

[文章编号] 1004-0609(2002)02-0363-06

宽温区 P-型热电材料的性能表征与设计^①

崔教林^{1, 2}, 赵新兵¹

(1. 浙江大学 材料科学与工程系, 杭州 310027; 2. 宁波高等专科学校 机械系, 宁波 315016)

[摘 要] 通过对 Bi₂Te₃/FeSi₂ 叠层热电材料的性能建模计算, 得出了该结构的平均 Seebeck 系数及内电阻与热端温度的关系可分别用两个三次多项式表征。在外阻为 0.073 4 Ω, 热端温度约 510 °C 时, Bi₂Te₃/FeSi₂ 叠层热电材料的最大输出功率值与实验值较为接近, 在相同条件下均为计算得出的单段 FeSi₂ 材料的 2.5 倍, 说明该方法有效、可行。对用此方法建模设计多种单段材料组合成的梯度结构, 计算发现以两种不同成分并经相近工艺制备的均质 FeSi₂ 材料制成的叠层结构性能较优, 与 Bi₂Te₃/FeSi₂ 结构有相同的最大输出功率值。但从多方面分析表明, 用两均质 FeSi₂ 材料制成的宽温区热电材料更具潜力。

[关键词] 宽温区热电材料; 性能表征; 设计; 输出功率

[中图分类号] TN 304

[文献标识码] A

均质热电材料的性能可用温差电值 Z 表示:

$$Z = \alpha^2 \sigma / \kappa \quad (1)$$

式中 α —Seebeck 系数, σ —电导率, κ —热导率。由于均质材料的 Z 值只在某一局部温区取得最大值^[1], 若沿温度高低方向设置不同的材料, 使每段材料各自工作在其最佳温度区域内, 可有效地发挥材料的热电转换效率^[2]。然而, 对于作用在宽温度区域的热电材料, 其性能不能简单地按文献[1]中所描述的函数关系来表征。首先, 各段材料之间的界面温度需要优化设计, 文献[1]中曲线段交点所对应的温度并不代表材料段间的界面温度; 其次, 对于作用在宽温度区域的梯度材料, 所反映出来的性能具有积分或平均的性质, 而文献[1]中的 Z 值只表示在某一局部温度下所对应材料的性能。Koshigoe 等人^[3]在研究 Bi₂Te₃/PbTe 梯度结构材料时, 平均电导率 $\bar{\sigma}$ 取两均质材料的长度加权平均值。这在相当程度上忽略了材料各热电参数与温度之间关系的相互独立性和非线性特征, 由此组合计算得到的梯度结构整体性能也缺少理论依据。Schilz 和 Heimers 等人^[4~6]则认为, 对于作用在宽温度区域的热电材料, 可应用方程

$$\eta_{\text{loc}} = \frac{J \alpha dT - \frac{I^2 dx}{\sigma}}{-\kappa dT/dx + J \alpha T} \quad (2)$$

来表征局部区域的热电转换效率。式中 η_{loc} —局部热电转换效率, J —电流密度, dx —材料微分段

长度。这一方程虽适用性较广, 但不能给人一个直观而又明确的结论, 使用起来也极为不便。

通过设计各材料段的载流子浓度可以提高温差电材料的性能^[7], 但采用这一方法所制得的材料应用温区较窄, 难以满足实际需要。采用能带理论也可以设计梯度热电材料^[8, 9], 但如何选择具有合适能量范围的材料及决定势垒高度是一大难题。基于以上考虑, 本文作者拟对作用在宽温度区域热电材料的各参数(Seebeck 系数 α 、电阻 R)值与热端温度的依赖关系进行推证, 并在此基础上, 设计更为优越的宽温区热电材料, 考察其热电转换量。

1 实验方法

1.1 均质材料的制备与热电性能测试

2 种半导体 Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃(以下简称 Bi₂Te₃)和 Fe_{30.74}Mn_{2.5}Si_{66.66}Cu_{0.1}(以下简称 FeSi₂)的成分按化学计量比比, 各元素纯度为: Fe ≥98%; Si ≥99.99%; Mn 和 Cu ≥99%; Bi, Sb, Te 99.999%。采用真空悬浮炉熔炼 FeSi₂。Bi₂Te₃在真空石英管内熔炼, 熔炼温度为 750 °C。球磨时间各为 4 h 以制备粉末。FeSi₂粉末经冷压(860 MPa)后, 在 1 150 °C 烧结 8 h, 再在 800 °C 退火 168 h 获得 β 相结构^[10], 样品最终尺寸为 $d 9 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 左右。Bi₂Te₃材料经同样压力冷压后在 380 °C 烧结 5 h, 样品直径 9 mm, 厚度约为 1.0 mm。

① [基金项目] 浙江省自然科学基金资助项目(501047)

[收稿日期] 2001-04-23; [修订日期] 2001-07-06

[作者简介] 崔教林(1963-), 男, 副教授, 博士。

材料 Seebeck 系数 α 及电阻率 ρ 的测试方法参照文献[10]。由此测得的两均质材料的热电性能见表 1。

表 1 两单段材料的热电性能

Table 1 Thermoelectric properties of two monolithic materials

t / °C	$\alpha_1 / (10^{-6} \cdot$ $\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho_1 / (10^{-5} \cdot$ $\Omega \cdot \text{m})$	t / °C	$\alpha_2 / (10^{-6} \cdot$ $\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho_2 / (10^{-5} \cdot$ $\Omega \cdot \text{m})$
26.0	138.0	18.0	25.0	89.3	227.5
38.2		18.0	51.1	97.8	194.0
65.5	142.0	17.0	100.0	109.3	123.0
95.3	143.3	16.4	150.0	113.4	85.1
125.3		16.0	199.9	124.2	67.3
160.0	140.2	16.1	249.8	135.6	55.7
195.2	139.0	16.4	299.7	139.8	49.5
240.3	135.0	15.6	350.0	145	49.9
280.0	126.4	14.3	399.9	150.5	53.8
			449.9	157.4	30.1
			500.0	163.6	18.3

$\alpha_1, \rho_1 - \text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$; $\alpha_2, \rho_2 - \text{Fe}_{30.74}\text{Mn}_{2.5}\text{Si}_{66.66}\text{Cu}_{0.1}$

1.2 宽温区热电材料性能表征

假设组成叠层结构材料的界面无接触热阻与电阻, 即过渡层材料具有理想的导热与导电性。根据我们以前的研究^[11], 对于 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 叠层材料, 当冷端温度为室温($\sim 25^\circ\text{C}$)、热端温度为 510°C 左右时, 最佳 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 尺寸段比例为 1:10。按此比例设计的叠层材料, 实验测得其冷端、界面温度与热端温度的关系如图 1 所示。

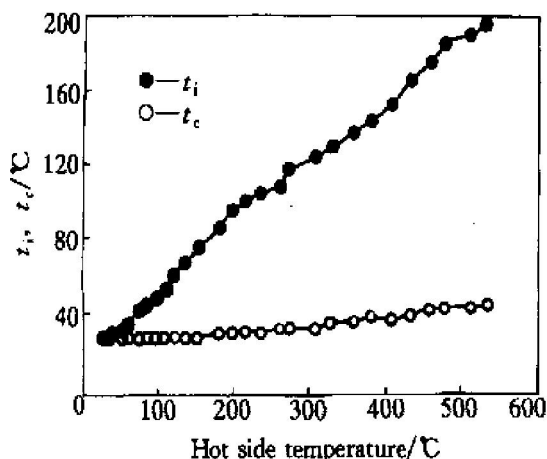


图 1 Bi_2Te_3 的长度为 1 mm 左右时
界面、冷端与热端温度之间的关系

Fig. 1 Dependence of interface and cold side temperature on hot side temperature when length of Bi_2Te_3 layer keeps about 1 mm

1.3 材料平均 Seebeck 系数的表征

设计一组 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 叠层材料。该材料在不同热端温度下应有相应的界面温度。则平均 See-

beck 系数可用下面公式计算:

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_{t_c}^{t_i} \alpha_1 dt + \int_{t_i}^{t_H} \alpha_2 dt}{t_H - t_c} \quad (3)$$

式中 t_i, t_H, t_c 分别为界面及热冷端温度。 α_1, α_2 分别为均质 Bi_2Te_3 与 FeSi_2 的 Seebeck 系数(取自表 1 实验值), 依赖于温度。

1.4 热电材料电阻的表征

叠层材料的内电阻可用公式(4)表示:

$$R_i = \frac{\int_0^{l_1} \rho_1 dx + \int_{l_1}^{l_2} \rho_2 dx}{A} \quad (4)$$

式中 A 为截面积, ρ_1 与 ρ_2 分别为均质 Bi_2Te_3 与 FeSi_2 的电阻率(取自表 1 实验值), 也依赖于温度, x 为轴向距离。但 ρ 与轴向距离 x 并没有实验规律, 因此在计算 R_i 之前, 必须先得出 ρ 与轴向距离 x 的关系。精确确定轴向温度分布是困难的。由于受到 Joule 热和 Thomson 热的影响, 轴向温度一般并不成线性分布, 近材料段中间有最大的热分布^[12, 13]。但已有研究表明^[14], 如果忽略由于冷热端之间的不均匀热流及热损失所造成的横向温度差异(实际器件一般是绝热的, 因此横向温度差异可忽略不计), 轴向温度采用线性分布不会引起太大的误差, 尤其是在冷热端温差较小的情况下(本实验采用的最大温差约为 490°C 左右)。因此, 局部温度与某尺寸段 x 可采用 $T = ax + b$ 线性模式(a, b 均为常数), 以冷端作为计算起点(即 $x = 0$), 在不同的热端温度(即不同的界面温度)下, 可以得出沿热端方向不同温度处所对应的 x 值, 然后将 $\rho = \rho(t)$ 之关系转化成 $\rho = \rho(x)$ 之关系。

1.5 材料输出功率(P_{out})计算

在输出功率测试装置中, 所采用的纯铜导线截面积为 1.5 mm^2 , 线阻大约在 0.01Ω 以下, 因此在计算输出功率时予以忽略。由此, 材料输出功率可用下式计算:

$$P_{\text{out}} = JA \left(\int_{t_c}^{t_i} \alpha_1 dt + \int_{t_i}^{t_H} \alpha_2 dt \right) - J^2 A \left(\int_0^{l_1} \rho_1 dx + \int_{l_1}^{l_2} \rho_2 dx \right) \quad (5)$$

式中 J 为电流密度, 其它符号意义同上。热端温度控制在 510°C 左右。

2 计算结果与实验验证

叠层材料 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 的平均 Seebeck 系数计

算结果见图 2。拟合图中曲线, 得到与热端温度的关系为

$$\bar{\alpha}=95.07+0.21 t_H-4.62 \times 10^{-4} t_H^2+4.86 \times 10^{-7} t_H^3$$

(6)

图中还示出了实验测得的 Bi_2Te_3 与 FeSi_2 两单段材料的 Seebeck 系数与温度的关系。比较 3 曲线可知, 在低温与高温端, 叠层材料的平均 Seebeck 系数均介于两单段半导体之间, 这跟实际情况吻合。

图 3 所示为计算得到的内电阻与热端温度的关系, 拟合该曲线, 可得内阻与热端温度的关系为

$$R_i=41.53 \times 10^{-2}-0.208 \times 10^{-2} t_H+4.48 \times 10^{-6} t_H^2-3.33 \times 10^{-9} t_H^3$$

(7)

当热端温度为 $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 计算得内阻为

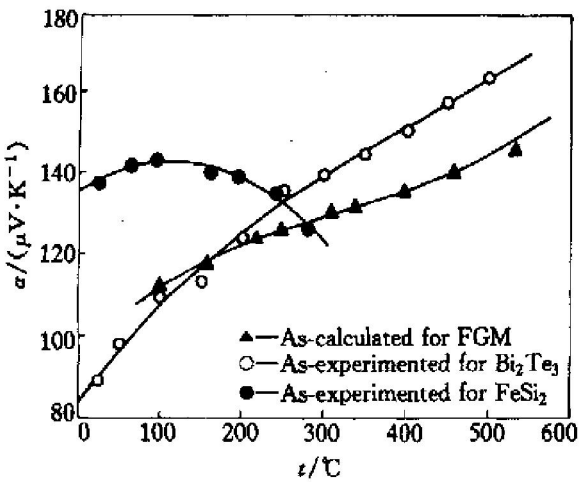


图 2 各种材料热电因子与温度的关系

Fig. 2 Dependence of Seebeck coefficients for different materials on hot side temperature

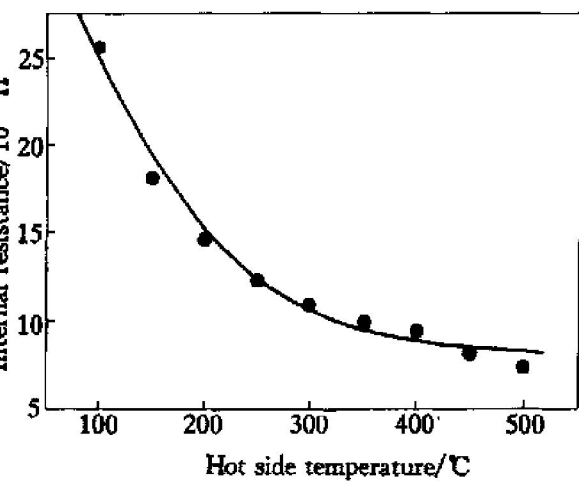


图 3 梯度热电材料 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 的内阻与热端温度的关系

Fig. 3 Dependence of internal resistance of FGM $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ on hot side temperature

0.0734Ω , 与拟合所得的结果(0.08Ω)较为接近。

图 4 所示为按照公式 (5) 计算的叠层结构 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 输出功率与负载电阻的关系曲线。图中还示出了实验测得的叠层结构 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 输出功率值。实验时, 以 $\text{Sn}_{95}\text{Sb}_5$ 作为过渡层, 用热浸焊法制成叠层 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sn}_{95}\text{Sb}_5/\text{FeSi}_2$ 热电材料。在相同的外加温差下(约为 $490\text{ }^{\circ}\text{C}$) 计算及测试输出功率值。输出功率测试方法参见文献[15]。发现当负载电阻较小时, 计算值较实验值高。这可能是在低负载电阻(小于 0.1Ω) 时, 导线电阻的影响起了一定的作用。而负载电阻大于 0.1Ω 时却较实验值低, 这似乎跟模拟计算得出的热电势值比实测值低有关。但当负载电阻接近于 0.1Ω 时, 计算值与实测值基本吻合。从图 4 还可发现, 当内阻为 0.0734Ω , 计算得的输出功率取得最大值(约为 18.4 mW), 这跟采用方程 $P'_{\max}=\Delta V^2/4R_i$ 计算得的值相一致(式中 ΔV 为热电势, 求平均 Seebeck 系数时可得)。因此计算结果符合最大输出功率值的条件: $R_l=R_i$ 。虽然实验未测出负载电阻为 0.0734Ω 时的输出功率值, 但从图 4 中也可发现在这一负载电阻时输出功率处于较大区域。说明用上述建模计算热电性能(包括平均 Seebeck 系数、内电阻)的方法有效、可行。同时还发现, 在相同条件下, 叠层结构 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 热电材料最大输出功率值为单段 FeSi_2 材料(这一材料与叠层结构 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 中的单段 FeSi_2 材料相同)的 2.5 倍, 说明宽温区热电材料既发挥了低温端材料 Bi_2Te_3 的优势, 同时也发挥

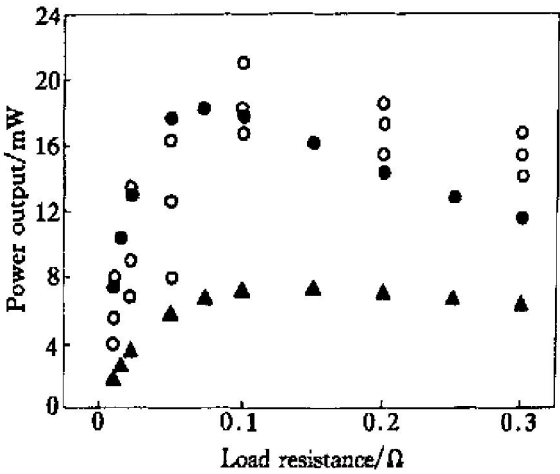


图 4 各种材料的输出功率与负载电阻的关系

Fig. 4 Dependence of power output on load resistance of different materials

- Experimental data for FGM $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$;
- Calculated data for FGM $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$;
- ▲—Calculated data for homogeneous material FeSi_2

了高温端材料 FeSi_2 的特长。

3 宽温区热电材料的设计

上面已经说明, 利用公式(3), (4), (5) 计算得到的各热电性能比较符合实际情况。因此, 只要测出各单段材料的热电性能(Seebeck 系数和电阻率), 用上述方法同样可以计算出不同结构模型、不同单段材料或不同尺寸/参数组合成的叠层材料性能(输出功率)。这在相当程度上省去了实验所造成的人力、物力损耗。实验已测得多种不同成分但经相近工艺(烧结与退火温度相同, 但烧结时间或有区别)制备的 P-型 FeSi_2 材料的热电参数值, 见表 2。

在相同的热端温度(510 ℃左右)下, 按 1. 3, 1. 4, 1. 5 节叙述的方法计算多种组合方式的输出功率值(其中包括叠层数、叠层次序及各层长度), 发现取表 2 中 1, 2 两组数据按图 5 方式进行组合(命名为 S1/S2 结构, 尺寸见图)时其输出功率最佳, 并得出输出功率与负载电阻的关系(见图 6)。由图 6 可见, 该叠层热电材料最大输出功率为 18. 2 mW, 与上面 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 结构所输出的最大功率值相等, 但显然 S1/S2 结构更为优越。第一, S1/S2 结构中两单段材料主要成分均为 FeSi_2 , 成本较低, 无毒, 对环境无污染; 其次, $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 结构中两

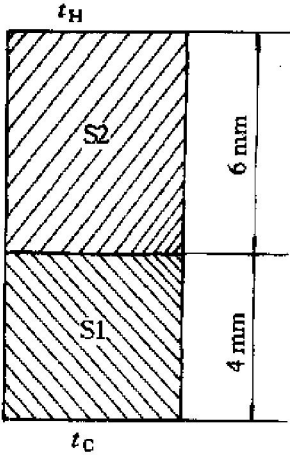


图 5 两元 FeSi_2 组成的 FGM 设计模型
Fig. 5 Model for design of FGM with two P-type iron-disilicides

单段材料的物化性能及力学性能相差较大。而 S1/S2 结构中, 两单段材料这两方面性能均相近, 因此, 使用时热稳定性可预计更好。

4 结论

1) 用本工作设计条件与模拟计算, 得出 P-型热电材料 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ 的平均 Seebeck 系数及整体结构内电阻与热端温度的关系可分别用下述公式表

表 2 各单段 P- FeSi_2 材料的热电性能测试值

Table 2 Thermoelectric properties of monolithic materials P- FeSi_2

$t/^\circ\text{C}$	α_1 $/ (10^{-6} \text{ V}\cdot\text{K}^{-1})$	ρ_1 $/ (10^{-5} \Omega\cdot\text{m})$	α_2 $/ (10^{-6} \text{ V}\cdot\text{K}^{-1})$	ρ_2 $/ (10^{-5} \Omega\cdot\text{m})$	α_3 $/ (10^{-6} \text{ V}\cdot\text{K}^{-1})$	ρ_3 $/ (10^{-5} \Omega\cdot\text{m})$	α_4 $/ (10^{-6} \text{ V}\cdot\text{K}^{-1})$	ρ_4 $/ (10^{-5} \Omega\cdot\text{m})$
50	286.0	311.6	180.0	453.2	90.0	52.7	343.0	706.4
100	284.0	237.8	197.0	344.4	106.0	41.4	345.0	702.6
150	282.0	166.1	212.0	225.7	116.5	33.6	343.0	643.2
200	280.0	117.5	227.0	144.9	128.6	28.1	330.0	458.7
250	282.0	80.2	235.0	96.9	139.2	24.2	326.0	313.4
300	278.0	65.1	238.0	77.5	147.0	21.7	307.0	211.5
350	260.0	54.8	232.0	78.9	156.0	25.7	293.5	147.3
400	252.0	42.1	232.0	62.4	162.0	26.0	283.0	118.8
450	251.6	32.0	227.6	38.2	164.0	23.3	272.0	84.0
500	239.0	22.7	227.2	24.5	158.0	15.8	260.0	50.3
550	231.5	18.4					250.5	31.9

α_1, ρ_1 — $\text{Fe}_{27.4}\text{Mn}_{2.5}\text{Si}_{70}\text{Cu}_{0.1}$, 800 ℃ annealing for 21 h, 1 150 ℃ sintering for 8 h(S1);
 α_2, ρ_2 — $\text{Fe}_{30.75}\text{Mn}_{2.5}\text{Si}_{66.65}\text{Cu}_{0.1}$, 800 ℃ annealing for 21 h, 1 150 ℃ sintering for 3 h(S2);
 α_3, ρ_3 — $\text{Fe}_{30.75}\text{Mn}_{2.5}\text{Si}_{66.65}\text{Cu}_{0.1}$, 800 ℃ annealing for 21 h, 1 150 ℃ sintering for 8 h(S3);
 α_4, ρ_4 — $\text{Fe}_{27.4}\text{Mn}_{2.5}\text{Si}_{70}\text{Cu}_{0.1}$, 800 ℃ annealing for 21 h, 1 150 ℃ sintering for 3 h(S4)

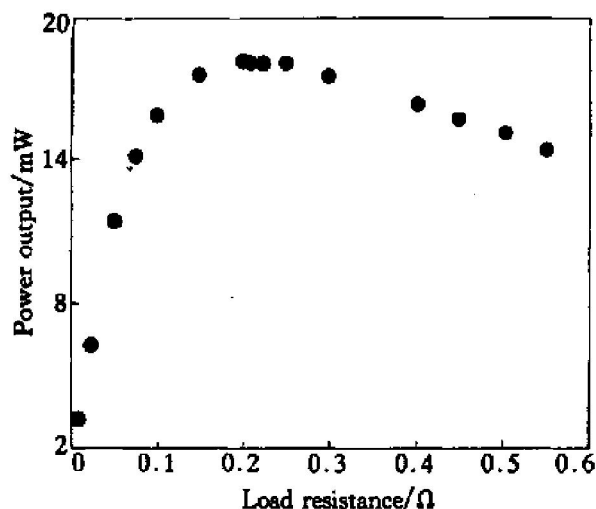


图6 S1/S2 梯度结构输出功率值与外加电阻的关系

Fig. 6 Dependence of power output calculated on load resistance for model of FGM with S1/S2 structure

征:

$$\bar{\alpha} = 95.07 + 0.21 t_H - 4.62 \times 10^{-4} t_H^2 + 4.86 \times 10^{-7} t_H^3$$

$$R_i = 41.53 \times 10^{-2} - 0.208 \times 10^{-2} t_H + 4.48 \times 10^{-6} t_H^2 - 3.33 \times 10^{-9} t_H^3$$

2) 热端温度为 510 °C 左右时, 在负载电阻较低或较高时, 计算值与实测值有差异, 但在负载电阻为 0.073 4 Ω 时, 计算的最大输出功率为 18.2 mW, 与实验值一致, 证明所采用的计算方法有效、可行。

3) 用该种计算方法可设计宽温区热电材料。在外加温度相同的情况下, 通过计算多种以 FeSi₂ 材料组合成的叠层结构, 发现以其中两种不同的 FeSi₂ 材料组合成的宽温区热电材料性能较佳, 计算可得与 Bi₂Te₃/FeSi₂ 结构有相等的最大输出功率值。但从多方面分析, 该两单段 FeSi₂ 材料制成的宽温区热电材料更为优越。

[REFERENCES]

- [1] Tritt T M. Thermoelectric materials: Holey and unholey semiconductors [J]. Science, 1999, 283: 804– 805.
- [2] Hirai T, Chen L. Recent and prospective development of functionally graded materials in Japan [J]. Materials Science Forum, 1999, 308– 311: 509– 514.
- [3] Koshigoe M, Shiota I, Nishida I A. Expansion of utilizing temperature range of Bi₂Te₃/PbTe by FGM forming [J]. Materials Science Forum, 1999, 308– 311: 693– 698.

- [4] Schilz J, Müller E, Helmers L, et al. On the composition function of graded thermoelectric materials [J]. Materials Science Forum, 1999, 308– 311: 647– 652.
- [5] Schilz J, Helmers L, Kang Y S, et al. Bismuth-telluride/iron-disilicide segmented thermoelectric elements: patterning, preparation and properties [A]. 16th International Conference on Thermoelectric [C]. IEEE, 1997. 375– 378.
- [6] Schilz J, Helmers L, Müller E et al. A local selection criterion for the composition of graded thermoelectric generators [J]. J Appl Phys, 1998, 83(2): 1150– 1152.
- [7] Imai Y, Shinohara Y, Isoda Y, et al. Effect of segment length on maximum power of 2-segmented n-type with different carrier concentrations [J]. Materials Science Forum, 1999, 308– 311: 665– 668.
- [8] Hirano T, Teraki J, Nishio Y. Computational design for functionally graded thermoelectric materials [J]. Materials Science Forum, 1999, 308– 311: 641– 646.
- [9] Nishio Y, Hirano T. Methods of improving the efficiency of thermoelectric energy conversion and characteristic energy range of carriers [J]. Jpn J Appl Phys, 1997, 36: 5181– 5182.
- [10] ZHAO Xin-bing, ZHU Tie-jun, HU Shu-hong, et al. Transport properties of rapid solidified Fe-Si-Mn-Cu thermoelectric alloys [J]. J of Alloys and Compounds, 2000, 306: 303– 306.
- [11] 崔教林, 赵新兵, 朱铁军, 等. 两元 P-型梯度结构热电材料 FeSi₂/Bi₂Te₃ 的制备与性能 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1089– 1093.
CUI Jiao-lin, ZHAO Xin-bing, ZHU Tie-jun, et al. Preparation and performance of P-type FeSi₂/Bi₂Te₃ segmented thermoelectric materials [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 1089– 1093.
- [12] Sherman, Heikes R R R, Ure R W. Calculation of efficiency of thermoelectric devices [J]. J Appl Phys, 1960, 31(1): 1– 16.
- [13] Domenicall C. Stationary temperature distribution in an electrically heated conductor [J]. J Appl Phys, 1954, 25(10): 1310– 1311.
- [14] Helmers L, Müller E, Schilz J. et al. Graded and stacked thermoelectric generators-numerical description and maximisation of output power [J]. Materials Science and Engineering, 1998, B56: 60– 68.
- [15] Kang Y S, Niino M, Nishida I A, et al. Development and evaluation of 3-stage segmented thermoelectric elements [A]. 17th International Conference on Thermoelectrics [C]. IEEE, 1998. 429– 432.

Performance description and design for P-type thermoelectric materials with large temperature span

CUI Jiao-lin^{1, 2}, ZHAO Xin-bing¹

(1. Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Mechanical Engineering Department, Ningbo College, Ningbo 315016, China)

[Abstract] Several values referring to the performance for the P-type $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ graded thermoelectric materials were calculated. It is demonstrated that this simulation and calculation procedure can be proved to be effective and applicable in the design of FGM structure. The relationship between apparent Seebeck coefficient, internal resistance and hot side temperatures for the $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ structure using the calculation procedure mentioned above can be described by two three-order polynomials respectively. Although the maximum power output as calculated is somewhat higher than those as experimented in the lower load resistance and lower than those in the higher one, their values at a load resistance of 0.0734Ω under a hot side temperature of 510°C approximately match each other, and is 2.5 times that of monolithic material FeSi_2 calculated at the same applied circumstances. The calculation also illustrates that the configuration with two FeSi_2 with different compositions and similar preparations, being the best couple among all of the intensively selected P-type monolithic materials FeSi_2 with measured parameters, is superior to a large degree to the structure $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ in many ways, even though the same maximum power output as that of $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{FeSi}_2$ is calculated.

[Key words] thermoelectric materials with large temperature span; performance description; design; power output

(编辑 袁赛前)