

涡流损耗对爆炸去磁脉冲发生器 输出性能的影响^{*}

陈 朗, 伍俊英, 冯长根

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了提高爆炸去磁脉冲发生器的输出能量, 设计了绝缘层截断涡流回路磁体结构, 以减小冲击去磁过程中磁体内产生涡流造成的能量损耗。把圆柱形钕铁硼磁体切分成 4 块, 在块与块之间增加聚脂绝缘层, 再组合成一个圆柱形整体, 形成截断涡流回路的磁体结构。采用 Maxwell 3D 电磁场有限元分析软件, 对未切分和切分后的钕铁硼磁体进行了静磁场计算, 分析了两种结构下的磁感应强度分布。对这两种磁体结构的脉冲发生器进行了爆炸实验, 测量了脉冲发生器输出的感生电动势, 分析了涡流损耗对发生器输出电流的影响。结果表明: 磁体中截断涡流回路的脉冲功率发生器涡流损耗较小, 能够输出更大的电能。

关键词: 爆炸去磁; 涡流损耗; 钕铁硼永磁体; 脉冲功率技术

中图分类号: O383

文献标识码: A

1 引 言

铁磁体受到强冲击波作用后, 磁体会发生由铁磁相到顺磁相的转变, 磁性将会完全消失, 这种现象称为冲击去磁效应^[1]。20 世纪 50 年代, 美国的 Anderson 和 Kulterman 等人提出了爆炸去磁脉冲功率发生器的概念^[2-3], 即利用炸药爆炸冲击波对带线圈铁磁体去磁, 使通过线圈的磁通量快速减小, 从而使线圈产生脉冲感应电流。20 世纪 90 年代以前, 大部分冲击去磁研究都是对软磁材料的研究^[4-5], 但软磁材料储能密度较低, 爆炸去磁脉冲功率发生器输出能量不高。20 世纪 90 年代以后, 人们对铁氧体 ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) 和钕铁硼 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 等高磁能积硬磁材料进行了冲击去磁研究^[6-10]。

由于磁体具有一定的电导率, 在爆炸去磁的能量转换过程中, 磁体导体内部将产生涡流, 涡流具有与传导电流相同的热效应会造成能量的损耗^[11]。Kristiansen 等人^[6]在爆炸去磁脉冲功率发生器设计中, 提出了在磁体中增加绝缘层, 切断涡流回路, 减小涡流损耗, 可以提高发生器的输出功率, 并进行了理论计算分析, 但还没有见到这方面的实验报道。本工作把圆柱形钕铁硼磁体切分成 4 块, 在块与块之间增加聚脂绝缘层, 再组合成一个圆柱形整体, 形成截断涡流回路的磁体结构。对有绝缘层和没有绝缘层两种磁体的爆炸去磁发生器进行了实验和计算研究, 分析了涡流损耗对发生器输出电流的影响。

2 爆炸去磁脉冲发生器的基本原理

针对圆柱形磁体结构, 冲击波沿磁场方向加载的爆炸去磁发生器进行分析。图 1 是爆炸去磁脉冲功率发生器工作原理示意图^[7]。磁体为圆柱形, 直径为 d , 长为 l 。这种圆柱形开路磁体的磁场呈非均匀分布, 假设初始平均磁感应强度为 $\bar{B}_0$ 。在磁性介质中传播的冲击波速度为 D , 则通过线圈的初始磁通量 Φ_0 为

$$\Phi_0 = \bar{B}_0 \pi d^2 / 4 \quad (1)$$

^{*} 收稿日期: 2006-10-19; 修回日期: 2007-02-02

作者简介: 陈 朗(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆轰物理和冲击动力学研究. E-mail: chenlang@bit.edu.cn

平面冲击波通过磁体的时间为

$$\Delta t = l/D \quad (2)$$

假设磁体在冲击波阵面后完全被去磁,因此,线圈中的磁通量从初始量 Φ_0 变为零,通过线圈的磁通量在 Δt 时间内变化量为 $\Delta\Phi = \Phi_0$ 。根据电磁感应定律^[11],当穿过导体回路的磁通量 Φ 发生变化时,回路中就会产生感生电动势,导体回路中感生电动势的大小与穿过回路的磁通量随时间的变化率成正比,那么在单匝感应线圈中产生的感生电动势为

$$E_g(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\bar{B}_0 \pi d^2 D}{4l} \quad (3)$$

由(3)式可知,对于圆柱形开路状态的磁体,由于冲击去磁效应在线圈中产生的感生电动势是一个幅值为 $\bar{B}_0 \pi d^2 D/4l$ 的方波,如果在圆柱形磁体上均匀绕制 N 匝线圈,则产生的感生电动势幅值为 $N\bar{B}_0 \pi d^2 D/4l$ 。

如果爆炸去磁发生器与负载相连,其等效电路如图 2 所示。整个回路由爆炸去磁发生器产生的感生电动势 $E_g(t)$,感应线圈本身的自感 L_g 和内阻 R_g ,以及负载电感 L_l 和电阻 R_l 等组成。其中 i 为回路电流, t 为时间, Φ 为磁通量。等效电路方程为

$$(L_g + L_l) \frac{di}{dt} + (R_g + R_l)i = E_g(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

如果负载电感 L_l 和电阻 R_l ,以及线圈内阻 R_g 相对线圈本身的自感 L_g 较小时,则等效电路方程又可以写为

$$E_g(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = L_g \frac{di}{dt} \quad (5)$$

分别对(5)式两边的 t 积分,则有

$$i(t) = -\frac{N}{L_g} \int_{\Phi_0}^{\Phi_t} d\Phi = \frac{N}{L_g} (\Phi_0 - \Phi_t) \quad (0 \leq t \leq l/D) \quad (6)$$

式中: l 是圆柱形磁体的长度, Φ_t 是 t 时刻线圈中通过的磁通量。如果在 t 时刻,冲击波破坏的磁体长度为 tD ,剩下的 $l-tD$ 长的磁体平均初始感应强度为 $\bar{B}_0(t)$,则(6)式可写成

$$i(t) = -\frac{N}{L_g} \int_{\Phi_0}^{\Phi_t} d\Phi = N \frac{\pi d^2}{4L_g} [\bar{B}_0 - \bar{B}_0(t)] \quad (0 \leq t \leq l/D) \quad (7)$$

当 $t=l/D$ 时,磁体中平均初始感应强度发生了 $\bar{B}_0 \rightarrow 0$ 的变化,此时电流最大,即

$$i_{\max} = N \frac{\bar{B}_0 \pi d^2}{4L_g} \quad (8)$$

对于均匀线制的线圈,线圈的自感为^[12]

$$L_g = N^2 \mu_0 \mu V \quad (9)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率, μ 为磁体的相对磁导率, V 为磁体的体积。将(9)式代入(8)式,则线圈产生的最大电流为

$$i_{\max} = \bar{B}_0 / N \mu_0 \mu l \quad (10)$$

由(10)式可知,在其他条件不变的情况下,改变线圈绕制匝数,将相应改变输出电流,单匝线圈的输出电流最大。

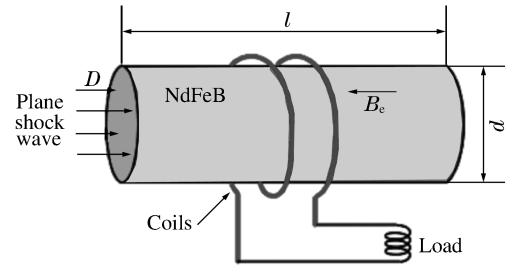


图 1 爆炸去磁脉冲发生器工作原理示意图
Fig. 1 Schematic illustration of the principles of explosive-driven ferromagnetic generators

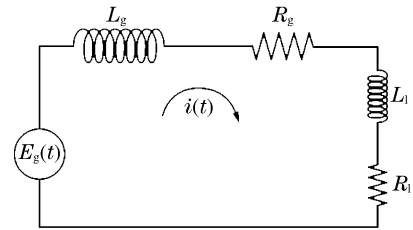


图 2 爆炸去磁脉冲发生器等效电路图
Fig. 2 The equivalent circuits of the explosive-driven ferromagnetic generators

3 实验装置

图 3 是爆炸去磁脉冲发生器实验装置结构简图。发生器主要由雷管、炸药透镜、加载药柱、圆柱形钕铁硼磁体、感应线圈等组成。实验中,首先由雷管起爆炸药透镜,炸药透镜爆炸产生的平面冲击波起爆加载药柱,加载药柱爆炸产生冲击波作用于磁体,磁体在冲击加载作用下发生冲击去磁,使通过缠绕在磁体上线圈的磁通量发生变化,从而在线圈中产生感生电动势和感生电流。

实验中,炸药透镜直径为 50 mm;加载药柱为直径 50 mm、高 10 mm 的 8701 炸药柱。8701 炸药密度为 1.72 g/cm³,爆速为 8.1 km/s,爆压为 30 GPa^[13]。

3.1 磁体结构设计

由于磁体具有一定的电导率,在能量转换过程中,磁体内将产生涡流,会大大降低能量输出。因此为了降低涡流损耗,可以将磁体先分割成几块,然后在块与块之间增加绝缘层,最后再粘结在一起,这样可减小涡流损耗^[6]。如果分的块越多,增加的绝缘层越密,越有利于降低涡流损耗,但这样会影响磁体的总储存能量,且结构复杂,加工较困难,因此只把圆柱形磁体平分成 4 块进行实验。图 4 是圆柱形磁体结构示意图。磁体直径为 50 mm,高为 30 mm。图 5 是 4 块磁体组成四拼结构的圆柱形磁体结构示意图。它的尺寸与图 4 中圆柱形磁体基本相同,只是磁体被割分成 4 块后,每块之间有 1 mm 厚的聚脂绝缘层。表 1 给出了钕铁硼永磁材料的磁性能参数^[14]。

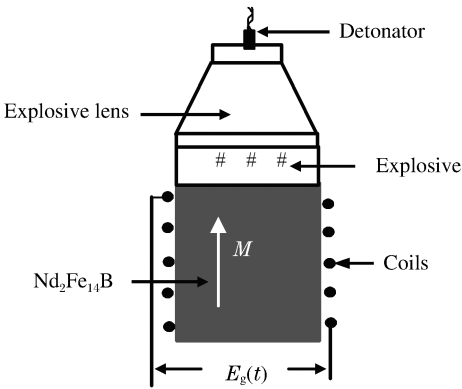


图 3 爆炸去磁脉冲发生器实验装置结构简图
Fig. 3 Experimental setup of explosive-driven ferromagnetic generators with plane shock waves

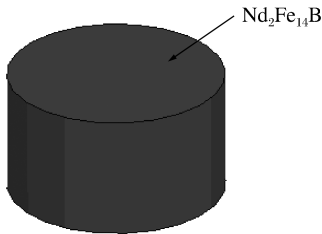


图 4 圆柱形磁体结构示意图
Fig. 4 The structure of cylindrical magnet

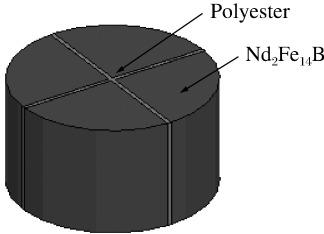


图 5 四拼结构的圆柱形磁体结构示意图
Fig. 5 The structure of four-combined cylindrical magnet

表 1 Nd₂Fe₁₄B 稀土永磁体的磁性能参数

Table 1 The performance parameters of the Nd₂Fe₁₄B hard magnet

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$B_r/(\text{T})$	$H_c/(\text{kA}/\text{m})$	$H_c/(\text{kA}/\text{m})$	$(BH)_{\max}/(\text{kJ}/\text{m}^3)$	$T_{\max}/(^{\circ}\text{C})$
7.50	1.21~1.27	≥ 880	≥ 960	280~304	≤ 80

3.2 实验测量系统

感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质,即使导体回路不闭合,也会产生感生电动势,但没有感应电流。而且感应电流的大小取决于回路的阻抗,而感应电动势的大小与回路的阻抗无关^[11]。此外,实验中每发实验的实际电路回路参数可能存在差别,感生电动势比感应电流的可比性好。因此,主要对两种磁体结构的脉冲发生器输出感生电动势进行测量。

采用 Tektronix P6015 高压探头来测量感生电动势。高压探头的输入阻抗为 10 MΩ,在这种情况下

下电流可以忽略($I(t)_{\max} < 10^{-5}$ A),记录的电压波形可等效为感生电动势波形^[7],并用数字示波器记录信号。图 6 是感生电动势测量的电路示意图。

4 永磁体的静磁场分析

对于图 4 和图 5 所示形状结构的磁体,磁路为开路状态,磁体内的磁感应强度分布不均匀,无法计算得到横截面上的平均磁感应强度和磁通量。而且图 5 所示的磁体结构,由于磁体中增加了绝缘层,使磁体的磁场分布更加复杂。为此,采用电磁场有限元分析软件 Maxwell 3D 程序^[15]对这两种结构的磁体进行静磁场分析,通过分析磁体中磁场强度的分布规律,优化磁体结构的设计。

4.1 计算模型

图 7 是圆柱形磁体的静磁场分析计算模型,图中方框内是整个计算区域,磁体周围为空气介质。图 8 是四拼结构圆柱形磁体的静磁场分析计算模型,计算模型与图 7 所示类似,绝缘层为聚脂材料。

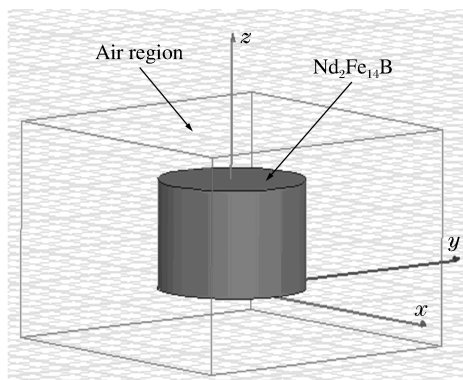


图 7 圆柱形磁体的静磁场分析计算模型
Fig. 7 The simulated model of the cylindrical magnet

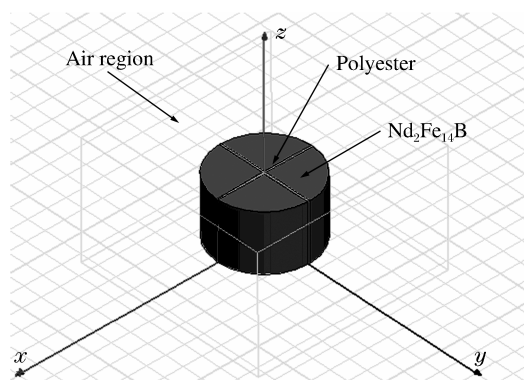


图 8 四拼结构圆柱形磁体的静磁场分析计算模型
Fig. 8 The simulated model of the four-combined cylindrical magnet

4.2 计算结果分析

图 9 是圆柱形磁体的中心横截面上磁感应强度分布图。由图可知,圆柱形磁体的中心处磁感应强度较小,靠近边沿处磁感应强度最大。图 10 给出了四拼结构圆柱形磁体的中心横截面上磁感应强度分布图。磁感应强度的分布规律与图 9 所示相似,只是在绝缘层处,磁感应强度较低,但绝缘层很薄,对整个磁体的储能影响较小。

图 11 是圆柱形磁体中不同高度截面上,沿直径方向上的初始磁感应强度 $B_0(r)$ 分布曲线。图中给出了底端面($z=0$ mm)、高 8 mm($z=8$ mm)处的横截面和中心横截面($z=15$ mm)上,通过圆心任一条直线上的磁感应强度 $B_0(r)$ 分布曲线。由图可知,对于圆柱形磁体,中心横截面上的感应强度最大,两端截面上的最小,并以中心成对称分布,每个横截面上的磁感应强度 $B_0(r)$ 也成中心对称分布,中心位置最小,边沿上最大。

任何一个横截面上通过的总磁通量 Φ_0 ,可通过对该截面上的磁感应强度 $B_0(r)$ 曲线进行积分求得,即

$$\Phi_0 = \int_0^r B_0(r) 2\pi r dr \quad (11)$$

式中: r 为半径。通过该截面的初始平均磁感应强度 $\bar{B}_0$ 为

$$\bar{B}_0 = \Phi_0 / S \quad (12)$$

式中: S 为横截面积。计算得到该磁体中的中心横截面上通过的总磁通量 Φ_0 为 $1\,414.6\,\mu\text{Wb}$ 。根据(12)式,得该横截面上的平均磁感应强度 $\bar{B}_0$ 为 $0.72\,\text{T}$ 。

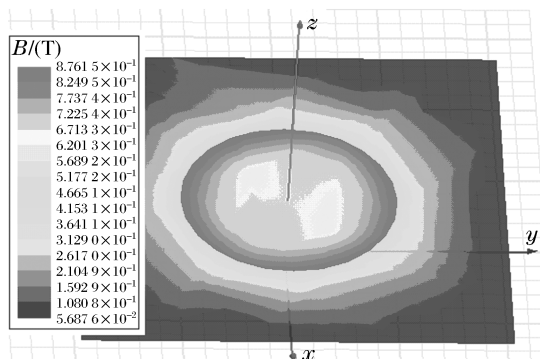


图9 圆柱形磁体的中心横截面上磁感应强度分布

Fig. 9 The magnetic flux density at the central face of the $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cylinder

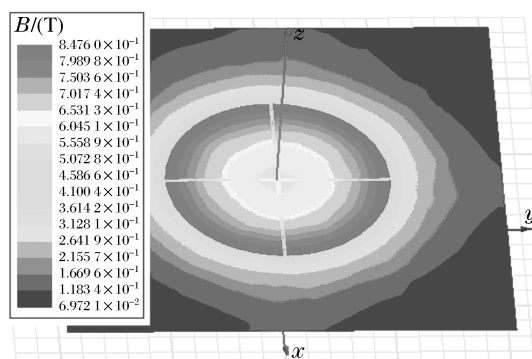


图10 四拼结构圆柱形磁体的中心横截面上磁感应强度分布

Fig. 10 The magnetic flux density at the central face of the four-combined $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cylinder

图12是四拼结构的圆柱形磁体上不同高度横截面上的 $B_0(r)$ 分布曲线。图中3条直线分别是取自底端面($z=0\,\text{mm}$)、高 $8\,\text{mm}$ ($z=8\,\text{mm}$)处的横截面和中心横截面($z=15\,\text{mm}$)上,通过圆心与 x 坐标轴正方向成 45° 角的直线。由图可知,磁感应强度曲线形状与图11所示相类似,但底端面上的磁感应强度较低;而磁体中心截面上的磁感应强度与圆柱形磁体的磁感应强度差别不大,磁感应强度曲线中间有一小段向上凸起,这是由于有绝缘层的缘故。根据(11)式和(12)式计算的结果,四拼结构的圆柱形磁体中通过中心横截面的总磁通量 Φ_0 为 $1\,364\,\mu\text{Wb}$,该截面上平均磁感应强度 $\bar{B}_0$ 约为 $0.70\,\text{T}$ 。与圆柱形磁体相比,四拼结构圆柱形磁体的磁感应强度有一定的降低,但降低幅度较小。

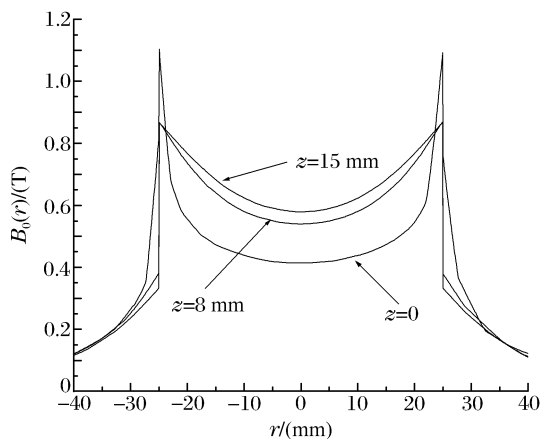


图11 圆柱形磁体中不同高度横截面上的磁感应强度 $B_0(r)$ 分布曲线

Fig. 11 The magnetic flux density $B_0(r)$ curves of the $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cylinder

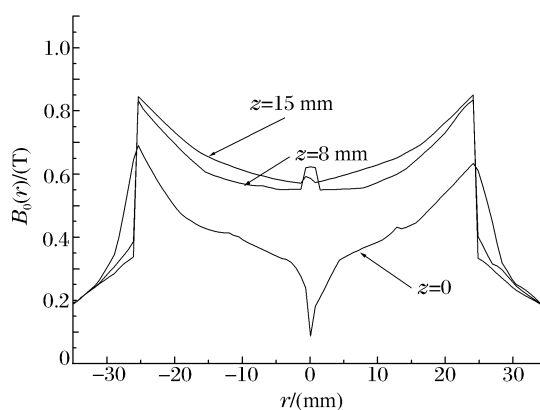


图12 四拼结构的圆柱形磁体中不同高度横截面上的磁感应强度 $B_0(r)$ 分布曲线

Fig. 12 The magnetic flux density $B_0(r)$ curves of the four-combined $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cylinder

5 实验结果与讨论

图13是圆柱形结构磁体的脉冲发生器的感生电动势曲线。线圈采用直径为 $0.20\,\text{mm}$ 的漆包线绕制

而成,缠绕在圆柱形磁体的中间位置,线圈匝数为 2。由图可知发生器产生的感生电动势波形为一个陡脉冲,上升时间约为 $4.11\ \mu\text{s}$,峰值 $E_g(t)_{\text{max}}$ 为 $191.0\ \text{V}$,平均每匝线圈产生感生电动势为 $95.5\ \text{V}$ 。图 14 是四拼结构磁体发生器产生的感生电动势曲线。实验中,线圈采用直径 $1.25\ \text{mm}$ 的漆包线绕制而成,线圈共 2 匝,线圈同样绕在磁体中间位置。由图可知,发生器产生的感生电动势波形与图 13 所示相似,但曲线上升段不是很光滑,上升时间约为 $3.28\ \mu\text{s}$,感生电动势峰值约为 $243.0\ \text{V}$,平均每匝线圈产生感生电动势为 $121.5\ \text{V}$,与由圆柱形结构磁体发生器产生的感生电动势相比,平均每匝线圈高 $26.0\ \text{V}$ 。

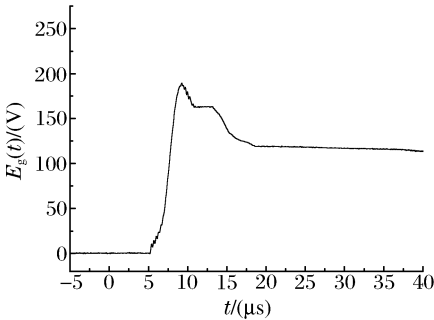


图 13 圆柱形结构磁体的脉冲发生器的感生电动势曲线(编号 1)
Fig. 13 The waveform of the electromotive force of the generator with the $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cylinder (No. 1)

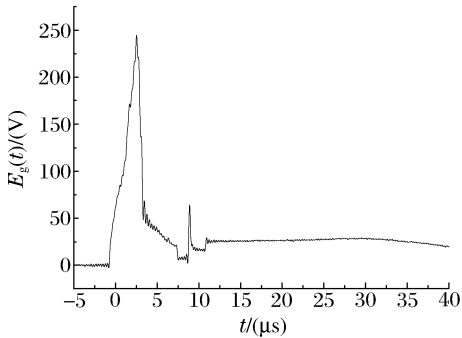


图 14 四拼结构圆柱形磁体的脉冲发生器的感生电动势曲线(编号 6)
Fig. 14 The waveform of the electromotive force of the generator with the four-combined $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cylinder (No. 6)

通过改变线圈匝数和线圈绕线的直径进行了多发对比实验,实验条件和结果如表 2 所示。实验测量数据表明:线圈绕线的直径对于感生电动势峰值及波形的影响不大。对增加绝缘材料的四拼结构磁体的发生器,产生感生电动势平均每匝线圈比圆柱形结构磁体的发生器产生的电动势约高 $20.0\ \text{V}$ 。而磁体结构的静磁场分析结果表明,四拼结构磁体的中心截面通过的总磁通量要略低一些,如果不考虑磁体中的涡流损耗效应,按公式(3)的计算结果,产生的感生电动势也应该略低一些,这与实验结果相反。因此,本实验结果验证了把磁体分割并增加绝缘层阻断磁体中的涡流回路的方法,可以有效地增加爆炸去磁发生器电能输出。这对高效率爆炸去磁脉冲发生器的设计具有指导意义。

表 2 实验条件和结果
Table 2 The experimental results of electromotive force measure

Experiment No.	Ferromagnet structure	Coils		Electromotive force $E_g(t)$		
		Wire diameter of coils/(mm)	Turns of coils N	Rising time $t/(\mu\text{s})$	Peak value $E_{g,\text{max}}/(\text{V})$	Average peak value of single turn $\overline{E}_{g,\text{max}}/(\text{V})$
1	Cylinder	0.20	2	4.11	191.0	95.5
2	Cylinder	2.50	5	5.04	350.0	70.0
3	Cylinder	2.50	4	5.09	287.0	71.8
4	Four-combined cylinder	2.50	4	5.54	470.0	117.5
5	Four-combined cylinder	0.20	2	4.28	228.0	114.0
6	Four-combined cylinder	1.25	2	3.87	243.0	121.5

6 结 论

(1) 磁体的静磁场模拟计算表明,增加绝缘层的圆柱形钕铁硼永磁体与无绝缘层的圆柱形钕铁硼永磁体的磁场分布规律相似,磁感应强度有较小幅度的减小。

(2) 感生电动势测量结果表明:对于磁体中增加绝缘层的爆炸去磁脉冲发生器输出感生电动平均每匝比没有绝缘层的发生器约高 20.0 V。

(3) 研究表明,通过把磁体分割加绝缘层阻断磁体中涡流回路的方法,可以有效地减少涡流损耗,增加爆炸去磁发生器电能输出。这对高效率爆炸去磁脉冲发生器的设计具有指导意义。

References:

- [1] Bancroft D, Peterson E L, Minshall F S. Polymorphism of Iron at High Pressure [J]. J Appl Phys, 1956, 7(3): 291.
- [2] Anderson G W, Neilson F W. Effect of Strong Shocks in Ferromagnetic Materials [J]. Bull Amer Phys Soc, 1957, 2: 302.
- [3] Kulterman R W, Neilson F W, Benedick W B. Pulsed Generator Based on High Shock Demagnetization of Ferromagnetic Material [J]. J Appl Phys, 1958, 29(3): 500-501.
- [4] Wayne R C. Effect of Hydrostatic and Shock-Wave Compressions on the Magnetization of A 31.4% Ni-Fe Alloy [J]. J Appl Phys, 1969, 40(1): 15-22.
- [5] Mineev V N, Ivanov A G. Electromotive Force Produced by Shock Compression of a Substance [J]. Uspekhi Fizicheskii Nauk, 1976, 119(1): 75-109.
- [6] Kristiansen M, Dickens J, Shkuratov S I. Fundamental Limits to Compact, Expendable Pulsed Power and Microwave Sources [R]. ADA383182, 2000: 3-15.
- [7] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Compact Explosive-Driven Generator of Primary Power Based on a Longitudinal Shock Wave Demagnetization of Hard Ferri- and Ferromagnets [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(5): 1681-1691.
- [8] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Shock Wave Demagnetization of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ Hard Ferrimagnetics [J]. J Appl Phys, 2002, 91(5): 3007-3009.
- [9] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Transverse Shock Wave Demagnetization of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ High-Energy Hard Ferromagnetics [J]. J Appl Phys, 2002, 92(1): 159-162.
- [10] Shkuratov S I, Evgueni F, Talntsev E F, et al. Compact Autonomous Explosive-Driven Pulsed Power System Based on a Capacitive Energy Storage Charged by a High-Voltage Shock-Wave Ferromagnetic Generator [J]. Rev Sci Instrum, 2006, 77: 066107(1)-066107(4).
- [11] Ni G Z. Engineering Electromagnetic Theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
倪光正. 工程电磁场原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [12] Калантаров П Л, Цейтлин Л А. Inductance Calculation Manual [M]. Translated by Chen T M. Beijing: Machine Industry Press, 1992. (in Chinese)
卡兰塔罗夫, 采伊特林. 电感计算手册 [M]. 陈汤铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [13] Chen X R, Xu L Y, Chen S Y, et al. The Performances and Technics of Explosives [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988. (in Chinese)
陈熙蓉, 许丽云, 陈书言, 等. 炸药性能与装药工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [14] Zhou S Z, Dong Q F. Highest Strong Permanent Magnet—Fe Series Rare Earth Permanent Magnetic Materials [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2004. (in Chinese)
周寿增, 董清飞. 超强永磁体——稀土铁系永磁材料 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [15] Liu G Q, Zhao L Z, Jiang J Y. Ansoft Engineering Electromagnetic Finite Cell Analysis [M]. Beijing: Electronic Industries Press, 2005. (in Chinese)
刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

Effect of Eddy Current Waste on the Output Performance of the Explosive-Driven Ferromagnetic Generators

CHEN Lang, WU Jun-Ying, FENG Chang-Gen

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: For increasing the output energy of the explosive-driven ferromagnetic generators, a new structure of ferromagnetic element has been designed to reduce the eddy current waste. The cylindrical $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ rare-earth magnet was cut into four separate parts, and the insulated layers were placed between magnet parts for keeping them insulating from each other. And then the four magnet parts with insulated layers were combined together again to form a new cylinder. The magnetic field calculations of the magnet cylinder and the cylinder with insulated layers were conducted by the Maxwell 3D code of the electromagnetic analysis software. The initial magnetic flux distribution of two types of cylinders were obtained. The detonation tests of ferromagnetic generators were carried out, and the electromotive forces of ferromagnetic generators were measured. The results show that the eddy current waste of the generator with insulated layers is lower than the generator without insulated layers, and the output energy of the former is higher than that of the latter.

Key words: explosive demagnetization; eddy current waste; $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ rare-earth magnets; pulse power technology