

磁探针速度传感器研究

李欣增 唐志平 周光泉

(中国科技大学近代力学系,合肥 230026)

摘要 应用 Hopkinson 杆装置,对磁探针速度计进行了实验测定。发现对待测自由面速度阶跃,磁探针有两种类型稳定的输出信号,分别对应于不同的速度范围。对某个特定磁探针来说,其初始信号峰值与速度成正比的条件是速度大于某个阈值。实验还测定了间距大小对磁探针输出信号的影响,给出了磁探针对阶跃实验的响应波形。基于实验条件,本文探讨了磁探针原理、测量电路特性以及靶板涡流的穿透深度等理论问题,得到的结果可以定性解释磁探针的两种特征信号以及它们间的转化机理。本文工作表明,磁探针可以用来定量测量自由面速度的初始阶跃幅度,准确测定全时域的速度阶跃时刻,但不足以确定整个速度历史。为使这种传感器更加成熟,其结构和线路有待改进。

关键词 磁探针 速度传感器 实验标定

一维撞击实验中的一个重要问题是靶背自由面的速度测量。涡流型磁探针是国内近年来提出的一种测量自由面速度的非接触式传感器。目前,常见的非接触式测量方法还有两种,即以 L. M. Barker 提出的 VISAR 系统为代表的光测法^[1]和平行板电容器法^[2]。与这两种方法相比,磁探针的优点在于成本低廉,线路简单。在国内,磁探针已被试用于激光打靶实验^[3],但磁探针并没有经过严格的实验测试和理论分析,因此其测量结果是有待验证的。基于这种需求,本文在各种已知自由表面速度条件下实测到磁探针的响应波形,并分析了磁探针的测量电路特性,为磁探针速度计的应用建立了实验和理论基础。

另一个很重要的工作应当是磁探针的电磁特性,频率响应等参数的电学测算。在最后一节,本文对磁探针的自感和电路驰豫时间做了估算。

磁探针是在一根永久磁针的一端绕几圈导线构成的。沿着磁探针轴线,磁感强度 B 可以用经验公式表示为:

$$B = be^{-kz} \quad (1)$$

其中: z 表示离开磁探针端面的距离; b 、 k 为常数。当待测金属靶自由面运动时,会在靶表面诱发涡电流,涡电流的磁场激发导线线圈中的感生电动势,这一电动势就是磁探针的输出信号。

Hopkinson 压杆装置(SHPB)上可以方便地产生一维应力波,其压力和速度测量都比较成熟。本文利用中国科技大学的这一装置对 $\varnothing 5\text{mm}$ 和 $\varnothing 1\text{mm}$ 两种磁探针进行了实验,自由面速度为单次阶跃和双阶跃型,后一种波形即所谓的跳跃实验(Jump test),可用来考

查磁针对第二次速度突变的响应性能。

1 磁探针的实验测定

1.1 实验布置及原理

我们应用 SHPB 装置发射子弹,子弹和入射杆同为 LY12 铝,直径 14.5mm,磁探针的安置方式如图 1 所示。由子弹撞击在靠近磁探针的杆端面产生一个矩形速度波形,其幅值与子弹飞行速度一样。实验中使用光电法和半导体应变片两种方式测速,后一种方法是随体测量,由于半导体应变片的高值灵敏度系数,可以测量到 0.1m/s 的低速,两种结果在可比范围内吻合得很好,精度是令人满意的。

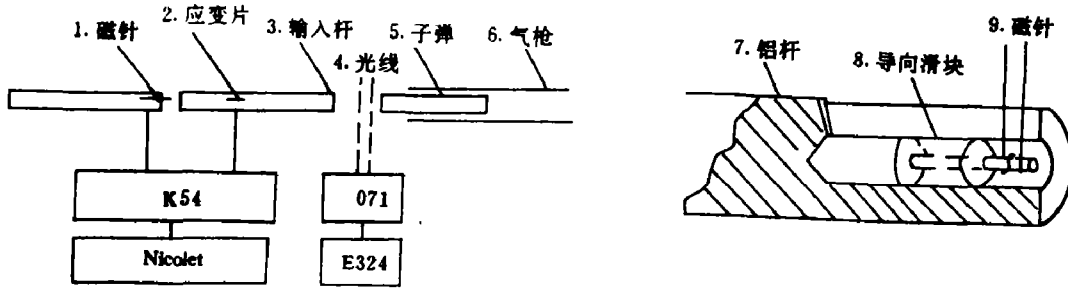


图 1 实验布置

Fig. 1 Experimental arrangements

- 1. Magnet needle, 2. Strain gauge, 3. Input bar, 4. Light, 5. Bullet,
- 6. Gun, 7. Aluminum bar, 8. Magnet needle, 9. Nicolet

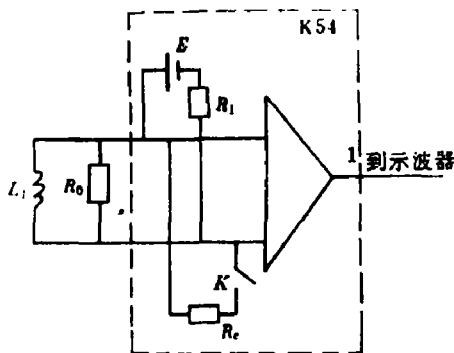


图 2 测量电路

Fig. 2 Testing circuits

- 1. To oscilloscope

磁探针信号通过一个 50Ω 的匹配电阻 R_0 , 接入 K54 型超动态应变仪, 测量电路如图 2 所示, 通过磁探针 L_1 断路标定, 可以确定应变仪的信号放大倍数, 从而由示波器波形判定磁探针的信号大小。表 1 列出了实验所用的磁探针参数。由于二维效应, 实际波形中有横向振动的影响。

表 1 实验所用磁探针的参数

Table 1 Experimental gauges parameters

编 号	规格/mm	线径/mm	匝 数	备 注
1	∅1×10	0.1	7	
2	∅5×1.5	0.22	4	常用于并联测量方式
3	∅5×1.5	0.22	5	

1.2 磁探针初始信号峰值和速度的关系

磁探针输出和速度成正比时则为理想传感器,但如 1.4 节中图 5 所示。对应于矩形的速度波形,磁探针的输出并非矩形。我们选取磁探针信号的初始峰值,其和速度的关系表示在图 3 中。可以看出,在速度大于 1.5m/s 时,线性关系是成立的,在低于 1.5m/s 时,两者间的关系是非线性的,可以分别用线性和抛物线进行拟合。表 2 列出 3 对实验点拟合的公式参数:其中 a 、 b 、 a' 、 b' 为拟合常数, e_1 为信号初始峰值电压。

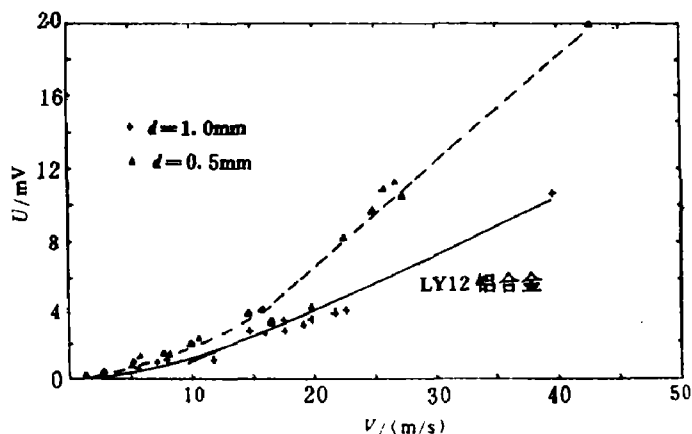


图 3 2# 磁探针对速度的响应

Fig. 3 Output amplitude vs velocity of No. 2 gauge

表 2 实验拟合参数

Table 2 Calibrated coefficients of the gauges

规格/mm	磁探针	间距/mm	$v \geq 1.5\text{m/s}^*$		$v < 1.5\text{m/s}^{**}$		误差/(%)
			a	b	a'	b'	
5	2#	1.0	0.88	0.29	1.07	0.32	5
		0.5	0.89	0.17	0.88	1.13	5
1	1#	1.0	0.005	0.0087	—	—	10
		0.5	0.00365	0.038	—	—	10

* 此时: $v = a - be_1$

** 此时: $v = a'e_1 + b'e_1^2 (e_1, \text{mV})$

1.3 磁探针信号对间距的依赖性

由于速度和位移本质上是不可分离的,因而有必要考察空隙间距对响应信号的影响。我们使用不同厚度的塞片,控制子弹速度在 2.5m/s 附近时进行了两组实验,图 4 表示的是归一到速率 2.5m/s 后的实验结果。值得一提的是在 $z=0.08\text{mm}$ 时,西南流体所在 $10^8\text{W}/\text{cm}^2$ 强度的激光实验中测得的 $\varnothing 5\text{mm}$ 磁探针输出为 6~8mV,依照本文结果,可算出速度值在 1.0m/s 左右。R. E. Beverly 在激光强度为 $3.48 \times 10^8\text{W}/\text{cm}^2$ 时,测得 CO_2 激光在铝中产生的压强为 $143 \times 10^6\text{Pa}$,对应的质点速度为 $1.2\text{m}/\text{s}^{[4]}$,考虑到靶厚的影响,磁探针的响应在量级上和 Beverly 的结果是吻合的。对 Hopkinson 杆来说,频响范围为 1MHz,激光载荷的频率要更高一些,这留在第 2 节中更详细地讨论。

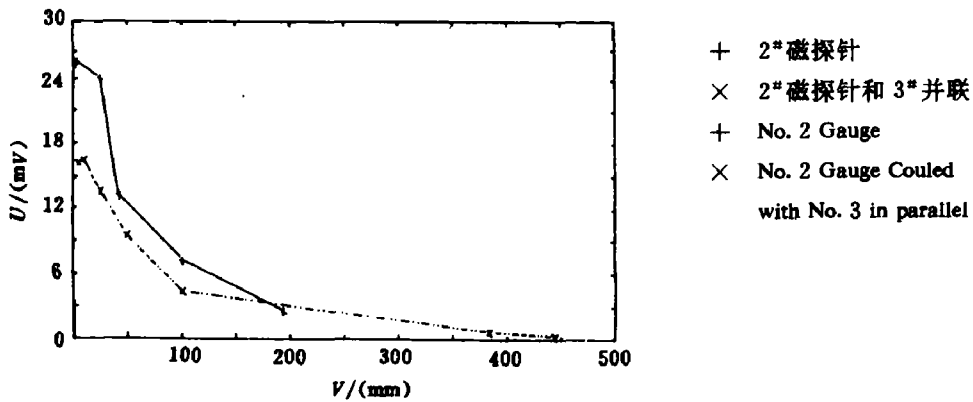


图 4 间距对信号的影响

Fig. 4 Output signal as a function of crevice width

1.4 典型的磁探针响应波形

对于恒值速度,磁探针表现出两种典型波形,表示在图 5 中。后文的理论分析表明 I

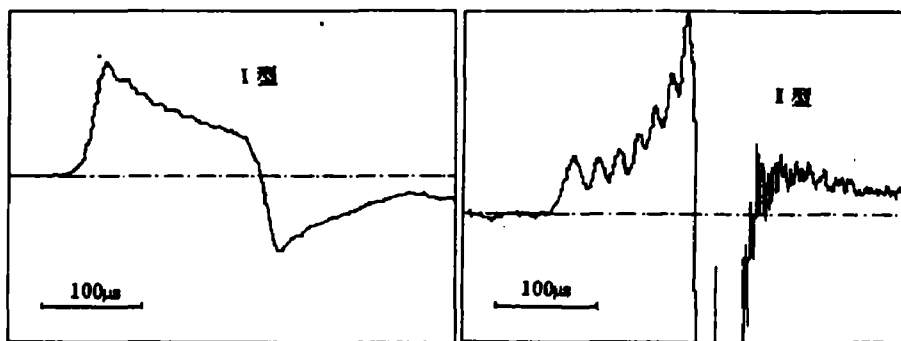


图 5 磁探针的两种典型波形

Fig. 5 Two kinds of typical output profiles

型波是以暂态响应为主导的, I 型波是以速度和位移效应为主导的。

图 6 是使用阶梯子弹产生的跳跃实验的结果,目前的水平尚难以测量出速度历史。图中子弹速度约为 3m/s。

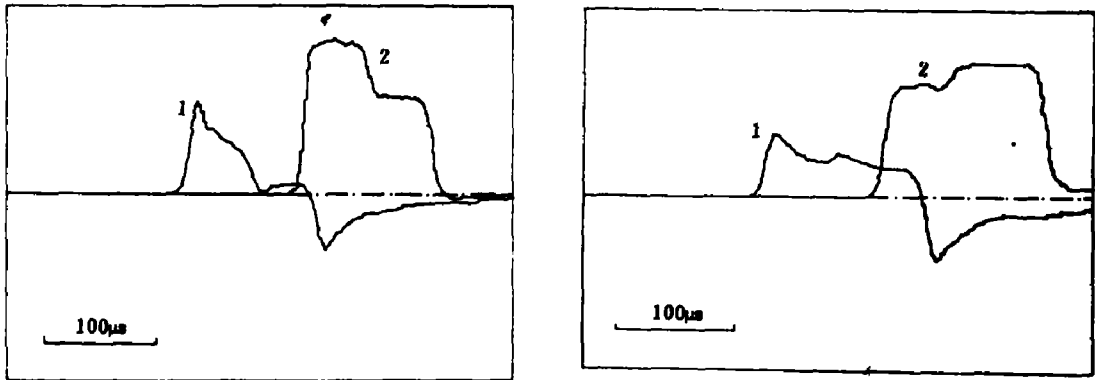


图 6 跳跃实验的结果

1. 信号, 2. 实际速度

Fig. 6. Output profiles subjected to jump tests

1. Gauge's signal, 2. Velocity

2 磁探针的理论探讨

2.1 速度和电压关系

虽然圆形线圈的磁场分布有解析解^[6], 但为简明而言, (1)式是一种很好的近似. 如果认为互感不变, 可得:

$$e_1(t) = A \cdot \frac{dz}{dt} \cdot e^{-kz} \quad (2)$$

其中: $e_1(t)$ 仍为磁探针信号, A 为某个常数. 由此可得:

$$v = \frac{dz}{dt} = C_1 \cdot \frac{e_1(t)}{1 + C_2 \int_0^t e_1(t) dt} \quad (3)$$

式中: v 为速度, C_1, C_2 为常数.

可见文献[3]中由(2)式推断 $e_1(t)$ 和速度成正比是不全面的, 尤其在后期波形的信息提取时会引入较大误差. 我们按(3)式对几个 I 型波形进行计算机数值积分, 结果如图 7 所示. 图中 $a=2.8\text{m/s}$, $C_1=0.17$, $C_2=0.06$. 图 7 中常数项 a 是由于初始非线性响应而引入的.

2.2 涡流的穿透深度和磁探针的使用条件

如果涡流的表面强度为 i_0 , 深度用 z' 表示, 则有

$$i(t, z') = i_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}} z'} e^{i(\omega t - \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}} z')} \quad (4)$$

式中: μ 为真空磁导率, ρ 为材料的电导率 ω 为角频率, 下式中 f 为频率. 涡流的穿透深度定义为:

$$d = \left(\frac{\omega\mu}{2\rho}\right)^{-1/2} = \sqrt{\rho/\mu f \pi} \quad (5)$$

铝的穿透深度列于表 3 中.

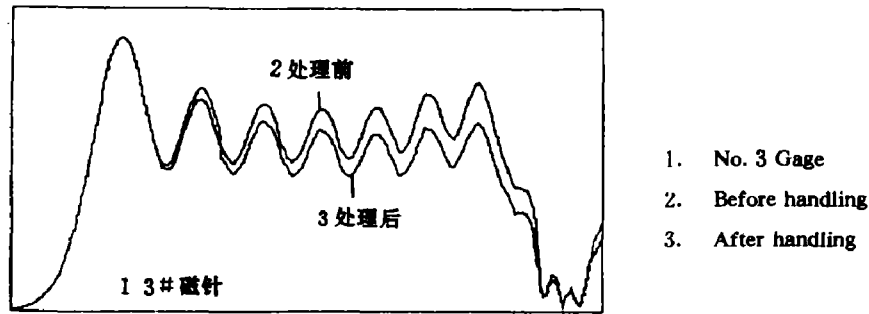


图7 波形的计算机处理结果

Fig. 7 A numerical integrated output profile

表3 铝中的涡流穿透深度

Table 3 Skin depth of eddy-current in aluminium target

f/kC	1	5	10	100	1000	10^4
d/mm	2.54	1.13	0.8	0.25	0.08	0.025

当测量时靶的厚度小于 d 时, 涡流不能充分形成, 因而磁探针的输出信号幅值会下降。从我们的激光层裂实验看, 层裂片厚度为几十微米^[6], 如果其频响为 $50\mu\text{Hz}$, 则 $d=10\mu\text{m}$, 不会影响涡流的充分形成。

2.3 电路方程

我们的实验等效电路如图8所示, 电路方程为:

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_2 = 0 \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + i_1 R_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_2 、 L_1 、 M 分别为靶板、磁探针的自感及两者间的互感, R_2 、 R_0 为靶板内阻和匹配电阻, i_1 、 i_2 为感生电流。

我们注意到: $i_2 R_2 = e_2$ 是铝板中感生电动势, 根据法拉第定律:

$$e_2 = d\Phi/dt = \frac{d}{dt} \int_s B ds \quad (7)$$

Φ 为磁通量, S 为有效面积。

另外: $i_1 R_0 = e_1(t)$ 即为磁探针的输出, 则有,

$$\frac{de_1(t)}{dt} = R_0 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (8)$$

由以上方程可推出:

$$\frac{de_1(t)}{dt} + G e_1(t) = p e_2(t) \quad (9)$$

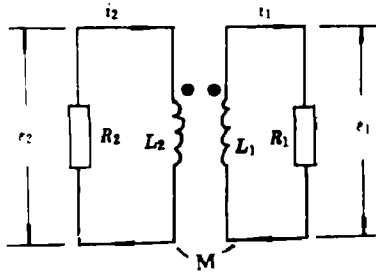


图 8 测量等效电路

Fig. 8 Equivalent experimental circuit

式中

$$G = R_0 L_2 / (L_1 L_2 - M^2) \quad (10)$$

$$p = R_0 M / (L_1 L_2 - M^2) \quad (11)$$

记

$$\mu(t) = \exp\left(\int G dt\right) \quad (12)$$

方程(9)的通解为:

$$e_1(t) = \frac{1}{\mu(t)} \left[\int p e_2(t) \mu(t) dt + C_0 \right] \quad (13)$$

式中 \$C_0\$ 为积分常数。在有漏磁的时候, \$L_1 L_2 > M^2\$。

(13)式就是我们得到的磁探针信号的一般表达式。如果我们将(1)式代入(7)式,认为 \$G, p\$ 为常数,即在图 3 的线性段内, \$C_0 \neq 0\$, 令速度为阶跃函数:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = -v_0 \\ z = z_0 - v_0 t \end{cases} \quad (14)$$

可推出:

$$e_1(t) = C_0 e^{-at} + k p B_0 S \cdot \frac{v_0}{G + k v_0} e^{-k(z_0 - v_0 t)} \quad (15)$$

(15)式就应当描述同本实验相对应的磁探针响应,其中第一项应属暂态响应,第二项才是由速度引起的信息部分。在低速实验 \$v_0 < G/k\$ 时,响应信号是递减的,即 I 型曲线;当高速时, \$v_0 > G/k\$ 响应波形是递增的,即 II 型曲线;忽略(15)式第二项分母变化时, \$e_1(t)\$ 的峰值响应和速度成正比。这些结论和实验是定性相符的。实际上,起初在 \$\phi 5\text{mm}\$ 磁探针中没有发现 I 型波,有了(15)式的结果以后,补做了高速实验,果然发现了 I 型响应。由于(15)式中电磁参数没有测量,目前不能作出定量的分析对比。

2.4 磁探针的频率响应和驰豫时间

对于均匀无蕊的螺线管,其磁通匝链数为^[7]:

$$\psi = \mu_0 n^2 l \cdot s \cdot I \quad (16)$$

式中: \$\psi\$ 为磁通匝链数, \$\mu_0\$ 为真空磁导率, \$l, s\$ 分别为线圈的长度和截面积, \$I\$ 为电流。如果 \$N\$ 表示匝数,则 \$n = N/l\$ 为匝数密度。由自感系数 \$L\$ 的定义知:

$$\psi = LI \quad (17)$$

由此可推出:

$$L = \mu_0 n^2 l S = \mu_0 N^2 S / l \quad (18)$$

对磁探针来说,以铁磁体为蕊,须将上式中 \$\mu_0\$ 换为铁磁体磁导率 \$\mu\$ 和 \$\mu_0\$ 之积;即:

$$L_1 = \mu_0 \mu N^2 \cdot S / l \quad (19)$$

一般 \$\mu\$ 的量级为 \$10^2 \sim 10^3\$。对图 8 所示的测量等效电路, \$L_1 R_0\$ 构成 \$LR\$ 回路,其电路的驰豫时间常数 \$\tau\$ 为:

$$\tau = (L_1 + M) / R_0 > L_1 / R_0 = \tau_0 \quad (20)$$

取 \$\mu = 300\$ 时,表 1 所列磁针的计算结果列于表 4。在考虑到有限长度的螺线管磁场有边

缘效应时,实际的电感量应比表 4 所列值更小。

表 4 磁探针的驰豫时间和频响估算

Table 4 Estimated time and frequency parameters of magnetic needles

规格 /(mm)	匝数 /N	自感系数 $L_1/\mu\text{H}$	时间常数 $\tau_0/\mu\text{s}$	特征频率 $f=(1/\tau_0)/(\text{MHz})$
2*, $\varnothing 5$	4	107.6	2.14	0.47
1*, $\varnothing 1$	7	20.7	0.41	2.41

在冲击波测量中,一般上升沿的宽度为几十纳秒,显然,表 4 表明磁探针是难以胜任的。在我们的 Hopkinson 杆实验中,上升沿量级为 8~12ns,磁探针的频响是足够的。在能量密度小于 $10^8\text{W}/\text{cm}^2$ 时,激光载荷一般为弹性波,这时 $\varnothing 1$ 的磁探针是勉强可以使用的,但在能量为 $10^{10}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上的强激光实验中,冲击波是强烈非线性的,磁探针信号会失真畸变。

3 结论和建议

本文首次在实验和理论方面对磁探针的特性进行了认真的研究,集中考察了磁探针的线性率和波形特征。实验和理论分析表明:(1)在速度阶跃小于 1.5m/s 时,磁探针的响应是非线性。(2)磁探针有两种类型的信号波形,其中 I 型为低速信号,以暂态信号为主导;II 型为高速信号,以信息信号为主导,两种波形的转化阈值为 $v_c=G/k$ 。(3)在本文速度范围即 0.2m/s 到 25m/s 以内,可以使用表 2 给出的公式和系数值,准确地确定自由面的速度阶跃,在一维弹性波实验中,由此可以确定弹性波强度。(4)磁探针响应和自由面速度变化间的关系本质上是非线性的。在近似条件下,通过实验标定,可以测量弹性波引起的自由面速度突跃。但很难在现有的技术水平上,进行全时域的自由面速度的定量测量。

磁探针的另外一个缺陷是存在着很强的信号反冲,如图 5,图 6 的波尾部分所示。这一点也妨碍磁探针技术应用于变速实验测量。

基于以上分析,我们认为磁探针只可应用于有限的实验场合如仅仅测量弹性波强度,则可以较好的精度。考虑到成本问题,磁探针仍具有一定的使用价值。

为使磁探针测量技术走向成熟,我们认为应该研制专用的磁探针测量线路,用特定的匹配消除掉暂态响应和非线性递增,配备专用的计算机软件以提取更长时域的速度信息也是一条必由之路。

西南流体物理研究所在本课题研究中予以合作,罗福同志参加了实验和讨论,孙承纬先生对作者予以鼓励,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 Barker L M, Hollenback R E. J Appl Phys, 1972, 43: 4669
- 2 Scruby C B, et al. J Phys D, 1978, 11: 1487

- 3 Yuan Gang, et al. *Bulletin of American Phys Society*, 1991, 3b, 1857
- 4 Beverly R E, Walters C T. *J Appl Phys*, 1976, 47, 3485
- 5 曹昌祺. 电动力学 北京:人民教育出版社, 1979, 114
- 6 唐志平等. 激光引起金属靶层裂的实验研究, 科学通报(待发表)
- 7 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学(下册), 北京:人民教育出版社, 1979, 36

STUDY ON MAGNETIC NEEDLES AS VELOCITY GAUGES

Li Xinzen Tang Zhiping Zhou Guangquan

(Dept. of modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT By using of Hopkinson bar apparatus, the magnetic needles were studied experimentally as velocity gauges. It was found that there were two types of signal profiles corresponding to different velocity ranges. For a typical magnetic needle, the initial signal peak became proportional to the velocity step after a threshold value of velocity was over taken. The influence of the crevice width to the gauge output was also tested, the response of jump test was obtained. Based on our experiments, the gauge principle, the circuit characteristics and the skin depth of the eddy-current were analyzed, a set of analytical formula were obtained that could illustrate the experimental phenomena qualitatively. Our results show that this kind of velocity gauges can be used to measure the initial velocity jumps of a free surface, and the times of velocity jumps in the whole process, but they are unable to obtain a quantitative velocity profile in a whole process. Further improvements are needed for this technique.

KEY WORDS magnetic needle, velocity gauge, experimental calibration