文章编号：1000-5773(2012)04-0433-09

磁爆加载下强磁体的磁场研究*

夏　明[1,2]，黄正祥[1]，顾晓辉[1]，王叶中[1]

（1.南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室，江苏南京　210094；
2.总参谋部工程兵科研三所，河南洛阳　471023）

摘要：为了研究磁爆压缩发生器加载下强磁体形成的磁场，对磁爆加载过程进行分析，建立了磁爆加载下强磁体形成磁场的理论模型。按照此模型，对6种不同结构强磁体的磁场进行对比研究，得到了强磁体的磁场变化规律。结果表明：在加载初始阶段，磁爆压缩发生器的自身参数为主要影响因素，各磁体的磁场峰值和范围差别较小；在磁通压缩阶段，电路过程的改变使得磁体结构的影响逐渐显著，各磁体的磁场峰值和范围发生了明显变化；磁体结构对磁场的空间分布具有决定性作用，磁场分布不受加载过程的影响。

关键词：磁爆压缩发生器；磁场；理论模型；强磁体
中图分类号：O361.3　　**文献标识码**：A

1　引　言

磁爆加载弹药技术是目前提升常规武器毁伤效能的新概念技术之一。它突破了传统的爆炸驱动毁伤元模式，利用爆轰到强磁场过程中较高的能量转化效率和易于控制的磁场聚焦方法，形成多种形态的高效毁伤元，进而对目标进行打击。磁爆加载弹药技术可使炸药的能量利用率提高30%，进而大幅提高弹药的毁伤能力。磁爆加载的能源是磁爆压缩发生器(Flux Compression Generator，FCG)。FCG是一种可以把炸药的化学能转换成电磁能的脉冲能源装置，具有体积小、结构紧凑、适应性好等特点[1]，能加载微亨或纳亨级电感负载，获得从几万安到数百兆安范围的脉冲电流[2-4]，已广泛应用于尖端军事和科研领域，如电磁发射[5-6]、磁动力加载的高能量密度物理实验[7]等。将FCG应用于磁爆加载弹药，通过FCG加载强磁体产生强磁场，进而驱动内置材料，使其变形、压垮和熔化，最后形成高速熔融态毁伤元实现对目标进行作用的研究，还未见报道。

按照毁伤元对驱动能力的要求及其自身的几何尺寸，本研究设计了6种不同结构的强磁体，对FCG加载6种强磁体形成的磁场进行研究，分析磁场的变化规律，为下一步进行磁场与内置材料相互作用研究提供理论指导。

2　理论模型

2.1　磁爆加载强磁体的作用过程

FCG与强磁体按图1连接。图1中：C为电容器组，S为撬动开关，G为火花间隙开关；R_1、R_2、R_3和L_1、L_2、L_3分别为传输线、FCG、强磁体的电阻和电感。FCG经火花间隙开关，通过电容器组放电获

* **收稿日期**：2011-01-06；**修回日期**：2011-02-17
基金项目：国家部委预研基金项目(51326030104H)
作者简介：夏　明(1981－)，男，博士研究生，工程师，主要从事磁爆加载弹药技术理论研究.
E-mail：hei_suo_jing@yahoo.com.cn
通讯作者：黄正祥(1967－)，男，博士，教授，主要从事高效毁伤理论及工程研究. E-mail：huangyu@mail.njust.edu.cn

得种子电流。当种子电流达到峰值时,撬动开关闭合,电容器组短路,同时,在爆炸作用下,FCG 的初始磁通被迅速压缩,电感急速下降,总电流呈指数增长,加载强磁体形成强磁场。

由图 1 中的电路模型可以发现,FCG 加载强磁体的过程分为:初始磁通形成阶段和磁通压缩阶段。在初始磁通形成阶段,电容器组放电,产生脉冲电流,电路可简化为 RLC 电路。设电容器组、火花间隙开关和撬动开关为理想元件,U、R、L、C、I 分别为电容器组充电电压、电路总电阻、电路总电感、电路总电容和电路总电流,则总电流 I 可表示为

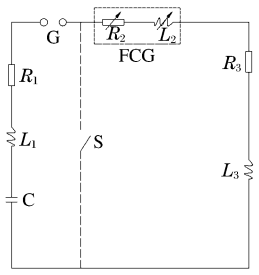


图 1 电路模型

Fig. 1 The circuit model

$$I(t)=\frac{U}{\omega L}\exp(-\beta t)\sin(\omega t) \tag{1}$$

式中:$\beta=R/(2L)$, $\omega_0=(LC)^{-1/2}$, $\omega=(\omega_0^2-\beta^2)^{1/2}$, t 为时间。在磁通压缩阶段,撬动开关闭合,脉冲电容器组被短路,形成了 FCG 和强磁体的闭合回路。忽略 FCG 的磁通损失,设撬动开关闭合瞬时的总电流为 I_0,电感为 L_0,则总电流 I 可表示为

$$I(t)=I_0\frac{L_0}{L(t)}\exp\left(-\int_0^{t'}\frac{R(t')}{L(t')}\mathrm{d}t'\right) \tag{2}$$

根据 FCG 加载强磁体两个阶段总电流的变化趋势,结合强磁体结构,可获得电流密度分布规律,从而可对强磁体形成的磁场进行分析,由此可以看出问题的关键在于得到(1)式和(2)式中的电感和电阻参数。

2.2 强磁场的电感

2.2.1 磁爆压缩发生器的电感

许多学者对 FCG 的电感进行过详细分析,本研究采用其中部分计算公式[8-10]。FCG 的电感由各段定子线圈和电枢的自感、互感组成。设 FCG 的总电感为 L',定子线圈共分为 N_s 段,则 L' 为

$$L'=\sum_{i=1}^{N_s}L_i'+\sum_{i,j=1}^{N_s}M_{ij}[1-\delta(i,j)] \tag{3}$$

式中:L_i' 为第 i 段自感,M_{ij} 为第 i 段和第 j 段间的互感,$\delta(i,j)$为 Kronecker delta 函数。

设 N 为各段定子线圈的匝数,r_c 为线圈半径,r_a 为电枢半径,l_i 为定子线圈段的长度,F 为各定子线圈段的电感修正系数,K_i为体积衰减系数(K_i与爆轰加载下电枢和定子线圈的运动过程相关),V_{0i}为初始时刻电枢与各定子线圈段之间的空间体积,V_{ci}为任意时刻 V_{0i}被爆炸加载的电枢所占据的空间体积,则 FCG 各段定子线圈和电枢的自感为

$$L_i'=\mu_0\pi N^2(r_c^2-r_a^2)F(l_i,r_c-r_a)K_i \tag{4}$$

$$K_i=(V_{0i}-V_{ci})/V_{0i}=1-V_{ci}/V_{0i} \tag{5}$$

$$F(l_i,r_c-r_a)=\frac{10}{11l_i+9(r_c-r_a)} \tag{6}$$

式中:μ_0 为真空磁导率。由于相邻定子线圈段或电枢段之间的互感比不相邻段大得多,因此仅考虑相邻段间的互感。设 N_i 和 N_j 分别为相邻段定子线圈的匝数,l_i 和 l_j 为两段定子线圈的长度,K_{ij}为两段定子线圈和电枢间的体积衰减系数(定义参照(6)式),K_i 和 K_j 为两段各自的体积衰减系数,则互感为

$$M_{ij}=\frac{\mu_0\pi N_iN_j(r_c^2-r_a^2)}{2l_il_j}[(l_i+l_j)^2F(l_i+l_j,r_c-r_a)K_{ij}-l_i^2F(l_i,r_c-r_a)K_i-l_j^2F(l_j,r_c-r_a)K_j] \tag{7}$$

2.2.2 强磁体的电感

对于单层多匝的线圈磁体,设 W 为线圈匝数,d 为线圈直径,k 为椭圆积分模数,K'和 E'分别为第一类和第二类椭圆积分,α 为线圈的长径比,则磁体电感 L_s 为[11]

$$L_s=\frac{\mu_0}{4\pi}W^2\mathrm{d}\Phi \tag{8}$$

$$\Phi=\frac{4\pi}{3}\left\{(\alpha^2+1)^{1/2}\left[K'(k)+\frac{1-\alpha^2}{\alpha^2}E'(k)\right]-\frac{1}{\alpha^2}\right\} \tag{9}$$

式中:$k=(1+\alpha^2)^{-1/2}$。对于多层、多匝的并联磁体,可按(8)式、(9)式计算每层线圈的自感。设 W 和 w 为两线圈各自的匝数,A 和 a 为两线圈的长度,D 和 d 为两线圈的直径,l_1、l_2、l_3、l_4、F_1、F_2、F_3、F_4 为与两线圈尺寸和相对位置有关的修正系数,则线圈间的互感 M_s 为[11]

$$M_s=\frac{\pi}{8}\mu_0 wW\frac{d^2}{aA}(l_1F_1-l_2F_2-l_3F_3+l_4F_4) \tag{10}$$

设 n 层线圈并联的磁体总电感为 L'',各层自感为 L_n,互感为 M'_{ij}($i,j=1,2,\cdots,n$;$M'_{ij}=M'_{ji}$),磁体总电感 L'' 满足[12]

$$\begin{vmatrix} L''-L_1 & L''-M'_{12} & \cdots & L''-M'_{1i} & \cdots & L''-M'_{1j} & \cdots & L''-M'_{1n} \\ L''-M'_{21} & L''-L_2 & \cdots & L''-M'_{2i} & \cdots & L''-M'_{2j} & \cdots & L''-M'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L''-M'_{i1} & L''-M'_{i2} & \cdots & L''-L_i & \cdots & L''-M'_{ij} & \cdots & L''-M'_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ L''-M'_{n1} & L''-M'_{n2} & \cdots & L''-M'_{ni} & \cdots & L''-M'_{nj} & \cdots & L''-L_n \end{vmatrix}=0 \tag{11}$$

因此,将(8)式~(10)式的计算结果代入(11)式求解,可得多层、多匝并联磁体的总电感。

2.3 强磁场的电阻

2.3.1 定子线圈和磁体线圈的电阻

设线圈的段长为 l,绕制螺距为 p,绕制半径为 r_0,则定子线圈和磁体线圈中导线的总长 l_s 为

$$l_s=\frac{2\pi l}{p}\left[r_0^2+\left(\frac{p}{2\pi}\right)^2\right]^{1/2} \tag{12}$$

线圈电阻 R_s 为[13]

$$R_s=\frac{\rho l_s}{S}\frac{3f}{2}\frac{D^2}{4D\delta-4\delta^2} \tag{13}$$

式中:ρ 为导线电阻率,S 为导线截面积,f 为临近效应系数,D 为导线直径,δ 为趋肤深度。

2.3.2 趋肤深度

在 FCG 初始磁通形成阶段,总电流近似正弦增长;而在磁通压缩阶段,总电流近似指数增长。由于总电流增长方式存在差别,因此趋肤深度也将采用不同的计算方法。设 δ_1 和 δ_2 分别为初始磁通形成阶段和磁通压缩阶段的趋肤深度,则[1]

$$\delta_1=\left[\frac{2\rho}{\mu_0}\left(\frac{L}{C}\right)^{1/2}\right]^{1/2} \tag{14}$$

$$\delta_2=\left[\frac{\rho I}{\mu_0}\left(\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\right)^{-1}\right]^{1/2} \tag{15}$$

2.3.3 电阻率

导体的电阻率在大电流热效应作用下变化明显。Tucker 提出了描述金属电阻率随电流比作用量变化的计算模型[14],设电流密度为 j,则比作用量 J 为

$$J=\int_0^t j^2\,\mathrm{d}t \tag{16}$$

在 FCG 的磁通压缩阶段,电流的热效应会使线圈中的铜导体发生由固态到熔化再到液态的相变过程。设 J_s 和 J_m 分别为熔化态和液态比作用量的阈值,ρ_s 和 ρ_m 为相应状态的电阻率,ρ_0 为常温电阻率,则在电流热效应影响下电阻率 ρ 为[15]

$$\rho=\begin{cases}\rho_0\exp\left(\dfrac{J}{J_s}\ln\dfrac{\rho_s}{\rho_0}\right) & 0\leqslant J\leqslant J_s \\ \rho_s\left[\dfrac{(J-J_s)(\rho_s^2-\rho_m^2)}{(J_m-J_s)\rho_m^2}+1\right]^{-1/2} & J_s<J\leqslant J_m\end{cases} \tag{17}$$

3 强磁体的磁场研究

按照建立的理论模型,对 FCG 加载 6 种不同结构的强磁体形成的磁场进行研究。采用的 FCG 结构如图 2 所示。FCG 的定子线圈结构见图 3(a),内径为 124 mm,共绕制 3 段(每段等长,为 192 mm):第 1 段用 10 mm^2 的铜导线绕 32 匝,螺距为 6 mm;第 2 段用 20 mm^2 的铜导线绕 16 匝,螺距为 12 mm;第 3 段用 40 mm^2 的铜导线绕 8 匝,螺距为 24 mm。FCG 的铜电枢结构见图 3(b),外径为 62 mm,厚 2.25 mm,采用 8701 炸药柱装填,装药密度为 1.72 g/cm^3,爆速为 8 450 m/s。

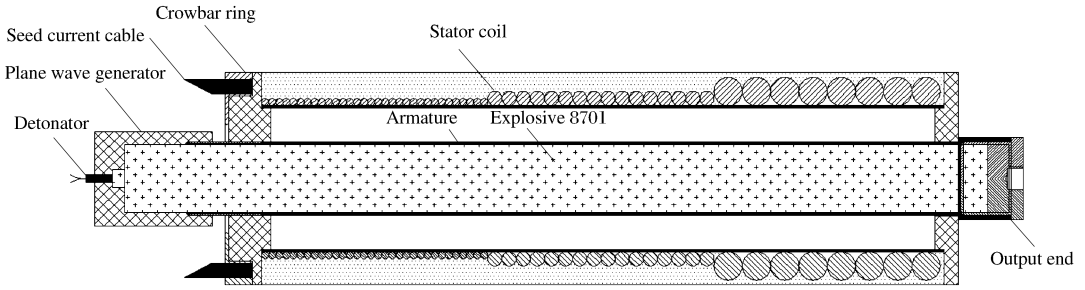


图 2 FCG 的结构

Fig. 2 Structure of FCG

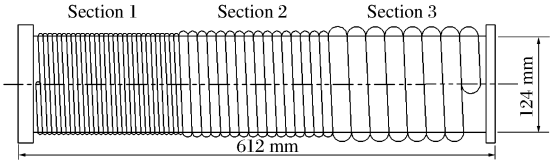


图 3(a) FCG 定子线圈尺寸

Fig. 3(a) Dimensions of the FCG stator

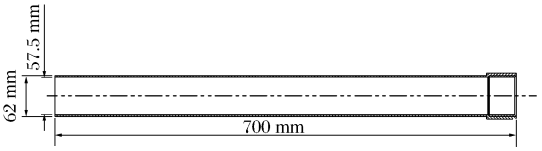


图 3(b) 电枢尺寸

Fig. 3(b) Dimensions of the armature

对于 6 种强磁体结构,除绕制导线外,其余组件均为绝缘材料,且材料一致。如图 4 所示,磁体采用 16 mm^2 的铜导线绕制,线径为 8 mm。磁体内桶外径 50 mm,壁厚 6 mm。除了磁体Ⅵ的挡板之间的距离为 88 mm,其余磁体结构挡板间的距离均为 160 mm。在各磁体的轴线相应位置建立(r,θ,z)柱坐标系。磁体Ⅰ为单层 20 匝;磁体Ⅱ为两层并联,各层 20 匝;磁体Ⅲ为 3 层并联,各层 20 匝;磁体Ⅳ为两层

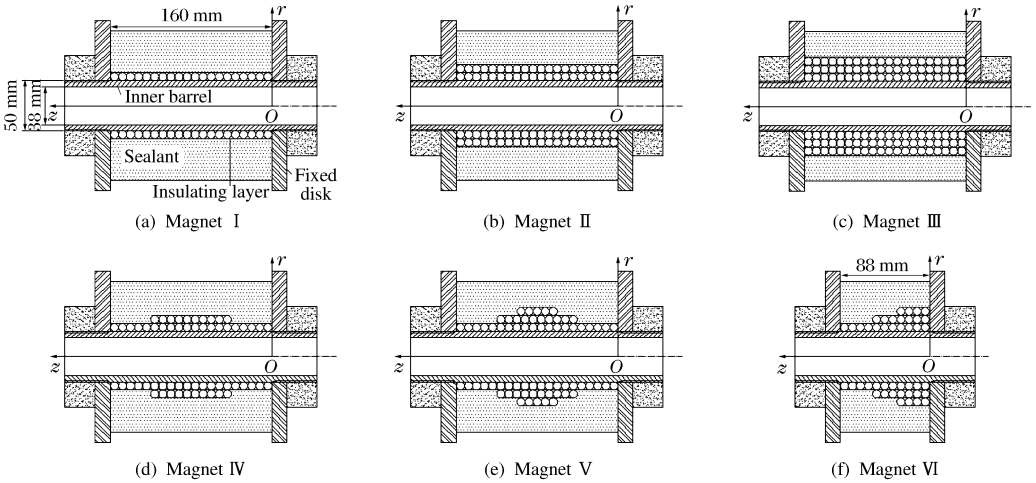


图 4 强磁体结构

Fig. 4 Structures of the high field magnets

并联,内层 20 匝,外层 10 匝;磁体Ⅴ为 3 层并联,从内向外依次为 20、10 和 5 匝;磁体Ⅵ为 3 层并联,各层线圈与磁体右侧挡板的端面对齐,各层对称轴不重合,形成偏置结构,从内向外依次为 11、7 和 4 匝。

3.1　强磁体的磁场计算

强磁体的磁场计算方法是:根据(1)式和(2)式得到的电流 I,结合强磁体结构,可求得强磁体的电流密度矢量 $\boldsymbol{J}$。引入满足 Maxwell 方程组的矢量磁位函数 $\boldsymbol{A}$,定义其满足以下方程组

$$\begin{cases} \boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} \\ \nabla \cdot \boldsymbol{A} = 0 \\ \boldsymbol{E} = -\dfrac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} \end{cases} \tag{18}$$

在 FCG 加载过程中,忽略位移电流,并设磁场中的介质为电磁各向同性,则 Maxwell 方程组变为仅含有矢量磁位函数 $\boldsymbol{A}$ 和电流密度矢量 $\boldsymbol{J}$ 的微分方程,即

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \boldsymbol{A} \right) = \boldsymbol{J} - \gamma \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t} \tag{19}$$

在强磁体不同的计算区域,采用与之相应的初始条件和边界条件,代入(19)式,求解所有计算区域的定解问题,获得矢量磁位函数 $\boldsymbol{A}$;再根据(18)式,求解磁感应强度矢量 $\boldsymbol{B}$;最后将 $\boldsymbol{B}$ 的结果叠加,得到整个区域的磁场解。

按照 FCG 和磁体结构参数,应用理论模型,得到了表 1 中的初始计算参数。对 FCG 加载强磁体在初始磁通形成阶段的总电流和磁场进行计算,利用初始阶段的结果,结合磁通压缩阶段电路的变化过程,得到了磁通压缩阶段的总电流和强磁体的磁场。

表 1　初始计算参数

Table 1　Initial parameters for calculation

Element	Resistance/(mΩ)	Inductance/(μH)	Element	Resistance/(mΩ)	Inductance/(μH)
FCG	146.6	69.50	Magnet Ⅳ	4.5	4.32
Magnet Ⅰ	11.7	7.16	Magnet Ⅴ	2.3	2.40
Magnet Ⅱ	6.5	7.15	Magnet Ⅵ	1.6	1.49
Magnet Ⅲ	4.8	7.11			

Note: The power source and transmission line are the same for every magnet (100 kV/10 μF capacitors and 10.2 mΩ/0.10 μH transmission line)

在磁通压缩阶段,电路过程发生了明显变化,特别是爆轰波加载电枢的运动引起总电感的变化,对电路过程影响显著。为了获得 FCG 起爆后任意时刻的电感修正系数(K_i),进而得到总电感的变化趋势,应用 ANSYS-AUTODYN 软件对 FCG 电枢和定子线圈在爆炸作用下的运动情况进行了仿真。

将定子线圈、电枢和炸药作为主要的组件,将定子线圈的质量进行轴向平均,并对 FCG 的结构进行简化,得到了如图 5 所示的仿真结果。如图 5(a)中所示,FCG 从电枢的左端起爆,在爆轰波作用下,电枢形成了近似锥状的膨胀构型,与定子线圈碰撞接触,并向末端方向扩展;图 5(b)为电枢膨胀的中间过程;图 5(c)为爆轰完成时电枢和定子线圈的状态。膨胀的电枢与定子线圈接触后,其构型基本不变,且电枢的膨胀半锥角约为 14.3°。

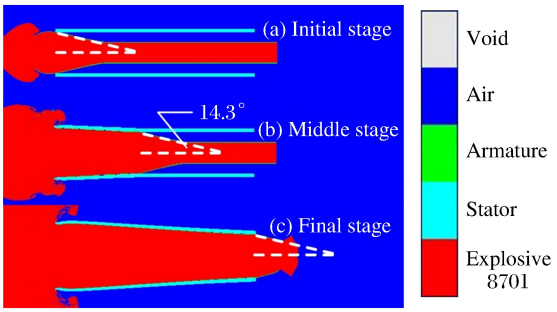


图 5　电枢膨胀过程模拟结果

Fig. 5　Simulation results of armature expanding process

按照仿真获得的任意时刻 FCG 电感的修正系数,计算得到磁通压缩阶段的电路总电感

变化趋势，如图 6 所示，其中将 FCG 爆炸运行时刻定为零时刻，则各磁体 FCG 加载过程的磁通压缩时间相同。

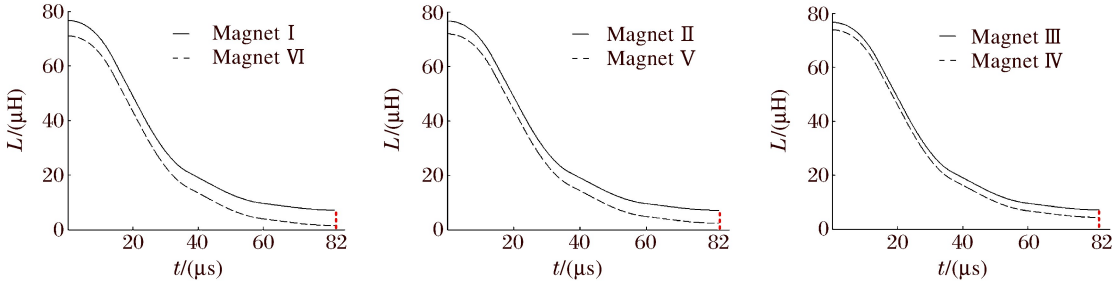


图 6 磁通压缩阶段电路总电感

Fig. 6 The total inductance of circuit in flux compression stage

两个阶段的磁体总电流见图 7 和图 8，电流峰值时各磁体的电流密度见图 9 和图 10，磁场分布见图 11 和图 12。

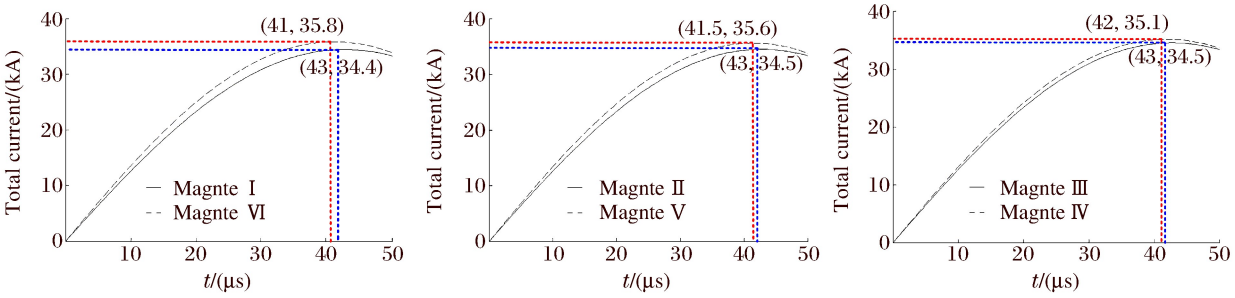


图 7 初始阶段各磁体总电流

Fig. 7 The total current in the magnets in initial stage

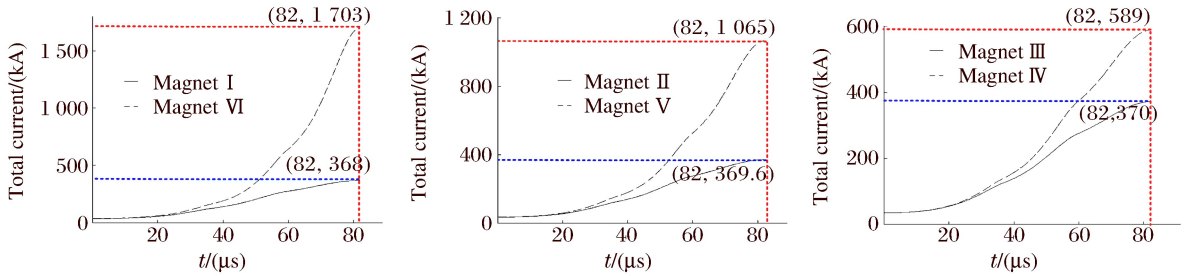


图 8 磁通压缩阶段各磁体总电流

Fig. 8 The total current in the magnets in flux compression stage

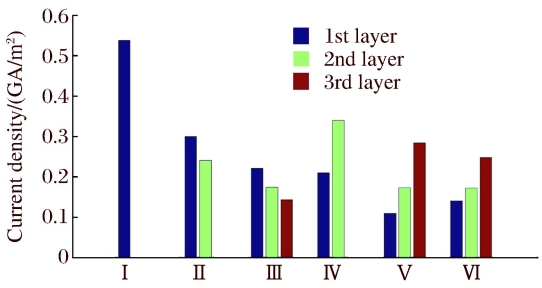


图 9 初始阶段各磁体的电流密度峰值

Fig. 9 The peak current density of magnets in initial stage

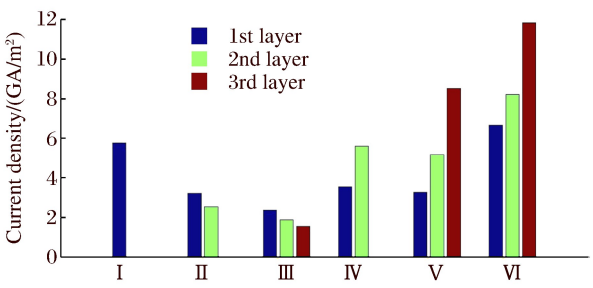


图 10 磁通压缩阶段各磁体的电流密度峰值

Fig. 10 The peak current density of magnets in flux compression stage

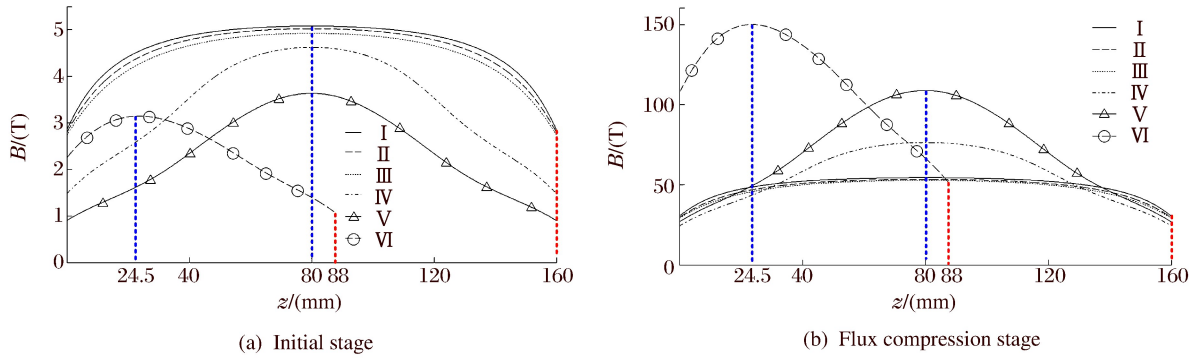


图 11　初始阶段和磁通压缩阶段磁体在 $r=19$ mm 位置的磁场分布

Fig. 11　The magnetic fields distribution at the position $r=19$ mm in the initial and flux compression stage

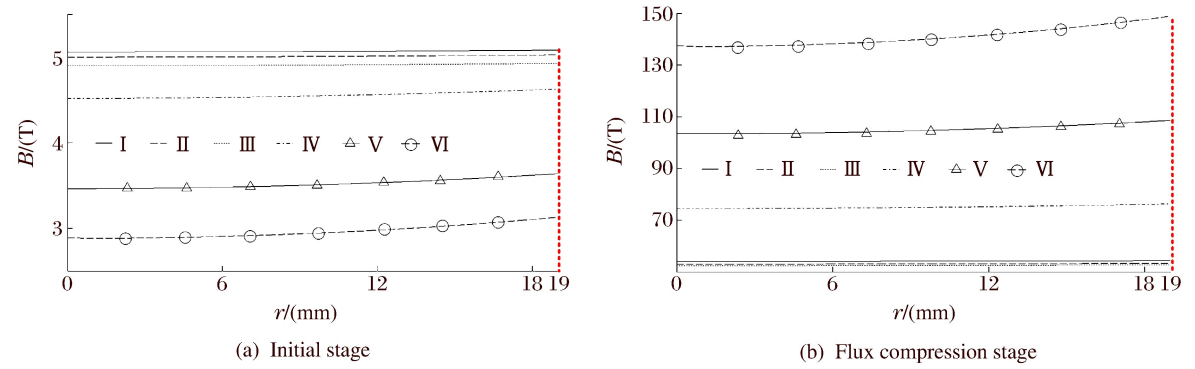


图 12　初始阶段和磁通压缩阶段磁体在 $z=80$ mm 位置的磁场分布(磁体Ⅵ的磁场分布对应 $z=24.5$ mm 位置)

Fig. 12　The magnetic fields distribution at the position $z=80$ mm in the initial and flux compression stage (The fields distribution of Magnet Ⅵ is at the position $z=24.5$ mm)

3.2　结果讨论

对 3.1 节中的计算结果进行分析,发现 FCG 加载强磁体形成磁场的过程具有以下特点。

(1) 在 FCG 加载强磁体的初始阶段,6 种磁体结构的总电流峰值相差较小,而电流密度峰值和形成磁场的峰值差别相对明显。例如:磁体Ⅵ的总电流峰值最大;而磁体Ⅰ最小,二者相差 1.4 kA,仅为最大值的 3.9%,见图 7;磁体Ⅰ的电流密度峰值最大,而磁体Ⅴ的第 1 层线圈的电流密度最小,二者相差达 0.43 GA/m^2,为最大值的 79.6%,见图 9;磁体Ⅰ的磁场峰值最大,而磁体Ⅵ最小,二者相差 2 T,为最大值的 39.2%,如图 11(a)所示。

(2) 在 FCG 加载强磁体的磁通压缩阶段,6 种磁体结构的总电流峰值、电流密度峰值和形成磁场的峰值差别明显扩大。例如:磁体Ⅵ的总电流峰值最大,而磁体Ⅰ最小,二者相差 1 335 kA,为最大值的 78.4%,如图 8 所示;磁体Ⅵ第 3 层线圈的电流密度最大,而磁体Ⅲ第 3 层线圈的最小,二者相差达 10.3×10^9 A/m^2,为最大值的 87.1%,如图 10 所示;磁体Ⅵ的磁场峰值最大,而磁体Ⅲ最小,二者相差 97 T,为最大值的 64.8%,如图 11(b)所示。

(3) 在 FCG 加载强磁体的初始压缩阶段和磁通压缩阶段,不同结构的磁体形成的磁场分布不同。如图 11 所示:在 $r=19$ mm 的柱面(磁体内侧壁)上,磁体Ⅰ～磁体Ⅲ形成的磁场形态相似,峰值位于 $z=80$ mm 的截面上,并且磁场以此截面对称分布,在 $z=40$ mm 和 $z=120$ mm 之间的区域具有较好的均匀性;磁体Ⅳ、磁体Ⅴ的磁场对称性与磁体Ⅰ～磁体Ⅲ一致,但没有磁场均匀区域;磁体Ⅵ的磁场既没有对称性,也没有均匀区域,其峰值位于 $z=24.5$ mm 的截面上。从图 12 可以看出:在磁场峰值截面上(磁体Ⅰ～磁体Ⅴ为 $z=80$ mm,磁体Ⅵ为 $z=24.5$ mm),所有磁体的磁场随半径 r 的增加而增大,只是磁体Ⅰ～磁体Ⅲ的磁场曲线增长缓慢,趋于平直,而磁体Ⅳ～磁体Ⅵ的磁场曲线增长相对明显。

由 6 种磁体结构的总电流峰值、电流密度峰值和形成磁场的峰值特点，可以发现：在初始阶段，FCG 本身的电参数占电路的比重较大，起主要作用，而各磁体的电参数比重较小，使得各磁体初始阶段的总电流十分接近。磁体结构影响着电流密度分布，因此单层线圈（磁体Ⅰ）形成的磁场峰值最大，而两层线圈、匝数递减型磁体（磁体Ⅳ）的磁场范围最大。在磁通压缩阶段，FCG 本身的电感快速下降，电阻也最终减少，各磁体的电参数逐渐对电路起主要作用，由于各磁体的电参数存在差异，使得最终的总电流产生了显著差别。磁体结构的影响进一步扩大了各磁体间的磁场差异，最终使得 3 层线圈、非对称结构、匝数递减型磁体（磁体Ⅵ）的磁场峰值和磁场范围最大。

由 6 种磁体结构形成的磁场分布特点，可以发现：在加载过程的两个阶段，尽管磁体总电流变化明显，但是各磁体磁场的空间分布具有相似性；虽然不同加载阶段的磁场幅值发生了改变，但是分布曲线的构型基本一致。等匝数、增加磁体层数，会改善磁场的轴向均匀度，但会降低磁场峰值和磁场范围，如磁体Ⅰ～磁体Ⅲ；匝数递减、增加磁体层数，能扩大磁场范围，并在 FCG 的最终阶段提高磁体峰值，如磁体Ⅳ和磁体Ⅴ；按偏置结构增加磁体层数并递减匝数，能使磁体结构更紧凑，减少了磁体本身的电感和电阻，在 FCG 运行的最终阶段获得最大峰值和范围的磁场，如磁体Ⅵ。

4 结 论

通过分析 FCG 加载强磁体形成磁场的过程，建立了相应的理论模型，并对磁爆加载下 6 种强磁体形成的磁场进行了对比分析，获得了强磁体的磁场变化规律。在 FCG 加载过程的两个阶段：受到电路过程和磁体结构的共同影响，各磁体形成的磁场峰值和磁场范围具有不同特点；磁体结构对磁场分布的影响起决定作用，磁场分布不受加载过程的影响。在 FCG 加载的不同阶段，对比 6 种磁体结构形成的磁场发现：相对其它 5 种磁体结构，匝数随层数递减的偏置型磁体结构设计，在磁体几何尺寸接近的情况下，具有较小的电感和电阻，能形成较高的峰值磁场和较宽的磁场范围，适于形成高磁动力幅值和大磁动力梯度，能够用于磁爆加载弹药对毁伤元的驱动。

References:

[1] Knoepfel H. Pulsed High Magnetic Fields [M]. Amsterdam, Holland: North-Holland Publishing Company, 1970: 177-204.

[2] Fowler C M, Altgilbers L L. Magnetic flux compression generators: A tutorial and survey [J]. Electromagn Phenom, 2003, 3: 306-357.

[3] Altgilbers L L. Recent advances in explosive pulsed power [J]. Electromagn Phenom, 2003, 3: 497-516.

[4] Cavazos T C, Gale D G, Roth C E, et al. Flux compression generator development at the air force research laboratory [A]//Proceedings of the 15th International Pulsed Power Conference [C]. Monterey, US, 2005: 453-456.

[5] Peterson C R, Fowler C M. Rail gun powered by an integral explosive generator, LA-UR-79-2220 [R]. Los Alamos, US: Los Alamos National Laboratory, 1979.

[6] Kristiansen M, Worsey P, Freeman B, et al. Explosive-driven pulsed generation for directed-energy munitions, AFRL-SR-AR-TR-04-0108 [R]. US: Air Force Research Laboratory, 2004.

[7] Sun C W. Research of High energy density physics under magnetic load [J]. High Energy Density Physics, 2007, 3(1): 41-46. (in Chinese)
孙承纬. 电磁加载下的高能量密度物理问题研究 [J]. 高能量密度物理, 2007, 3(1): 41-46.

[8] Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, et al. Magnetocumulative Generators [M]. New York, US: Springer, 2000: 131-151.

[9] Chato D M, Kiutu G F, Chase J B. High voltage flux compression generators, AFRL-RD-PS-TR-2008-1046 [R]. US: Air Force Research Laboratory, 2008.

[10] Novac B M, Smith I R. A zero-dimensional computer code for helical flux-compression generators [J]. Electromagn

Phenom,2003,3:444-451.

[11] Калантаров П Л,Цейтлин Л А. Inductance Calculation for Manual [M]. Translated by Chen T M,Liu B A,Luo Y L,et al. 1st ed. Beijing:China Machine Press,1992:252,311. (in Chinese)
卡兰塔罗夫 П Л,采依特林 Л А. 电感计算手册 [M]. 陈汤铭,刘保安,罗应立,等,译. 第 1 版. 北京:机械工业出版社,1992:252,311.

[12] Wen S L. The problems about joins of induction coils [J]. College Physics,2005,24(7):12-15. (in Chinese)
文盛乐. 关于电感线圈的联接问题 [J]. 大学物理,2005,24(7):12-15.

[13] Stuetzer O M. Theory of small compressed magnetic flux current amplifiers,SAND79-1075 [R]. Albuquerque,US:Sandia Laboratories,1979.

[14] Tucker T J,Toth R P. A computer code for the prediction of the behavior of electrical circuits containing exploding wire elements,SAND-75-0041 [R]. Albuquerque,US:Sandia Laboratories,1975.

[15] Appelgren P. Experiments with and modelling of explosively driven magnetic flux compression generators [D]. Sweden:KTH Royal Institute of Technology,2008.

Study on the Magnetic Field of High Field Magnet Powered by Flux Compression Generator

XIA Ming[1,2], HUANG Zheng-Xiang[1], GU Xiao-Hui[1], WANG Ye-Zhong[1]

(1. *ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *The Third Engineering Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang* 471023, *China*)

Abstract: To study magnetic field of the high field magnet powered by flux compression generator (FCG), a theoretical model is established by analysis of loading process. According to this model, a comparative study on magnetic fields of six high field magnets with different structures is carried out, and the variation laws of the magnetic fields are also acquired. The results show that the parameters of FCG are the main factor in the initial stage, which cause small differences of peak strength and range of magnetic field between six magnets; but in the flux compression stage, the influence of the magnetic structure is more and more important with the variation of circuit process, and the peak strength and range of magnetic field for different magnets are changed significantly. Furthermore, the structure of magnet plays the decisive role in the spatial distribution of magnetic field, which is not affected by the loading process.

Key words: flux compression generator; magnetic field; theoretical model; high field magnet