

在永磁体强磁场中 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物热磁发电研究

刘忠深 特古斯 欧志强 范文迪 宋志强 哈斯朝鲁 伟伟 韩睿

Thermomagnetic power generation of $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ compounds in strong field of permanent magnet

Liu Zhong-Shen Tegus O Ou Zhi-Qiang Fan Wen-Di Song Zhi-Qiang Ha Si Chao Lu Wei Wei Han Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 047103 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.047103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.047103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

替代掺杂的 $MnNiGe_{1-x}Ga_x$ 合金中马氏体相变和磁-结构耦合特性

Martensitic transformation and magnetic properties in Ga-doped MM'X alloy $MnNiGe_{1-x}Ga_x$ ($x=0-0.30$)

物理学报.2013, 62(19): 197501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.197501>

铬和镍的添加对 Fe_3Al 合金力学性能影响的 DFT 研究

The DFT analyses of effect of chromium and nickel additions on the mechanical properties of Fe_3Al based alloys

物理学报.2013, 62(3): 037104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037104>

机械弹性储能机组储能过程非线性动力学模型与混沌特性

Nonlinear dynamic model and chaotic characteristics of mechanical thastic energy storage unit in energy storage process

物理学报.2013, 62(3): 038403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.038403>

一级相变材料 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.4}Si_{0.6}$ 的热磁发电性能

Thermomagnetic power generation performance of first-order phase transition material $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.4}Si_{0.6}$

物理学报.2012, 61(7): 077103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.077103>

$Co_{50}Fe_{25-x}Mn_xSi_{25}$ 系列合金的结构、磁性和半金属性研究

Structural, magnetic and half-metallic properties of $CoFeMnSi$ alloys

物理学报.2011, 60(4): 047108 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.047108>

在永磁体强磁场中 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物热磁发电研究*

刘忠深¹⁾²⁾ 特古斯^{1)†} 欧志强¹⁾ 范文迪¹⁾ 宋志强¹⁾
 哈斯朝鲁¹⁾ 伟伟¹⁾ 韩睿¹⁾

1) (内蒙古师范大学, 内蒙古自治区功能材料物理与化学自治区重点实验室, 呼和浩特 010022)

2) (吉林省德惠市第八中学, 德惠 130323)

(2014年7月19日收到; 2014年9月25日收到修改稿)

研究了处于永磁体强磁场中 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物的热磁发电性能, 采用高性能球磨和固相烧结合成方法制备了 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物, 并对该系列化合物的物相结构、磁性和热磁发电性能进行了测量. 结果表明: $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.37}Si_{0.63}$ 和 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.35}Si_{0.65}$ 化合物是具有 Fe_2P 型六角结构的一级相变软磁性材料, 两者居里温度分别为 334 K 和 348 K, 处于工业余热温区. 根据一级相变磁性材料在居里温度磁化强度发生突变这一特性, 研制热磁发电演示装置, 测量了 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.37}Si_{0.63}$ 和 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.35}Si_{0.65}$ 这两种材料铁磁相变产生感应电流大小与线圈匝数、热磁发电材料质量、表面积、表面上温度梯度的关系. 研究结果表明, $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物具有很好的热磁发电性能, 有望成为热磁发电候选材料.

关键词: 热磁发电, 居里温度, 一级相变

PACS: 71.20.Be, 75.30.Kz, 84.60.Rb

DOI: 10.7498/aps.64.047103

1 引言

热磁发电作为一种新型发电技术, 直接将热能转化为电能. 可利用工业余热、太阳能、热电厂产生废热进行发电, 对于降低一次性能源使用、节能环保和探索新型发电技术都具有重要意义. 早在 1887 年, Tesla^[1] 用铁作为热磁发电材料实现了热磁发电, 并在 1890 年申请了专利. 铁的居里温度太高, 为 1043 K, 因而未能在实际中应用. 20 世纪 50 年代, Elliot^[2] 提出了热磁发电的基本思路; 80 年代, Kiroi 和 Mills^[3] 对 Fe, Gd, $Ho_{69}Fe_{31}$ 作为热磁发电材料进行了研究, Solomon^[4] 对 Gd 在超导体磁场中的热磁发电进行了研究. 但因材料和热磁发电效率低, 未能将其应用于实际. 后来很少有这方面的研究报道. 近年来, 在室温磁致冷材料

研究探索中, Tegus 等^[5] 发现 $MnFe(P, As)$ 化合物在室温区具有巨磁热效应. 文献^[6, 7] 研究了 Si 代替 As 的 $MnFe(P, Si)$ 系列化合物的磁热效应. 2011 年, 毕力格等^[8] 研究了 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.4}Si_{0.6}$ 化合物在电磁铁磁场中的热磁发电性能, 本文对该研究进行了改进, 系统研究了 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.37}Si_{0.63}$ 和 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.35}Si_{0.65}$ 这两种化合物在永磁体强磁场中的热磁发电性能, 并研制永磁体强磁场热磁发电演示装置.

2 理论基础和实验方法

2.1 理论模型

根据法拉第电磁感应定律, 穿过线圈的磁通量发生变化时, 在线圈所组成的闭合回路中就有感应电流产生.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51161017) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tegusph@imnu.edu.cn

图 1 为热磁发电原理示意图, 热水流过处于永磁体强磁场中线圈装有的热磁发电材料时, 若温度超过居里温度可引起材料瞬间由铁磁态转变为顺磁态, 穿过线圈的磁通量减小而产生感应电流; 接着通过冷水降温, 温度低于居里温度, 材料瞬间由顺磁态转变为铁磁态, 穿过线圈的磁通量增加, 在线圈中产生反向的感应电流. 热磁发电就是利用处于永磁体强磁场中的热磁发电材料在居里温度附近冷热交替变化而引起的磁化强度变化, 实现热能到电能的转化.

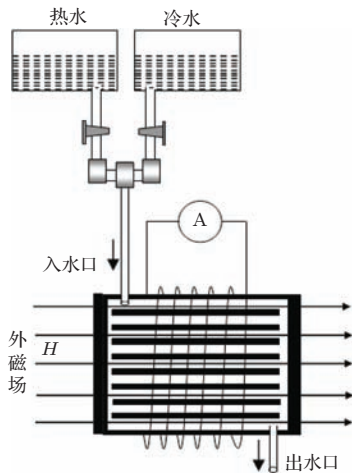


图 1 热磁发电原理示意图

线圈中产生的感应电动势 E 可表示为

$$E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

图 2 为铁磁态和顺磁态相互转化的微观示意图. $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列合金是过渡金属化合物, 磁矩全部来源于电子自旋磁矩, 轨道磁矩被冻结. 铁磁态时, 存在分子场作用, 原子之间磁矩的交换作用能为正值, 自旋磁矩平行排列, 自旋平行时能量低, 系统稳定; 当温度升到居里温度, 分子动能增大破坏了电子自旋磁矩间的交换作用, 自旋磁矩变得杂乱无章, 总磁矩为零, 材料变为顺磁态, 实现热能与磁场能的转化.

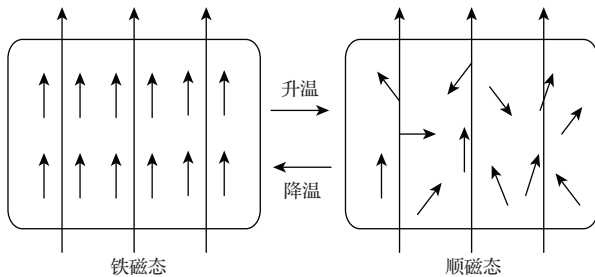


图 2 铁磁态和顺磁态相互转化微观示意图

在外磁场不超过 1 T 的一般情况下, 存在外磁场时的磁化强度 M 与同温下的自发磁化强度相差甚微, 可不加以区别. 磁化强度^[9] M 表示为

$$M = \frac{k_B T}{\gamma J g_J \mu_B} x - \frac{H}{\gamma} \cong \frac{k_B T}{\gamma J g_J \mu_B} x, \quad (2)$$

$$M = N J g_J \mu_B B_J(x). \quad (3)$$

设铁磁体内单位体积有 N 个原子, 原子角动量的量子数为 J , γ 是分子场常数, g_J 为朗德因子, $B_J(x)$ 为布里渊函数.

方程 (2) 和 (3) 用图 3 表示, 由两个图线的交点可以直接求得磁化强度 M , 具体分析如下.

1) 当 $T \rightarrow 0$ K 时, 绝对饱和磁化强度为 $M = N J g_J \mu_B$, 即所有磁矩完全平行排列.

2) 当 $T < T_C$ 时, 直线和曲线有两个交点 O 和 P , 这两个交点为该温度下两方程的解. 点 O 对应能量的极大值, 因而不稳定; 点 P 对应能量极小值, 是稳定的. 点 P 的纵坐标就是这一温度下的自发磁化强度. 改变温度, 可以求得不同温度下的一簇直线, 由这簇直线与 $B_J(x)$ 的交点, 可求出不同温度下的自发磁化强度^[10].

3) $T = T_C$ 时, 直线和曲线相切于原点; 自发磁化强度 M 正好降为 0.

4) $T > T_C$ 时, 直线和曲线只有在原点的交点, 不再存在自发磁化.

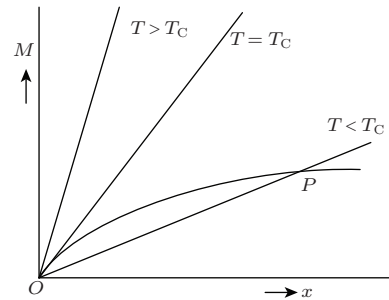


图 3 自发磁化图解

冷热源中热水和冷水周期性地通过处于永磁体强场中的热磁发电材料, 温度 T 与时间 t 的关系以及对应产生的交变感应电流 i 与时间 t 的关系如图 4 所示. T_H 为热源的温, T_C 为热磁发电材料的居里温度, T_R 为室温, T_L 为冷源的温度, I_m 为交变感应电流的峰值. 从图 4 可以看出, 热水和冷水周期性地通过热磁发电材料, 在线圈回路中产生交变的感应电流, 并且在温度为居里温度 T_C 时, 回路中产生的感应电流为峰值 I_m .

热磁发电材料中磁感应强度 B 和自发磁化强

度 M 的关系为

$$B = \mu_0(H + M), \quad (4)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, H 为外磁场, M 为材料的自发磁化强度.

当线圈中放入质量为 m 的热磁发电材料时, 产生的感应电流为

$$I = -\frac{NSm}{\rho R} \frac{\partial M}{\partial t}, \quad (5)$$

其中, N 为线圈匝数, S 为线圈横截面积, ρ 为磁性材料密度, R 为总电阻, $\frac{\partial M}{\partial t}$ 为磁化强度随时间的变化率. 在居里温度附近, 材料热传递越快, 温变越快, 磁化强度随时间的变化率 $\frac{\partial M}{\partial t}$ 也越大, 即感应电流较大, 热磁发电效率越高.

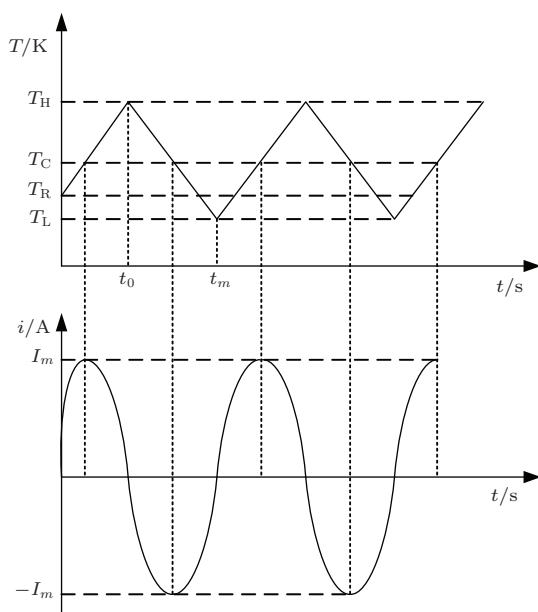


图4 温度 T 与时间 t 的关系以及对应产生的交变感应电流 i 与时间 t 的关系

2.2 实验

按照设计好的化学配比, 利用称重 weight 软件计算纯度为 99.9% 的粉末状原料 Mn, Fe, P, Si 的质量, 用电子天平称重后, 在氮气保护下密封入球磨罐, 放入德国产高性能球磨机 (pulverisett-6) 球磨 6 h. 再将球磨完的 100 g 样品在氮气保护手套箱中装入分块的模具, 用液压机在 10 吨压力作用下保持 20 min 成型. 将初步成型的样品放入塑料袋中抽真空塑封, 再放入等静机中加压进一步成型. 压好成型后放入退火炉中, 在流动氩气保护下高温 (1373 K) 烧结 2 h, 随后自然冷却至室温. 用 Philips-1830 型 X 射线粉末衍射仪测定样品的物相

结构. 用 Lakeshore-7407 型振动样品磁强计测量其磁性能.

3 实验系统及测量结果

3.1 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 化合物的物相结构 [11,12]

图 5 为 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物的室温 X 射线粉末衍射图. 对衍射数据处理和分析表明, 该系列化合物形成主相 Fe_2P -型六角结构, 空间群为 $P-62m$, 有少量杂相 Fe_3Si .

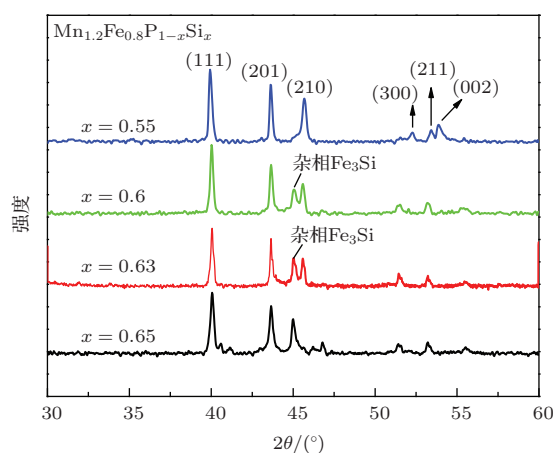


图5 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物 X 射线粉末衍射图

3.2 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 化合物的磁性

图 6 为外磁场为 50 mT 时 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 化合物磁化强度 M 随温度 T 的变化. 测量结果: Si 含量 $x = 0.55, 0.6, 0.63, 0.65$, 居里温度分别为 $T_C = 298, 324, 329, 343$ K. 随着硅含量的增加, 居里温度也随着增加.

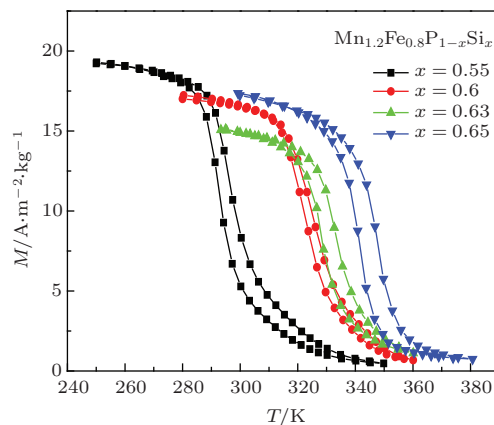


图6 (网刊彩色) $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 化合物 $M-T$ 曲线

3.3 热磁发电装置的研制^[13]

图7为热磁发电演示仪实物图. 演示仪由磁场系统、感应线圈、热磁发电材料、冷热源、电流表等组成.

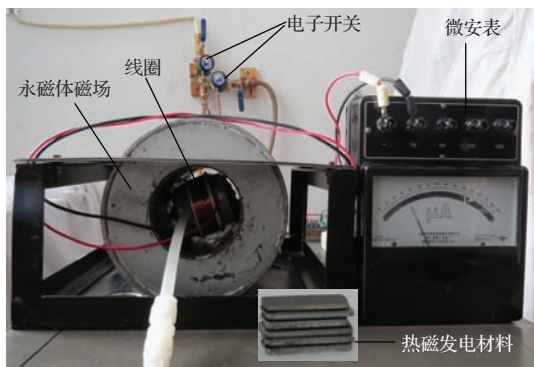


图7 热磁发电装置实物图

3.4 热磁发电测量

3.4.1 感应电流大小与样品质量的关系

$Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.37}Si_{0.63}$ 样品用线切割机切成了 1.5 mm 薄片, 片状样品发电测试完, 变成不规则颗粒. 分别取不同质量的样品, 放入匝数不同的线圈中, 热水温度大约 80 °C, 强永磁体磁感应强度为 0.8 T 下进行热磁发电性能测试. 测量结果如表 1 所列 (本文各表中的电流均为正向最大感应电流).

表 1 对于不同质量的 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.37}Si_{0.63}$ 样品, 在不同匝数下测量得到的感应电流

	<i>m/g</i>				
	50	100	150	187	200
$I/\mu A (N = 1050, \text{片状})$	4	8	16	—	21
$I/\mu A (N = 2000, \text{片状})$	4	9	14	—	32
$I/\mu A (N = 2700, \text{颗粒})$	25	30	34	—	39
$I/\mu A (N = 3500, \text{颗粒})$	—	31	50	60	—

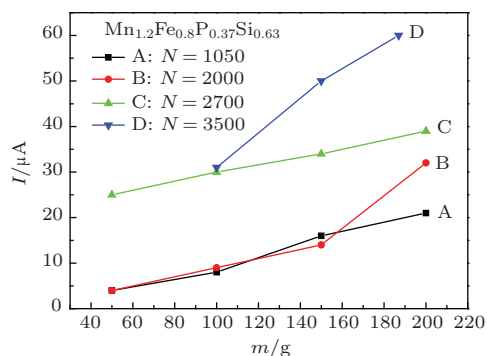


图8 (网刊彩色) 感应电流 I 与质量 m 的变化关系

利用表 1 所列数据, 给出感应电流 I 与热磁发电材料质量 m 的关系, 如图 8 所示.

测量结果表明: 不管是片状样品, 还是颗粒样品, 感应电流随样品质量的增加而增大. 颗粒样品热磁发电效率高于片状样品.

3.4.2 感应电流大小与线圈匝数的关系

制备 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.35}Si_{0.65}$ 样品 200 g, 将样品变成颗粒, 分别取 45 和 195 g 放入匝数不同的线圈中, 进行发电性能测试, 测量结果如表 2 所列.

表 2 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.35}Si_{0.65}$ 样品的质量为 45, 195 g 时, 在不同匝数下测量得到的感应电流

	<i>N</i>			
	1050	2000	2700	3500
$I/\mu A (m = 45 \text{ g})$	16	21	30	—
$I/\mu A (m = 195 \text{ g})$	—	50	60	65

图 9 为利用表 2 所列数据给出的感应电流 I 与线圈匝数 N 的关系.

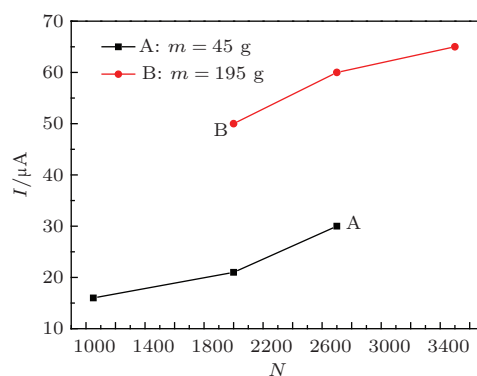


图9 感应电流 I 与线圈匝数 N 的关系

测量结果表明: 等质量热磁发电材料, 感应电流大小正比于线圈的匝数.

4 实验测量结果分析

测试 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.37}Si_{0.63}$ 样品发电性能时发现, 将 78 g 颗粒样品放入 2700 匝的线圈中, 热水和冷水交替通过时, 测得最大感应电流为 44 μA ; 而将 200 g 薄片样品放入 2700 匝的线圈中, 测得最大感应电流为 40 μA . 测量结果表明, 样品形状对感应电流大小有比较大的影响. 是什么原因造成样品质量增加而感应电流却没有成比例增加呢?

测试 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{0.35}Si_{0.65}$ 样品发电性能时发现, 将 130 g 颗粒样品放入 2700 匝的线圈中, 当热水温度为 80 °C 时, 热水和冷水交替通过, 测得最

大感应电流为 60 μA ; 当热水温度升高到 100 $^{\circ}\text{C}$ 时, 测得最大感应电流为 80 μA . 结果表明, 随水温升高, 感应电流增大. 是什么原因导致感应电流随水温升高而增大呢?

为讨论上述两个问题, 建立了一个理想化的热传递模型. 取一块用线切割机切成的 $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.37}\text{Si}_{0.63}$ 薄片, 它的长 $a = 40 \text{ mm}$, 宽 $b = 20 \text{ mm}$, 高 $c = 1.5 \text{ mm}$, 若将其变成直径 $d = 1.5 \text{ mm}$ 或 1 mm 的小球, 其表面积变化情况, 如图 10 所示.

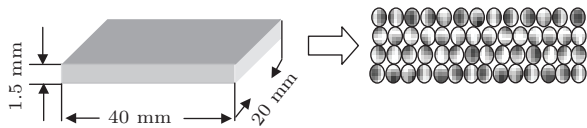


图 10 薄片变成 n 个小球的示意图

矩形薄片与 n 个小球的体积相等:

$$abc = n \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = n \frac{1}{6} \pi d^3, \quad (6)$$

矩形薄片外表面积:

$$S_1 = 2(ab + bc + ac), \quad (7)$$

n 个小球的外表面积:

$$S_2 = n \pi d^2 = \frac{6abc}{d}. \quad (8)$$

经计算, 矩形薄片外表面积 $S_1 = 1780 \text{ mm}^2$; 当 $d = 1 \text{ mm}$ 时, n 个小球的外表面积 $S_2 = 7200 \text{ mm}^2$, 则有 $S_2 \approx 4S_1$; 当 $d = 1.5 \text{ mm}$ 时, n 个小球的外表面积 $S_2 = 4800 \text{ mm}^2$, 则有 $S_2 \approx 2.7S_1$.

通过以上计算表明, 同体积的薄片变成 n 个小球时, 表面积会增加, 并且随小球半径的减小表面积逐渐增加.

当 $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.37}\text{Si}_{0.63}$ 化合物颗粒 A 处于热水 B 中受热升温时, 为了研究的方便, 将 $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.37}\text{Si}_{0.63}$ 化合物颗粒简化成半径相等的小球, 沿小球外法线方向温度逐渐升高. 如果在小球的外表面取一个面元 dS , 热量将通过 dS 由热水 B 传递到小球 A. 如用 dQ 表示在时间 dt 内通过 dS 沿径向向小球传递的热量, 以 $\frac{dT}{dr}$ 表示 dS 所在处的温度梯度, 则

$$dQ = -k \left(\frac{dT}{dr}\right) dS dt, \quad (9)$$

式中, k 为导热系数, 负号表示热量沿着温度减小的方向传递. (9) 式即为傅里叶定律^[14].

通过 (9) 式我们可以得出, 热传递的快慢与表面积成正比, 与小球 A 和热水 B 的温度差成正比. 因此, 增大样品的表面积和温度梯度都会加快热传递的速度, 进而加快样品的温度变化, 提高热转变的速度, 减小热传递的时间, 增大磁化强度随时间的变化率, 最终使得热磁转变中产生的感应电动势增大, 电路中感应电流也随之增大.

通过提高热传递的速度, 增大感应电动势, 进而提高热磁发电效率, 提高热能与电能的转化率. 小颗粒热量的传递如图 11 所示.

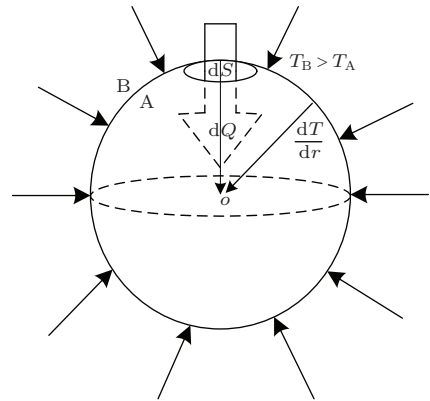


图 11 热量的传递

热磁发电材料在每次热循环中都有部分热能转化为电能. 设热磁发电材料从高温热源吸收热量为 Q_h , 转化电能为 ΔE , 释放给低温热源的热量为 Q_c , 根据能量转化和守恒定律有

$$Q_h = \Delta E + Q_c. \quad (10)$$

在每次热磁转变中产生的电能表示为

$$\Delta E = \frac{\mu_0 m}{\rho} \oint M dH, \quad (11)$$

热磁发电的效率

$$\eta = \frac{\Delta E}{Q_h}. \quad (12)$$

实验结果和理论推导表明, 感应电流与样品的表面积和样品表面的温度梯度成正比, 增大样品表面积和提高样品表面的温度梯度, 对于提高热磁发电的效率是非常关键的.

5 结 论

本文研究了处于永磁体强磁场中 $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{1-x}\text{Si}_x$ 系列化合物的热磁发电性能. 理论推导和实验测量结果表明: 热磁发电产生感应电流的大小正比于线圈的匝数、热磁发电材料的质量、磁化

强度随时间的变化率, 结论为表达式(5). 提高热磁发电材料效率的关键是提高热磁发电材料在居里温度附近的热转变速度, 增大热磁发电材料与水接触的表面积以及材料表面的温度梯度, 是加快热磁转变的两条有效途径. 虽然 $Mn_{1.2}Fe_{0.8}P_{1-x}Si_x$ 系列化合物机械性能有待进一步提高, 但表现出的热磁发电性能, 以及 Mn-Fe-P-Si 这四种元素在地球上储量丰富, 使其有望成为热磁发电的候选材料. 永磁体强磁场中热磁发电的研究, 具有实际应用价值, 并可为将来实际发电应用进行基础性探索研究.

感谢包头稀土研究院黄焦宏教授在强永磁体制作给予的帮助.

参考文献

- [1] Tesla N 1890 *U. S. Patent* 428057
- [2] Elliot J F 1959 *J. Appl. Phys.* **30** 1774
- [3] Kirol L D, Mills J I 1984 *J. Appl. Phys.* **56** 824
- [4] Solomon D 1988 *J. Appl. Phys.* **63** 915
- [5] Tegus O, Brück E, Buschow K H J, de Boer F R 2002 *Nature* **415** 150
- [6] Cam Thanh D T, Brück E, Trung N T, Klaasse J C P, Buschow K H J, Ou Z Q, Tegus O, Caron L 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07B318
- [7] Song L, Wang G F, Ou Z Q, Haschaolu O, Tegus O, Brück E, Buschow K H J 2009 *J. Alloy. Compd.* **474** 388
- [8] Bi L G, Tegus O, Yi R L T, Shi H R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 077103 (in Chinese) [毕力格, 特古斯, 伊日勒图, 石海荣 2012 物理学报 **61** 077103]
- [9] Huang K, Han R Q 1988 *Solid Physics* (Beijing: Higher Education Press) p408 (in Chinese) [黄昆, 韩汝琦 1988 固体物理学 (北京: 高等教育出版社) 第 408 页]
- [10] Jiang S T, Li W 2003 *Condensed Matter Magnetic Physics* (Beijing: Science Press) pp54–56 (in Chinese) [姜寿亭, 李卫 2003 凝聚态磁性物理 (北京: 科学出版社) 第 54—56 页]
- [11] Tegus O, Bao L H, Song L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 037506
- [12] Geng Y X, Tegus O, Bi L G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 037504
- [13] Liu Z S, Tegus O 2014 *J. Phys. Experiment.* **34** 37 (in Chinese) [刘忠深, 特古斯 2014 物理实验 **34** 37]
- [14] Huang S Q, Nie Y R, Shen X J 1994 *Thermology* (2nd Ed.) (Beijing: Higher Education Press) pp269–270 (in Chinese) [黄淑清, 聂宜如, 申先甲 1994 热学教程 (第二版) (北京: 高等教育出版社) 第 269—270 页]

Thermomagnetic power generation of $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{1-x}\text{Si}_x$ compounds in strong field of permanent magnet*

Liu Zhong-Shen¹⁾²⁾ Tegus O^{1)†} Ou Zhi-Qiang¹⁾ Fan Wen-Di¹⁾ Song Zhi-Qiang¹⁾
 Ha Si Chao Lu¹⁾ Wei Wei¹⁾ Han Rui¹⁾

1) (Inner Mongolia Key Laboratory for Physics and Chemistry of Functional Materials, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

2) (No.8 High School of Dehui, Dehui 130323, China)

(Received 19 July 2014; revised manuscript received 25 September 2014)

Abstract

In this paper, we study the thermomagnetic power generation performances of compound series $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{1-x}\text{Si}_x$ in a strong magnetic field of permanent magnet. The compounds are synthesized by using the high-energy ball milling and solid state reaction method. The crystalline structures, magnetic properties, and the thermomagnetic power generation performances of the compound series $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{1-x}\text{Si}_x$ are measured. The results show that $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.37}\text{Si}_{0.63}$ and $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.35}\text{Si}_{0.65}$ are the compounds of a first-order phase transition and the soft ferromagnetic materials, and they are of Fe_2P -type hexagonal structure, Curie temperatures of these compounds are 334 K and 348 K in the industrial waste heat temperature zone. According to this feature that temperature variation of the first-order phase transition material leads to a large change of magnetization at the Curie temperature, we design a demonstration device for thermomagnetic generator, and measure the relationships of induction current generated in ferromagnet phase transition with the coil turn number, mass and surface area of thermomagnetic generator material, and the gradient of surface temperature for compounds $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.37}\text{Si}_{0.63}$ and $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{0.35}\text{Si}_{0.65}$. The results show that the $\text{Mn}_{1.2}\text{Fe}_{0.8}\text{P}_{1-x}\text{Si}_x$ compound series possess the high performances of thermomagnetic power generation, and they are expected to be candidates of magnetic materials for thermomagnetic power generation.

Keywords: thermomagnetic power generation, Curie temperature, first-order phase transition

PACS: 71.20.Be, 75.30.Kz, 84.60.Rb

DOI: 10.7498/aps.64.047103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51161017).

† Corresponding author. E-mail: tegusph@imnu.edu.cn