文章编号：1000-5773(2011)01-0029-07

钕铁硼强磁体的冲击去磁规律实验研究*

伍俊英[1]，陈 朗[1]，李 维[2]，冯长根[1]

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2. 海军装备部驻重庆地区军事代表局，重庆 400042)

摘要：为了研究钕铁硼($Nd_2Fe_{14}B$)强磁体在冲击加载作用下的去磁规律，建立了平面波爆炸冲击加载实验装置，进行了冲击去磁实验。测量了冲击去磁产生的感生电动势，获得了冲击去磁时间、脉冲宽度等性能参数。通过改变加载磁体的冲击波强度和磁体尺寸参数，分析了$Nd_2Fe_{14}B$磁体在不同冲击波压力作用下的去磁程度和磁体尺寸参数对感生电动势大小的影响规律。实验结果表明：$Nd_2Fe_{14}B$磁体发生冲击去磁的临界压力低于 8.52 GPa；感生电动势随着磁体直径的增加而增加，随着磁体高度的增加而减小。

关键词：$Nd_2Fe_{14}B$磁体；冲击去磁；爆炸去磁脉冲功率源；炸药

中图分类号：O383 **文献标识码**：A

1 引 言

永磁性材料在受到强冲击波压缩后，磁性会减弱或完全消失，这种物理现象称为冲击去磁效应[1]。1957 年，Anderson 和 Neilson[2]最早提出了基于冲击去磁效应的脉冲功率源装置，其工作原理是，利用炸药爆炸产生冲击波作用于带线圈的磁体，使磁体快速去磁，变化的磁通量使线圈中产生脉冲感生电流。爆炸去磁脉冲功率源具有体积小、功率高和使用方便等特点，在武器系统中具有特殊的用途[3]。

在 20 世纪 90 年代以前，人们都是以软磁材料为研究对象。由于软磁体的能量密度较低，以它作为能量转换单元的爆炸去磁脉冲功率源，其输出功率不高，因而实用范围有限。1966 年，Royce 等人[4]对铁-镍磁体($NiFe_2O_4$)冲击去磁的研究表明，只有当冲击压力在 40 GPa 以上时，磁体才能被完全去磁。1969 年，Wayne[5]研究发现，冲击波压力在 4.2 GPa 以上时，铁-镍(31.4%Ni-68.6%Fe)磁体的去磁率能够达到 85%，随着压力的增加去磁率最终达到 100%。20 世纪 90 年代后，出现以钕铁硼($Nd_2Fe_{14}B$)为代表的强磁性材料，其磁性强度比软磁材料高出几十倍[6]。以强磁体为基础的爆炸去磁脉冲功率源，其单位体积输出功率大幅度提高。至此，人们才开始重视对强磁体能量转换单元的爆炸去磁脉冲功率源的研究，但研究内容主要集中在脉冲功率源装置的设计、应用以及如何提高输出性能等方面[7-10]，对强磁材料冲击去磁特性的研究还很少，对强磁材料的冲击去磁条件和去磁效率的影响规律还认识不清楚。因此，深入开展$Nd_2Fe_{14}B$强磁材料冲击去磁规律的研究，对爆炸去磁脉冲功率源的研究具有重要的理论和实际意义。

本工作以圆柱形 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体为研究对象，采用炸药平面波爆炸冲击加载方式，进行冲击去磁实验。测量感生电动势波形，分析磁体发生冲击去磁的时间、脉冲宽度等重要特征参数。通过在炸药柱和磁体之间增加隔板的方式，改变加载磁体的冲击波强度，对线圈中产生的感生电动势进行分析，从而确

* **收稿日期**：2010-05-31；**修回日期**：2010-08-22
基金项目：国家自然科学基金面上项目(11072036)；北京理工大学基础研究基金(20080242001)
作者简介：伍俊英(1977—)，女，博士，讲师，主要从事爆轰、爆炸与冲击等方面的研究. E-mail：wjy1312@bit.edu.cn

定磁体在不同冲击强度加载下是否发生去磁以及去磁的程度。分析磁体尺寸参数对感生电动势峰值的影响规律。

2 冲击去磁放电过程的基础理论

图 1 是磁体冲击去磁放电过程的工作原理示意图[8]，其中图 1(a)是磁体在冲击波作用之前的磁场分布，图 1(b)是冲击波作用过程中的磁场分布。当冲击波作用于带线圈的圆柱形磁体时，磁体的磁性会发生改变，在冲击波作用之前，圆柱形磁体中的初始磁场强度为 $\boldsymbol{B}_0$，在冲击波作用后，磁性会减弱或者完全消失。如果冲击波足够强时，被冲击波作用后磁体的磁性完全消失，而磁体中未受冲击压缩作用部分的磁场进行重新分布，磁场强度由初始 $\boldsymbol{B}_0$ 变为 $\boldsymbol{B}_0'$，使得线圈中通过的磁通量发生改变。



(a) (b)

图 1 冲击去磁放电过程的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of shock wave demagnetization principle

根据法拉第电磁感应定律可知，当穿过导体回路的磁通量发生变化时，线圈回路中将会产生感生电动势和感生电流，从而实现由磁能向电能的转化，感生电动势的大小与穿过回路的磁通量随时间变化率成正比，那么在线圈中产生的感生电动势 $E_g(t)$ 为

$$E_g(t) = -N\frac{d\Phi}{dt} \tag{1}$$

式中：N 是线圈匝数，Φ 是磁通量，t 是时间。

对(1)式两边分别积分，可以获得通过单匝线圈磁通量的改变量 $\Delta\Phi_f(t)$，即

$$\Delta\Phi_f(t) = -\frac{1}{N}\int_0^t E_g(t)\,dt \tag{2}$$

磁体的去磁率 η 反映了磁体在冲击加载作用下的去磁化程度，可根据(3)式计算得到

$$\eta = [\Delta\Phi_f(t)/\Delta\Phi_{0,\max}] \times 100\% \tag{3}$$

式中：$\Delta\Phi_{0,\max}$ 为通过单匝线圈的初始磁通量。对于冲击去磁实验，线圈中产生的感生电动势 $E_g(t)$ 随时间的变化曲线可以通过实验获得。将实验测得感生电动势 $E_g(t)$ 代入式(2)中，则计算出的磁通量改变量 $\Delta\Phi_f(t)$ 就是冲击去磁过程中通过线圈中磁通量的改变量。

由于圆柱形结构磁体其磁路为开路状态，磁体内的磁场分布不均匀，因此对于线圈中通过的初始磁通量 $\Delta\Phi_{0,\max}$ 不能采用简单解析计算公式得到。本文作者采用电磁场有限元分析软件，对磁体进行静磁场分析，计算线圈中通过的初始磁通量 $\Delta\Phi_{0,\max}$，具体计算方法见文献[11]。

3 爆炸冲击去磁实验

图 2 是本研究设计的爆炸冲击去磁实验测量系统示意图。实验系统由雷管、炸药平面波透镜、加强药柱、铜隔板、$Nd_2Fe_{14}B$ 磁体、线圈、高压探头、示波器和 RC 型脉冲测时网络等组成。雷管起爆炸药平面波透镜和加强药柱产生平面爆轰波，直接或者经隔板衰减后沿轴向加载 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体，磁体发生冲击去磁，使线圈中产生感生电动势。

实验中采用高压探头测量线圈中产生的感生电动势。线圈的两极通过同轴电缆分别连接高压探头

的正、负极。由于高压探头的输入阻抗较高,线圈中最大电流小于 10 μA,电流可以忽略不计,因此,可以认为线圈处于断开状态,高压探头测量的电压可以等效为感生电动势。

RC 型脉冲测时网络是用来产生一个时序信号的脉冲装置,它将触发探针导通的信号转换成一个脉宽约 1 μs 的脉冲信号。第 1 个触发探针埋在炸药平面波透镜和加强药柱之间,第 2 个探针埋在 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体上表面中心位置处。第 1 个探针用于触发示波器开始工作,第 2 个探针用于确定冲击波到达磁体的时间。高压探头和 RC 型脉冲测时网络输出信号由示波器记录。

实验中,炸药平面波透镜的直径为 50 mm 或 80 mm;加强药柱为 8701 炸药,其直径为 50 mm 或 80 mm,高为 10 mm; $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的直径为 50 mm,高为 30 mm。8701 炸药的密度为 1.72 g/cm^3,爆速为 8.1 km/s,爆压为 30 GPa[10]。$Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的密度为 7.5 g/cm^3,剩磁为 1.21～1.25 T,矫顽力大于 880 kA/m,最大磁能积为 0.28～0.304 J/cm^3[10]。

本工作进行了 3 种入射冲击波强度作用于 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的冲击去磁实验。第 1 种是采用炸药爆炸冲击波直接作用于磁体,第 2 种是爆炸冲击波经 60 mm 厚铜隔板衰减后作用于磁体,第 3 种铜隔板的厚度为 86 mm。在感生电动势波形分析实验中,采用炸药柱产生爆轰波直接加载 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的方式。

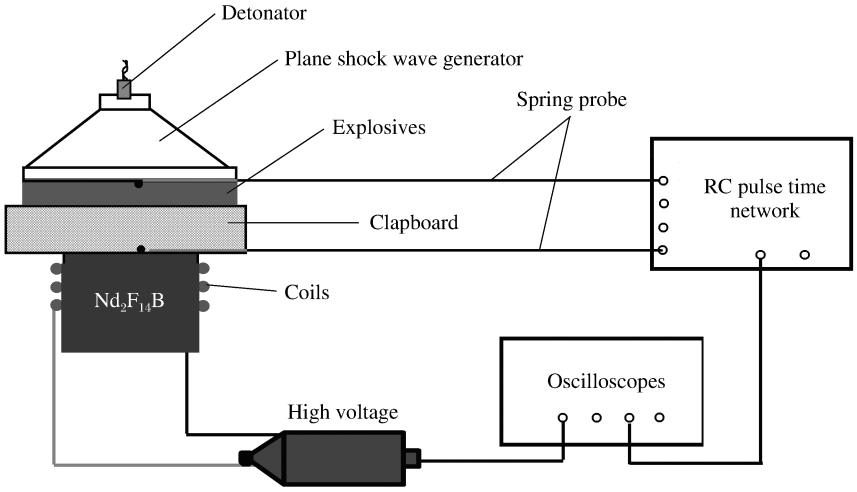


图 2　爆炸冲击去磁实验测量系统示意图

Fig. 2　Experimental set-up of explosive-driven shock wave demagnetization

4　实验结果及分析

4.1　感生电动势波形分析

图 3 是输出的感生电动势曲线和探针信号曲线。在探针信号曲线中出现了两个峰值,第 1 个峰值起跳时间 t_0 为零,第 2 个峰值起跳时间 t_1 为 1.08 μs,表明在零时刻爆轰波到达加强炸药柱的上表面,在 1.08 μs 时刻爆轰波到达了 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的上表面,开始在磁体中透射冲击波。图 3 中所示的电压曲线约在 1.36 μs 时开始上升,由此可知,磁体在冲击波作用下很快开始发生冲击去磁,从冲击波进入 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体到开始发生冲击去磁的时间约为 0.28 μs。

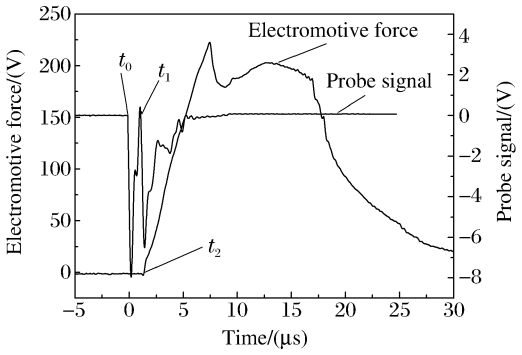


图 3　感生电动势曲线和探针信号曲线

Fig. 3　Electromotive force and probe signal curves

由图 3 中的感生电动势曲线可知,感生电动势近似一个方波,在 7.49 μs 时,感生电动势达到最大

值，上升时间约为 6.29 μs，脉宽约为 28.5 μs。对于炸药爆炸直接加载磁体的方式，冲击波经过 30 mm 高 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的时间大约为 7.80 μs（这个数据是根据实验测量获得的[10]），由此可知，产生的感生电动势脉宽远大于冲击波经过磁体的时间。然而 Anderson 和 Neilson 给出的计算公式[2]表明，对于闭路磁体产生的感生电动势脉宽等于冲击波经过磁体的时间，显然与本文实验研究结果有一定的差距，由此可以看出，Anderson 和 Neilson 给出的脉宽计算公式[2]，对于开路磁体情况还需要进一步修正。

4.2 冲击去磁能量转化效率分析

表 1 是冲击去磁感生电动势测量的实验结果及实验条件。表 1 中的入射冲击波压力是本文作者通过实验测量和计算获得的，其中，对于无隔板和隔板厚为 60 mm 两种情况的入射冲击波压力是采用锰铜压力传感器测量获得的，隔板厚为 86 mm 的情况是通过有限元流体力学计算方法得到的，具体测量和计算方法见文献[12]。

表 1 冲击去磁感生电动势测量实验结果及条件

Table 1 Experimental results of electromotive force induced shock wave demagnetization with different conditions

No.	Copper clapboard thickness/(mm)	Shock wave incidence pressure/(GPa)	Turns of Coils /(N)	Electromotive force $E_g(t)$ Peak value per turn /(V)
1	—	45.29(Exp.)	2	71.52
2	60	13.87(Exp.)	5	61.20
3	86	8.52(Calc.)	4	42.50

图 4 给出了爆炸冲击波直接作用于磁体产生的感生电动势曲线和磁通量变化曲线。爆炸冲击波直接作用于磁体时，冲击波强度最大，入射冲击波压力在 45 GPa 左右。由图 4 中磁通量的变化曲线可知，平均每匝线圈磁通量的最大改变量 $\Delta\Phi_f(t)$ 约为 1 237.02 μWb。图 5 给出了爆炸冲击波直接作用于磁体时的去磁率随时间变化的曲线。由图 5 可知，最大去磁率 η 值约为 87.94%。在去磁率计算中，通过单匝线圈的初始最大磁通量 $\Delta\Phi_{0,max}$ 约为 1 414.60 μWb。

图 6 给出了冲击波经 60 mm 厚铜隔板衰减后磁体中产生的感生电动势曲线和磁通量变化曲线。经60 mm厚铜隔板衰减后，磁体中冲击波的入射压力约为 13.87 GPa。由图 6 可知，磁体线圈中仍有感生电动势产生，平均每匝线圈的感生电动势峰值为 61.20 V。同爆炸冲击波直接作用于磁体的情况相比，感生电动势峰值降低了 10.32 V。由图 6 中磁通量的变化曲线可知，磁通量的最大改变量约为 623.25 μWb。图 7 给出了冲击波经60 mm厚铜隔板衰减后磁体的去磁率曲线。在这种情况下，去磁率约为 44.07%，与图 5 相比，降低了 43.87%。

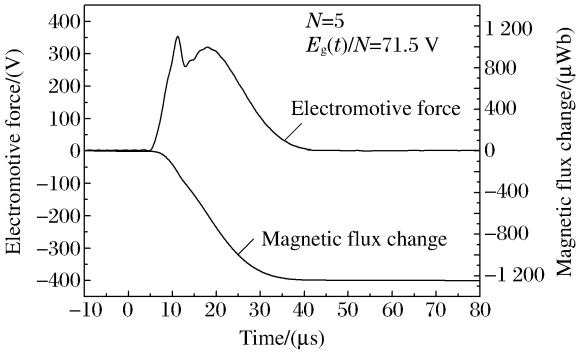


图 4 爆炸冲击波直接作用时的感生电动势曲线和磁通量变化曲线

Fig. 4 Electromotive force and magnetic flux change curves without clapboard

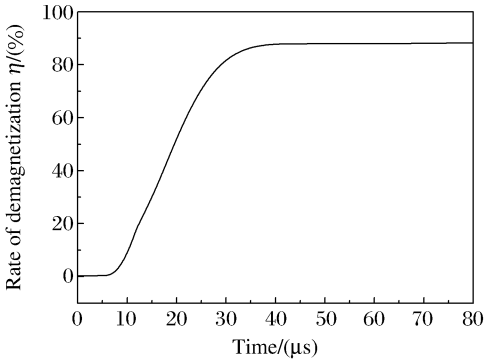


图 5 爆炸冲击波直接作用时的冲击去磁率曲线

Fig. 5 Shock wave demagnetization rate curve without clapboard

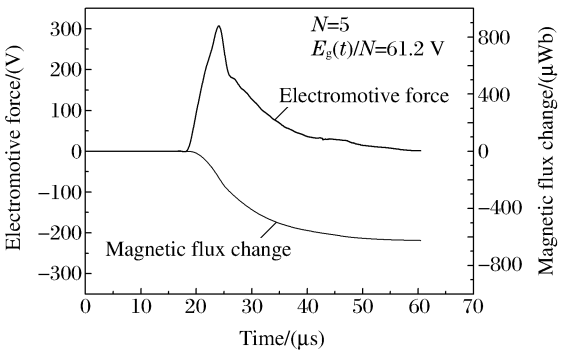


图 6　60 mm 厚铜隔板时的感生电动势曲线和磁通量变化曲线

Fig. 6　Electromotive force and magnetic flux change curves with 60 mm thick Cu clapboard

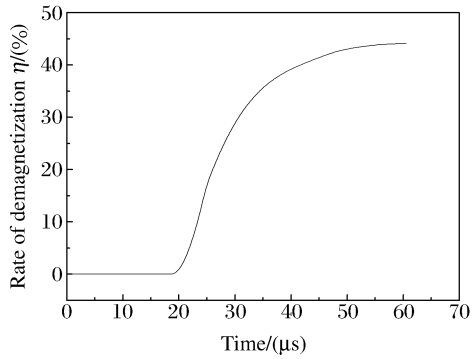


图 7　60 mm 铜隔板时的冲击去磁率曲线

Fig. 7　Shock wave demagnetization rate curve with 60 mm thick Cu clapboard

图 8 给出了冲击波经 86 mm 厚铜隔板衰减后磁体中产生的感生电动势曲线和磁通量变化曲线。对于这种情况,冲击波的入射压力减小到了 8.52 GPa。由图 8 可知,线圈中仍有感生电动势输出,但感生电动势的峰值较低,平均每匝线圈产生的感生电动势为 42.50 V,磁通量的最大改变量约为 505.40 μWb。图 9 给出了铜隔板厚为 86 mm 时磁体的冲击去磁率时间曲线。由图可知,在隔板加厚的情况下,$Nd_2Fe_{14}B$ 磁性材料的冲击去磁率更低,约为 35.60%。

从不同入射冲击波压力作用下的实验结果来看,$Nd_2Fe_{14}B$ 磁体的入射冲击波越强,产生的感生电动势越大,去磁率越高。从隔板厚为 86 mm 的情况来看,$Nd_2Fe_{14}B$ 磁体发生冲击去磁的临界压力低于 8.52 GPa。

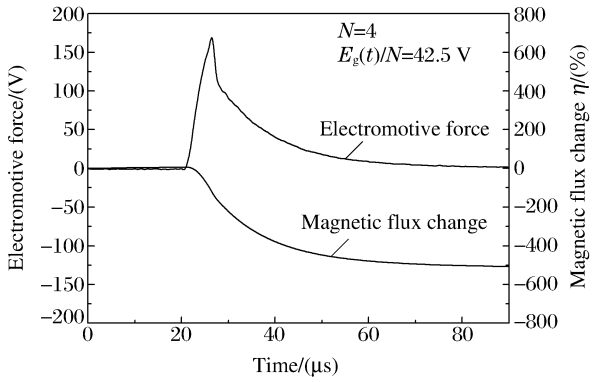


图 8　86 mm 厚铜隔板时的感生电动势曲线和磁通量变化曲线

Fig. 8　Electromotive force and magnetic flux change curves with 86 mm thick Cu clapboard

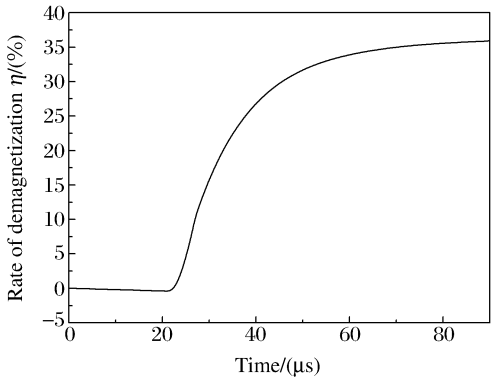


图 9　86 mm 厚铜隔板时的冲击去磁率曲线

Fig. 9　Shock wave demagnetization rate curve with 86 mm thick Cu clapboard

4.3　磁体尺寸参数对感生电动势的影响

表 2 给出了不同尺寸磁体产生的感生电动势。由表 2 可知,当直径相同、高度不同时,磁体越高产生的感生电动势峰值反而越小,上升时间越长。这表明,尽管磁体越高,磁体内磁场强度越大,线圈中通过的最大初始磁通量也越大,但是由于磁体越高,冲击波通过磁体的时间越长,反而使线圈中磁通量的变化率减小,产生的感生电动势变小。因此单从通过增加磁体高度的方式不利于提高感生电动势峰值。在磁体高度一致、直径不同时,直径为 60 mm 磁体产生的感生电动势峰值约为直径 30 mm 磁体的两倍。

由此可知,对于爆炸去磁脉冲功率源,在磁体高度确定的情况下,可以通过适当增加磁体直径的方法来提高输出感生电动势的峰值。

表 2 不同尺寸磁体产生的感生电动势

Table 2 Electromotive forces with different sizes of magnets

No.	Magnet sizes /(mm×mm)	Turns of coils /(N)	Electromotive force $E_g(t)$	
			Rise time of /(μs)	Peak value per turn/(V)
1	50×30	2	4.99	95.12
2	50×60	1	7.89	67.01
3	80×60	6	11.62	131.41

5 结 论

(1) 不同冲击波强度下的冲击去磁实验研究表明,入射冲击波压力越大,平均每匝线圈产生的感生电动势峰值越大,上升时间越快,能量转化效率也越高。

(2) $Nd_2Fe_{14}B$ 磁体容易发生冲击去磁效应,发生冲击去磁的临界压力低于 8.52 GPa。

(3) 磁体尺寸对感生电动势的影响研究结果表明,当磁体直径相同时,磁体高度越高感生电动势峰值反而越低;当磁体高度相同时,磁体直径越大感生电动势峰值越大。

References:

[1] Novikov V V, Mineev V N. Magnetic Effects during Shock Loading of Magnetized Ferro- and Ferrimagnets [J]. Russian Original, 1983, 19(3): 336-342.

[2] Anderson G W, Neilson F W. Effect of Strong Shocks in Ferromagnetic Materials [J]. Bull Amer Phys Soc, 1957, 2: 302.

[3] Altgilbers L L, Brown M D J, Grishnaev I, et al. Magnetocumulative Generators [M]. New York: Springer-Verlag, 2000.

[4] Royce E B. Anomalous Shock-Induced Demagnetization of Nickel Ferrite [J]. J Appl Phys, 1966, 37(11): 4066-4070.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Prishchepenko A, Tretyakov D. Dissipative Energy Losses in Ferromagnetic Generator of Frequency [J]. 12th IEEE International Pulsed Power Conference, 1999, 2: 856-858.

[8] 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.

[9] Shkuratov S I, Talantsev E F, Baird J, et al. Compact Autonomous Completely Explosive Pulsed Power System [J]. IEEE Pulsed Power and Plasma Science, 2007, 2: 1347-1351.

[10] Wu J Y, Chen L, Feng C G. Experiments and Theoretical Calculation of Explosive-Driven Shock Wave Ferromagnetic Generators [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 398-404. (in Chinese)

伍俊英，陈　朗，冯长根.爆炸去磁脉冲功率发生器的实验和理论计算 [J].爆炸与冲击,2007,27(5):398-404.

[11] Chen L,Wu J Y,Feng C G. The Effect of Eddy Current Waste on the Output Performance of the Explosive-Driven Ferromagnetic Generator [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2007,21(4):359-366. (in Chinese)
陈　朗,伍俊英,冯长根.涡流损耗对爆炸去磁脉冲发生器输出性能的影响 [J].高压物学报,2007,21(4):359-366.

[12] Wu J Y. Experimental and Theoretical Investigation of Explosive-Driven Shock Wave Ferromagnetic Generators [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2007. (in Chinese)
伍俊英.爆炸去磁脉冲功率源的理论和实验研究 [D].北京:北京理工大学,2007.

Experimental Study on Shock Wave Demagnetization of $Nd_2Fe_{14}B$ Hard Ferromagnetic

WU Jun-Ying[1], CHEN Lang[1], LI Wei[2], FENG Chang-Gen[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Military Representative Office of Naval Equipment Department in Chongqing, Chongqing* 400042, *China*)

Abstract: For the study of the demagnetization performance of $Nd_2Fe_{14}B$ ferromagnetic under shock wave loading, the plane shock wave loading experiment device was established, and the shock demagnetization experiments were conducted. The electromotive forces were measured, and the shock demagnetization time and pulse width were obtained. The demagnetization rates with different shock wave pressures were discussed, and the effects of magnet sizes on the electromotive force were analyzed. The results show that the time is about 0.28 μs between the shock wave loading $Nd_2Fe_{14}B$ ferromagnetic and shock demagnetization occurring. The critical pressure of demagnetization is lower than 8.52 GPa. The electromotive force increases with the increase of the magnet diameter and the decrease of the magnet height.

Key words: $Nd_2Fe_{14}B$; shock wave demagnetization; explosive-driven shock demagnetization generator; explosives