

文章编号:2095-7386(2019)04-0032-05

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2019.04.007

热电材料几何结构对其制冷性能的影响

丁露¹, 徐建¹, 陈明祥²

(1. 武汉轻工大学, 电气与电子学院, 湖北 武汉 430023;

2. 华中科技大学, 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:随着光电子器件的发展, 热电材料由于其优异的机械及电学稳定性被广泛用于光电器件的芯片冷却中。传统的热电制冷器采用矩形柱状结构的热电材料作为主要部件, 其性能受到一定的限制。在传统热电材料结构的基础上, 对采用金字塔台结构的热电材料和普通矩形柱状结构的热电材料的冷却性能进行了理论计算及仿真对比研究, 计算结果表明, 增加热电材料的长度、减小截面面积以及增大金字塔台结构的倾斜角均可以改进热电材料的温差, 从而改进热电器件的制冷性能。

关键词:热电材料; 热电制冷; 矩形柱状结构; 金字塔台结构

中图分类号: TB 61

文献标识码: A

Research on structural geometry effect for the performance of TEC for cooling

DING Lu¹, XU Jian¹, CHEN Ming-xiang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Polytechnic University,

Wuhan 430023, China; 2. School of Mechanical Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the development of optoelectronics, the thermoelectric material is widely used for cooling electronics because of its good and stable performance on mechanical and electrical properties. For the traditional thermoelectric cooler (TEC), the geometry of the material is often cylinder with rectangular cross section, which is hard to further improve the performance. In this paper, a pyramid shape is applied to the TE material. Theoretical analysis and finite element simulation results show that, the TE material with pyramid shape could make more temperature difference which could be used to improve the cooling performance of the TEC substantially. Furthermore, the length, the cross-section of the shape and the slant angle, would also affect the improvement of temperature difference, so as to improve the cooling performance of thermoelectric devices.

Key words: thermoelectric cooling technology; thermoelectric material; rectangular cylindrical structure; pyramid type

收稿日期: 2019-07-01.

作者简介: 丁露(1996-), 女, 硕士研究生, E-mail: dinglu_0454@qq.com.

通信作者: 徐建(1984-), 男, 副教授, E-mail: xu.jian_01@163.com.

1 引言

现代传统的对电子设备制冷方式主要有空气对流制冷、液体汽化制冷和流动水制冷等。然而,在各种情况下,传统的无源冷却系统在大功率电子设备的冷却能力方面已经接近极限,热电制冷器则因其优异的机械及电气稳定性成为电子芯片冷却的替代方案^[1]。

热电制冷主要利用珀尔帖效应,该过程无须使用制冷剂,其运行过程无噪音、无污染、可靠性高、寿命长。虽然目前半导体的制冷性能可以达到较高的制冷效率,但相对于传统的制冷工艺而言,其制冷效率只有传统制冷效率的 30%^[2]。因此,如何提高热电器件的制冷效率成为热电领域亟待解决的问题。

热电器件的制冷性能取决于许多因素,如冷热板之间的温差、材料性能以及热电臂的形状和排列等。研究表明,在这些因素中,热电臂的几何形状起着决定性的作用^[3]。随着热电偶长度的增长,热电器件的制冷性能越好^[4-5],而对于整个热电器件而言,减少较短热电臂的数量可以有效提高热电器件的性能^[6]。同时,热电材料的长度和传热横截面积也对热电器件的性能有重要影响^[7-8]。为此,研究人员设计了不同形状的热电臂,例如矩形柱状结构、金字塔台结构、圆环结构等,并将这些形状的热电器件在发电方面进行了研究对比^[9-10],但热电器件用于电子设备制冷方面的研究相对较少。笔者专门针对热电器件的制冷性能,深入研究了不同形状的热电材料在热传导方面的特性。

2 热电材料热传导模型

热电制冷器的工作过程实质是将一面的热量传导至另一面。在热电制冷效应(即珀尔帖效应)形成的温差中,很重要的一部分是热电材料的热传导形成的温度分布。对于不同几何结构的热电材料,其热传导特性也存在差异。

2.1 矩形柱状结构热电材料模型

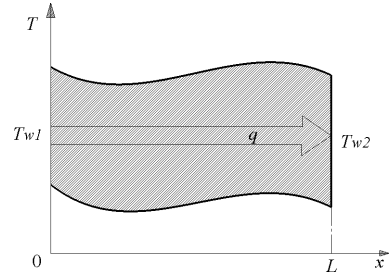


图 1 一维导热模型

图 1 给出了在一维稳态情况下的热传导形式,其热流量可以用如下公式计算:

$$q = kA \frac{T_{w1} - T_{w2}}{L} \quad (1)$$

式中 q 为单位时间传递的热流量,单位为 W; A 为导热物体传热面的表面积; k 为材料的热导率; L 为导热材料的厚度; T_{w1} 和 T_{w2} 为材料两侧的温度。 k 的大小反映材料的导热能力, k 越大则代表材料的导热能力越强^[11]。

物体热量一般是从热端传导到冷端,假设已知传递的热流量和其中一端的温度值,则另一端温度可以改写成:

$$T_h = T_c + \frac{qL}{kA} \quad (2)$$

式中 T_c 为冷端温度, T_h 为热端温度。

图 2 给出了组成热电制冷器的热电材料体模型。将该半导体划分为四个同等大小的矩形立方体,每一个矩形体将如图 2b 所示,从而可以得到如下计算式:

$$\frac{d\Delta T}{dx} + \frac{q}{4k} \cdot \frac{L}{a^2} = 0 \quad (3)$$

其中, ΔT 为材料两端的温度差值。当材料的其中一端为近似绝缘,则可以得到材料每一截面的温度分布:

$$T(x) = \frac{qL}{4k} \cdot \frac{L-x}{a^2} + T_c \quad (4)$$

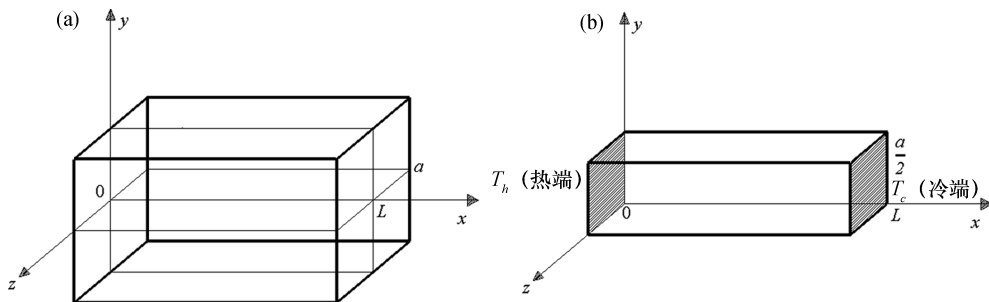


图 2 矩形柱状结构热电材料模型

2.2 金字塔台热电材料模型

热电材料用于发电器件的研究表明,金字塔台结构的热电材料具有良好的特性。若将热电材料制作作为如图 3a 所示的金字塔台结构,则可以按照图 2 的结构划分方法,得到金字塔台结构的热电材料热传导模型。取其中四分之一模块进行分析,如图 3b 所示。其中金字塔台结构在 xy 平面内直线方程设为 $y = x \cdot \tan\theta + d$, 由该金字塔台模型可以得出:

$$\frac{dT}{dx} + \frac{qL}{4k} \cdot \frac{1}{(x \cdot \tan\theta + d)^2} = 0 \quad (5)$$

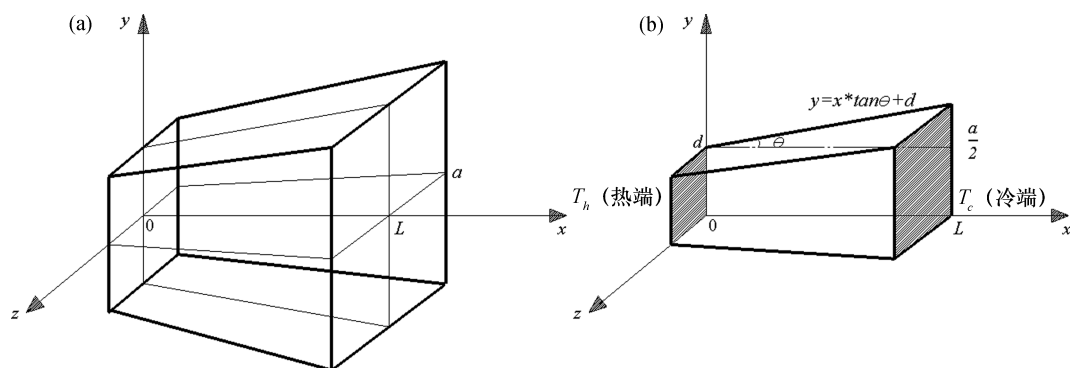


图 3 金字塔台结构热电材料模型

3 计算和仿真

针对前述给出的热电材料的热传导温度分布方程,我们设计了不同尺寸的金字塔台结构,并对其进行了理论计算及有限元仿真。使用 COMSOL Multiphysics 进行该物理场仿真,图 4、图 5 为实验仿真结果。

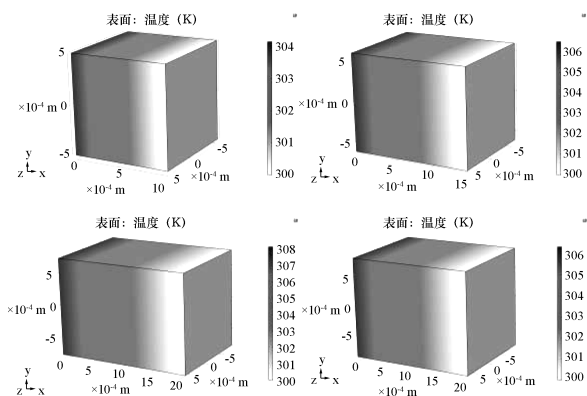


图 4 矩形柱状结构热电材料仿真模型

(规格 1-1-1mm, 1.2-1.2-1.5mm, 1.5-1.5-2.1mm, 1.7-1.7-2.1mm)

3.1 不同长度和传热面积比热电材料研究

表 1 和表 2 分别给出了矩形柱状结构及金字塔台结构三种长度的热电材料,每一种热电材料有四种不同的截面积。若将材料的长度和传热面积的比

其中, θ 为金字塔台结构的侧面倾斜角, d 为热端正方形边长, L 为半导体的总长度, $\frac{a}{2}$ 为冷端截面边长的一半。

通过进一步整理可得,该金字塔台结构的热电材料随长度变化的温度分布为:

$$T(x) = T_c + \frac{qL}{4k \cdot \tan\theta} \cdot \left(\frac{1}{x \cdot \tan\theta + d} - \frac{1}{L \cdot \tan\theta + d} \right) \quad (6)$$

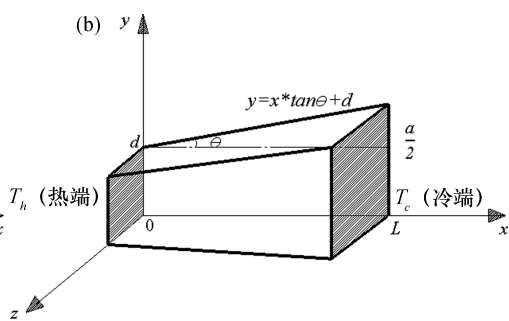


图 5 金字塔台结构热电材料仿真模型

(规格 1.7-1.7-2.1mm, θ 角依次为 5° , 10° , 15° , 20°)

值视为一个变量,则可以计算在不同比值下热电材料的温差变化情况。计算时将金字塔台结构的 θ 角设定为 10° , 热传导功率 Q 设定为 10 W/m 。

表 1 矩形柱状结构热电材料温差 (精确到小数点后两位)

长度(mm)	不同传热面积(mm^2)的温差(K)			
	1^2	1.2^2	1.5^2	1.7^2
1	4.16	2.89	1.85	1.44
1.5	9.38	6.51	4.17	3.24
2.1	18.36	12.76	8.17	6.36

表 2 金字塔台结构热电材料温差(θ 角为 10°)
(精确到小数点后两位)

长度(mm)	不同传热面积(mm ²)的温差(K)			
	1 ²	1.2 ²	1.5 ²	1.72
1	6.44	4.10	2.42	1.82
1.5	19.90	11.64	6.44	4.71
2.1	70.83	33.33	16.13	11.27

实验中给定坐标系内长度为 0 处的传热功率 $Q = 10 \text{ W/m}$, 长度 L 处设定固定温度为 300 K , 将 COMSOL 仿真结果与理论计算曲线值进行对比, 如图 6 所示。

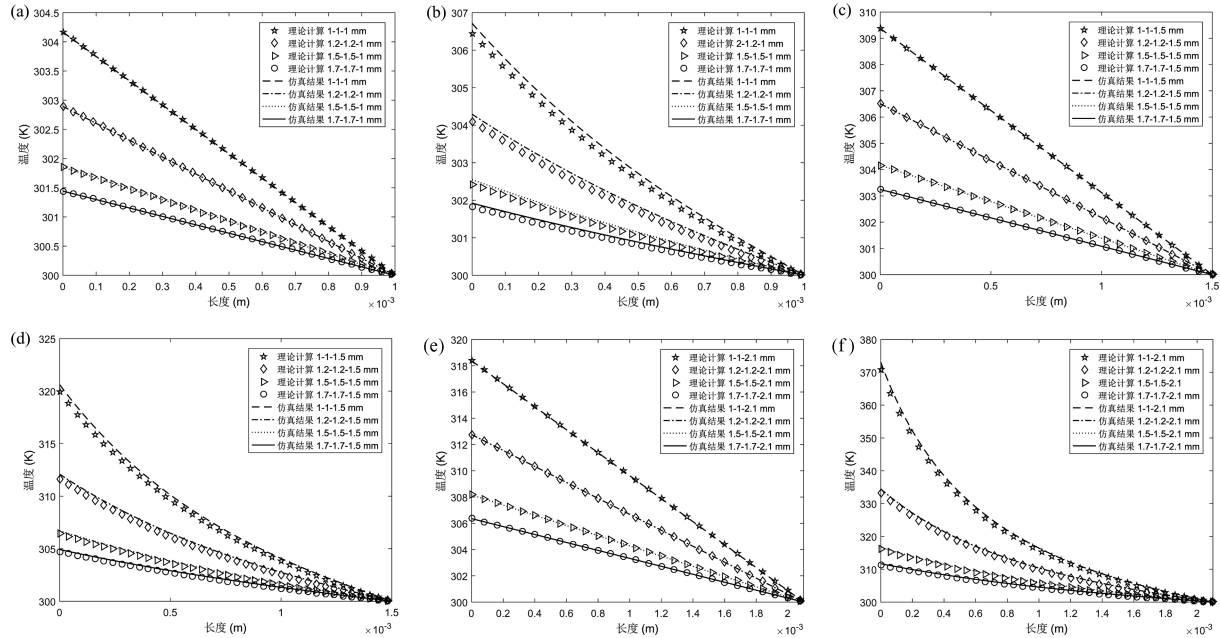


图 6 不同长度和传热面积比的矩形柱状结构、金字塔台结构的
COMSOL 仿真结果与理论计算结果对比

(a)长度 $L=1 \text{ mm}$ 的四组矩形柱状结构热电材料;(b)长度 $L=1 \text{ mm}$ 的四组金字塔台结构热电材料;(c)长度 $L=1.5 \text{ mm}$ 的四组矩形柱状结构热电材料;(d)长度 $L=1.5 \text{ mm}$ 的四组金字塔台结构热电材料;(e)长度 $L=2.1 \text{ mm}$ 的四组矩形柱状结构热电材料;(f)长度 $L=2.1 \text{ mm}$ 的四组金字塔台结构热电材料

可以看到,对于同一规格的热电材料,金字塔台结构热电材料产生的温差比矩形柱状结构热电材料产生的温差更大。长度与传热面积比值越大的热电材料产生的温差越大。由仿真结果可以看出,矩形柱状结构热电材料的温度分布结果与理论计算值重合,而金字塔台结构的热电材料由于热量在传输过程中传热面积在不断发生变化,因此实验仿真结果与理论计算值有偏差,且该偏差随着长度与传热面积比值的增大而增大。

3.2 同等传热面积不同长度热电材料研究

若设定热电材料的底面面积 A 为定值 1.72 mm^2 ,则可以计算不同长度和不同 θ 角的热电材料的温差值,理论计算结果如表 3 所示。随着材料长度的增长和 θ 角的增大,热电材料产生的温差越大。图 7 给出了采用 COMSOL 进行仿真结果及

理论的计算对比。

由图 7 可以看出,随着金字塔台结构热电材料夹角 θ 的增大,其材料的传热温差越大,在长度 $L=2.1 \text{ mm}$ 时, θ 角为 20° 的金字塔台结构热电材料冷热两端温差达到了 70 K 。同时,随着金字塔台结构热电材料 θ 角的增大,仿真结果与理论计算结果的偏差越大。

表 3 不同长度和 θ 角的热电材料温差
(精确到小数点后两位)

长度 (mm)	不同 θ 角热电材料温差(K)				
	0°	5°	10°	15°	20°
1	1.44	1.61	1.82	2.11	2.52
1.5	3.24	3.84	4.71	6.15	9.07
2.1	6.36	8.11	11.27	18.81	63.09

3.3 不同角的热电材料温差研究

对于金字塔台结构的热电材料,当 θ 越大时,其一侧底面会变得越来越小,最终将变为锥体。此时,对于热电器件而言,这种结构的材料无法进行制冷器件的设计。理论计算发现,对于材料底面边长为 1.7 mm、长度为 2.1 mm 的热电材料,其最大 θ 角

为 21° 。针对不同 θ 角的金字塔台结构的热电材料的导热特性进行分析,图 8 给出了 θ 角为 0° 、 4° 、 8° 、 12° 、 16° 、 20° 的金字塔台结构热电材料的传热计算及仿真分析结果。可以看到,随着 θ 角度的增大,热电材料两端的温差也是逐渐增大的。

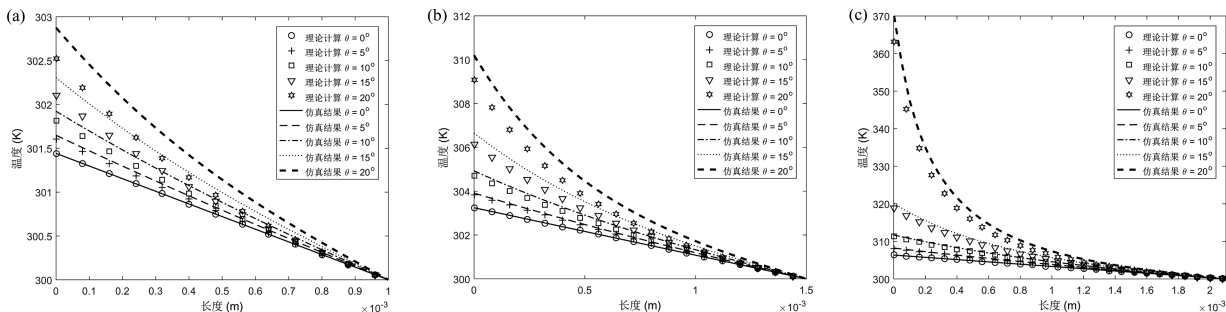


图 7 不同长度和不同 θ 角的热电材料 COMSOL 仿真结果以及理论计算结果的对比

(a)长度 $L=1$ mm 的 5 组不同 θ 角热电材料;(b)长度 $L=1.5$ mm 的 5 组不同 θ 角热电材料;(c)长度 $L=2.1$ mm 的 5 组不同 θ 角热电材料

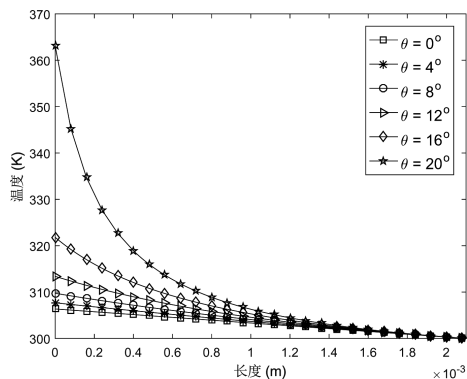


图 8 金字塔台结构热电材料不同 θ 角的仿真结果

4 研究结论

笔者针对应用于热电制冷器件的热电材料的结构及尺寸进行了深入的研究,给出了普通矩形柱状结构的热电材料和金字塔台结构的热电材料的热传导模型,并从理论计算和有限元仿真两个方面对不同尺寸的热电材料进行了研究。研究表明,增加半导体材料的长度、减小传热面积以及增大金字塔台结构 θ 角都可以有效增大热电材料的温差。并且,金字塔台结构热电材料相对于传统矩形柱状结构的热电材料可以形成更大的温差,这有利于热电制冷器件性能的进一步的提升。

参考文献:

[1] Zhou Y Y, Yu J L. Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35 (4):

1139-1144.

[2] 刘华军,李来风. 半导体热电制冷材料的研究进展[J]. 低温工程,2014,137(1):32-38.

[3] Fabián-Mijangos A, Min G, Alvarez-Quintana J. Enhanced performance thermoelectric module having asymmetrical legs [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148 (15): 1372-1381.

[4] Ma X L. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: A review [J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(9): 753-768.

[5] Zhao D L, Tan G. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66(2): 15-24.

[6] Fateh H, Baker C A, Hall M J, et al. High fidelity finite difference model for exploring multi-parameter thermoelectric generator design space [J]. Applied Energy, 2014, 129 (15): 373-383.

[7] Abid M, Somdalen R, Rodrigo M S. Design Optimization of a Thermoelectric Cooling Module Using Finite Element Simulations [J]. Journal of Electronic Materials, 2018, 47 (8): 4845-4854.

(下转第 93 页)

模块化程序设计图的设想[J]. 计算机研究与发展, 1995(12):21-25.

- [5] 史永哲. 计算机编程思想分析[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2008(6):179-181.
- [6] 胡思康. 软件工程基础(第 3 版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2019.
- [7] 叶勇健, 谭超. C 语言中动态链表的应用研究[J]. 网络安全技术与应用, 2014(12):

167, 169.

- [8] 邵顺增. 稳定快速排序算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(7):263-266.
- [9] 王锦坤. 浅析基于 C 语言的常用排序算法比较[J]. 信息通信, 2019, 31(3):83-85.
- [10] 苗智雯. 基于 C 语言的 Excel 文件操作研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2017(7):31-32.

(上接第 36 页)

- [8] Lee K H, Kim O J. Analysis on the cooling performance of the thermoelectric micro-cooler [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(9):1982-1992.
- [9] Xuan X C, Ng K C, Yap C, et al. Optimization of two-stage thermoelectric coolers with two design configurations [J]. Energy Conversion and

Management, 2002, 43(15):2041-2052.

- [10] Yilbas B S, Ali H. Thermoelectric generator performance analysis: Influence of pin tapering on the first and second law efficiencies [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 100:138-146.
- [11] 苏亚欣, 范晓伟. 传热学[M]. 第 1 版. 武汉:华中科技大学出版社, 2009.

(上接第 39 页)

可预测在该能量范围内形成的高熵合金具有强度高、硬度高、耐磨性好等性能。

(3)从态密度图可以看出, FeNiMnCu_{0.2}Al_x 高熵合金在 -6 eV 时, 态密度图对应的峰很尖锐, 说明金属原子间容易成键。

(4)计算后 FeNiMnCu_{0.2}Al_x 高熵合金的体积模量、剪切弹性模量和 lame 常数分别为 156 GPa、43.6、127.56。

参考文献:

- [1] 熊志华, 孙振辉, 雷敏生. 基于密度泛函理论的第一性原理赝势法[J]. 江西科学, 2005, 23(1):1-4.
- [2] 贺战文, 康少波. 基于 CASTEP 软件的 TiC_x 结构构建及性能研究[J]. 武汉轻工大学学报, 2016, 35(4):43-46.
- [3] 刘源, 李言祥, 陈祥, 等. 多主元高熵合金研究

进展[J]. 材料导报, 2006, 20(4):4-6.

- [4] 李忠丽. 多主元高熵合金的组织结构与性能研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2010.
- [5] 刘源, 陈敏, 李言祥, 等. 多主元高熵合金的组织与性能特点[C]//第十二届全国铸钢及熔炼学术年会暨中国有色金属加工工业协会重有色分会技术交流会. 郑州. 特种铸造及有色合金. 2006:252-255.
- [6] 朱海云. 多主元高熵合金的探索性研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2009.
- [7] 李亚峰, 孔利军, 甘章华, 等. FeNiMnCuCo_{0.2}Al_x 高熵合金结构及性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, (1):60-63.
- [8] 李泽函. CASTEP 软件建模与计算过程[J]. 吉林广播电视大学学报, 2017, 190(10):155-157.