

撞击杆中应变波激发的磁流

邢国军 徐小荷

(东北大学土木工程学院 沈阳 110006)

摘要 应变波通过铁磁性杆件时,由于压磁效应,会同时在杆件中激发出不均匀的磁流。利用实验和磁流理论的分析,证实了撞击杆中磁流的存在。

关键词 应变波 磁流 磁流元 压磁效应

中图法分类号 O 361.6*

1 引 言

铁磁性物体在磁场中会产生变形,称作磁致伸缩效应。它的逆效应为压磁效应,即铁磁性物体会因外加载荷造成的应变而引起磁感应强度的变化。压应的研究表明^[1],应变引起的磁感应强度与应变值线性相关。

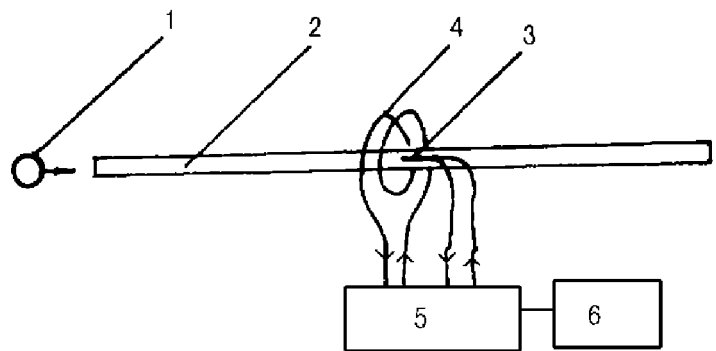
杆件受到撞击时,应变波在杆件中传播。对于铁磁性介质,由于压磁效应,杆件中会同时产生变化着的磁场^[2],即有变化的磁通量在作同步传播。磁通量的变化率就是磁流,所以在应变波通过铁磁性杆件时,会同时激发出磁流。

平常,物理的传统看法认为,“磁流”和“磁荷”一样,都是实际中不存在的,引入它完全是为了把磁场各物理量和电场的各物理量一一对应起来,互成对偶关系^[3]。但在撞击铁磁性杆件时,会实际出现磁流现象。

2 应变波激发磁流的实验

按照杆中的应力波理论^[4],物体受到外力作用时,扰动是以应力波的形式传播的。在铁磁性介质中,应变波传到某个截面时,在该截面的扰动就会由于压磁效应在杆中产生磁通的变化。磁通的变化率就是磁流,因此就相当于磁流与应变波在杆中同步传播。

磁流会在周围空间感应出电场,在闭合回路中产生感应电压。因此,在应变波通过铁磁性介质的同时,如果能在介质周围的闭合回路中采集到相应的感应电压信号,就可以证明磁流的确在介质中通过。设计的实验装置如图 1所示。



1 Hammer; 2 Bar sample; 3 Strain gauges
4 coil; 5 Data acquisition set; 6 Computer

图 1 应变波激发磁流的实验装置
Fig. 1 Test device of magnetic current
stimulated by the strain wave

* 邢国军:男,1971年生,博士。

1998-04-09收到原稿,1998-06-01收到修改稿。

实验时用锤 1 撞击铁磁性杆件 2 以便产生沿杆的轴线方向传播的应变纵波。杆件的中点贴有电阻应变片 3 以测量应变 ϵ 应变片的规格为 $3\text{mm} \times 5\text{mm}$, 内阻 120Ω , 采用全桥连接。在杆件的中点还套上一个半径为 3cm 的线圈 4 相当于闭合回路, 因此杆件中的应变波所激发的磁流就会在线圈中感应出电压 e , 应变和电压信号的采集工作由 HP3852A 数据自动采集设备来完成, 最后在 HP362 控制计算机中进行数据的整理、绘图和存贮工作。

所用撞击锤的截面积为 5cm^2 长 7cm 重 0.25kg 实验时的撞击条件、应变波的反射条件以及所用试件的几何条件、材料力学性质等参数见表 1, 在该实验条件下, 所得应变 ϵ 和感应电压 e 的实测历程曲线如图 2 图 3 图 4

表 1 试件情况及撞击条件

Table 1 Experimental samples and striking condition

试件	几何形状	截面积 $/\text{cm}^2$	长度 $/\text{cm}$	弹性模量 M Pa	密度 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	撞击速度 $/(\text{m}/\text{s})$	线圈 匝数	应变波 反射条件
长钢杆	六方棱柱	4	350	2×10^5	7.8×10^3	1	200	自由端
短钢杆	六方棱柱	4	25	2×10^5	7.8×10^3	3	200	砧子端
石榴石 片麻岩	圆柱体	12	15	1×10^5	3×10^3	3	2000	砧子端

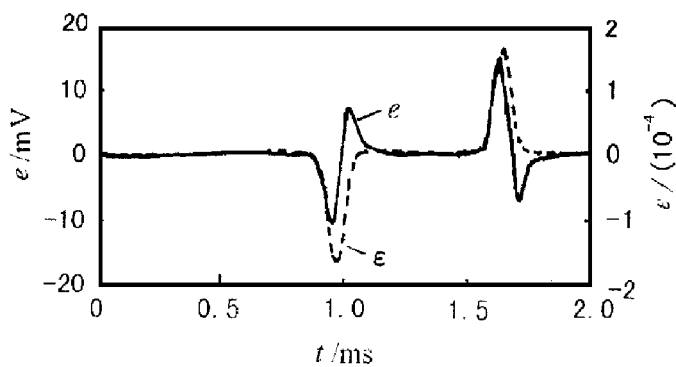


图 2 长钢杆的 ϵ 和感应电压 e 的实测历程曲线

Fig. 2 Histories of strain ϵ and inductive voltage e in long steel bar

从图 2~ 图 4 可以看到, 当应变波通过杆件时, 线圈中有感应电压存在, 从而说明有变化的磁通量穿过。即铁磁性杆件受到撞击时, 不仅会产生应变波, 还会激发出磁流。

撞击杆中产生的应变波传播时的大小、方向和位置不断变化, 它所激发的磁流的大小、方向以及位置也随着应变波而变化。因而该磁流沿杆件的分布是不均匀的, 长度是有限的。

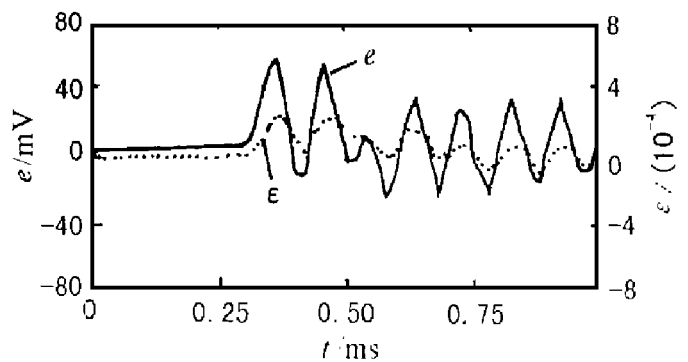


图 3 短钢杆的 ϵ 和感应电压 e 的实测历程曲线

Fig. 3 Histories of strain ϵ and inductive voltage e in short steel bar

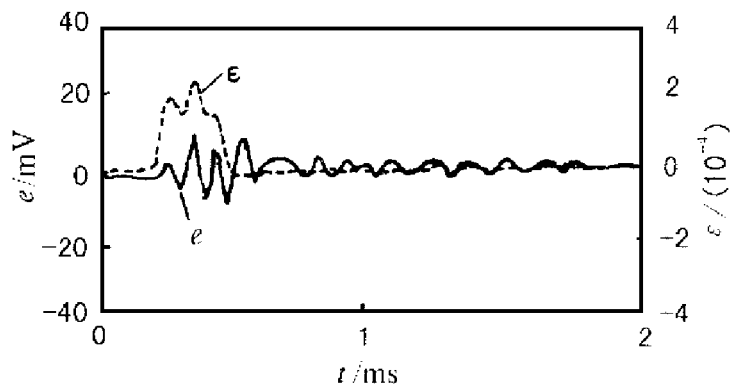


图 4 石榴石片麻岩的 ϵ 和感应电压 e 的实测历程曲线

Fig. 4 Histories of strain ϵ and inductive voltage e in garnetiferous gneiss

3 应变波激发磁流的理论分析

线圈中实测的感应电压信号,还必须用磁流理论进一步分析,与实测结果进行对比。

现有的关于磁流与感应电压关系的物理公式多侧重于分析均匀、无限长的磁流或磁场变化引起的电场(如法拉第电磁感应定律)。本实验中的磁流是不均匀和有限长的,必须加以推理分析,以便得出应变与感应电压的关系,与实测结果进行比较。

为简化求解过程,利用磁场与电场的对偶性,通过对毕奥-萨伐尔定律进行对偶性置换,引出磁流元在周围空间任意一点引起电场的公式。有限长杆件中不均匀的磁流可以看成是沿轴线方向分布的磁流元组成,从而有限长一维杆中的磁流在周围空间任意一点所引起的电场,就可以由沿轴线方向上各个磁流元对该点作用结果的积分求得。

3.1 磁流元在周围空间引起的电场

毕奥-萨伐尔定律^[5]反映的是电流元在周围空间引起的磁场,这与磁流元在周围空间引起电场刚好是相互对应的。因此,按照磁场与电场的对偶性原则^[3]对毕奥-萨伐尔定律中相关的变量进行置换,经简化后,便可以得到磁流元在周围空间任意一点 P 引起的电场强度

$$dE_m = - \frac{\sin\theta}{4\pi r^2} \cdot J dl \quad (1)$$

式中: $J dl$ 为磁流元; dE_m 为磁流元引起的电场强度; r 为磁流元与定点的距离; θ 为磁流元和定点的连线与磁流元方向之间的夹角; 负号代表方向与右手法则相反。

3.2 均匀直磁流在周围空间引起的电场

参照有限长均匀直电流在周围空间任意一点引起磁场的公式的推导过程^[5],有限长均匀直磁流在周围空间任意一点引起的电场可以由式(1)的积分求得

$$E_m = \int dE_m = - \frac{J}{4\pi a} (\sin U_2 - \sin U_1) \quad (2)$$

式中: J 为均匀直磁流; E_m 为磁流引起的电场强度; a 为定点到直磁流所在直线的距离; U_1 、 U_2 为如图所示的角度; 负号表示方向与右手法则相反。

当均匀直磁流为无限长的特殊情况时,在(2)式中: $U_1 = -\pi/2$, $U_2 = \pi/2$, 从而有

$$E_m = - J / 2\pi a \quad (3)$$

此即法拉第电磁感应定律,说明推理思路是正确的。

3.3 撞击杆中的磁流引起的电场

杆件受到撞击时,应变波在杆件中传播,由于杆件是有限长的,而且应变沿杆件的分布并不均匀,从而由应变所激发的磁流是有限长和不均匀的。因此,由这样的磁流引起的电场就不能简单地按照 3.2 节中的算法进行计算。

撞击杆件中的应变波满足波动方程



图 5 磁流元引起电场的计算用图

(1) Fig 5 Inductive electric field by magnetic current element

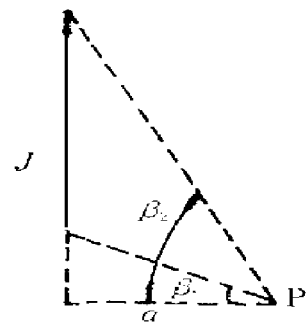


图 6 均匀直磁流引起电场的计算用图

Fig 6 Inductive electric field by uniform straight magnetic current

$$\frac{\partial X}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial X}{\partial x^2} \tag{4}$$

式中: X 为应变; x 为位移坐标; t 为时间; c 为应变波在杆件中的波速

波动方程的通解是

$$X = f(x - ct) + F(x + ct) \tag{5}$$

式中: f 和 F 是任意形式的函数。它的具体形式取决于初始条件和边界条件^[6]。

Stewart的研究表明^[1]: 一维铁磁性杆件受纵向力作用时, 由压磁效应激发的磁感应强度 B 与应变 X 线性相关

$$B = K \cdot X \tag{6}$$

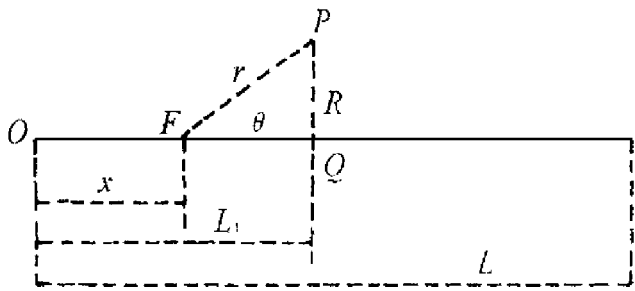
比例系数 K 取决于试件的压磁效应常数和磁导率。 K 的取值范围^[2]: 钢杆试件为 $3 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$; 岩石试件为 $10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ 。(6)式对时间 t 的微分为

$$\frac{\partial B}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \tag{7}$$

设杆件的截面积为 A , 则杆件中的磁流 J 为

$$J = A \cdot \frac{\partial B}{\partial t} = KA \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \tag{8}$$

可见, 如果知道杆件中应变波的状况, 它所激发的有限长不均匀的磁流引起的电场, 就可以由按上式分布的各个磁流元引起电场的积分求得。如图 7所示, 设杆件长为 L , 取杆上任意一点 F , 杆外任意一点 P , PQ 垂直杆件于 Q , PQ 距离为 R , 以杆件左端 O 为原点, OQ 距离为 L_1 , OF 距离为 x 。



则撞击杆中的磁流在 P 点引起的电场强度 E_m 由 (1)式积分得

图 7 撞击杆中的磁流引起电场的计算用图

Fig 7 Inductive electric field by magnetic current in stricken bar

$$E_m = \int_0^L - \frac{\sin\theta}{4\pi r^2} \cdot J dx \tag{9}$$

由图 7可知, $\sin\theta = R/r$, $R = \sqrt{R^2 + (L_1 - x)^2}$, 同时将式 (8)代入式 (9), 化简后可得

$$E_m = - \frac{KAR}{4\pi} \int_0^L \frac{1}{[R^2 + (L_1 - x)^2]^{3/2}} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} dx \tag{10}$$

如果能够知道杆件中应变的空间分布情况以及随时间的变化情况, 便可以求得 E_m 。则以 Q 为圆心、半径 R 的 N 匝线圈中产生的总的感应电压 e 为

$$e = \pi RN E_m = - \frac{NKAR^2}{2} \int_0^L \frac{1}{[R^2 + (L_1 - x)^2]^{3/2}} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} dx \tag{11}$$

如果应变 X 的分布及变化情况比较复杂。可以利用计算机进行数值积分求得 e

4 应变波激发磁流的模拟计算

杆件中的应变波采用文献 [7]的程序计算, 只要输入杆件的撞击以及边界条件, 便可得知应变在空间上的分布和时间上的变化, 利用式 (11)就可以求得磁流所感应的电压值。用计算机模拟计算后就可以得到杆件中的应变和所套线圈中的感应电压的历程曲线。

对于截面积 4cm^2 、长 3.5m 和 25cm 的两种钢杆, 输入如前所述的锤击条件、锤击速度以及杆件的几何条件、材料力学性质参数, 所得到的模拟计算结果如图 8 图 9

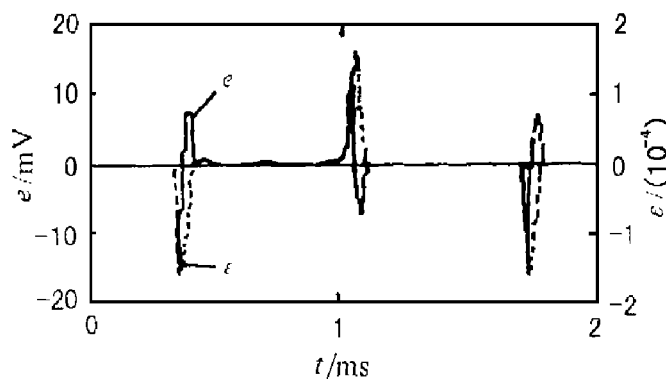


图 8 长钢杆的应变 X 与感应电压 e 历程曲线的模拟结果

Fig. 8 Simulation histories of strain X and inductive voltage e in long steelbar

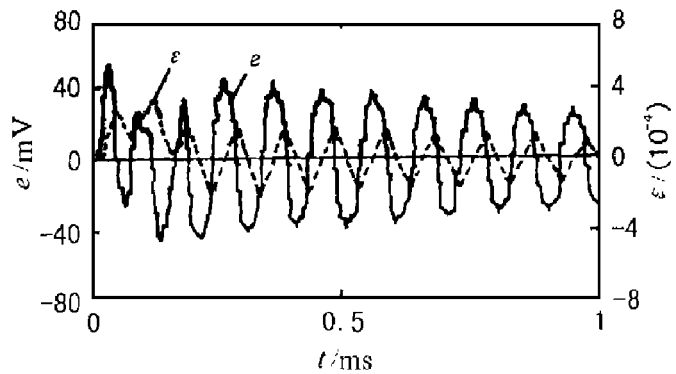


图 9 短钢杆的应变 X 与感应电压 e 历程曲线的模拟结果

Fig. 9 Simulation histories of strain X and inductive voltage e in short steelbar

将图 8 图 9 分别与图 2 图 3 进行对比, 从坐标上可以看出, 应变和感应电压的模拟结果与实测结果在数值和波形变化上都是基本一致的。这表明, 撞击杆件时产生的应变波会激发出磁流, 后者又在线圈中产生感应电压。

5 推论及结论

利用磁流在线圈中感应出的电压波形, 可以反推杆件受撞击时的应变状况。

实验还发现, 岩石中也有应变波激发磁流现象, 因此可推断, 地震波大面积掠过岩层时, 会在某些岩层中激发出电磁效应, 从而造成地震时的电磁异常现象^[2]。

可以利用这种原理来测定介质的压磁系数。

通过实验及理论分析, 可以得出: 铁磁性介质的杆件在受到撞击时, 所产生的应变波会激发出磁流。

参 考 文 献

- 1 Stewart K. H. Ferromagnetic Domains Britain Cambridge Press, 1954 37~ 60
- 2 徐小荷, 邢国军, 王 标. 岩石中应变波激发的电磁效应. 地震学报, 1998 20(1): 96~ 100
- 3 楼仁海, 符果行, 肖书君. 工程电磁理论. 北京: 国防工业出版社, 1991 16~ 17
- 4 宋守志. 固体介质中的应力波. 北京: 煤炭工业出版社, 1989 7~ 8
- 5 程守洙, 江之永. 普通物理学第 2 册 (1982 年修订本). 北京: 高等教育出版社, 1990 130~ 131
- 6 徐小荷, 等. 冲击凿岩的理论基础与电算方法. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986 75~ 163
- 7 徐小荷. 撞击凿入系统应力的微机程序. 凿岩机械与气动工具, 1995 (2): 32~ 34

MAGNETIC CURRENT STIMULATED BY STRAIN WAVES IN STRICKEN BAR

Xing Guojun, Xu Xiaohu

(College of Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, 110006)

ABSTRACT When strain waves pass through a ferromagnetic bar, owing to piezomagnetic effect, a nonuniform magnetic current will be stimulated by the strain wave simultaneously. In this paper, both experimental results and analysis of the magnetic current theory demonstrate the occurrence of the magnetic current in stricken ferromagnetic bar.

KEY WORDS strain wave, magnetic current, magnetic current element, piezomagnetic effect