第21卷 第2期
2007年6月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 21, No. 2
June, 2007

文章编号:1000-5773(2007)02-0210-05

钕铁硼的冲击压缩特性*

李巧燕[1,2],施尚春[2],杨金文[1,2],孙 悦[1]

(1. 四川大学原子与分子物理研究所,四川成都 610065;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621900)

摘要:利用二级轻气炮对恒磁体钕铁硼进行冲击压缩,采用阻抗匹配法进行测量,获得了平均初始密度为7.346 g/cm^{3}的钕铁硼Hugoniot关系数据。实验结果表明,该种钕铁硼在19~78 GPa范围内,其D-u_p满足线性变化关系,即:C_0、λ分别为3.686 km/s、1.059,是一种稳定的压缩过程,其间没有相变产生。而较小的λ值表明该种钕铁硼材料偏向于疏松体结构,且容易被压缩。同时实验结果也为其状态方程和脉冲功率源等方面的研究工作提供了可资参考的实验参数。

关键词:钕铁硼;Hugoniot;冲击压缩
中图分类号:O521.21 **文献标识码**:A

1 引 言

有关硬磁材料利用冲击波去磁产生脉冲电流的理论研究和实验探索工作可以追溯到20世纪50年代[1]。随着研究工作的不断深入与拓展,人们逐渐利用恒磁体炸药爆炸冲击波去磁方法制作脉冲功率源,因其具有结构简单、小型、输出功率大、工程应用较为灵活方便等特点,注定其有广泛的应用前景,进而越来越多的受到人们的关注[2-4]。

钕铁硼($Nd_2Fe_{14}B$)是目前世界已有的磁综合性能最好的硬磁材料,因而成了相关研究工作中的首选材料。但是,由于钕铁硼($Nd_2Fe_{14}B$)出现的时间还相对较短,对它的许多物性认识还相对有限,主要关注点还仅限于电磁学方面,对它的力学特性尤其是高压结构力学特性至今还没人涉足,这给一些实际应用及问题分析带来不便。Shkuratov[2]等人在用钕铁硼材料进行爆炸去磁脉冲电源实验研究工作时,为了知道爆炸冲击波在钕铁硼材料中的传播压力,分别用单质铁和单质钕的Hugoniot参数通过混合法则计算钕铁硼的Hugoniot参数,其结果正确与否,必须通过相关的实验数据才能给以评判。

本工作通过对钕铁硼进行平面冲击波压缩实验,获取这种材料在高温高压加载条件下的相关物性数据,确定其动态响应特性,以弥补其不足。

2 实验方法

2.1 实验原理

冲击压缩条件下,物质热力学特性满足基于冲击波阵面上质量、动量、能量守恒Rankine-Hugoniot关系式。当满足一次冲击压缩过程条件$u_0=0$、$p_0 \ll p$、$E_0 \ll E$,可得

$$p = \rho_0 D u_p \tag{1}$$

$$V = V_0(1 - u_p/D) \tag{2}$$

$$E = (1/2)p(V_0 - V) \tag{3}$$

* 收稿日期:2006-06-22;修回日期:2006-09-21
作者简介:李巧燕(1979—),女,硕士研究生,主要从事高压凝聚态物理研究. E-mail:liqy06@163.com
通讯作者:施尚春(1957—),男,副研究员,主要从事高压凝聚态物理研究. E-mail:sschun891@126.com

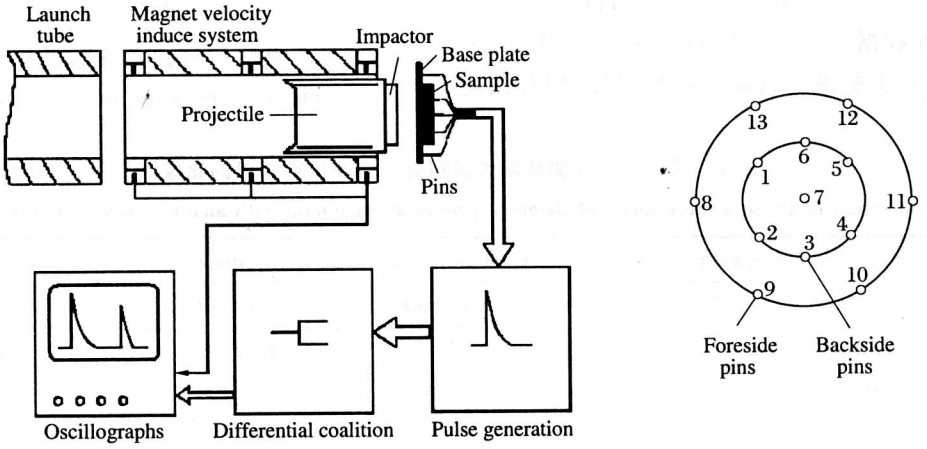
式中：D 为冲击波速度、p 为冲击波压力，ρ_0、u_p、V_0、V 分别为样品的初始密度、粒子速度、初态体积、终态体积，E 为体系内能。事实上，在冲击压缩碰撞装置中，探针阵列面差 Δs 是一定的，故冲击波速度 D 直接由测量时间间隔 Δt 得到，即 $D=\Delta s/\Delta t$。而冲击波阵面后的粒子速度无法直接测量，只能通过已知飞片和靶碰撞面材料的 Hugoniot 数据，采用阻抗匹配法[6]求解。考虑到样品材料与比对材料间界面两边的压力相等，当飞片和靶属于同一种材料时：$u_{p1}=W_f/2$；而当飞片和靶属于不同两种材料时则有

$$u_{p1}^2(\rho_{0f}\lambda_f-\rho_{01}\lambda_1)-u_{p1}(\rho_{0f}C_{0f}+2\rho_{0f}\lambda_f W_f+\rho_{01}C_{01})+\rho_{0f}W_f(C_{0f}+\lambda_1 W_f)=0 \tag{4}$$

式中下标“f”分别代表飞片的参数，最后由 $p=\rho_0 D u_p$ 得到样品中相应的冲击波压力 p。

2.2　测试方法

对钕铁硼的平面冲击波加载实验是在二级轻气炮上进行的，弹丸的碰靶速度通过安装在炮口上的磁测速装置获得，测量误差在±0.2%以内[5]，冲击波速度通过由样品靶前后界面圆形布局的电探针、脉冲网络源、微分耦合电路及示波器组成的系统测量得到，实验装置及电探针布局见图 1 所示。前后界面上的电探针分别旋转交错 30°，在后界面上的中心还装有一根电探针。微分耦合电路是将前后两个台面上相邻两个探针信号分别由 RC 微分电路合并成一路，这样用示波器一个通道就可记录到不同台面上两个探针的两个时间信号，1～6 号和 8～13 号 12 根探针信号只需要 6 个示波器通道即可。图 2 是微分耦合电路原理图，图 3 是一次典型实验的时间信号记录波形。



(a) Shock wave loading and test system　　(b) Rotundity distribution of target probes

图 1　实验装置及电探针布局示意图

Fig. 1　Experiment equipment and sketch map of electricity probes

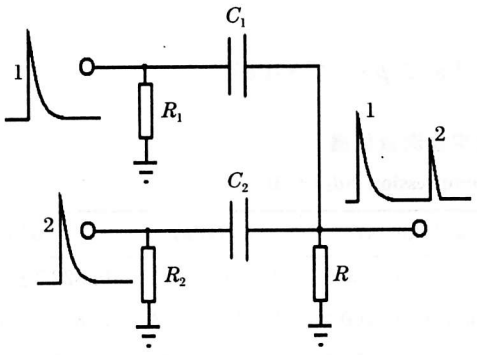


图 2　微分耦合电路原理图

Fig. 2　Circuit principle diagram of differential coefficient coupling

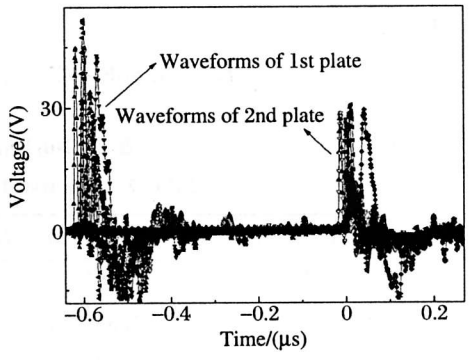


图 3　典型的实验示波器记录脉冲信号波形

Fig. 3　Registering pulse waveform of the typical experiment

由于飞片在飞行过程中可能会发生变形，由平面转变为曲面形状，且可能与样品靶以一定的角度相碰撞，对此需进行必要的修正。

假设飞片仅是以一定的倾角击靶，探针记录的冲击波到达每一圆周所测的平均时间为

$$\tau_2 = (1/3)[(t_1 + t_4)/2 + (t_2 + t_5)/2 + (t_3 + t_6)/2] \tag{5}$$

$$\tau_1 = (1/3)[(t_8 + t_{11})/2 + (t_9 + t_{12})/2 + (t_{10} + t_{13})/2] \tag{6}$$

式中：τ_1、τ_2 分别为冲击波到达前界面和后界面的时间。

当碰撞既有倾斜、冲击波又有弯曲时，可以采取一种类曲面光滑处理的方法，即：分别将前后界面上的圆形分布探针按极坐标 θ 轴展开，这样便得到一个关于 θ 角的时间函数

$$\tau_j(\theta) = f_j(\theta) \qquad (j = 1,2) \tag{7}$$

将实验测到的前后界面上各探针的时间分别按相同阶次的多项式拟合，便得到两条光滑的时间曲线。冲击波到达前后界面的时间差为

$$\Delta T = \left\{ \sum_0^{360} [f_2(\theta) - f_1(\theta)]\Delta\theta \right\} \Big/ \sum_0^{360} \Delta\theta \tag{8}$$

图 4 是一次典型实验获得的时间极角函数曲线。基于两种数据处理方法所得的结果见表 1。可见，两种处理方法所得的结果一致性很好，相对偏差在±1%之间。

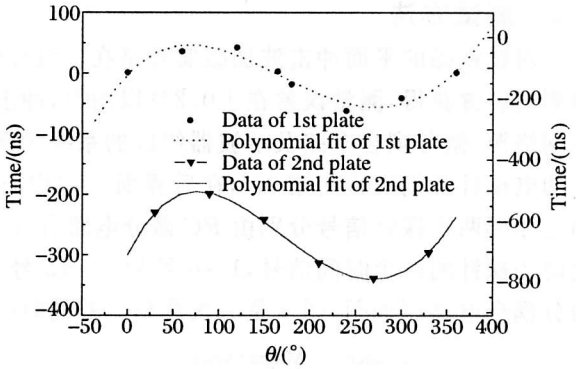


图 4 时间极角函数曲线

Fig. 4 Time angle function curve

表 1 冲击波速度测量两种数据处理方法所得结果的比较

Table 1 Comparison of shock wave velocity of diagonal probes average data with analogy curve side lubricity disposal

Shot No.	Diagonal probes average data		Analogy curve side lubricity disposal		$(D_1 - D_2)/D_2$ /(%)
	Δt_1/(ns)	D_1/(km/s)	Δt_2/(ns)	D_2/(km/s)	
1	644.27	4.640 9	646.75	4.623 1	0.4
2	691.53	4.302 1	700.93	4.254 3	1.0
3	523.87	5.695 3	525.09	5.713 2	−0.3
4	605.58	4.928 6	604.44	4.946 7	−0.4
5	591.67	5.040 3	588.94	5.093 9	−1.0

3 实验结果及讨论

实验获得的钕铁硼的 Hugoniot 数据及状态参数详见表 2，将冲击波速度 D 和粒子速度 u_p 用线性拟合得到

$$D = 3.686 + 1.059u_p \qquad (19\ \text{GPa} < p < 78\ \text{GPa}) \tag{9}$$

表 2 $Nd_2Fe_{14}B$ 的冲击压缩实验测量数据

Table 2 The test data for shock compression $Nd_2Fe_{14}B$

Shot No.	Flyer-driver material	W_f/(km/s)	D/(km/s)	u_p/(km/s)	p/(GPa)	v/v_0
1	Al-Al	2.205 7	4.609 4	0.819 6±0.000 5	27.75±0.05	0.822 2±0.000 2
2	Al-Al	1.639 4	4.302 1	0.608 3±0.000 4	19.23±0.03	0.858 6±0.000 1
3	Cu-Cu	3.292 4	5.695 3	1.860 5±0.000 7	77.84±0.09	0.673 3±0.000 2
4	Ni-Al	3.193 7	4.928 6	1.135 1±0.000 4	41.10±0.06	0.769 7±0.000 3
5	Al-Al	3.577 0	5.040 3	1.377 1±0.000 7	50.99±0.08	0.726 8±0.000 3

图 5 为钕铁硼的 D-u_p 关系图，图 6 为钕铁硼的 p-v/v_0 关系图。由图 5 可以看出，钕铁硼在 19～78 GPa范围内 D-u_p 具有较好的线性关系。

按照文献[2]里的方法，由已知 Fe 和 Nd 各单质的 Hugoniot 关系，采用质量比(Fe 占 70.5%，Nd 占 29.5%)混合法则得到 $\rho_0=7.400$ g/cm^3 钕铁硼的 D-u_p 关系式为

$$D = 3.913 + 1.475u_p \tag{10}$$

与实验得到的结果有较大的偏差。从压强随比体积变化的图 6 中，可以看到本实验的钕铁硼在 19～78 GPa范围内没有发生突变，而且满足一定的单调连续变化关系，说明在此区间内材料一直维持相同的结构相。

图 6 给出了本实验测得的 p-v/v_0 曲线和文献[2,6]的数据拟合曲线。文献[2]中的曲线是理论预测的钕铁硼曲线，文献[6]中的曲线是单质铁的压缩曲线，可见本次实验曲线要低。与单质铁相比，说明属于陶瓷相结构的钕铁硼合金相对晶体相结构的单质铁组成要疏松些，在强冲击压缩下也容易压缩，那么合金的可压缩性要比单质的可压缩性高，体系表现出软化或更容易压缩；与理论预测的曲线相比，表明对不是按一般密度比合成的钕铁硼合金而言，低密度的样品对强冲击波衰减作用较明显，介质的冲击阻抗下降，可压缩性较大，材料的冲击压缩特性趋向于“软化”。

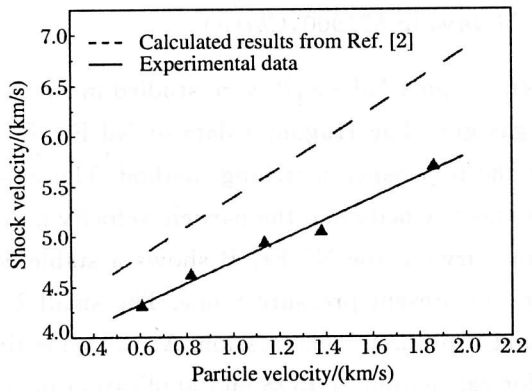


图 5　钕铁硼的 D-u_p 关系

Fig. 5　Experimental D-u_p data of $Nd_2Fe_{14}B$

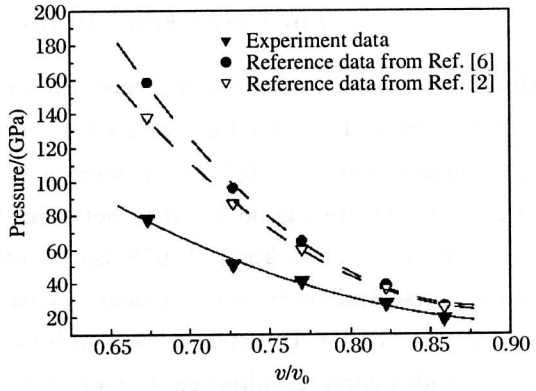


图 6　钕铁硼的 p-v/v_0 关系

Fig. 6　The relation between shock pressure and ratio of compression

4　结　论

用传统的电探针测试技术，直接测量钕铁硼样品中的冲击波速度 D，通过对对角线探针平均数据和类曲面光滑处理数据的比较，两种方法所得到的结果非常一致，一方面说明实验测试技术及处理方法有较高的可信度，另一方面说明对样品加载的冲击波的平面性很好。实验获得的钕铁硼的 Hugoniot D-u_p关系 $D=3.686+1.059u_p$ 在 19～78 GPa 压力范围内呈线性变化，表明其在此区间内，材料维持相同的结构相，为解决爆炸去磁脉冲电源等研究工作的相关实验提供了可资参考的钕铁硼材料的动态数据。

References:

[1] Kulterman R W, Neilson F W, Benedick W B. Pulse Generator Based on High Shock Demagnetization of Ferromagnetic Material [J]. J Appl Phys, 1958, 29(3): 500-501.

[2] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Longitudinal-Shock-Wave Compression of High-Energy Hard Ferromagnet: The Pressure-Induced Magnetic Phase Transition [J]. Appl Phys Lett, 2003, 24: 1248-1250.

[3] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Shock Wave Demagnetization of $BaFe_{12}O_{19}$ Hard Ferrimagnetics [J]. J Appl Phys, 2002, 91: 3007-3009.

[4] Shkuratov S I, Talantsev E F, Dickens J C, et al. Transverse Shock Wave Demagnetization of $Nd_2Fe_{14}B$ High-Energy Hard Ferromagnetics [J]. J Appl Phys, 2002, 92: 159-163.

[5] Shi S C, Dong S, Huang Y, et al. Study on Compression of Liquid Nitrogen and Carbon Monoxide [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(4): 205-214. (in Chinese)
施尚春,董 石,黄 跃,等. 液态 N_2、CO 冲击压缩特性探究 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(4): 205-214.

[6] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State (2nd ed) [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第2版) [M]. 北京:科学出版社, 1999.

Shock Compression Behavior of $Nd_2Fe_{14}B$

LI Qiao-Yan[1,2], SHI Shang-Chun[2], YANG Jin-Wen[1,2], SUN Yue[1]

(1. *Institute of Atom and Molecule, University of Sichuan, Chengdu* 610065, *China*;
2. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The shock compression properties for permanent magnet $Nd_2Fe_{14}B$ were studied in the shock pressure range of 19～78 GPa, using a two-stage light-gas gun. The Hugoniot data of $Nd_2Fe_{14}B$ with initial average density 7.346 g/cm^3 were measured by the impedance matching method. The experiment results indicate a good linearity between the shock wave velocity and the particle velocity i. e. C_0, λ are obtained as 3.686 km/s, 1.059. Shock compression curve in the $Nd_2Fe_{14}B$ shows a stable compression course and there is no evidence phase transition in present pressure range. The small λ displays that the $Nd_2Fe_{14}B$ material leans to loosen state and is prone to compression. At the same time, it also provides corresponding experiment parameters for calculation of EOS and application of pulse power resource.

Key words: $Nd_2Fe_{14}B$; Hugoniot; shock compression