

定产生影响。因此，无论是频率稳定或是功率稳定的激光器都应消除光耦合效应。在设计激光谐振腔时必须注意这一点。

本实验是在小型的稳频 He-Ne 激光器上进行的，但其分析结果在原则上也适用于全内腔 He-Ne 激光器及其他各种类型的激光器。

### 参 考 文 献

[1] K. Tanaka and T. Kurosawa, Japan, *J. Appl.*

*Phys.*, 15(1976), 2271.  
 [2] 中国计量科学研究院激光组,《物理》,2(1973),40.  
 [3] R. H. Lovberg, in *Fundamental and Applied Laser Physics*, Wiley, New York, 1973, 921.  
 [4] 天津大学精仪系,《激光技术》,科学出版社,1972.  
 [5] 中国计量科学研究院激光组,《物理》,2(1973),35.  
 [6] W. R. C. Rowley and D. C. Wilson, *Appl. Optics*, 11(1972), 475.  
 [7] 《气体激光》(下册),上海人民出版社,1976.

# 高温高压模拟实验技术

邢 梯 良 高 才 生

## 一、引 言

高温高压实验研究是近代发展起来的一门新科学。目前采用的手段和解决的课题愈来愈多。从所研究的内容看,有高压物理,如高压下物质的行为和性质的变化;有高压化学和高温化学,如在高温高压条件下,物质的相变和体系的相平衡,新矿物和贵重工业矿物的合成;在高压下,X射线衍射研究;地质领域中利用高温高压模拟实验,研究矿物、岩石形成的物理化学条件,以及地壳深部过程和岩浆演化等。最近几年来,国外有利用爆炸丝产生高温和高能密度对爆炸的化学环境进行模拟,利用爆炸丝对水下爆炸现象进行模拟等。

我们进行的高温高压模拟实验是为研究地下爆炸空腔形成的机理及其物理化学过程而提出的一项科研项目。现象本身是一个极为复杂的物理化学过程,我们试图以不太复杂的实验设备,对爆炸现象作模拟研究。客观世界具有物质的统一性,这种统一性提供了模拟实验的客观可能性。我们现有的高温高压模拟装置(俗称高压釜),只能作近似的局部模拟,模拟地

下爆炸空腔形成的后期物理化学过程,以便进行现象分析,并试图建立爆炸能量与介质样品的熔化物,汽化物,气体及其空腔大小的定性与定量关系。

## 二、高温高压模拟实验技术

### 1. 概 述

我部高温高压模拟装置(高压釜)是一个密封式电弧瞬时加热装置。为收集模拟实验过程

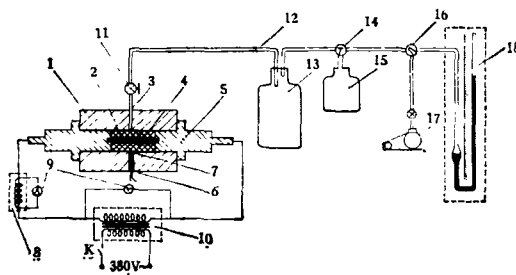


图 1 模拟装置图

- 1——高压釜胴体; 2——样品; 3——排气孔; 4——电极; 5——密封塞; 6——测温孔; 7——热电偶; 8——交流互感器; 9——电流、电压自动记录仪; 10——交流弧焊机; 11——针型阀门G; 12——真空管; 13——缓冲瓶; 14——玻璃三通; 15——取样瓶; 16——玻璃四通; 17——真空泵; 18——U型水银压力计。

中高压釜内的气体,以及压力计算,在高压釜

外,建立一个真空体系,并与高压釜圆筒型中心腔室(俗称“爆室”,下文同)连接,中间由针型阀门“G”控制(图1)。在模拟实验时(俗称“零时”,下文同),高压釜密封为孤立体系,与外界、真空系统隔绝。

目前我们借用 BA-500 型交流弧焊机作为瞬时放电加热源,其额定工作电流为 300—700 安培,工作电压为 60 伏。圆柱形样品放置在爆室内,焊机两个电极插入样品中心孔,并在样品中心起弧放电,使样品熔化和汽化,形成空腔。为了保证电极瞬时放电起弧,电极磨成圆锥型,并微微接触。这样,焊机一旦通电,两电极接触部分立即烧失,自动拉开弧距,形成电弧。

电弧温度瞬时可达数千度。一般打弧时间控制在数秒钟内。电弧电流用电流互感器,借助于 LD9 型交流电流自动记录仪测定(图2),

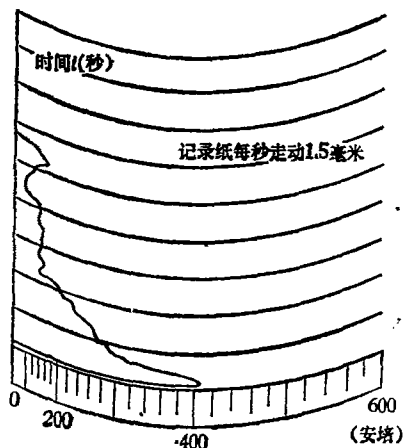


图2 测定电流图

电弧电压由 LD9 型交流电压自动记录仪记录

$$E = \int_0^t IV dt$$

$$= \sum_1^n I_n \cdot V_n \cdot \Delta t_n \text{ (焦耳)}.$$

## 2. 高温条件的建立

电弧放电是高压釜能量的来源。电弧装置一旦通电,两针型电极接触点,由于产生大量电阻热而被烧失,形成空气间隙,间隙强烈地受热而发生热电离,使中性原子变成带电离子和电子。同时,被加热的阴极上有高速的电子飞出(热发射电子),撞击空气中的分子和原子,使其

物理

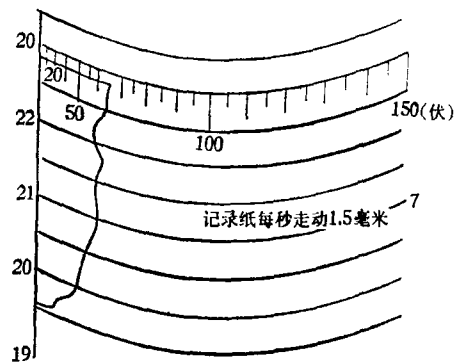


图3 测定电压图

发生碰撞电离,产生(阴、阳)离子和自由电子。这时在电场的作用下,带电微粒按一定的方向移动。阳离子移向阴极并与阴极碰撞;阴离子和自由电子移向阳极并与阳极碰撞,碰撞结果更加速了电子的发射,最终使两电极间的气体剧烈电离而产生电弧。在放电空间,有与气相接触的固体或者液体也可以成为带电质点的来源。

为了满足起弧的需要,电弧装置必须具有降压的外特性曲线(图4),这样才能保证引弧

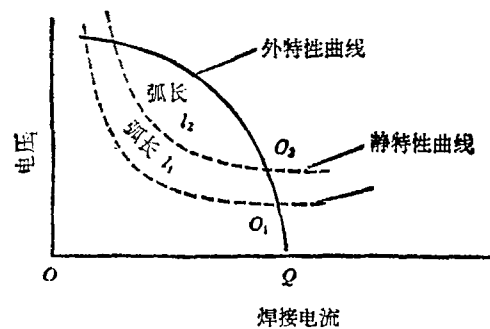


图4 外特性曲线图

时,供给较高的引弧电压和较小的电流,当电弧稳定燃烧时,电弧电流就增大,而电压急剧下降到工作点电弧电压。

电弧装置的外特性曲线陡降一些好。这样,模拟实验中,即使电极被烧损,电弧长度不断拉长的情况下,电弧电流变化不太大(见图4)。

目前,我们常用的电极有  $\phi 6$  毫米的碳棒(光谱纯石墨电极)和钨棒。实验证明,上述电极起弧时,弧温是足以使碳棒或钨棒熔化和汽

化。在常压下,钨的熔点为 3380°C,沸点为 6000°C<sup>[1]</sup>;石墨的沸点为 3540°C<sup>[3]</sup>。这就表明钨极弧温可在 6000°C 以上,碳极弧温在 3540°C 以上。

用光学高温计测得碳极的极点温度为 3500K 在电弧透明火焰中,加入钠盐 (NaCl) 作指示剂,测得碳极弧温为 4200K。又用光谱谱线计算,测得电弧温度高达 6800K ~ 8000K。这样高的电弧温度,对于模拟地下爆炸后期的现象来说是可行的。

### 3. 高压釜爆室压力状态的形成

高压釜装置形成高压状态,可有两种途径:一是在高压釜爆室内充以气体(如水或者其他气体);另一是利用高温条件,使样品汽化或分解出气态物质。在我们的模拟实验中,高压釜压力的产生是属于第二种类型。一般来说,由于岩石介质不同,样品分解、汽化形成气态物质,产生的爆室压力大约在几十至几百个大气压。

例如石灰岩介质,其主要成份是  $\text{CaCO}_3$ , 还含有少量  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等。文献表明,石灰岩在 400°C ~ 500°C 就开始部分分解出  $\text{CO}_2$ <sup>[2]</sup>, 当温度至 800°C ~ 900°C<sup>[3]</sup> 时,迅速分解成  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$ 。由于  $\text{CO}_2$  气体的出现,抑制  $\text{CaCO}_3$  继续分解,而且在  $\text{CO}_2$  气体为 40 个大气压,温度近于 1220°C 时,  $\text{CaCO}_3$  本身开始熔化呈液态。当温度继续上升时,  $\text{CaCO}_3$  可以汽化。但在一般情况下,  $\text{CaCO}_3$  先分解为  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$ 。而分解出的  $\text{CaO}$  在 2570°C 时被熔化,温度至 2850°C 时就会被汽化<sup>[3]</sup>。我们对模拟实验中产生的汽化物进行了化学分析。分析结果表明,  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaO}$  在本高压釜的温度条件下,是可以汽化呈气态物质,从而形成高压状态。介质中的结晶水也可以形成水蒸汽,形成高压。

对于花岗岩样品,其主要成份是  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 还有其他一些氧化物。  $\text{SiO}_2$  的熔点为 1100 ~ 1400°C<sup>[2]</sup>, 沸点为 2230°C<sup>[3]</sup>;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔点为 2050°C<sup>[3]</sup>, 沸点为 2250°C<sup>[3]</sup>。因此,花岗岩介质在本高压釜的温度条件下,同样可以液化并汽化呈气态物质。

### 4. 高压釜爆室在起弧燃烧刚结束时的压力计算

(1) 对花岗岩样品的压力估算

(a) 用气体扩散法求爆室非冷凝气体的分压力。

在高压釜爆室起弧燃烧刚结束时(俗称流体动力学阶段),立即打开阀门“G”(见图一)。于是爆室中非冷凝高压气体迅速充入真空系统,此时因温度下降至室温,可冷凝的气态物质已被冷却成固态。此时 U 型水银压力计的压力,表示整个系统非冷凝气体的分压力。这里我们近似应用理想气体状态方程,可得下列方程:

$$P_1^* V_1 = GRT_1,$$

$$P_1^{**}(V_1 + V_2) = GRT_2,$$

式中:  $P_1^*$ ——流体动力学阶段,空腔中非冷凝气体的分压力

$P_1^{**}$ ——高压气体充入真空系统后,整个系统中,非冷凝气体分压力

$V_1$ ——爆室体积(包括原样品与爆室的间隙以及“零后”样品空腔)

$V_2$ ——真空系统体积

$G$ ——爆室内非冷凝气体量

$R$ ——为非冷凝气体的气体常数

$T_1$ ——流体动力学阶段的温度

$T_2$ ——室温(293K)

则

$$P_1^* = \frac{P_1^{**}(V_1 + V_2)}{V_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}.$$

目前,本高压釜爆室的测温装置尚不完善,因此,在做花岗岩样品模拟实验时,为了估算爆室压力状态,现借用美国某试验中流体动力学阶段的温度 1200 ~ 1500°C<sup>[6]</sup>(我们取其平均值 1350°C)来代替温度  $T_1$  的数值。我们选取五个花岗岩样品(见表3)做模拟实验,计算其平均压力,其结果列于表 1 中。表中看出,花岗岩模拟实验,非冷凝气体的平均分压力  $P_1^* = 13.5$  大气压。

(b) 根据花岗岩汽化量,求爆室花岗岩气体的平均分压力  $P_2^*$ 。

上述五个花岗岩样品平均汽化量为 0.588 克(见表3)。爆室温度  $T_1$  仍取 1350°C(即 1623K)。

那么

$$P_2^* = \frac{nKT}{V_1}$$

$$\text{式中: } n(\text{分子数}) = \frac{0.588}{67} \times 6.06 \times 10^{23}$$

$$= 5.32 \times 10^{21}$$

67——花岗岩的克分子量。

$6.06 \times 10^{23}$ ——亚佛加得罗常数。

$K = 1.38 \times 10^{-16}$ (尔格/度)——波耳茨曼常数。

$V_1 = 46.55$  毫升——爆室容积。

代入上式, 得:

$$P_2^* = 26.2(\text{大气压}).$$

上述计算中, 假定花岗岩气体在实验过程中没有被周围环境所冷凝, 但实际并非如此, 因此花岗岩气体的平均分压力  $P_2^*$  可能偏大。

这样, 对于上述选定的五个花岗岩样品, 在模拟实验刚结束的瞬间, 其爆室压力的平均值  $P$  应是非冷凝气体的平均分压力  $P_1^*$  与花岗岩气体的平均分压力  $P_2^*$  之和, 即  $P = P_1^* + P_2^* =$

表 1 五个花岗岩样品爆室平均压力

花岗岩样品号	花岗岩汽化量(平均)(克)	爆室体积 $V_1$ (毫升)	真空体系 $V_2$ (毫升)	爆室温度 $T_1$ (K)	真空体系温度 $T_2$ (K)	U型压力计 $P_1^*$ (毫米汞柱)	非冷凝气体分压力 $P_2^*$ (巴)	花岗岩气体分压力 $P_2^*$ (巴)	爆室总压力 $P$ (巴)
平均值	0.588	46.55	428.5	1623	293	181	13.5	26.2	39.7

39.7 大气压(见表 1)。

(2) 对石灰岩样品的压力估算

对于石灰岩样品模拟实验刚结束瞬间的压力计算, 这里仅举两例, 即石灰岩 0—2 号样品和 0—3 样品。

同样, 设石灰岩空腔形成过程流体动力学

阶段的温度为  $T_1$ 。目前我们选用文献[5]中报导的,  $\text{CO}_2$  气体压力为 40 大气压的  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$  体系中,  $\text{CaCO}_3$  液化温度为  $1220^\circ\text{C}$  来代替  $T_1$  数值。这样, 可以应用上述同样的方法, 计算出 0—2 号和 0—3 号石灰岩样品的压力(见表 2)。

表 2 石灰岩样品爆室压力

石灰岩样品号	加入能量(克 TNT)	样品失重(克)		零后爆室 $V_1$ (毫升)	真空系统 $V_2$ (毫升)	零后至放气间隔	水银压力计 $P_1^*$ (毫米汞柱)	爆室温度 $T_1$ (K)	室温 $T_2$ (K)	爆室 $\text{CO}_2$ 气体分压力 $P_1^*$ (巴)	爆室 $\text{CaO}$ 和 $\text{CaCO}_3$ 气体分压力 $P_2^*$ (巴)	爆室总压力 $P_1 = P_1^* + P_2^*$ (巴)
		$\text{CaCO}_3$ 和 $\text{CaO}$ 汽化物	$\text{CO}_2$ 气体量									
0—2	25.1	0.715	15.1	56.5	14300	2 分钟	462	1493	300	770	28.6	798.6
0—3	41.4	0.690	21.9	71.0	14300	70 分钟	670	1493	300	888.4	27.8	916.2

由表 2 看出, 大量的  $\text{CO}_2$  气体是石灰岩样品形成空腔压力的主要原因。这些  $\text{CO}_2$  气体可能主要是在冷却以前早已形成的, 而又不能按平衡态来计算。究竟大量的  $\text{CO}_2$  气体是在流体动力学阶段之前还是之后产生的, 是平衡态还是非平衡态冷却? 有待今后对爆室温度和压力的正确测定后, 加以进一步研究。因此上述石灰岩压力计算仅供参考。

### 三、实验结果

我们曾对某地花岗岩样品和石灰岩样品分

别做了模拟实验, 其部分实验结果列于表 3、表 4。

由实验结果看出, 数据的波动性比较大, 特别是花岗岩样品的规律性更差。这是我们研究空腔物理化学过程时出现的一个很大的不足之处。其原因可能是多方面的。看来, 一方面是实验次数较少, 还没有找出统计规律性; 另一方面, 可能在每次实验中, 由于加入能量的功率变化较大而引起物化过程不同; 再一方面由于岩样的不均匀性, 可能带来实验数据的波动。总之, 在许多方面都要做进一步的探讨。

表 3 花岗岩样品实验结果

样品编号	电极类别	加入能量 (克 TNT) 或 (千卡)	熔化物		汽化物		气 体		空腔平均半径 (厘米)
			重 量 (克)	组 份	重 量 (克)	组 份	重 量 (克)	组 份	
10	钨棒	15	5.133	同原样	1.615	同原样	0.196	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> CO, CH <sub>4</sub>	2.234
12	钨棒	21	7.714	同原样	0.112	同原样	0.111	同 上	2.234
13	钨棒	21	6.282	同原样	0.231	同原样	0.070	同 上	2.234
14	钨棒	17	8.264	同原样	0.163	同原样	0.152	同 上	2.234
15	钨棒	17	6.592	同原样	0.818	同原样	0.050	同 上	2.234

表 4 石灰岩样品模拟实验结果

样品编号	电极类别	加入能量 (克 TNT) (或千卡)	熔化物			汽化物			气 体		空 腔		热分解形成生石灰 (CaO) (克)
			重 量 (克)	组 份		重 量 (克)	组 份		重 量 (克)	组 份	体 积 (毫升)	直 径 (厘米)	
				CaCO <sub>3</sub> (%)	CaO (%)		CaCO <sub>3</sub> (%)	CaO (%)					
2	碳棒	38.00	22.21	64.0	36.0	2.195	13.43	72.79	6.424	主要是 CO <sub>2</sub>	4.774	1.047	2.63
3	碳棒	10.21	5.816	64.2	35.8	0.875	13.43	72.79	2.803	主要是 CO <sub>2</sub>	1.834	0.760	2.50
5	碳棒	33.80	23.51	64.1	35.9	2.105	13.43	72.79	8.015	主要是 CO <sub>2</sub>	5.582	1.104	3.73

#### 四、结 束 语

本文主要介绍我们建立的高压釜模拟实验技术。对于报告中所列一些数据,仅供参考。

本高压釜的能量损耗较明显。其中主要是由于样品及汽化物质与周围导热率相当高的金属壁的导热损失和换热损失。另外,还有爆室间隙对压力的损失,以及电极熔化,烧损的能量损失。我们认为,计算高压釜能源给予样品的能量(即有效能量),以建立有效能量与汽化量,液化量及气体量等物理量的关系,才比较符合模拟实验的要求。若取花岗岩的汽化能为2800卡/克,液化能为500卡/克。那么对于表3中花岗岩五个样品,其汽化和熔化的能量,平均约占加入能量的27.6%;若由考虑装置的能量损失来计算有效能量,那么,平均有效能量约占总能量的30%。

另外,本高压釜采用的电弧放电装置的额定功率较低,而且电弧电流在放电过程中,下降很厉害,实际功率更低。目前我们已开始使用

新型高压釜装置,其装置的一个放电电极在起弧过程中,可以调节电弧弧距,以弥补电极的烧损。这样电弧电流不至于陡降很厉害。

今后,我们将进一步改进高压釜的测量系统,特别是爆室的温度和压力的测量。同时要改进我们的能源装置。我们计划采用大型瞬时高压放电装置,即所谓爆炸丝的方法进行模拟。

我们的工作一直在程开甲教授的指导和领导下进行的。贵阳地化所王道德等同志,一直参加本项目的研制和实验,给我们帮助很大,在此表示感谢。

参加本工作还有吕克谋、蔡华昌、铁子杰、钟永华同志。

#### 参 考 文 献

- [1] [苏联] K. П. 雅阔夫列夫, 简明物理技术手册, 第一卷, 中国工业出版社, 1966, p. 442.
- [2] "Peaceful Nuclear Explosion", vol. 2.
- [3] 苏联化学手册, 第一册, 科学出版社, 1958, p. 867.
- [4] «原子能» (Atomkernenergie), 第五卷, 第10期, 1960.
- [5] Wu-Liang Huang and Peter J. Wyllie, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40-2 (1976), p. 129-132.