

# 高通量实验技术在块体材料中的应用

吴迪<sup>1,2,3</sup>, 刘立斌<sup>1,2\*</sup>, 章立钢<sup>2</sup>, 王万林<sup>3</sup>, 周科朝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中南大学粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙

<sup>2</sup>中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙

<sup>3</sup>中南大学冶金与环境学院, 湖南 长沙

Email: \*lbliu@csu.edu.cn

收稿日期: 2020年11月16日; 录用日期: 2020年11月30日; 发布日期: 2020年12月7日

---

## 摘要

材料基因工程的三大要素是: 高通量计算, 高通量实验和材料数据库。高通量实验不但可以加速建立材料成分-相-性能之间关系, 从而快速建立和丰富材料性能数据库, 同时也可用来验证材料计算理论模型的准确性。本文将介绍一些块体材料的高通量实验方法及应用实例, 包括扩散多元节、快速合金成型法、激光近净成形技术、双圆锥台和梯度热处理等。利用这些技术, 可以以并行的方式研究成分、应变、温度、冷速等的变化对块体材料相、显微结构、硬度、强度、塑性等性能的影响。期望可以为致力于块体材料高通量实验研究的同行提供一些参考。

## 关键词

材料基因工程, 高通量实验, 块体材料, 扩散多元节

---

# Application of High-Throughput Experimental Technology in Bulk Materials

Di Wu<sup>1,2,3</sup>, Libin Liu<sup>1,2\*</sup>, Ligang Zhang<sup>2</sup>, Wanlin Wang<sup>3</sup>, Kechao Zhou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>School of Material Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

<sup>3</sup>School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha Hunan

Email: \*lbliu@csu.edu.cn

Received: Nov. 16<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 30<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 7<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The three essential factors of materials genome engineering are high-throughput computing, high-

---

\*通讯作者。

throughput experiments and materials databases. Not only can high-throughput experiments accelerate the establishment of the relationship between the composition, as well as phase and properties of material, therefore, establishing and enriching the material performance database, but also they can be used to verify material calculation models accuracy. This article will introduce some high-throughput experimental methods and applied cases of bulk materials, including diffusion multiple, rapid alloy prototyping, laser engineered net shaping, double cone and gradient heat treatment. Employing these technologies, the effects of composition, strain, temperature, and cooling rate on the phase, microstructure, hardness, strength and plasticity of the bulk materials can be studied in parallel manner. We expect to give some references for colleagues who are involved in high-throughput experimental research on bulk materials.

## Keywords

Materials Genome Engineering, High-Throughput Experiment, Bulk Materials, Diffusion Multiple

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

材料创新是技术进步的核心，“一代材料、一代装备”的观念早已深入人心。先进材料的研发和应用是促进国家在航空、航天、汽车等国防与国民经济发展的主要推动力。2011年以来，美国、中国、欧盟等发达和发展中国家相继开展了旨在提高新材料研发速度的材料基因工程计划[1] [2] [3]。材料基因工程的总目标是将先进材料的研发速度提高一倍，研发成本降低一倍，其主要包括三大要素：高通量材料实验技术、集成计算材料设计和材料数据库。当前，由于受到计算能力、理论模型等方面的限制，多数材料计算结果的准确性远不能满足材料设计要求，而材料大数据技术仍在起步阶段，还需完善[4] [5]。高通量实验则起到承上启下的关键作用，其不但可以加速材料成分-相-性能之间关系的建立，从而快速建立和丰富材料性能数据库，同时也可用来验证理论模型的准确性。

高通量实验的总体思路是一次性合成多种材料，以并行的方式进行快速实验研究。上世纪70年代，Hanak等人[6]提出了“多样品实验”的概念；到80年代，高通量药物筛选、基因测序等方法的应用显著提高了生物和化学领域的研发效率；从90年代开始，高通量实验开始应用到材料领域，最初是美国劳伦斯伯克利实验室的项晓东等人发展的薄膜芯片[7]；到90年代末期，高通量实验开始普遍被人们所接受，发展了大量的高通量实验方法，并取得了一系列成果。如三星公司的存储合金和介电材料[8]、通用电气公司(GE)的燃气轮机用GTD262高温合金[9] [10]和Symyx公司的新型催化剂等[11] [12]。进入21世纪，高通量实验手段进一步丰富，已经逐步发展出覆盖块体，薄膜和粉体材料的多种高通量制备技术。目前，基于薄膜材料的组合芯片技术是发展最为成熟的高通量实验技术，目前已应用于非晶合金、荧光、超导、介电、燃料电池等多种新材料[13] [14] [15]。适用于粉体材料的高通量实验则主要应用于有机、无机结构材料和纳米催化材料等[16] [17]。

薄膜和粉体形态的材料由于受到试样尺寸的限制，通常不能定量反应材料在力学等方面的性能，只能定性反映其变化趋势。因此，还需要制备高通量块体材料，以便准确表征材料相关性能。近年来，一系列块体材料的高通量实验技术得到快速发展，涵盖了材料研发、设计过程中的成分设计、加工成型、热处理等多个主要环节，包括扩散多元节技术、双圆锥台和梯度热处理等。本文总结了当前几种主要的

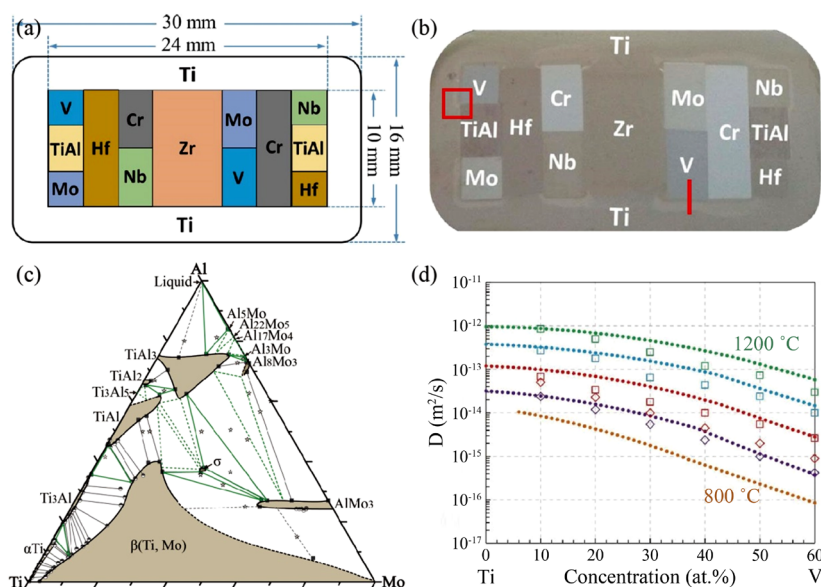
适用于块体材料的高通量实验技术及其应用案例,期望未来可以发展出更丰富和完善的高通量实验技术,并可以应用于更广泛的块体材料领域。

## 2. 成分设计方面的高通量实验

### 2.1. 扩散多元节法

扩散多元节是将不同元素合金按照设定的方式排列组合,紧密贴合在一起,在高温、真空、高压下扩散退火,使合金元素之间发生相互扩散,在界面处形成连续成分变化的固溶体或化合物。利用 EPMA (electron probe micro-analysis), EDS (Energy Dispersive Spectrometer)等成分分析测试扩散界面处的成分分布;利用 EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction), SEM (Scanning Electron Microscopy), 和微区 XRD (X-ray diffraction)可以获得不同成分合金显微组织和相的分布;利用显微硬度、纳米压痕、FIB 微纳拉伸测试可以进行力学性能表征;同时可利用飞秒激光器等其他微区检测技术,可以进行多种物理化学性能的测试[18] [19]。

图 1 是 Zhao 等人[20] [21]制备的多组元扩散多元节,此扩散节由 9 种元素 14 块合金组成。将扩散节在设定温度扩散退火,在 Ti-Al-Mo 三元扩散区域(图 1(b)红色方框),利用 EPMA 在相界面附近进行成分测定,根据局部平衡理论[22],可以测定 Ti-Al-Mo 体系三元相图等温截面,如图 1(c)所示[20]。测试结果与需要制备几十个合金试样的传统合金法测定结果一致。该扩散节一共可以完成相关体系(19 个二元系和 19 个三元系)相图热力学数据的测定。相图计算是材料设计的基础,随着当今材料的多元化和复杂化,需要建立多组元的相图热力学数据库来指导材料设计。而二元和三元热力学数据库是多组元数据库的基础,扩散多元节等高通量实验的发展可以大大加快多组元相图数据库的建立。



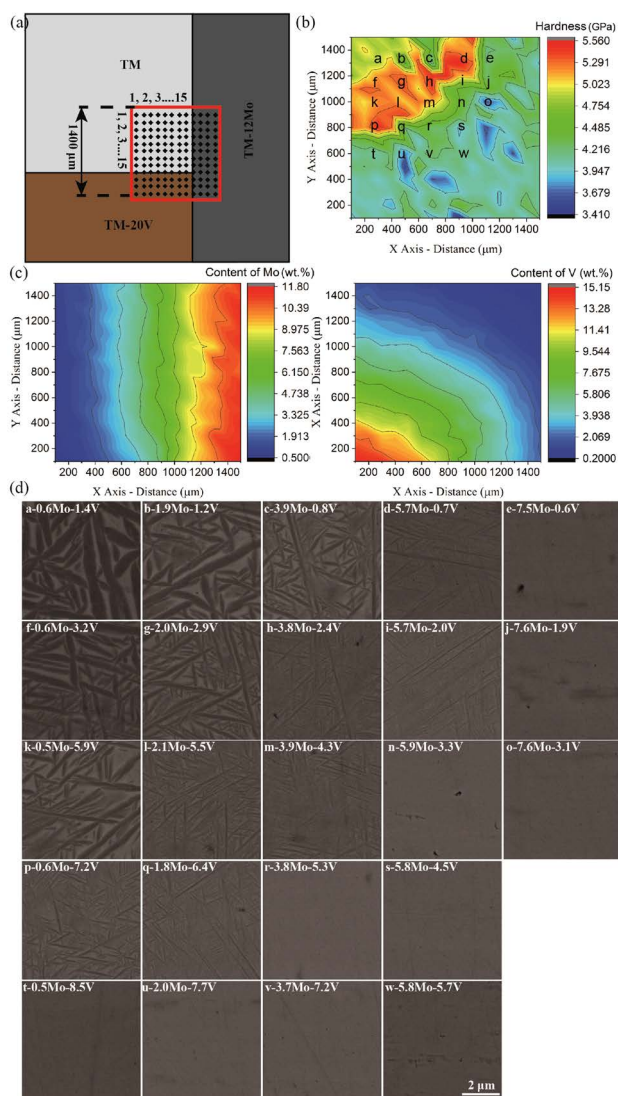
**Figure 1.** Measurement of Ti-Al-Mo ternary system isothermal section and Ti-V binary system diffusion coefficient using diffusion multiple method. (a) Schematic diagram of the cross-section of the diffuse multiple. (b) Diffusion multiple after annealing at 1100°C for 25 h. (c) The isotherm cross section of the Ti-Al-Mo ternary system measured using the red box area in Fig. 1(b). (d) The Ti-V binary system diffusion coefficient measured using the red line area in Fig. 1(b) [20] [21]

图 1. 利用扩散多元节测定 Ti-Al-Mo 三元系等温截面和 Ti-V 二元系扩散系数, (a) 扩散多元节截面示意图, (b) 在 1100°C 退火 25 h 后制成的扩散多元节, (c) 利用图 1(b) 红色方框区域测定 Ti-Al-Mo 三元系等温截面, (d) 利用图 1(b) 中红线区域测定 Ti-V 二元系扩散系数[20] [21]

扩散多元节也可以建立相关体系的扩散动力学数据库。在图 1(b) 的 Ti-V 二元扩散区域, 利用 EPMA 成分分析, 在扩散区域测定元素扩散的成分 - 距离曲线。利用 Whittle-Green 即(W-G)方法[23]可以提取其

扩散通道交点处的互扩散系数。图 1(d)是所获得 Ti-V 二元体系的扩散动力学数据[21]。利用图 1 的扩散多元节可以完成 19 个二元体系扩散动力学数据库的建立。

扩散多元节还可以用来进行多组元合金的成分设计。图 2 [24]是本研究小组设计的以 Ti-4.5Al-2Cr-2.5Nb-2Zr-1Sn (简称 TM)为基体的 TM-TM20V-TM12Mo 三元扩散节。用来研究 Mo、V 元素单独或复合作用下对 TM 合金相、显微组织和力学性能的影响。利用 EPMA, SEM 和纳米压痕等微区表征技术,快速获得相关体系合金“成分-组织-性能”的对应关系,为合金设计提供有效实验数据,加速合金成分刷选。此外,扩散多元节还可以用 FIB 制备微纳拉伸和压缩试样,表征合金的屈服强度和伸长率等力学性能[25]。

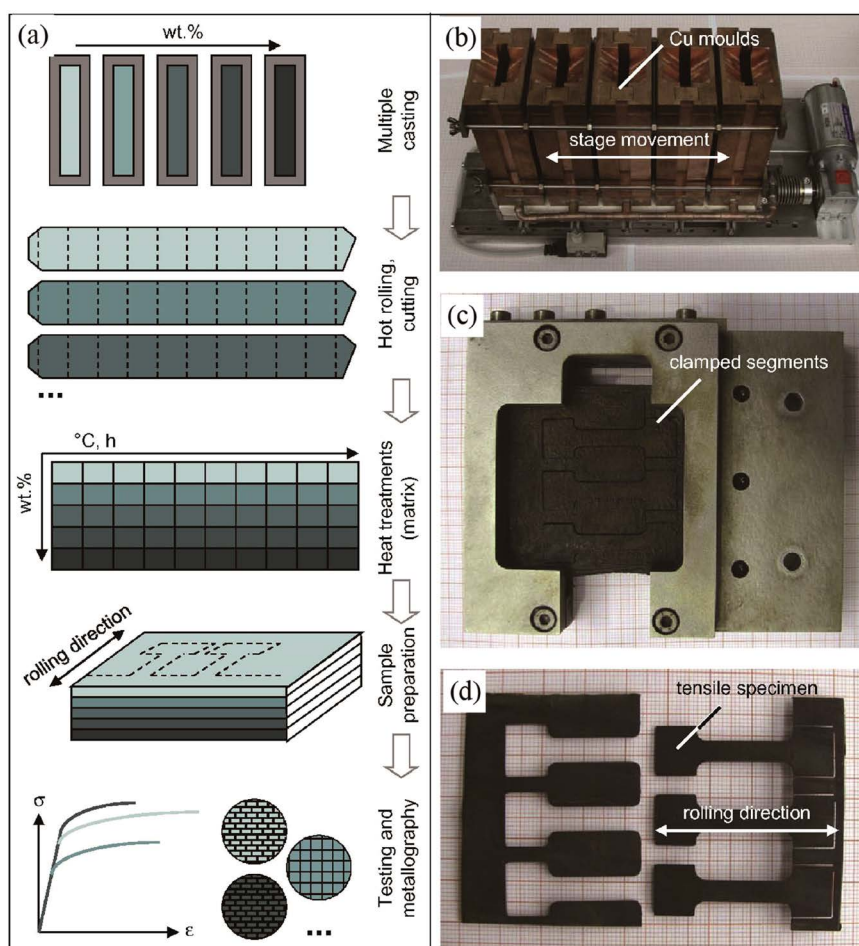


**Figure 2.** The influence of Mo and V content changes on the microstructure and hardness of TM (Ti-4.5Al-2Cr-2.5Nb-2Zr-1Sn) alloy was studied using the diffusion multiple method, (a) Schematic diagram of TM-TM20V-TM12Mo ternary diffusion multiple, (b) The alloy hardness distribution in the red area of Fig. 2(a). (c) The alloy composition distribution (Mo, V content distribution) in the red area of Fig. 2(a). (d) The distribution of the alloy microstructure in the red area of Fig. 2(a) varies with the composition (a, b, c... in the Fig. 2d corresponds to a, b, c... in Fig. 2(b)) [24]

**图 2.** 利用扩散多元节研究 Mo、V 含量变化对 TM (Ti-4.5Al-2Cr-2.5Nb-2Zr-1Sn)合金显微组织和硬度的影响, (a) TM-TM20V-TM12Mo 三元扩散节示意图, (b) 图 2(a)红色区域内合金硬度分布, (c) 图 2(a)红色区域内合金成分分布(Mo, V 元素含量分布), (d) 图 2(a)红色区域内合金显微组织随成分变化分布(图中 a, b, c...与图 2(b)中 a, b, c...对应) [24]

## 2.2. 快速合金成型法

快速合金成型法是利用高通量的铸造、轧制、热处理等制备技术，在短时间内制备出 5 种不同成分，共 45 种不同状态的合金试样，试样可进行显微结构，拉伸、硬度等方面的表征。图 3 是 Springer 等人[26]采用快速合金成型法研究成分和热处理温度对 Fe-30Mn-1.2C-xAl 体系合金显微结构和力学性能影响的研究，分别向 5 个装有相同成分 Fe-30Mn-1.2C 合金的铜坩埚内加入不同成分的 Al(Al 含量 0~8 wt.%)。5 种合金进行相同的热处理和轧制，之后将合金切成 9 块尺寸为  $60 \times 55 \times 2 \text{ mm}^3$  的试样，9 块合金分别在  $450^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$ 、 $550^\circ\text{C}$  和  $600^\circ\text{C}$  进行 0、1 和 24 h 热处理。将 45 组试样加工成狗骨头状拉伸试样，进行拉伸等力学性能表征以及相应的显微结构分析，最终实现材料的高通量筛选。



**Figure 3.** (a) Schematic sketch of the rapid alloy prototyping approach with the differently shaded colours referring to the different chemical compositions, (b) Device for casting five alloys into separate Cu moulds placed on a linear stage, (c) Five segments after completion of the heat treatment clamped together for simultaneous spark erosion, (d) Preparation of three tensile specimens [26]

图 3. (a) 快速合金成型法示意图，其中不同的颜色表示不同的化学成分，(b) 将五种合金倒入平行放置的铜制铸造磨具中，(c) 热处理完成后的五个试样夹紧在一起，以同时加工拉伸试样，(d) 完成制备的三个拉伸试样[26]

## 2.3. 激光近净成形技术

激光近净成形技术 Laser Engineered Net Shaping (LENS)是利用激光熔融金属粉末的 3D 打印技术。通过计算辅助设计软件 CAD (computer aided design)，将预设的每一层金属粉成分输入到打印程序中。将金

属或合金作为粉末沉积的基底，粉末原料由流经多喷嘴组件的惰性气体输送，并注入高功率激光产生熔池以获得均匀性。喷嘴的设计方式使原料和高功率激光汇聚到一个点上。通过计算机控制金属基底相对于激光的移动，以控制每个沉积层的厚度。图4是用 LENS 方法制备的直径为 10 mm，圆柱体的高度为 25 mm 的  $Al_xCrCuFeNi_2$  ( $x = 0\sim 1.5$ )高熵合金[27]。利用 EDS、XRD、SEM、EBSD 和等表征材料的成分、相、显微结构等特征，利用显微硬度表征材料的硬度等力学性能。此方法适用于 3D 打印技术的高通量测试与表征。

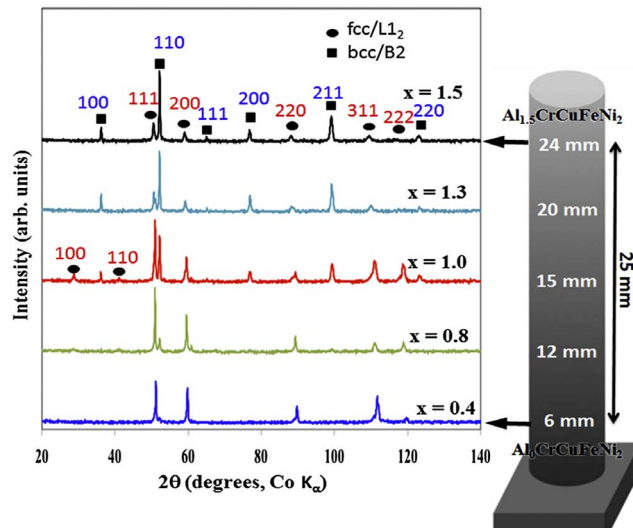


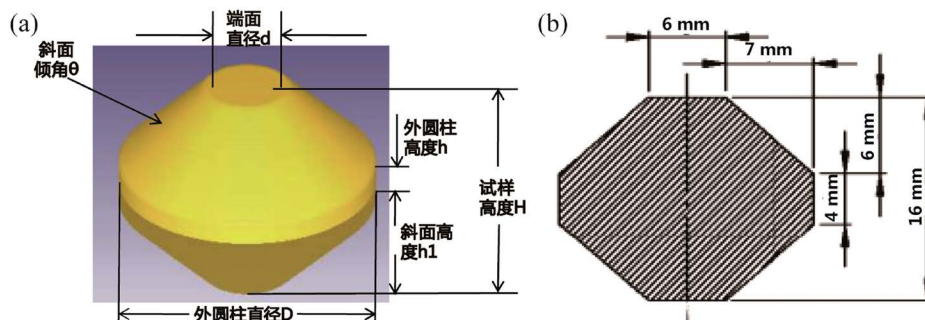
Figure 4.  $Al_xCrCuFeNi_2$  ( $x = 0 - 1.5$ ) high-entropy alloy samples prepared by Laser Engineered Net Shaping, and the XRD results of alloys at different positions (compositions) [27]

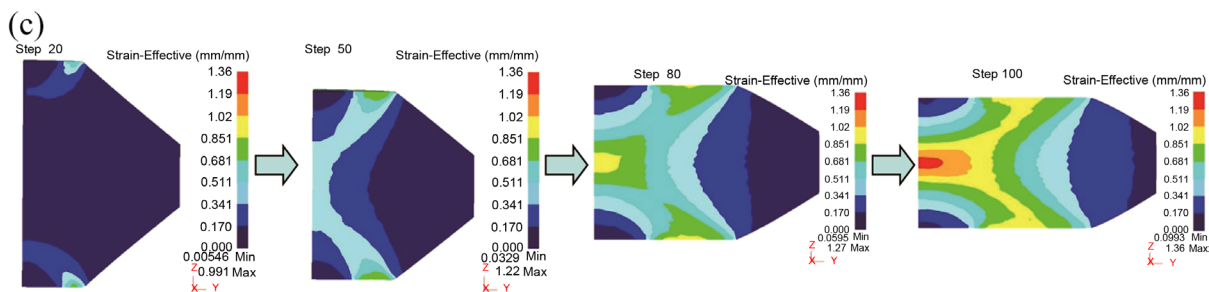
图4. 利用激光近净成形技术(Laser Engineered Net Shaping)制备的  $Al_xCrCuFeNi_2$  ( $x = 0\sim 1.5$ )高熵合金试样，和不同位置(成分)合金的 XRD 结果[27]

### 3. 加工成型方面的高通量实验

#### 双圆锥台实验

双圆锥台实验是基于有限元模拟，制备具有应变梯度的高通量试样，研究不同应变对材料组织、性能影响的方法。图3是采用双圆锥台实验研究应变对 Ti-3Al-5Mo-4.5V 合金组织和力学性能影响的案例[28][29]。将合金试样加工成图5(a)和图5(b)所示形状，通过 MTS 力学试验机对双圆锥台形状合金试样进行热挤压变形，挤压前后合金试样模型如图5(c)所示。利用有限元仿真模拟合金试样变形过程，确定不同区域应变状态。仿真结果显示，挤压后的试样实现了从内到外应变的连续分布，试样心部将发生应变较大，而边缘部位应变较小，从而可研究不同应变下材料的组织性能及变化规律。





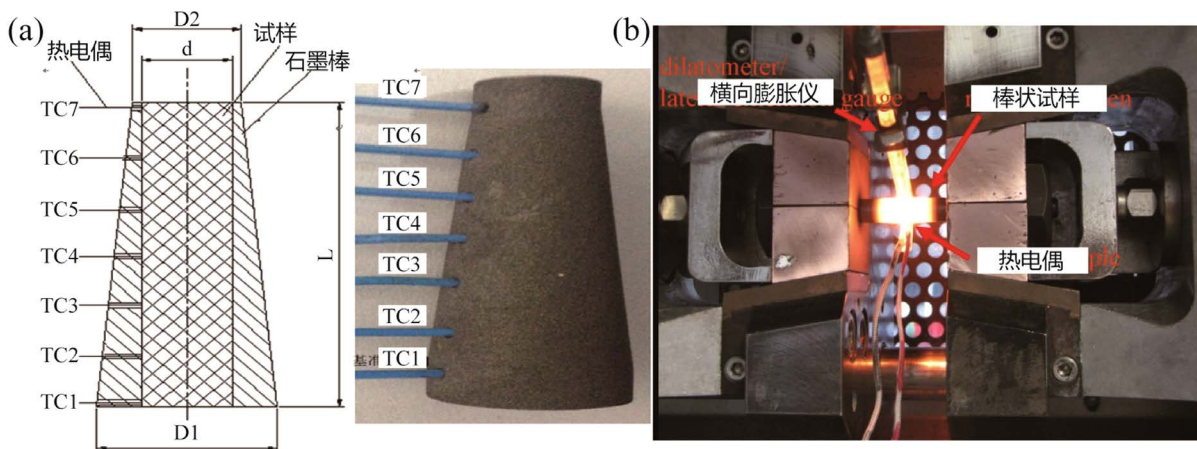
**Figure 5.** Schematic diagram of double cone strain gradient sample: (a) Double cone sample model, (b) Sample size parameter (mm), (c) Finite element simulation result, the strain changes from large to small from inside to outside [28] [29]

**图 5.** 双圆锥台应变梯度试样示意图: (a) 双圆锥台试样模型, (b) 试样尺寸参数(mm), (c) 有限元模拟结果, 从内到外应变从大变小[28] [29]

## 4. 热处理方面的高通量实验

### 4.1. 梯度热处理

梯度热处理方法是利用特定装备形成稳定的温度分布区间, 实现快速研究温度变化对材料的显微结构、机械性能等影响的方法。图 6 中刘彬等人[30]利用梯度热处理装置研究热处理温度对 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr 合金组织性能的影响。制备空心的锥形石墨棒, 将试样置于石墨棒内, 将多点热电偶焊接在试样不同位置。利用热模拟机对锥形石墨棒加热, 当电流通过石墨棒时, 根据电阻加热原理, 石墨棒截面积的连续变化造成的电阻连续变化, 可实现温度的连续变化。结合多种微区表征技术, 可研究不同热处理温度下材料组织性能变化规律。



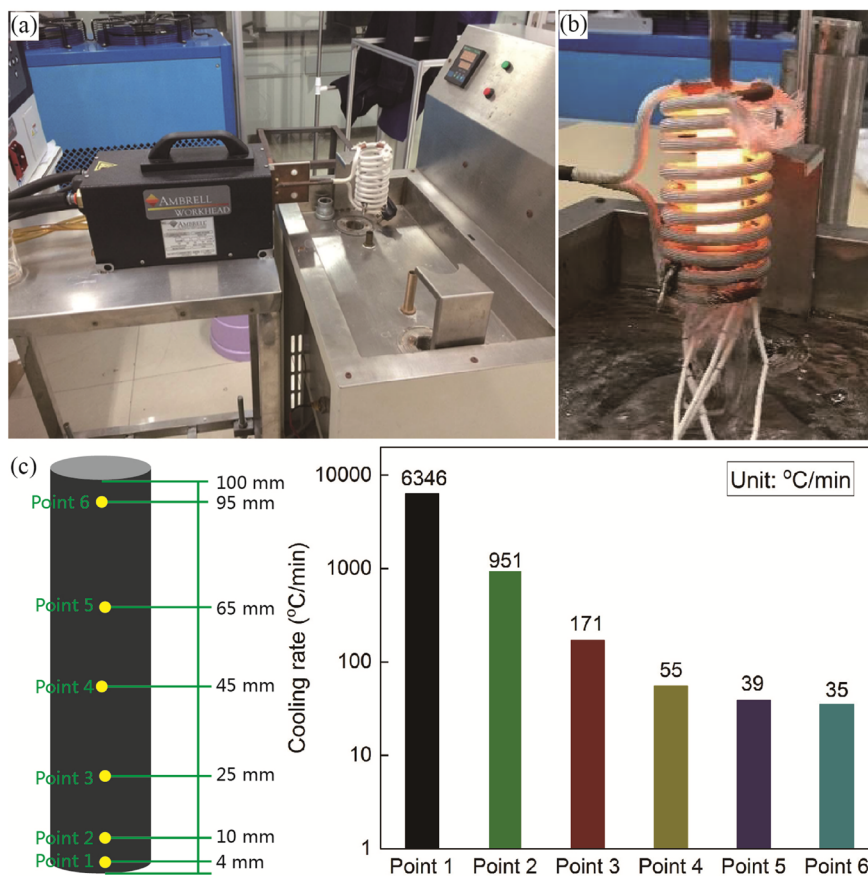
**Figure 6.** Preparation method of temperature gradient sample, (a) Schematic diagram of tapered graphite rod, sample and thermocouple, (b) Use gleeble 3500 to heat tapered graphite rod to obtain temperature gradient [30]

**图 6.** 温度梯度试样制备方法, (a) 锥形石墨棒、试样和热电偶示意图, (b) 利用 gleeble 3500 热模拟机加热锥形石墨棒以获得温度梯度[30]

### 4.2. 端淬技术

端淬技术是通过长棒状试样一端淬火处理, 另一端自然冷区, 使材料不同位置经历不同冷却速率, 从而研究不同冷却速率对材料组织性能影响。图 7 是江亮等人[31]设计的端淬实验装置, 用来研究冷却速率对多晶镍基高温合金组织性能的影响。图 7(a)中感应线圈为加热装置, 水池中安装喷水口。将试样加热到设定温度, 停止加热后, 打开喷水口对准试样一端喷水冷却, 使试样一端快速冷却, 另一端自然冷却。

利用焊接在试样不同位置上的多点热电偶测试试样降温速率。同时结合多种微区检测技术, 研究不通冷却速率对材料组织性能的影响。



**Figure 7.** (a) End quenching experimental equipment, (b) Heating coil and water spray cooling equipment, (c) Schematic diagram of different cooling rates obtained at different positions of the sample [31]

**图 7.** (a) 端淬实验装置, (b) 加热线圈和喷水冷却装置, (c) 试样不同位置获得的不同冷却速率示意图[31]

## 5. 结论

基于材料基因工程思想的高通量实验方法, 已经在多个材料研发和应用领域取得成效。但就目前而言, 高通量的实验方法还有不尽完善之处, 比如, 实验标准的制定尚未完成, 实验的精度仍需提高以及缺乏更大范围材料性能的表征技术(比如断裂韧性的表征)等。然而, 材料基因工程所提出的是一种先进的材料设计理念, 正如《中国制造 2025》中明确提出的智能制造, 基于大数据、云计算、机器学习、高通量实验等先进的材料设计方法是大势所趋。可以预期, 在今后的 5~10 年, 高通量实验结合先进材料计算和材料大数据技术, 将会在高熵合金、钛合金、3D 打印等先进块体材料领域发挥更大的作用。

## 致 谢

感谢中南大学粉末冶金国家重点实验室。

## 基金项目

感谢国家重点研发计划(2016YFB0701301、2018YFB0704100), 国家自然科学基金(51901251、51671218), 湖南省自然科学基金(2020JJ5750)的资助。



## 参考文献

- [1] 向勇, 闫宗楷, 朱焱麟, 张晓琨. 材料基因组技术前沿进展[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 634-649.
- [2] 赵继成. 材料基因组计划简介[J]. 自然杂志, 2014, 36(2): 89-104.
- [3] 王海舟, 汪洪, 丁洪, 项晓东, 向勇, 张晓琨. 材料的高通量制备与表征技术[J]. 科技导报, 2015, 33(10): 31-49.
- [4] Yang, Z., Tang, G., Jiang, Z., Qian, G. and Qian, Q. (2020) Glass Genetic Engineering. *Semiconductor Science and Technology*, **50**, 582-592. <https://doi.org/10.1360/SST-2019-0366>
- [5] Rajan, K. (2005) Materials Informatics. *Materials Today*, **8**, 38-45. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)71123-8](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)71123-8)
- [6] Hanak, J.J. (1970) The "Multiple-Sample Concept" in Materials Research: Synthesis, Compositional Analysis and Testing of Entire Multicomponent Systems. *Journal of Materials Science*, **5**, 964-971. <https://doi.org/10.1007/BF00558177>
- [7] Tonegawa, S. (1983) Somatic Generation of Antibody Diversity. *Nature*, **302**, 575-581. <https://doi.org/10.1038/302575a0>
- [8] Kau, D., Tang, S., Karpov, I., Dodge, R., Klehn, B., Kalb, J., Strand, J., Diaz, A., Leung, N., Wu, J., Lee, S., Langtry, T., Chang, K.-W., Papagianni, C., Lee, J., Hirst, J., Erra, S., Flores, E., Righos, N. and Spadini, G. (2010) A Stackable Cross Point Phase Change Memory. *International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest*, Baltimore, 4.
- [9] Zhao, J.-C., Jackson, M.R., Peluso, L.A. and Brewer, L.N. (2002) A Diffusion Multiple Approach for the Accelerated Design of Structural Materials. *MRS Bulletin*, **27**, 324-329. <https://doi.org/10.1557/mrs2002.100>
- [10] J. Liang, Z. Ji-Cheng, F. Ganjiang, (2006) Nickel-Containing Alloys, Method of Manufacture Thereof and Articles Derived Therefrom. EP1670962. <https://www.freepatentsonline.com/EP1670962.html>
- [11] Senkan, S.M. (1998) High-Throughput Screening of Solid-State Catalyst Libraries. *Nature*, **394**, 350-353. <https://doi.org/10.1038/28575>
- [12] Senkan, S. (2001) Combinatorial Heterogeneous Catalysis: A New Path in an Old Field. *Angewandte Chemie International Edition in English*, **40**, 312-329. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010119\)40:2<312::AID-ANIE312>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010119)40:2<312::AID-ANIE312>3.0.CO;2-I)
- [13] Chang, K.-S., Green, M., Suehle, J., Vogel, E., Xiong, H., Hatrick-Simpers, J., Takeuchi, I., Famodu, O., Ohmori, K., Ahmet, P., Chikyow, T., Majhi, P., Lee, B. and Gardner, M. (2006) Combinatorial Study of Ni-Ti-Pt Ternary Metal Gate Electrodes on HfO<sub>2</sub> for the Advanced Gate Stack. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 142108. <https://doi.org/10.1063/1.2357011>
- [14] Xiang, X.-D. (2004) High Throughput Synthesis and Screening for Functional Materials. *Applied Surface Science*, **223**, 54-61. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00931-0](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00931-0)
- [15] Christen, H., Rouleau, C., Ohkubo, I., Lee, H., Sathyamurthy, S. and Lowndes, D. (2003) An Improved Continuous Compositional-Spread Technique Based on Pulsed-Laser Deposition and Applicable to Large Substrate Areas. *Review of Scientific Instruments*, **74**, 4058-4062. <https://doi.org/10.1063/1.1602962>
- [16] Chen, L., Bao, J., Gao, C., Huang, S., Liu, C. and Liu, W. (2004) Combinatorial Synthesis of Insoluble Oxide Library from Ultrafine/Nano Particle Suspension Using a Drop-on-Demand Inkjet Delivery System. *Journal of Combinatorial Chemistry*, **6**, 699-702. <https://doi.org/10.1021/cc034075l>
- [17] Wang, J., Yoo, Y., Gao, C., Takeuchi, I., Sun, X., Chang, H., Xiang, X.-D. and Schultz, P.G. (1998) Identification of a Blue Photoluminescent Composite Material from a Combinatorial Library. *Science*, **279**, 1712-1714. <https://doi.org/10.1126/science.279.5357.1712>
- [18] 赵继成. 材料基因组计划中的高通量实验方法[J]. 科学通报, 2013, 58(35): 3647-3655.
- [19] Zheng, X., Cahill, D., Weaver, R. and Zhao, J.-C. (2008) Micron-Scale Measurements of the Coefficient of Thermal Expansion by Time-Domain Probe Beam Deflection. *Journal of Applied Physics*, **104**, Article ID: 073509. <https://doi.org/10.1063/1.2988111>
- [20] Huang, X.M., Zhu, L.L., Cai, G.M., Liu, H.S. and Jin, Z.P. (2017) Experimental Investigation of Phase Equilibria in the Ti-Al-Mo Ternary System. *Journal of Materials Science*, **52**, 2270-2284. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0520-5>
- [21] Zhu, L., Zhang, Q., Chen, Z., Wei, C., Cai, G.-M., Jiang, L., Jin, Z. and Zhao, J.-C. (2017) Measurement of Interdiffusion and Impurity Diffusion Coefficients in the BCC Phase of the Ti-X (X = Cr, Hf, Mo, Nb, V, Zr) Binary Systems Using Diffusion Multiples. *Journal of Materials Science*, **52**, 3255-3268. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0614-0>
- [22] Zhao, J.-C. (2004) Reliability of the Diffusion-Multiple Approach for Phase Diagram Mapping. *Journal of Materials Science*, **39**, 3913-3925. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000031472.25241.c5>
- [23] Whittle, D.P. and Green, A. (1974) The Measurement of Diffusion Coefficients in Ternary Systems. *Scripta Metallurgica*, **8**, 883-884. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(74\)90311-1](https://doi.org/10.1016/0036-9748(74)90311-1)

- [24] Wu, D., Liu, L., Zeng, L., Zhu, W., Wang, W., Zhang, X., Hou, J., Liu, B., Lei, J. and Zhou, K. (2021) Designing High-Strength Titanium Alloy Using Pseudo-Spinodal Mechanism through Diffusion Multiple Experiment and CALPHAD Calculation. *Journal of Materials Science & Technology*, **74**, 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.013>
- [25] Uchic, M.D. and Dimiduk, D.M. (2005) A Methodology to Investigate Size Scale Effects in Crystalline Plasticity Using Uniaxial Compression Testing. *Materials Science and Engineering: A*, **400-401**, 268-278. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.082>
- [26] Springer, H. and Raabe, D. (2012) Rapid Alloy Prototyping: Compositional and Thermo-Mechanical High Throughput Bulk Combinatorial Design of Structural Materials Based on the Example of 30Mn-1.2C-xAl Triplex Steels. *Acta Materialia*, **60**, 4950-4959. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.05.017>
- [27] Chen, X., Banerjee, R., Gwalani, B., Styles, M.J., Borkar, T., Choudhuri, D. and Ramanujan, R.V. (2016) A Combinatorial Assessment of  $Al_xCrCuFeNi_2$  ( $0 < x < 1.5$ ) Complex Concentrated Alloys: Microstructure, Microhardness, and Magnetic Properties. *Acta Materialia*, **116**, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.025>
- [28] Tan, L., Huang, Z., Liu, F., He, G., Wang, X., Huang, L., Zhang, Y. and Jiang, L. (2017) Effects of Strain Amount and Strain Rate on Grain Structure of a Novel High Co Nickel-Based Polycrystalline Superalloy. *Materials & Design*, **131**, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.004>
- [29] 司家勇, 宋思远, 廖晓航, 黄再旺. DP 工艺 GH4169 合金热加工高通量测试方法[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(6): 1204-1213.
- [30] 徐圣航, 刘咏, 刘彬, 王鑫, 陈智星. 连续温度梯度热处理 Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr 合金的显微组织演变与力学性能[J]. 中国有色金属学报: 英文版, 2018, 28(2): 273-281.
- [31] Wu, H., Li, J., Liu, F., Huang, L., Zeng, X., Fang, Q., Huang, Z. and Jiang, L. (2017) A High-Throughput Methodology Search for the Optimum Cooling Rate in an Advanced Polycrystalline Nickel Base Superalloy. *Materials & Design*, **128**, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.025>