

技术发明奖公示内容

项目名称：	块体热电材料高通量筛选关键技术
提名者：	上海市教育委员会
提名等级：	一等奖
项目简介：	<p>目前我国正处于工业转型升级的关键期，而作为现代工业基础的新材料已经成为制约我国制造业转型升级的突出短板。热电材料及器件在温差发电和固态制冷方面体现出的先进性和广泛应用前景，使之非常有望成为重要的新兴材料产业。作为世界上热电材料最大的生产国，加快新型高效热电材料的研发，迅速占领国际行业制高点，已经成为当前我国科研及工业界的紧迫任务。随着材料基因组工程计划的提出，高通量材料计算设计的理念被迅速引入到热电材料领域，有效推动了热电材料的发展。然而，作为重要基础的高通量实验制备与表征技术发展却十分缓慢，成为限制高效新型热电材料研发的瓶颈。在国家重点研发计划、国家自然科学基金、上海市科委和上海市教委等支持下，上海大学在块体热电材料高通量制备与表征技术及装备研发方面取得重要突破，创造性地实现了块体热电材料高通量全流程实验，这也是国内外目前为止的唯一成功案例。具体创新成果如下：</p> <p>1) 发明了基于梯度成分块体材料的高性能热电材料高通量筛选的完整方案与技术。该方案与技术涵盖梯度成分原料棒智能制备、样品致密化及均质化处理、样品网格化离散处理、电热输运性能快速筛选等核心环节，是国际上首创的热电材料高通量实验筛选全流程技术方案，已经在 PbSe-SrSe、$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ 等材料体系中得到了验证。</p> <p>2) 发明了自动化智能配料装置。该核心技术能够实现高精度称量 ($\pm 0.2\text{mg}$) 和自动化配料，并具有远程控制功能，有效解决了人工配料的随机性误差大以及时间长的难题，大大提高了样品制备效率。该系统已经应用于目前主流的热电材料体系，如 $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$、铅硫族化合物、半赫斯勒合金等，并成功制备出具有梯度成分的块体高通量样品。该自动化智能配料装置适用于</p>

	<p>原料为粉末状的样品配制，具有广泛的适用性。</p> <p>3) 发明了利用红外热成像法快速筛选热电材料热输运性能的全流程方案及相关技术。开发的“热性能红外筛选系统”利用真空冷热台对样品进行加热，可在真空或通气气氛下把样品均匀加热至 600℃，控温精度高达± 0.05℃，同时实时监测样品的升温 and 冷却过程（测温范围-40 至 650℃，热灵敏度高达 20mK）。数据采集和分析系统不仅可以实时显示样品的温度分布情况，还可以记录各点温度数据，通过分析样品的升温或降温速度，即可以推算出样品的热导率。</p> <p>本项目成功开发了一整套梯度成分块体热电材料快速制备与表征技术，并自主研发了“自动化智能配料装置”和“热性能红外筛选系统”两套装备，技术方案及其相关设备研制已获国家发明专利授权 7 项。在国际上率先实现了从梯度原料棒配制、准连续成分样品制备、直至热电性能筛选的全链条实验，相关方案及装备已经成功应用于多种热电材料体系，近年来在包括 Energy Environ Sci、Acta Mater、J Mater Chem A 等期刊发表论文 10 余篇，为加快我国高效新型热电材料的研发，保障我国在热电材料领域的领先地位做出了贡献。</p>
<p>知识产权 情况：</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 罗宏杰、骆军、张继业、曹世勋、吴立华、张文清，二维连续成分样品、其制备方法及其在相图高通量快速测定中的应用，专利号：ZL201610188226.8，授权公告号：CN105891243B，授权公告日：2018 年 10 月 23 日。 2. 罗宏杰、骆军、吴立华、张继业、曹世勋、张文清，基于连续成分块材的高通量热电性能表征方法及其应用，专利号：ZL201610188029.6，授权公告号：CN105842276B，授权公告日：2018 年 8 月 17 日。 3. 蒲华燕、邹俊、杨扬、谢少荣、罗均、陈功，连续成分无机块材自动化快速制备系统，专利号：ZL201610531555.8，授权公告号：CN106041065B，授权公告日：2018 年 10 月 23 日。 4. 骆军、陈晖、张继业、曾李骄开、张玉，复合掺 Sr 和 Na 的 PbSe 基热电材料及其制备方法，专利号：ZL201510394036.7，授权公告号：CN105140383B，授权公告日：2018 年 7 月 10 日。 5. 张志军、冯鹤、徐展、王红、胡关钦、赵景泰，高光产额钨酸铅 (PbWO₄) 闪烁晶体的生长方法，专利号：ZL201510569092.X，授权公告号：CN105154977B，授权公告日：2017 年 11 月 10 日。 6. 余丽丽、朱俊杰、赵景泰，结构可调的 3D 网络结构介孔二氧化锰及其制备方法，专利号：ZL201610023322.7，授权公告号：CN105481018B，授权公告日：2018 年 4 月 6 日。

	<p>7. 余丽丽、李爽、范骏、李荣兵、赵景泰，一种介孔三氧化二锰及其制备方法，专利号：ZL201610470544.3 授权公告号：CN105883925B，授权公告日：2019年2月1日。</p>
<p>发表论文 著作情况：</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. L. You, Y. F. Liu, X. Li, P.F. Nan, B.H. Ge, Y. Jiang, P.F. Luo, S.S. Pan, Y.Z. Pei, W.Q. Zhang, G.J. Snyder, J. Yang, J.Y. Zhang, J. Luo, Boosting the thermoelectric performance of PbSe through dynamic doping and hierarchical phonon scattering [J], Energy & Environmental Science, 11 (2018) 1848-1858. 2. Y.F. Liu, L. You, C.Y. Wang, J.Y. Zhang, J. Yang, K. Guo, J. Luo, W.Q. Zhang, Enhancing thermoelectric performance of PbSe by Se vacancies [J], Journal of Electronic Materials, 47 (2018) 2584-2590. 3. J. Luo, L. You, J.Y. Zhang, K. Guo, H.T. Zhu, L. Gu, Z.Z. Yang, X. Li, J. Yang, W.Q. Zhang, Enhanced Average Thermoelectric Figure of Merit of the PbTe-SrTe-MnTe Alloy [J], ACS Applied Materials & Interfaces, 9 (2017) 8729-8736. 4. L.J.K. Zeng, J.Y. Zhang, L. You, H.Y. Zheng, Y.F. Liu, L. Ouyang, P. Huang, J.J. Xing, J. Luo, Enhanced thermoelectric performance in PbSe-SrSe solid solution by Mn substitution [J], Journal of Alloys and Compounds, 687 (2016) 765-772 5. Z.C. Wei, Y. Yang, C.Y. Wang, Z.L. Li, L.X. Zheng, J. Luo, Enhanced room-temperature thermoelectric performance of p-type BiSbTe by reducing carrier concentration [J], RSC Advances, 9 (2019) 2252-2257. 6. 黄平, 游理, 梁星, 张继业, 骆军, Se 替代 Te 对 BiCuTeO 电热输运性能的影响 [J], 物理学报, 68 (2019) 077201. 7. 骆军, 何世洋, 李志立, 李永博, 王风, 张继业, 热电材料高通量实验制备与表征方法 [J], 无机材料学报, 34 (2019) 247-259 8. P.F. Luo, L. You, J. Yang, J.J. Xing, J.Y. Zhang, C.Y. Wang, X.L. Zhao, J. Luo, W.Q. Zhang, Effects of Mn substitution on thermoelectric properties of CuIn_{1-x}MnxTe₂ [J], Chinese Physics B, 26 (2017) 097201 9. Y. Zhang, L.H. Wu, J.Y. Zhang, J.J. Xing, J. Luo, Eutectic microstructures and thermoelectric properties of MnTe-rich precipitates hardened PbTe [J], Acta Materialia, 111 (2016) 202-209. 10. R.J. Yan, J.W. Lin, L. You, K. Guo, X.X. Yang, J.Y. Zhang, D.L. Hu, J. Luo, J.T. Zhao, Increasing the thermoelectric power factor via Ag substitution at Zn site in Ba(Zn_{1-x}Ag_x)Sb₂ [J], Journal of Alloys and Compounds, 745 (2018) 228-233. 11. W.Y. Lv, C.H. Yang, J.W. Lin, X.Y. Hu, K. Guo, X.X. Yang, J. Luo, J.T. Zhao, Cd substitution in Zintl phase Eu₅In₂Sb₆ enhancing the thermoelectric performance [J], Journal of Alloys and Compounds, 726 (2017) 618-622. 12. M. Pan, K. Guo, W.Y. Lv, J.Y. Zhang, D.L. Hu, X.X. Yang, J. Luo, J.T. Zhao, Influence of Ag doping on the thermoelectric properties of layered

	<p>compound NdOZnSb [J], Materials Letters, 189 (2017) 126-130.</p> <p>13. R.J. Yan, W.Y. Lv, K. Wang, K. Guo, X.X. Yang, J. Luo, J.T. Zhao, Enhanced thermoelectric properties of BaZn₂Sb₂ via a synergistic optimization strategy using co-doped Na and Sr [J], Journal of Materials Chemistry A, 4 (2016) 12119-12125.</p>
新增直接经济效益:	<p>项目第二完成单位高博通信(上海)有限公司, 2016-2018三年间新增产值 3297 万元, 新增利润 263.76 万元, 新增税收 164.85 万元, 创收外汇 648 万美元。</p>
主要完成人:	<p>1、骆军, 2、杨扬, 3、张继业, 4、赵景泰, 5、林卫国, 6、黄杰, 7、张文清, 8、曹世勋, 9、郭凯, 10、余丽丽, 11、张志军, 12、杨昕昕, 13、王晨阳, 14、胡剑峰, 15、杨炯.</p>
主要完成单位:	<p>1. 上海大学</p> <p>2. 高博通信(上海)有限公司</p>