

# 高增益螺旋形爆炸磁通量压缩发生器<sup>①)</sup>

龚兴根 谢卫平 蔡明亮 刘正芬 孙奇志 戴文锋

(中物院流体物理研究所 成都 610003)

**摘要** 从爆炸磁通量压缩发生器的工作原理和有效利用炸药能入手,探讨爆炸磁通量压缩发生器运行性能的影响因素和设计制造过程应注意的问题

**关键词** 爆炸磁通量压缩发生器 螺线管 通量损耗 高场效应 内部电压

中图法分类号 O 361

## 1 引言

爆炸磁通量压缩发生器是一种把炸药的化学能转换成电磁能的脉冲能源装置,它根据磁通守恒的原理,借助炸药爆炸,驱使导电回路快速变形,降低回路电感和压缩初始磁通,从而提高负载中的输出电流和能量。根据回路的形状,可分为螺旋形发生器、同轴形发生器、条形发生器、平板形发生器、圆盘形发生器和圆柱形内爆发生器等。由于螺旋形发生器有较大初始电感,从而有较大的电流和能量放大,因此这种发生器已被广泛应用于特殊的物理实验中。这种发生器的运行性能与通量损耗、高场效应和内部电压等有关,高增益螺旋形发生器也应考虑有效利用炸药能,因此作者将从发生器的工作原理和有效利用炸药能入手,探讨这种关系和设计制造中应注意的问题

## 2 螺旋形爆炸磁通量压缩发生器的工作原理

螺旋形发生器主要由初始能源、短路开关、中心填充高级炸药的金属管、螺线管和负载组成,如图1所示。发生器工作时,电容器组C对螺线管2金属管3和负载5放电,在回路中达到极大电流时,雷管6点火,引爆管中炸药4炸药爆轰产物的压力驱使金属管向外扩张,使短路开关1闭合,发生器开始运行,随着金属管中爆轰波向右移动,形成的圆锥形金属管的外沿与螺线管的接点不断地沿着螺线管向右移动,螺线管的电感不断减少,螺线管与金属管之间的磁通不断被压缩,负载中的电流和能量也得到放大。它的运行过程可以用下列集中参数方程描述:

$$\frac{d}{dt}(LI) + IR = 0 \quad (1)$$

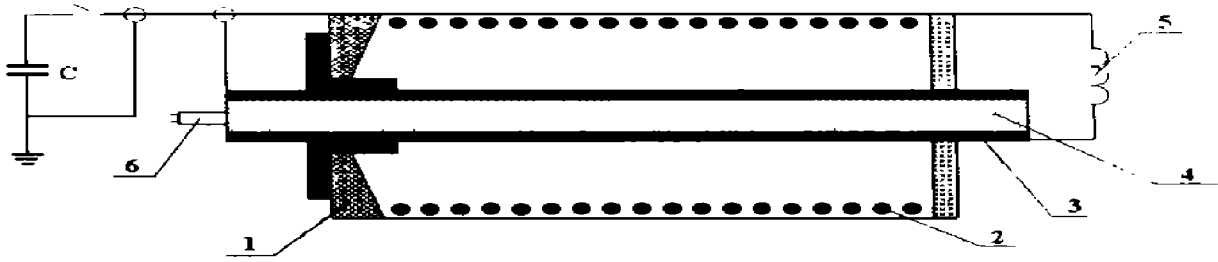
其中:  $L = L_G + L_H$ ,  $R = R_G + R_H$ ,  $L_G$  和  $R_G$  为发生器的电感和电阻,  $L_H$  和  $R_H$  为负载的电感和电阻。解方程(1)可得到负载中的电流

$$I = I_0 \tau \quad (2)$$

其中:  $I_0$  为发生器短路开关闭合时回路中的电流,  $\tau = L_0/L$  为电感压缩比,  $L_0$  为短路开关闭合

①) 龚兴根:男,1938年12月生,研究员。

1997-01-29收到原稿,1997-08-10收到修改稿。



1 Closure switch; 2 Solenoid; 3 Metal tube; 4 Explosive; 5 Load; 6 Detonator

图 1 初始能源 (C)和爆炸磁通压缩发生器

Fig 1 Initial energy source and exploding magnetic flux compression generator

时发生器电感和负载电感之和,  $U = \exp(-\int_0^t \frac{R}{L} dt)$  为能量效率。负载中储存的磁能  $W$  为

$$W = W_0 T^2 \tag{3}$$

式中:  $W_0$ 为发生器电感 ( $L_0$ )中储存的初始磁能。从能量转换过程看: 爆炸磁通量压缩发生器运行过程中, 炸药的化学能首先转换成金属管向外飞行的动能, 金属管向外飞行反抗磁压做功, 又把管子的动能转换成电感性负载中的磁能 (电阻性负载中的电能)。如果把方程 (1)变换成方程式

$$-\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dt} = R I^2 + \frac{d}{dt} (\frac{1}{2} L I^2) \tag{4}$$

可直接看出, 爆炸产物的压力 (通过管子) 反抗磁压 (即减少电感) 做的功等于电阻  $R$  上消耗的电能与回路磁能的增加之和

如果  $R = 0$  通量守恒, 即有

$$I = I_0 T \tag{5}$$

$$W = W_0 T^2 \tag{6}$$

事实上, 回路中的电阻不可能等于 0 从方程 (1)中可以看出, 当  $-\frac{dL}{dt} > R$  时, 负载中电流放大。从方程 (4)中可以看出, 当  $-\frac{dL}{dt} > 2R$  时, 负载中磁能增加。

从上面分析来看, 发生器的电阻大小是高增益螺旋形发生器性能的关键。发生器的电阻实际上表示发生器欧姆电阻和其它形式造成通量泄漏的象征性电阻, 因此降低欧姆损耗和减少其它磁通量损耗是高增益螺旋形发生器设计应寻求的。

### 3 有效利用炸药能

设计高增益螺旋形发生器时, 首先应考虑充分利用炸药能。常数截面的炸药装药表示恒定的能量输入, 为了有效地利用炸药能, 金属管应该反抗恒定的磁压 ( $P = \frac{H^2}{2}$ ) 做功<sup>[1]</sup>, 这就要求膨胀的圆锥形金属管面对一个恒定的磁通量密度  $B$ ; 又由于金属管单位时间扫出常数体积, 因此如果忽略末端效应, 应该有

$$\frac{1}{B} \frac{dB}{dt} = V \tag{7}$$

式中:  $V$ 为常数,  $s^{-1}$ 。积分可得

$$B \approx B_0 e^{Vt} \tag{8}$$

(8)式要求螺旋形发生器的螺线管按指数变化的螺距来完成, 即匝密度用下式表示

$$n(z) = n_0 e^{-kz} \quad (9)$$

其中:  $n(z)$  为单位长度的匝数,  $k$  为指数常数, 它的值应和  $V$  值相匹配。如果  $k$  值太小, 在圆锥上的  $B_{\max}$  随着时间增加, 发生器运行到最后将过载, 能量增益将增加, 但热力学和化学效率将损失; 如果  $k$  值太大, 则  $B_{\max}$  随着时间降低, 导致小于极大可能的增益和效率。

在实际的情况中, 指数变化螺距的螺线管绕制是困难的, 但可以采用近似的方法, 把螺线管分段, 每段采用常数螺距, 而相邻段线圈螺距可以几何级数增加。如我们研制的 7-4M FCG<sup>[2-3]</sup> 只有 1.8kg 的小型装置, 电流和能量放大分别达到 453 和 24.5 倍, 就是采用这种方法绕制螺线管的 (见表 1)。

表 1 7-4M FCG 螺线管参数

Table 1 7-4M FCG helix parameters

分段号	段长 /mm	绕线根数	匝数	螺距 /mm
1	12.75	1	17	0.75
2	12.75	2	8.85	1.5
3	12.75	4	4.425	3.0
4	12.75	8	2.2125	6.0
5	16.87	16	1.344 1.406	12.0

#### 4 通量损耗

在方程 (1) 中, 电阻代表着通量的损耗, 而这种电阻包括发生器的欧姆电阻和其它形式造成通量泄漏的象征性电阻。随着电流的增加, 不断地增加绕线宽度可以减少欧姆, 按几何级数增加螺距的方法, 使不断增加绕线宽度成为可能, 7-4M FCG 装置就是不断地增加绕线根数来增加绕线宽度达到的。其它形式造成通量泄漏的原因较多, 其中比较明显的是由于机械加工的原因造成接触点的跳匝和滑动接点由于趋肤深度和导体缺陷波动深度造成的通量损耗。

机械加工造成的接触点的跳匝原因很多。首先, 如果螺线管与金属管不同轴, 接点的通量损耗剧烈地增加, 设计和制造发生器时螺线管应满足如下的偏心公差

$$\Delta < \frac{1}{4} p \tan \theta \quad (10)$$

式中:  $p$  为螺线管绕线的螺距,  $\theta$  为金属管的飞散角。其次, 端部的雷管不在中心也可造成跳匝, 因此雷管的偏心公差  $e$  应满足

$$e < \frac{p}{8a} \sqrt{z^2 + r^2} \quad (11)$$

式中:  $a$  为金属管半径,  $z$  为爆轰波经过的距离,  $r$  为圆锥与螺线管接点处的半径。这个公差主要在发生器开始工作时起作用。再次, 金属管的壁厚不均匀也可造成通量损耗, 通常要求壁厚公差满足以下不等式

$$e_w < \frac{1}{4} w \frac{p \tan \theta}{aX} \quad (12)$$

式中:  $w$  为金属管的壁厚,  $X = (r/a) - 1$  最后, 炸药密度和成分均可造金属管的不对称飞散, 因

此炸药密度和成分均要求均匀。

随着爆轰波向前移动,圆锥形金属管和螺线管的接点也沿着螺线管绕线向前滑动,由于趋肤深度和导体缺陷造成的波动深度也可能造成通量损失,因此金属管表面要求加工光滑,以使金属管飞散过程尽量保持光滑的面。H. Knoepfel<sup>[4]</sup>给条形发生器推导了一个接点通量损耗的公式

$$\frac{d\Phi}{dt} = - 2SD B \quad (13)$$

这种损耗与损耗深度  $S$  (包括趋肤深度和导体缺陷造成的波动深度)以及爆速  $D$  成正比,根据他的计算,如果整个截面磁场是常数的情况,在压缩期间,磁场放大比无损耗情况下 ( $S=0$ ) 降低 40%,可见这种损失是很大的。螺旋形发生器比条形发生器问题更多,因为圆锥金属管与螺线管之间有效接触角很小,而且接点附近的电流分布很复杂。

螺旋形发生器的滑动接点沿着螺旋线移动,螺线管和金属管之间的磁通是通过具有环形电流的金属管压缩的,金属管的纵向裂缝阻止环形电流的流动,因而也能造成通量的损耗,因此要求金属管膨胀到与螺线管接触时不发生破裂。金属管破裂情况一般在设计发生器时,事先应由分幅照相实验确定,根据文献 [1] 的实验结果表明:对于 6061-T6 Al 合金管,当膨胀到 1.4 倍半径时有破裂的征状,但整个的发生器实验表示膨胀比分别为 1.26 和 2.4 时几乎有相同的结果。根据 A. E. Binder<sup>[5]</sup> 实验结果表明:对铜金属管,膨胀到 2 倍时开始破裂,并且铜管开始的微观结构影响破裂,机械加工的纹理影响破裂,压铸成型或板弯曲成的管子比机械加工的好。整个的发生器实验表明:金属管膨胀到 2.13 倍时,装置的输出性能较好。一般的情况下,发生器选择螺线管的直径为 1.8~2.0 倍金属管的直径。

## 5 高场效应

Fowler<sup>[6]</sup>和 Herlach<sup>[7]</sup>都认为电流密度超过  $1\text{MA/cm}$  时发生器性能大大地降低。 $1\text{MA/cm}$  的电流密度导体表面产生  $100\text{MA/m}$  的磁场强度,这样大的磁场以两种方式和导体产生相互作用:第一,它们使导体经受  $p = H^2/2$  的磁压力,只靠惯性约束产生  $100\text{MA/m}$  场是不可能的,至今超过  $240\text{MA/m}$  的同轴场只有在炸药约束的体系中产生;第二,在高场的环境中,导体表面温度升高,温升 ( $\Delta T$ ) 和到达峰值场 ( $H$ ) 的时间无关,但和波形有关。对于正弦波形,金属在第一峰值的温升由下式给出

$$\Delta T \approx 19 \times 10^6 H^2 \quad [H / (\text{MA/m})] \quad (14)$$

根据 (14) 式,对于黄铜和铜,在  $48\text{MA/m}$  磁场时,导体表面熔化。因此,设计螺旋形发生器通常要求最后的导体的电流密度不超过  $1\text{MA/cm}$ 。

## 6 发生器内部电压

发生器运行期间,防止内部电压的击穿是一个困难的问题。金属射流能造成导体之间的短路,接点或金属和炸药部件的缺陷均能使射流出现的机会上升。螺线管和金属管之间的气体经常被压缩到  $0.1\text{GPa}$  和冲击加热到弱离子化的程度。匝与匝之间也可能出现击穿的可能。这些击穿都可能造成电流短路路径的短路损失通量。Fowler 根据经验认为螺旋形发生器内部电压不可能超过  $100\text{kV}$ ,对于足够大的发生器可以扩展到  $500\text{kV}$ ,因此设计发生器时发生器内部电压  $I(dL_g/dt)$  瞬时值不能超过  $100\text{kV}$ ,如果要超过,发生器中应充填  $\text{SF}_6$  等气体,如果可能时,

内部元件采用固体介质绝缘, 但绝缘层不能太厚, 否则影响移动接点的接触性能, 这完全根据经验而定。

## 7 结束语

综上所述, 螺旋形爆炸磁通量压缩发生器输出性能的影响因素较多, 也很复杂。为了得到高增益的螺旋形爆炸磁通量压缩发生器, 设计和制造时, 必须根据经验和以上的分析仔细考虑炸药能的充分利用、发生器的通量损耗、高场效应和内部电压击穿等问题

### 参 考 文 献

- 1 Cummins D B. Electrical Pulses from Helical and Coaxial Explosive Generators. In: 1th Int Conf on Mega-gauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Italy: [s n ], 1965. 451
- 2 Gong Xinggen, et al. A Compact Magnetic Flux Compression Generator Driven by Explosives. In: 4th Int Conf on Mega-gauss Magnetic Fields Generation and Related Topics. USA: [s n ], 1986. 417
- 3 陈学印, 龚兴根, 等. 爆炸磁通量压缩装置的研究. 见: 王淦昌论文集. 北京: 科学出版社, 1987. 151
- 4 Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields. North-Holland Publishing Company, 1970. 189
- 5 Binder A E, et al. Effects of Metallurgical Microstructure of Amatures on Compressed Magnetic Field Generators. SAND-79-0890C
- 6 Fowler C M, et al. Introduction of Explosive Magnetic Flux Compression Generator. LA-5890-MS, 1975
- 7 Herlach F, Knoepfel H. Mega-gauss Fields Generated through Explosive Driven Flux Compression Devices. Rev Sci Instr, 1965. 36. 1088

## HELICAL EXPLODING MAGNETIC FLUX COMPRESSION GENERATOR WITH HIGH GAIN

Gong Xinggen, Xie Weiping, Cai Mingliang,  
Liu Zhengfen, Sun Qizhi, Dai Wenfeng  
(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Chengdu, 610003*)

**ABSTRACT** In this paper the working principle of explosive magnetic flux compression generator and how to make use of explosive energy efficiently are introduced. Then the authors discuss the influence factors of operating performance of explosive magnetic flux compression device and the problems in design and fabrication are pointed out.

**KEY WORDS** explosive magnetic flux compression generator; solenoid coil; flux loss; high field effect; internal voltage