

用金属丝爆炸模拟地 下爆炸空腔环境的初步研究

铁志杰 高才生 邢梯良

(1983年9月7日收到)

把金属丝和丝周围的砂岩压制样品置于密封的爆室内,利用Mv30-19型大储能电容器组(总储能达232千焦耳)在50千焦耳左右的储能下进行爆炸。实验结果表明,爆室中的金属丝爆炸可以产生足够的温度和压力,即可以产生类似于地下爆炸空腔形成早期的物理化学环境。而且,砂岩样品在爆炸中汽化、熔化至少形成了1克左右的早期玻璃体。

改进装置线路、降低线路电感、选择最佳金属丝参数使其匹配;改进爆室结构,并应用磁致收缩效应来提高爆炸丝产生的温度和压力,以产生更多的玻璃体是可能的。

一、引言

爆炸丝作为光源、冲击波源、低能X射线源是人们比较熟悉的。用爆炸丝进行高温化学反应及高温化学动力学研究,这是爆炸丝在化学领域中应用的一个典型例子。近年来,利用强大电流对含氘、锂的金属丝放电产生中子,用以进行聚变反应的研究^[1]。在工业上,利用爆炸丝方法进行某些贵金属的喷涂,也正在逐步推广。

在地下爆炸中,为了探索高温高压状态下岩石介质和爆炸产物汽化、冷凝的物理化学行为,从而达到控制其物理化学形态以及爆炸的逸出物。利用爆炸丝产生的热效应和力学效应以及高能密度,模拟地下爆炸空腔形成过程的物理化学环境是一个比较理想的方法。特别是用来研究地下爆炸空腔坍塌之前,在高温高压状态下熔岩的形成和演化过程,以及爆炸产物中某些重要元素的分散、富集和分布规律,这是一个有效的途径。

二、爆炸丝高温高压模拟源

模拟地下爆炸空腔物理化学环境的一个关键问题,就是采用什么样的模拟源。爆炸丝作为高温高压模拟源比起静态高温高压装置和火花放电装置以及磁流体力学方法要优越得多。爆炸丝具有:1)爆炸产生的温度高($\sim 10^5$ °K);2)能量密度高,大约为TNT炸药的90多倍;3)爆炸时间短,约为数微秒;4)爆炸时,产生较强的击波压力。爆炸丝具有的这些特点,是我们用来作为一种新的高温高压模拟源的重要依据。

(1) 爆炸丝产生的温度

由储能装置提供给金属丝大量能量,使金属丝瞬时发生爆炸。金属丝在爆炸中产生的温度,可以根据能量守恒关系进行计算。假设爆炸的金属丝为黑体,如考虑一根金属丝,其加热获得的能量可表示为:

$$du/dt = P - \sigma \varepsilon AT^4 - dw/dt - Q \quad (1)$$

式中, u 为该根金属丝的内能; P 是该根金属丝中吸收的能量比; $\sigma \varepsilon AT^4$ 为辐射能损耗; σ 为斯蒂凡—波尔兹曼常数 $= 5.7 \times 10^{-5}$ 尔格/秒·[厘米]²·°K⁴; ε 是金属丝材料的发射率; A 是该金属丝的表面积; T 是该金属丝的温度; dw/dt 是该金属丝流体动力学能量损耗; Q 是该金属丝的传导与对流的热损耗。由于在脉冲强电流 ($\sim 10^3$ 安培) 的作用下,金属丝加热极快,所以流体动力学能量损耗和传导对流热损耗,可以忽略不计。

当金属丝达到最大温度时,金属丝内能的变化率为零。那么,由方程(1)可得到金属丝的最大吸收能量比:

$$P_{max} = \sigma \varepsilon AT_{max}^4 \quad (2)$$

或

$$T_{max} = \left[\frac{P_{max}}{\sigma \varepsilon A} \right]^{1/4} \quad (3)$$

从方程(2)可以看出,金属丝爆炸温度的四次幂与金属丝中吸收的最大能量比成正比关系,与金属丝的辐射面积成反比。在金属丝爆炸中,如果我们知道金属丝材料和丝的辐射面积,以及金属丝中吸收的能量比,那么就可以估算出金属丝的爆炸温度。

在 RLC 电路中,传递给稳定负载电阻的最大能量比为

$$P_{max} = (V_0^2 / 2)(C/L)^{1/2} \quad (4)$$

式中 V_0 为充电电压。把方程(4)代入方程(2),则得

$$T_{max} = [(C/L)^{1/2}(V_0^2/2\sigma\varepsilon A)]^{1/4} \quad (5)$$

由(5)式表明,要获得高温金属丝爆炸,就要求电容器要有高的初始电压、低的电感和一定的电容。反过来,根据初始电压、电感、电容和金属丝材料与丝的辐射面积,我们又可以估算出金属丝的爆炸温度。

如果在金属丝爆炸体系中,能量是沿丝而被瞬时吸收,吸收能量的包括一个细的中心丝和金属丝周围的低热导率的岩石介质,那么就可以用热量峰值来表示这个体系。如果 Q' 是单位长度金属丝放出的能量,周围岩石介质中的温度分布为:

$$T(r,t) = T_0 + (Q'/4\pi C_p \rho)(1/\alpha t) \exp(-r^2/4\alpha t) \quad (6)$$

式中, $T(r,t)$ 是相应时间的温度分布; T_0 是吸收能量前的温度; C_p 为周围介质的热容; ρ 为周围岩石介质的密度; α 是周围介质的热扩散率。

由于岩石介质具有非常低的热导率,因而在能量传递给周围岩石介质之前,金属丝实际上吸收了全部能量。所以,用热量峰值可以预测爆炸丝周围介质中,相应时间的温度分布。

爆炸丝产生的温度,除了用理论计算外,还可以用光谱方法进行测量。Lochte等人用光谱法测得的温度值约为70000 °K左右⁽²⁾。

(2) 爆炸丝产生的压力

由于在金属丝瞬时爆炸的过程中,大约有50%左右的能量产生了冲击波。所以,许多学者都把爆炸丝作为一种高效击波源进行研究。因此,在爆炸的研究中,对于爆炸产生的击波压力,给予定量的估算是非常必要的。

在空气中,金属丝爆炸产生的冲击波压力,可以根据Rouse关于金属丝爆炸的公式(系柱面强冲击波近似解)计算⁽³⁾:

$$P(r,t) = \rho_0 A^2 \frac{F(X)}{R^2} \quad (7)$$

式中 $X = (r/R)$; r 为欧拉坐标,即半径; R 为击波阵面的半径;对于击波阵面来说, $X = (r/R) = 1$,这时 $F(X) = 0.833$;式中 $A = \dot{R}$, \dot{R} 为相应 R 时的击波速度; $\rho_0 = 1.293 \times 10^{-3}$ 克/(厘米)³。把这些值代入(7)式,则得

$$\begin{aligned} P(r,t) &= \rho_0 (\dot{R})^2 \cdot F(X) \\ &= 1.293 \times 10^{-3} \times \dot{R}^2 \times 0.833 \\ &= 1.078 \times 10^{-3} \dot{R}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

从高速照相机拍摄的冲击波发展的照片可以得到不同 R 时的击波速度 \dot{R} 值,代入(8)式,就可以得到不同距离的击波阵面的压力。

爆炸丝产生的击波压力。一方面,可以根据击波的速度计算;另一方面,可以用压电晶体探头直接测量。但是,在设计制造压力探头时,必须考虑到大电流放电产生冲击波的特点。因为爆炸丝产生的冲击波压力幅值范围大,波首上升时间短,同时爆炸中产生的电弧温度高,电磁干扰也强。

一般,金属丝在自由空气中爆炸时,击波压力可以达到数百大气压;在大储能条件下,特别是金属丝密封在爆室内的爆炸中,产生的击波压力,可以达到数千大气压以上。

三、地下爆炸空腔中物理化学环境的模拟

在理论上,爆炸丝产生的高温和高能密度,对于模拟地下爆炸空腔形成的早期的物理化学环境和研究裂变产物在高温高压下的行为及其特征是足够的。实验所用的爆室是把金属丝和岩石样品密封起来用金属丝爆炸产生一个类似地下爆炸的物理化学环境。爆室的结构和几何形状直接影响着模拟的效果。

(1) 爆炸室的设计

用爆炸丝作为高温高压模拟源,就是通过一定能量的金属丝爆炸使中心丝周围的岩石介质汽化、熔化,形成一个类似于地下爆炸空腔形成早期的高温高压环境和一定量的冷凝玻璃体。所以,在模拟实验中我们是把金属丝和丝周围的岩石样品密封在爆室内,进行爆炸,因为这样有助于金属丝和丝周围的岩石介质吸收更多的能量,并且可以防止样品在击波作用下

发生飞散。

同样，爆室的几何形状对于稳定和限制金属丝，提高金属丝的爆炸能量，起着很重要的作用。这种爆室，在结构上还应具备两个条件：既能够耐很高的电压而不致被击穿；同时又可以使金属丝的爆炸能量被密封于爆室内，其次也要考虑装卸方便。我们设计了一种莫雷型爆室，其结构如图1。这种爆室在结构的一端采用螺纹结构密封方式；另一端采用玻璃钢盘、

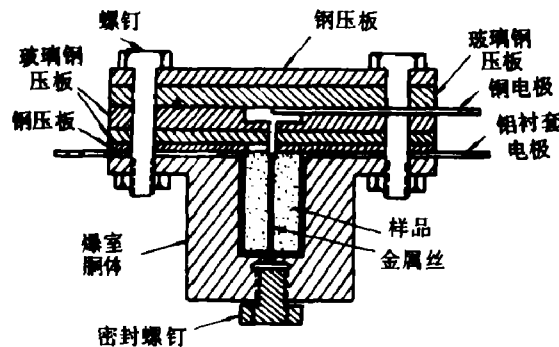


图1 莫雷型爆炸室结构示意图

紫铜垫片、钢压板，并借助螺钉固定进行堵封。这种结构从模拟实验的结果来看（爆炸中岩石样品汽化、熔化的玻璃体量）尚可采用。但是，这种爆室在结构上还存在着许多缺点，首先是堵封端还难以达密封的效果，其次，绝缘结构还不够合理，中心丝与爆室胴体壁之间，由于高压峰值往往引起短路弧，所以造成爆炸能量的严重损耗和失散；另外，岩石样品在爆炸中受到击波的强烈向外挤压，试验后的样品难于从爆室中取出。因此，在模拟研究中，不断改进或设计新型的爆室是此项研究工作进一步深入的一个尚待解决的课题。

（2）岩石介质中的金属丝爆炸现象

我们利用My 30-19型大储能电容器组装置，以压制的细砂岩圆柱体为样品，在储能15.2—50.6千焦耳的范围内进行了爆炸实验。实验结果摘录于表中。

从各次实验的结果来看，PS-8.9等实验因储能过小（15.2千焦耳左右）或在爆炸中发生飞弧现象，而未使岩石样品发生变化。其余实验，在储能和金属丝参数相近的条件下，如果爆炸中爆室的密封效果较好，又未发生飞弧现象，即能量损耗和失散较小，例如PS-1，在爆炸后的岩石样品中心孔表面和放射状径向裂隙中，形成比较明显的岩石样品汽化、熔化的冷凝玻璃体（图2）。这些玻璃体在中心孔及裂隙表面分布极不均匀，局部集中呈炉渣状，气孔发育，颜色不均匀，具有玻璃光泽（图3）。在单偏光镜下，玻璃体呈透明或带红色（铜丝汽化后混合于冷凝玻璃体内）；在双偏光镜下，其光学性质表现为全消光。玻璃体的折光率为1.46左右。这些均为硅酸盐玻璃体的典型特征。从爆炸的现象来看，在多数实验中可以看到，放电后形成的高温高压等离子体弧与爆室胴体壁之间发生短路，使岩石样品外围的铝衬

表 爆炸丝高温高压模拟实验结果

实验号	样品及规格 (毫米)	丝材料	丝尺寸 (毫米)	丝电阻 (欧姆)	丝+电路电感 (微亨)	充电电压 (千伏)	储能 (千焦耳)	爆炸产生的现象
PS-1	压制砂岩柱 长 $L=50$ 直径 $D=40$ 中心孔 $\phi 8$	Cu	长度 $l=30$ 直径 $d=0.3$	0.0132	10	20	49.4	样品室密封较好, 样品在击波作用下产生放射状径向裂隙。在中心孔表面及裂隙内形成少量玻璃体。铝衬套上部局部熔化, 玻璃体带红色, 数量有限。
PS-2	同PS-1	Cu	$l=45$ $d=0.3$	0.015	—	20	49.4	密封良好, 形成了较明显量的玻璃体。玻璃体表面气孔发育, 局部呈玻璃泡, 分布同PS-1。铝衬套底部有明显熔化现象。
PS-3	同PS-1	漆包铜线	$l=35$ $d=0.17$	0.0605	—	20	49.4	以胶板代替紫铜垫密封, 胶板烧坏, 形成了一定的玻璃体, 局部集中呈炉渣状, 气孔发育, 颜色不均匀, 玻璃光泽。
PS-4	同PS-1	漆包铜线	$l=35$ $d=0.17$	—	—	20	49.4	密封垫为紫铜, 爆后形成了较多的玻璃体, 紫红色。
PS-5	同PS-1	漆包铜线	$l=30$ $d=0.17$	—	—	20	49.4	现象同PS-1, 2, 3, 生成的玻璃体有限。
PS-11	规格同PS-1 中心孔 $\phi 2$	漆包铜线	$l=45$ $d=0.17$	—	—	12	50.6	用尼龙-6衬套代替铝衬套, 爆炸中密封和绝缘较好, 生成了较多的玻璃体, 玻璃薄层厚约0.5毫米, 爆炸中尼龙-6衬套被击波打裂。

注: 表中“—”代表未测。

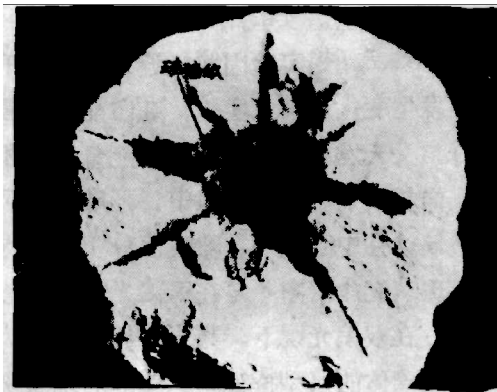


图2 PS-1 样品中心孔表面和放射状径向裂隙中的玻璃体



图3 PS-4的冷凝玻璃体，呈炉渣状，气孔发育，颜色不均匀

套局部熔融、烧蚀并形成小铝球。由于这种短路，造成了热效应能量的极大损耗，因此使得爆炸后形成的玻璃体量较少。

为了提高爆室的绝缘性能和防止上述短路现象的发生，实验中曾以尼龙—6衬套代替铝衬套进行了实验(PS-11)。实验结果表明，由于使用了尼龙—6衬套，提高了爆室的绝缘性能与密封效果，所以在爆炸中形成了较多的玻璃体量。样品中心孔表面玻璃体的厚度大约为0.5毫米左右。

总之，所有的实验表明，在上述储能范围内和丝参数变化不太大、爆室密封和绝缘性能不甚理想的条件下，岩石样品中的金属丝爆炸，可以产生类似于地下爆炸空腔形成早期的高温高压物理化学环境，并形成一定量的岩石样品玻璃体。这种玻璃体量，我们根据爆后样品中心孔和裂隙中冷凝玻璃体的厚度，爆后柱状空腔的半径与高度进行了估算。在这批实验中，爆炸生成的玻璃体量大约为1克左右。

四、改进爆炸丝模拟条件的途径

在爆炸丝模拟实验中，爆丝装置的线路、爆室几何形状、触发放电开关、丝参数和充电电压等是影响爆炸丝有效能量的重要因素。因此，从理论上对装置各部分给予论证，选择适当的匹配参数，并对线路和爆室的结构给予适当的改进或重新设计，这对改进爆炸丝模拟条件是极为重要的。

1. 由方程(2)、(4)和(5)可以看出，对装置线路进行计算和改进，使电路参数匹配，就可以提高装置在放电过程中传递给金属丝的输入功率。同时，要选择与所用装置线路相匹配的最佳丝参数。因为金属丝的尺寸对于产生高能爆炸有着重要的意义。而且，与电路参数相匹配的金属丝的电阻最佳平均值 $R_{最佳}$ ，应该符合 F 、 D 、具内特的经验不等式：

$$1.1 \cdot R_{最佳} (L/C)^{1/2} \sim 1.3$$

另外, 缩短传输线路, 降低电感并对装置的触发放电路和开关进行严格设计也是很重要的。因为即使装置线路匹配, 在电容器放电的第一个半周内, 大约有20%的储能被损耗在开关上, 这点已被莫西等人的测量所证明。因此, 改进 My30~19型大储能电容器组装置的线路、开关和选择最佳丝参数就可以使装置的储能在放电过程中非常快的加到体系中, 即能量增加的速率远远会超过由辐射和其它原因损耗能量的速率。这样, 降低了能量损耗而提高了输入的效率, 就会使金属丝吸收更多的能量, 以产生高温和强击波压力的高能爆炸 从而生成较多的岩石介质的玻璃体。

2. 改进或设计新型的爆室, 使结构合理, 能耐高电压, 密封性能好, 便于装卸, 除此之外, 爆室在设计原理上应该采用磁致收缩原理⁽⁵⁾。因为在金属丝爆炸中, 高能爆炸及高温的获得依赖于丝受自磁场限制的程度。如果根据磁致收缩原理设计的爆室具备产生强自磁场的结构, 即能使从金属丝返回到电容器组的电流在金属丝周围对称分布, 那么磁致收缩效应就有可能长时间限制丝材料和限制传导造成能量损耗的倾向, 并使金属丝在爆炸中可以吸收更多的能量。这样就可以提高丝的爆炸能和爆炸的温度与压力。否则, 爆室在爆炸中起不到稳定和限制金属丝的作用。因此, 在实验中改进或设计新型爆室, 完善其效能也是改进爆炸丝模拟条件的一个极为重要的途径。

3. 在金属丝爆炸中, 爆炸产生的柱面热峰值, 在不同时间不同距离的温度分布和击波阵面压力随距离的变化如图4和5所示^{(5) (6)}。由图4, 5可以看出, 爆炸丝产生的温度和击波压力随着距金属丝距离的增加而急剧下降。模拟实验中, 所用岩石样品的中心孔直径为6

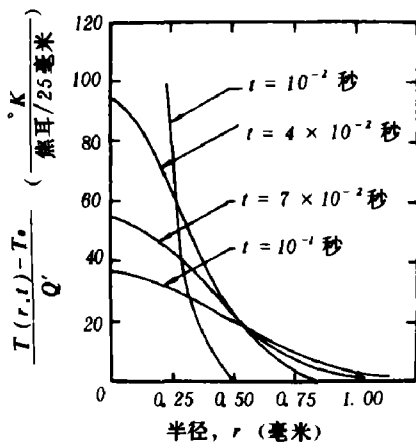


图4 柱面热峰值在不同时间的温度分布⁽⁵⁾。地壳材料的参数为: $C_p = 0.2$ 卡/克 $^{\circ}K$; 热扩散率 $K = 0.005$ 卡/秒·厘米 $^{\circ}K$; 密度 $\rho = 2.24$ 克/[厘米]³。

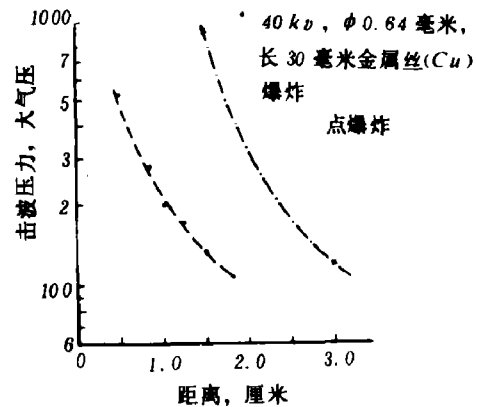


图5 爆炸击波阵面压力随距离的变化⁽⁶⁾。

毫米。这样大的中心孔径, 对于爆炸中形成汽化、熔化冷凝玻璃体的分布和模拟环境条件是不利的。因此, 在改进装置线路、爆室结构和几何形状的同时, 缩小试验样品的中心孔孔径, 对于改变样品中爆炸温度和压力的分布, 从而提高爆炸丝模拟条件与模拟效果同样是一个重

要的方面。

五、结 束 语

利用 My 30-19 型大储能电容器组装置(总储能可达232千焦耳),在50千焦耳左右的储能下,以砂岩为样品进行的模拟实验表明,封闭于爆室中的金属丝在瞬时爆炸过程中可以产生相当高的温度和压力,并且能够使金属丝周围的岩石样品汽化、熔化形成大约1克左右的玻璃体。

通过改进实验装置线路,选择最佳丝参数,降低传输线路电感使其参数匹配;改进或设计新的爆室,加强密封和绝缘措施并应用磁致收缩效应等方法。可以提高金属丝的爆炸能量,改进爆炸丝的模拟条件,从而获得足够量的岩石汽化、熔化冷凝玻璃体是可能的。

实验期间得到陈首深付研究员的帮助与指导,参加工作的还有王永荣、孙广生同志,在此表示感谢。

参 考 文 献

- (1) Lochte-Holtgreven, W., Nuclear fusion in very dense plasma obtained from electrically exploded liquid threads, *Atomkern Energie*, **28**, (1976), 150.
- (2) Bennett, F. D., *AD-807768*, (1968).
- (3) Rouse, C. A., *Exploding Wires*, Vol. 1, Plenum Press, New York, (1959), 227.
- (4) 铁志杰, 大储能爆炸金属丝模拟源的可能应用, *兵工学报*, **2** (1982).
- (5) Meyer, W. and Block, O. U. J., Simulation of the Chemical environment of a Nuclear Explosion with Exploding Wires, *CONF-700101*, **2** (1970), 1456.
- (6) 清华大学等, 放电模拟爆炸的研究, 私人通信.

**PRELIMINARY RESEARCH OF SIMULATING THE
PHYSICAL AND CHEMICAL ENVIRONMENT
IN THE CAVITY FORMATION OF THE
UNDERGROUND EXPLOSION BY
EXPLODING WIRES**

Tie Zhijie Gao Caisheng Xing Tiliang

Abstract

The metal bridgewires with the compressed cylindrical sample of sandstone surrounding them were placed in the sealed explosion chamber. The explosion was carried out at the storage energy of about 50KJ using the MY30-19 capacitor banks (total storage energy up to 232KJ). The experimental results show that the explosion of such wires in the sealed chamber can produce enough high temperature and pressure to simulate the physical and chemical environment in the early phase of the cavity formation of the underground explosion. Furthermore, the sandstone sample in our experiment was vaporized and melted during the explosion, and at least produced about one gram early phase glass mass.

It is possible to raise the temperature and pressure of an explosion and increase the amount of the produced glass by improving the apparatus circuit, decreasing the inductance and selecting the optimum bridgewire parameters to match the circuit, and by improving the structure of the explosion chamber and using the magnetic pinch effect.