给出了当 $0.76\leqslant Z\leqslant 8.6$ 时,冲击波超压的关系式为(12)式[4],彭先觉等人采用的即是(12)式[1-2]

$$\Delta p_s=\frac{0.0868}{Z}+\frac{0.0835}{Z^2}+\frac{0.33}{Z^3}-0.0016\tag{12}$$

表 1　标准大气状态下 $Q=1$ kt 时理想气体点爆炸理论计算结果

Table 1　The theoretical results of ideal gas point source explosion, standard atmospheric condition $Q=1$ kt

R/(m)	Δp_s/(MPa)	τ_+/(s)
35	9.40	0.16
40	6.35	0.16
50	3.30	0.16
60	1.97	0.16
70	1.28	0.16
80	0.89	0.14

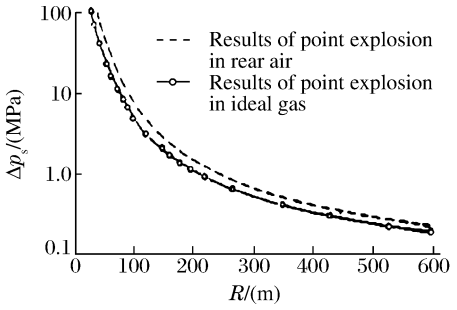


图 2　标准大气状态下 $Q=1$ kt 时理想气体和真实空气点爆炸计算结果对比

Fig. 2　The comparison figure of different point explosion, standard atmospheric condition $Q=1$ kt

根据爆洞核装置的爆炸威力为 10 kt TNT 当量,爆洞半径选取 60～80 m,可知,核爆聚变电站的比例距离为 $0.27\leqslant Z\leqslant 0.37$。综合上述分析,本研究选取理想气体点爆炸时在比例距离为 $0.2\leqslant Z\leqslant 1$ 的情况下将(5)式、(6)式和(12)式进行对比,其结果如图 3 所示。

由图 3 可知:(5)式、(6)式和(12)式的峰值超压随着 Z 值的增大逐渐趋于一致,当 $0.2\leqslant Z\leqslant 0.4$ 时,3 个公式超压峰值的相对误差都较大。限于没有更好的计算公式,本研究利用爆炸相似率原理,根据表 1 中的数据和(4)式进行非线性函数拟合,得到(13)式

$$\Delta p_s=\frac{-0.028}{Z}+\frac{0.0305}{Z^2}+\frac{0.39}{Z^3}+0.1163\tag{13}$$

将新公式(13)式与(5)式、(6)式和(12)式代入数据后与理论值进行对比,其结果见表 2。通过对比表 2 中各公式的数据和文献值不难发现:(13)式在 $0.35\leqslant Z\leqslant 0.8$ 时能更好地模拟冲击波超压峰值随爆炸当量及爆心距的变化。故本研究采用(13)式进行计算,由此可以得到当核爆当量为 10 kt TNT 时,距离爆心 60 m 处的超压为 18.17 MPa,距离爆心 80 m 处的超压为 7.96 MPa。

表 2 冲击波峰值超压公式的对比

Table 2 The comparison of equations

Z	Δp_s	Eq.(5)		Eq.(6)		Eq.(12)		Eq.(13)	
/(m/kg$^{1/3}$)	/(MPa)	Δp_s/(MPa)	e/(%)	Δp_s/(MPa)	e/(%)	Δp_s/(MPa)	e/(%)	Δp_s/(MPa)	e/(%)
0.35	9.40	15.11	60.74	24.86	164.47	8.63	8.19	9.38	0.21
0.40	6.35	10.29	62.05	16.62	161.73	5.89	7.24	6.34	0.16
0.50	3.30	5.46	65.45	8.46	156.36	3.15	4.55	3.31	0.30
0.60	1.97	3.27	65.99	4.85	146.19	1.90	3.55	1.96	0.51
0.70	1.28	2.14	67.19	3.02	135.94	1.26	1.56	1.28	0.00
0.80	0.89	1.49	67.42	1.99	123.60	0.88	1.12	0.89	0.00

由于核爆是在洞中进行，当冲击波到达洞壁时将产生反射压，因此压力提高的倍数与冲击波强度、气体绝热指数 γ 有关，其值在 2～8 范围之内。对于强冲击波，若洞中充单原子气体(如 Ar)，则其 γ 值较大，反射使压力提高的倍数大约是 5[1]，本研究取反射压倍数为 5。因此，可得 60 和 80 m 的洞壁最大压力值分别为 90.85 和 39.80 MPa。

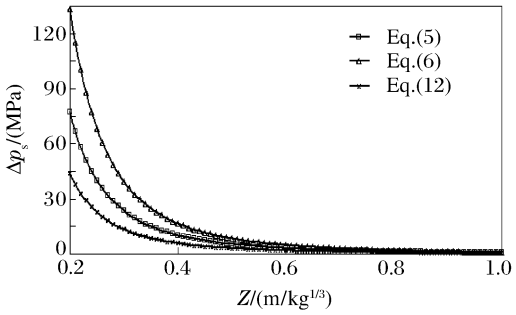


图 3 冲击波峰值超压公式对比

Fig. 3 The comparison figure of equations

核爆装置爆炸时，在核装置与洞壁之间的一定位置上分布有足够数量(几万吨)的水滴状钠(爆前几秒钟喷入)，冲击波将把绝大部分能量传递给钠，转化成钠的内能(特别是有相当数量的钠被汽化)，将有可能大大降低爆炸冲击波对洞壁的作用强度。作保守估计，将这个减弱因子取作 2[1]，则对于 10 kt TNT 爆炸当量，60 和 80 m 洞壁的最大压力分别为 45.43 和 19.90 MPa。

2.2 正压作用时间 τ_+ 的确定

文献[3]给出了正压作用时间 τ_+ 的计算式[3]

$$\tau_+ = 1.35\times10^{-3}\,(R\cdot Q^{1/3})^{1/2} \tag{14}$$

τ_+ 的大小与 Δp_s 有关，当 0.01 MPa≤Δp_s≤0.2 MPa 时，τ_+ 可以拟合为[4]

$$\tau_+ = 0.172\Delta p_s{}^{-0.343}Q^{1/3} \tag{15}$$

然而核爆聚变电站爆炸时产生的冲击波超压峰值分别为 45.43 MPa 和 19.90 MPa，不满足(15)式的计算条件，因此本研究采用(14)式进行计算，得出洞壁半径为 60 m 和 80 m 时的正压作用时间 τ_+ 分别为 0.15 s 和 0.18 s。

2.3 无量纲系数 ω 的确定

当 1 MPa<Δp_s<3 MPa 时，ω 近似取为[3]

$$\omega = 0.5 + \Delta p_s\left[1.1 - (0.13 + 0.2\Delta p_s)\,\frac{t}{\tau_+}\right] \tag{16}$$

当 Δp_s≤0.4 MPa 时，ω 近似取为[4]

$$\omega = 0.5 + 0.8\Delta p_s \tag{17}$$

由于 2.1 节中求解的冲击波超压峰值不符合(16)式和(17)式的条件，因此本研究采用冲量修正公式求解出 ω 值。冲量公式为[4]

$$I = \int_0^{\tau_+}\Delta p(t)\,\mathrm{d}t = \frac{1.28\times10^{-4}Q^{2/3}}{R} \tag{18}$$

将(1)式代入(18)式左边，可得

$$\left[\frac{\tau_+}{\omega}-\frac{\tau_+}{\omega^2}(1-\mathrm{e}^{-\omega})\right]\Delta p_s=\frac{1.28\times10^{-4}Q^{2/3}}{R} \tag{19}$$

当 $R=60$ m 时,将前面求解的 τ_+ 值、Δp_s、Q、R 代入(19)式后得

$$\omega^2-68.82\omega+68.82(1-\mathrm{e}^{-\omega})=0 \tag{20}$$

(20)式为非线性二次方程,将该方程分解为二次方程和指数方程,再将二次方程的根作为初值,采用叠代法求解后得 $\omega_1=\omega_2=67.81$。

因此,当 $R=60$ m 时,可得其超压形式为

$$\Delta p(t)=45.43(1-6.67t)\mathrm{e}^{-452t} \tag{21}$$

同理,当 $R=80$ m 时,可得其超压形式为

$$\Delta p(t)=19.9(1-5.56t)\mathrm{e}^{-262t} \tag{22}$$

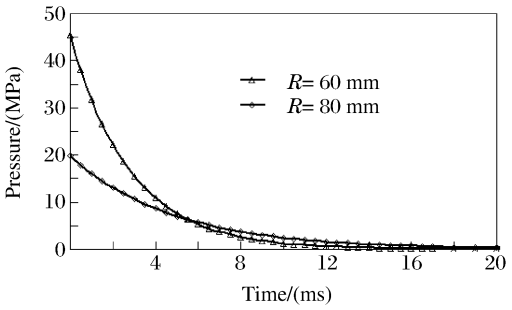


图 4　冲击波超压传播曲线

Fig. 4　The propagation curve of shock wave overpressure

图 4 为爆洞半径为 60 和 80 m 时冲击波超压的传播曲线。在后续进行洞壁设计时,冲击波超压传播曲线可替代核爆炸产生的效果,直接作用于爆洞洞壁上,从而为洞壁设计提供理论据。

3　结　论

通过对冲击波超压传播规律的理论研究,可得到以下结论。

(1) 当比例距离 $0.35\leqslant Z\leqslant0.80$ 时,通过将本研究拟合求得的新公式与现有公式进行对比,表明新公式在求解冲击波峰值超压时比其它公式更加精确,对核爆聚变电站在发电过程中产生的冲击波峰值超压进行计算时,建议采用本研究所提出的新公式。

(2) 在求解冲击波传播系数 ω 时,当冲击波超压峰值小于 3 MPa 时,可采用已有公式直接求出 ω 值;当冲击波超压峰值大于 3 MPa 时,可采用冲量修正公式进行求解。

(3) 本研究所得的冲击波超压传播规律((21)式和(22)式)可以作为爆洞洞壁设计的理论依据。

References:

[1] Peng X J, Zhu J S, Zhang X W, et al. Physics and economic construction conceptual design of a nuclear explosion fusion power plant [J]. Physics, 1997, 26(08): 481-485. (in Chinese)
彭先觉,朱建士,张信威,等. 核爆聚变电站概念设想 [J]. 物理,1997,26(08):481-485.

[2] Peng X J, Liu C A, Chen Y L, et al. Nuclear explosion fusion power plant—The hope of the mankind future energy [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(1): 39-46. (in Chinese)
彭先觉,刘成安,陈银亮,等. 核爆聚变电站——人类未来能源的希望 [J]. 中国工程科学,2008,10(1):39-46.

[3] Beijing Institute of Technology. Explosion and Its Action [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979: 240-270. (in Chinese)
北京工业学院. 爆炸及其作用 [M]. 北京:国防工业出版社,1979:240-270.

[4] Qiao D J. The Introduction to Nuclear Explosion Physics [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988: 30-70. (in Chinese)
乔登江. 核爆炸物理概论 [M]. 北京:原子能出版社,1988:30-70.

[5] Brode H L. Numerical solutions of spherical blast waves [J]. J Appl Phys, 1955, 26(6): 766-775.

[6] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use [M]. Translated by Xiong J G. Beijing: Science Press, 1987: 120-137. (in Chinese)
亨利奇. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国,译. 北京:科学出版社,1987:120-137.

[7] Yang X, Shi S Q, Cheng P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air [J]. Blasting, 2008, 25(1): 15-31. (in Chinese)
杨　鑫,石少卿,程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟 [J]. 爆破,2008,25(1):15-31.

[8] Wu C Q, Hao H. Modeling of simultaneous ground shock and air blast pressure on nearby structures from surface explosions [J]. Int J Impact Eng, 2005, 31(6): 699-717.

[9] Gu L, Xiang W F. Analyses on influential factors about airblast overpressure and its control [J]. blasting, 2002, 19(2): 15-17. (in Chinese)
顾 垒, 向文飞. 爆炸空气冲击波超压影响因素分析及控制 [J]. 爆破, 2002, 19(2): 15-17.

[10] Wang Y, Guo Z Q, Jiang X H. Numerical investigations on peak overpressure of blast wave [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2009, 33(6): 770-773. (in Chinese)
王 杨, 郭则庆, 姜孝海. 冲击波超压峰值的数值计算 [J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(6): 770-773.

[11] Wadley H N G, Dharmasena K P, He M Y, et al. An active concept for limiting injuries caused by air blasts [J]. Int J Impact Eng, 2010, 37: 317-323.

The Propagation Law of Shock Wave Overpressure in Nuclear Explosion Fusion Power Plant

TAO Jun-Lin[1], LI Ze-Peng[1], CHEN Xiao-Wei[1,2]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture, SWUST, Mianyang* 621010, *China*;
2. *Institute of Structural Mechanics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The shock wave will be created in the process of generating electricity in the nuclear explosion fusion power plant, whose propagation law of overpressure is an important foundation for the design of cavity wall. However, there is a certain lack of describing the peak overpressure of shock wave in the existing equations (for example, relative error is great). A new equation of the peak overpressure of shock wave, the time of positive pressure τ_+ and the propagation coefficient of shock wave ω are suggested by theoretical analysis, from which we get the propagation law of shock wave. The comparative result indicates that the new equation is more suitable than the existing equations for solving the peak overpressure of shock wave in the power plant.

Key words: nuclear explosion fusion power plant; shock wave; overpressure; propagation law