

非晶合金的高通量制备与表征

柳延辉

Combinatorial fabrication and high-throughput characterization of metallic glasses

Liu Yan-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 176106 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.176106

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.176106>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小角 X 射线散射表征非晶合金纳米尺度结构非均匀

Characterization of nanoscale structural heterogeneity in an amorphous alloy by synchrotron small angle X-ray scattering

物理学报.2017, 66(17): 176109 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.176103>

准静态颗粒介质的弹性势能弛豫分析

Analysis of elastic energy relaxation process for granular materials at quasi-static state

物理学报.2016, 65(9): 096102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.096102>

基于分数阶微分流变模型的非晶合金黏弹性行为及流变本构参数研究

Research on viscoelastic behavior and rheological constitutive parameters of metallic glasses based on fractional-differential rheological model

物理学报.2016, 65(4): 046101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.046101>

颗粒介质弹性的弛豫

Relaxation of granular elasticity

物理学报.2015, 64(23): 236101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.236101>

基于分数阶流变模型的铁基块体非晶合金黏弹性行为研究

Investigation on the viscoelastic behavior of an Fe-base bulk amorphous alloys based on the fractional order rheological model

物理学报.2015, 64(13): 136101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136101>

非晶合金的高通量制备与表征

柳延辉[†]

(中国科学院物理研究所, 极端条件物理实验室, 北京 100190)

(2017年6月1日收到; 2017年6月23日收到修改稿)

非晶合金是一种不同于传统合金材料的新型合金, 其突出的机械、物理、化学等性能在工程应用领域备受关注. 作为一种具有无序原子结构的新型合金, 非晶合金中蕴含的丰富的物理现象在基础研究领域也备受瞩目. 非晶合金往往由多个组元构成, 这给成分优化和性能调制带来了巨大的挑战. 材料基因组方法是最近发展起来的新方法, 通过高通量制备和结构表征以及性能筛选有望加快新型非晶合金材料的探索, 在高通量表征中获得的大量实验数据可以帮助人们理解非晶合金中的科学问题. 本文主要介绍高通量制备和表征在非晶合金中的应用, 通过列举典型案例, 展示通过高通量方法探索新型非晶合金材料的作用.

关键词: 非晶合金, 金属玻璃, 材料基因组, 高通量**PACS:** 61.43.-j, 61.43.Dq, 61.82.Bg**DOI:** 10.7498/aps.66.176106

1 引言

从对人类文明的划分方式(石器时代、青铜时代、铁器时代等)可以看出, 人类的历史实际就是人类使用材料的历史, 每一个新时代的出现都和一种新材料有关. 材料不仅彻底改变了人类的生活方式, 更逐渐地变成了人类的一部分. 正如《迷人的材料》的作者、伦敦大学学院的米奥多尼克教授所说: “我们发明材料、制造材料, 而材料让我们成为我们”. 材料的创新不仅是发展各种颠覆性技术的核心要素, 更是现代高端制造业的基石和科技发展的载体. 然而, 新材料的发现却往往出于偶然, 在对新材料的需求日益增长的今天, 需要新的材料研发模式, 提高新材料发现的效率. 作为材料科学中的新理念, 材料基因组方法受到了广泛关注, 并被逐渐应用到不同类型的材料中, 相关的研究进展层出不穷. 本文以非晶合金为例, 介绍材料基因组方法, 特别是高通量制备和表征技术在新型非晶合金探索中的具体应用.

2 非晶合金

金属和玻璃是人们耳熟能详的两类材料. 它们性能迥异, 在不同的领域发挥着各自的作用. 非晶合金却兼具了金属和玻璃两类材料的特点, 它们既具有金属的光泽和导电性, 又能够采用“吹塑”的方式进行加工成型. 它们在低温下表现出比钢铁材料还要高的强度和硬度, 当温度高于软化点(玻璃转变温度)时又如同橡皮泥一样柔软^[1]. 从最开始看似毫无用处的“愚蠢的合金”到实现工程应用, 非晶合金逐渐得到认可, 并被认为是继钢铁和塑料之后孕育着第三次材料技术革命的新型工程材料^[2]. 这些成就的取得在很大程度上是因为人们发现了能够形成块材的非晶合金体系.

非晶合金是典型的多组元合金材料. 为了获得大尺寸样品, 人们研究了大量的不同元素的组合以及不同元素的配比变化对非晶合金形成的影响, 最终获得了能够形成块材的非晶合金材料^[3]. 在以往的研究工作中, 对新合金体系和成分的开发和探索大多采用如图 1 所示的顺序迭代的试错法. 首先,

[†] 通信作者. E-mail: yanhui.liu@iphy.ac.cn

研究者根据某个理论模型初步选取一个有可能形成非晶合金的成分, 然后通过原材料准备、合金制备、结构表征、性能测试等一系列实验步骤进行确认. 遗憾的是, 通过一次实验就得到满足要求的合金的情况少之又少. 一个新的非晶合金的发现, 往往需要经过反复的成分调整, 对图 1 中的流程反复多次才有可能获得优化的合金成分. 一般情况下,

完成一个合金成分的全部实验大约需要一天的时间 [4]. 根据文献报道, 在非晶合金中已经用到的元素有几十个之多, 这些元素的排列组合构成一个巨大的成分空间. 用顺序迭代的试错法显然很难在短时间内发现新的材料. 因此必须改变传统的材料开发模式, 采用新的材料开发策略, 提高新材料探索的效率, 以满足对非晶合金日益增长的需求.

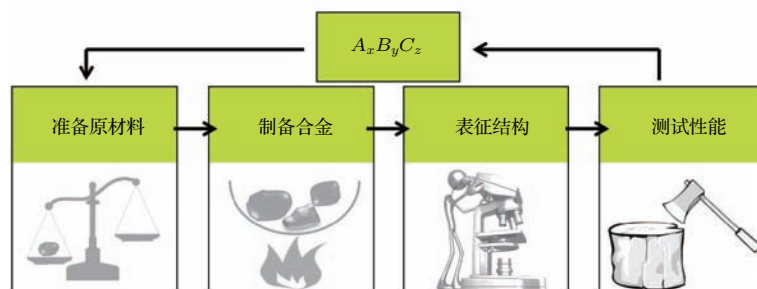


图 1 传统的“试错法”开发非晶合金的主要流程

Fig. 1. Illustration of the conventional “trial-and-error” approach of alloy development.

3 材料基因组

材料基因组是材料研发的一种新理念, 其主要目的是提高新材料探索的效率, 缩短从新材料研发到最终应用的时间, 降低新材料研发的成本 [5]. 材料基因组这一名称是在借鉴人类基因组的基础上提出的, 沿用了基因的概念, 同时暗含了样本多、需要高效率合成和快速筛选的思想, 但是目前尚没有统一的关于材料基因组的定义. 材料基因组这一理念包含了如图 2 所示的三方面内容: 高通量计算, 高通量实验, 数据管理. 高通量计算是通过理论和计算机模拟对材料的相形成和性能进行预测, 从而缩小实验搜索的范围, 缩短实验时间和成本. 高通量实验则是通过实验手段实现大量样品的快速合成、结构表征、性能测量, 从而筛选出性能得到优化的新材料. 数据管理则是将计算和实验获取的材料数据形成数据库, 并通过数据挖掘技术从海量数据中发现新的物理规律, 补充现有理论或形成新的理论, 进一步指导新材料的开发.

在材料基因组的三个要素中, 高通量实验是重中之重, 其核心内容是将传统的顺序迭代方法改变为并行或高效的串行实验, 通过快速的组合制备和高通量表征, 完成相图的绘制、材料性能的优化、新材料的快速筛选, 从而提高材料研发的效率. 高通量实验不仅可以直接实现材料的优化和快速筛选,

而且可以产生海量的实验数据. 这些数据一方面可以补充现有的理论模型, 提高计算材料学的材料预测能力, 还有可能导致新现象和新规律的发现. 高通量实验主要包含两个部分, 其一是实现大量样品的并行制备或快速串行制备, 其二是对这些样品进行快速结构表征和性能筛选, 从而在短时间内绘制出材料的相图, 确定性能得到优化的新材料.

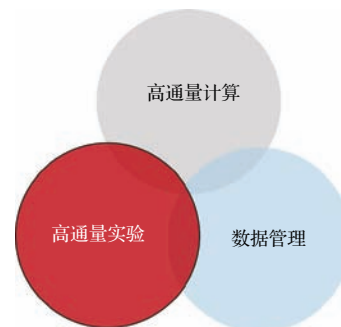


图 2 材料基因组的基本组成要素

Fig. 2. Key aspects of material genome approach.

4 非晶合金的高通量制备

高通量制备也称为组合制备, 是指采用某种方法在短时间内制备出传统方法难以获得的大量样品, 形成一个包含了一定成分范围的材料库 [6]. 组合制备的思想早在 20 世纪 70 年代就已经出现. 当时, Hanak [7] 在研究超导材料时采用共溅射的方法

实现了一次性合成完整的二元和三元超导材料的目的. 此后, 组合制备逐渐扩展到其他类别的材料, 新的组合制备技术也不断涌现出来. 对于非晶合金而言, 目前的高通量制备方法可以归结为四类: 物理掩膜法, 多靶顺序沉积法, 多靶共沉积法, 激光喷涂法.

物理掩膜法是利用镀膜技术通过掩膜制备多层薄膜^[8]. 其过程如图 3 所示, 衬底和沉积源之间安装可以移动的掩膜. 在沉积材料 A 的同时掩膜随时间从一端移动到另一端, 从而在衬底上形成具有厚度呈连续梯度变化的 A 薄膜层, 之后用同样的方法沉积材料 B 和 C, 最终得到如图 3 (d) 所示的多层膜. 之后, 通过固态反应获得薄膜厚度方向上成分均匀而水平方向成分具有梯度变化的组合薄膜材料库. 需要注意的是, 每层的厚度需要保持在纳米量级, 否则固态反应不能完全进行, 导致厚度方向上成分的不均匀. 通过这种方法, Yoo 等^[8]在 Fe-Co-Ni 这一合金体系中确定了能够形成金属玻璃的成分范围.

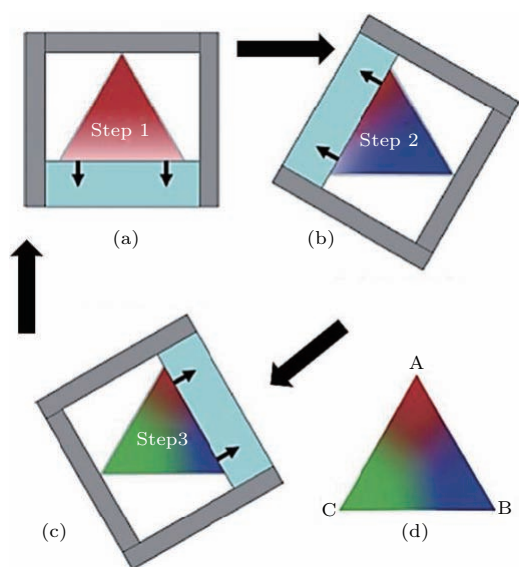


图 3 物理掩膜法示意图^[9] (a) 沉积元素 A; (b) 沉积元素 B; (c) 沉积元素 C; (d) 最终获得的三元相图样品
Fig. 3. Schematic of the moving mask method for fabrication of materials library^[9]: (a) Deposition A; (b) deposition B; (c) deposition C; (d) finally obtained sample.

多靶顺序沉积法如图 4 所示, 这种方法同样是利用镀膜技术使各材料在沉积过程中形成具有厚度梯度的多层膜, 最终获得成分梯度. 不同的是, 沉积源和衬底之间不安装掩膜, 厚度梯度的形成依靠沉积源和衬底各处之间的距离来控制. 材料 A 沉

积结束后将沉积源隔离或关闭, 之后用同样的过程沉积 B 和 C, 经过多次循环后形成组合材料库. 在制备过程中, 每次沉积的薄膜的厚度只有几个纳米, 以保证成分在薄膜厚度方向上的均匀性. Hata 等^[10,11]利用这种方法获得了多个非晶合金体系的组合材料库.

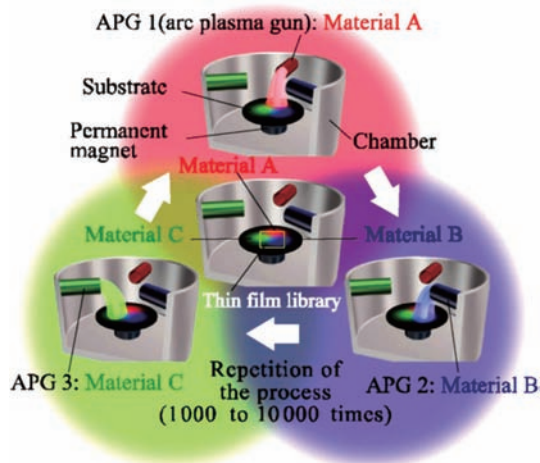


图 4 电弧等离子沉积示意图^[10]

Fig. 4. Illustration of arc plasma deposition for materials library fabrication^[10].

多靶共沉积法的原理如图 5 (a) 所示^[12]. 沉积过程中, 多个沉积源同时打开, 由于各个沉积源和衬底之间具有一定的倾斜角度, 获得的薄膜中会因此在水平方向上形成成分梯度. 薄膜的成分范围以及梯度变化可以通过多个参数进行控制, 比如沉积源的倾斜角度、位置、施加在各个沉积源上的功率等. 根据对衬底的不同处理方法, 通过多靶共沉积法既可以获得成分连续变化的组合薄膜, 也可以形成成分分立的组合薄膜. 图 5 (b) 给出的是具有分立成分的组合薄膜^[13]. 多靶共沉积法是非晶合金中应用较多的一种方法. 需要指出的是, 由于沉积过程中的等效冷却速率很高^[14], 通过这种方法获得的非晶合金形成成分范围比传统的快速凝固技术获得非晶合金形成成分的范围要大得多^[4]. 这为研究非晶合金形成的机理提供了有利条件. 采用合金沉积源, 还可以获得四元、五元等多组元合金体系的组合薄膜. 通过多靶共沉积法, 研究者们在多种非晶合金体系中进行了尝试, 比如 Deng 等^[15]制备了 Zr-Cu-Al 三元合金, Li 等^[13]制备了 Au-Cu-Si 三元合金, Ding 等^[4]制备了 Mg-Cu-Y 三元合金, Liu 等^[12]制备了 Zr-Cu-Al-Ag 四元合金等.

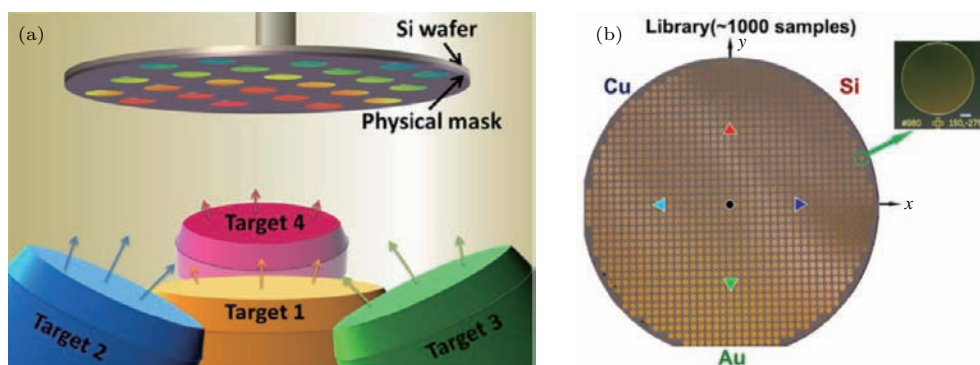


图5 多靶共沉积示意图 (a)^[12] 及组合薄膜材料库样品 (b)^[13]

Fig. 5. Multiple target co-sputtering deposition (a)^[12] and fabricated materials library (b)^[13].

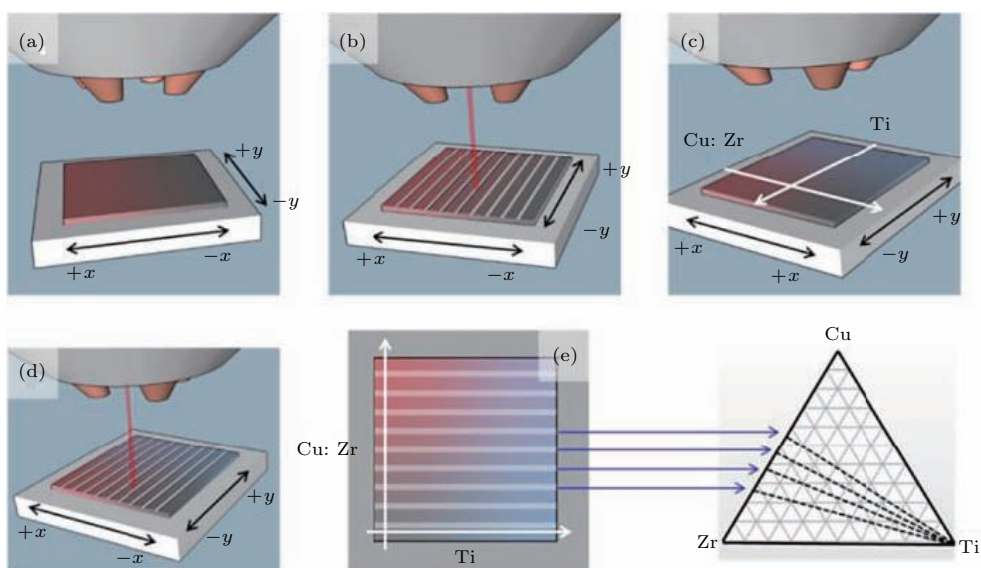


图6 激光喷涂法示意图^[17]

Fig. 6. Illustration of laser deposition for material library fabrication^[17].

激光沉积法利用了金属激光增材制造中的同轴送粉技术, 其原理如图6所示. 喷嘴与不同的粉末材料源连接, 通过激光熔融在衬底上喷涂不同材料的涂层, 通过控制各个喷组的送分量可以控制成分的变化及范围. 之后用激光对涂层进行重熔, 从而获得厚度方向成分均匀而水平方向有成分梯度的组合材料库. 通过控制激光功率和脉冲时间可以对冷却速率进行控制. 采用这种方法, Tsai和Flores制备了二元Cu-Zr^[16]和三元Cu-Zr-Ti^[17]体系的金属玻璃组合材料库.

5 非晶合金的高通量表征

组合材料库制备完成以后, 需要分析材料库的成分分布以及各个合金的具体化学组分, 同时还需要对材料的结构进行表征, 以获得有关物相形成的

信息, 实现相图的绘制. 分析材料成分的方法较多, 但为了在短时间内得到所需要的信息, 可以采用能谱分析仪进行成分分析. 这种方法的优点是操作简单, 能够实现自动化测量, 而且在普通的实验室中即可完成^[4]. 此外, 还可以通过X射线荧光光谱进行成分分析^[9], 这种方法的优点是能够和X射线衍射相结合. 结构及物相的确定可以采用X射线衍射仪或同步辐射光源^[4,9], 这两种方法各有优势, 能够互补. 虽然同步辐射光源能够给出更准确和精细的结果, 但同步辐射光源在各个国家都属于大型装置, 难以随时使用. 通过X射线衍射仪, Li等^[13]测定了Au-Cu-Si三元体系的非晶形成范围, 他们对组合薄膜进行重熔后进一步分析了各个成分的物性形成规律(见图7). 利用同步辐射光源, Gregoire等^[18]研究了成分及冷却速率对三元Au-Cu-Si合金体系的非晶形成的影响.

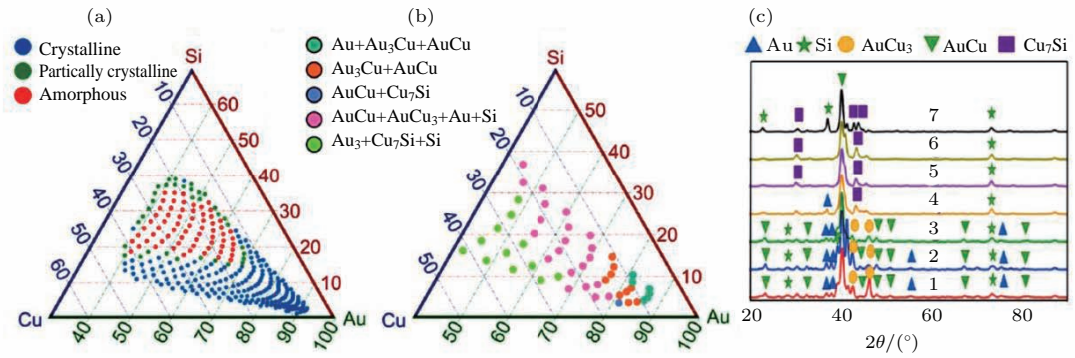


图7 Au-Cu-Si合金体系中非晶合金的形成^[13] (a) 沉积态的非晶合金形成范围; (b) 重熔冷却后物相的形成随成分的变化; (c) 典型的XRD图谱

Fig. 7. Formation of amorphous phase in Au-Cu-Si alloy^[13]: (a) Compositional range in which amorphous phase forms during deposition; (b) phase formation after re-solidification; (c) representative X-ray diffraction patterns.

对组合材料库进行成分和结构分析是高通量表征中最基本的内容. 为实现快速筛选新材料, 对性能及基本物理参数的高通量表征是必不可少的. 然而材料性能所涵盖的内容及其广泛, 难以采用通用的方法对所有性能进行快速测量. 本节通过几个典型案例, 介绍高通量表征技术在探索非晶合金方面的作用.

玻璃转变温度 T_g 和晶化温度 T_x 是非晶合金的基本热力学参数. Gregoire 等^[18] 开发了一种纳米扫描量热技术, 他们将组合薄膜沉积在由钨电极阵列构成的器件上(图8(a)–(d)), 通过钨电极实现对薄膜材料的加热和温度测量(图8(e)), 从而获得了非晶合金的基本热力学参数. 他们用这种方法研究了 Au-Cu-Si 三元合金体系, 给出了玻璃转变温度的分布图. 除了玻璃转变温度, 这种方法还能够给出晶化温度(图8(f))^[19]. 此外, 这种纳米扫描量热器件可以大幅度改变加热和冷却的速率, 结合微区 X 射线衍射能够给出各合金成分的临界冷却速率^[18], 这一参数直接反映了非晶的形成能力. 通过这种方法, 他们给出了 Au-Cu-Si 体系中玻璃形成能力随合金成分的变化(图8(g)). 这一技术的不足之处在于器件加工成本较高, 能够涵盖的样品数量较少.

Hata 等^[20,21] 则发展了另外一种可以测量非晶合金晶化温度的高通量技术(图9(a)). 他们采用红外方法加热组合薄膜, 用红外热成像仪和热电偶同时监测加热过程中样品的温度. 在这一过程中, 红外热成像仪记录的温度 T_a 和实际温度 T 之间为线性关系: $T_a = (\varepsilon/\varepsilon')^{0.25}T$, 其中 ε 和

ε' 分别为材料表面辐射率和热成像设置的辐射率^[21]. 晶化发生时, 材料的辐射率发生明显变化,

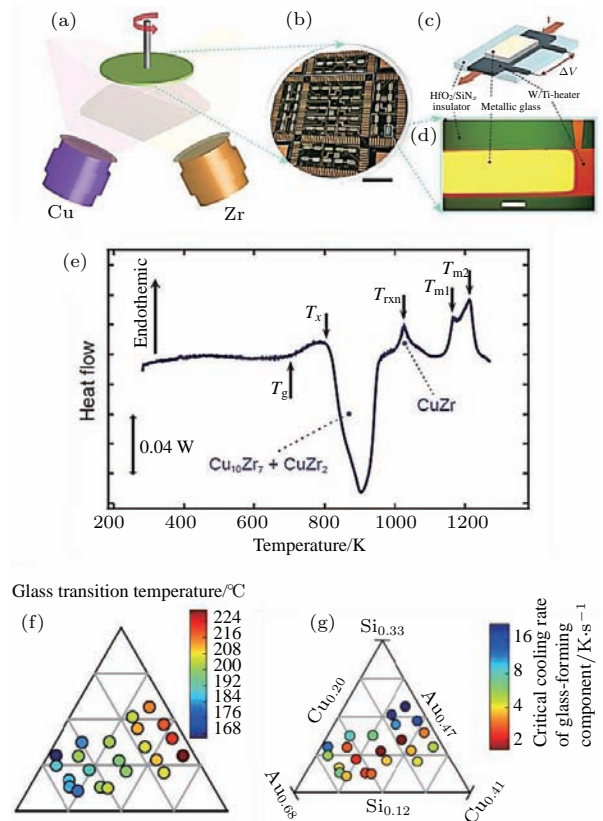


图8 (a)–(d) 阵列式纳米扫描量热仪的装配与测量^[19]; (e) 用纳米扫描量热方法记录的热流随温度的变化^[19]; (f) Au-Cu-Si 合金体系的玻璃转变温度的分布^[18]; (g) Au-Cu-Si 体系的临界冷却速率(玻璃形成能力)随成分的变化^[18]

Fig. 8. (a)–(d) Fabrication and principle of nanocalorimeter^[19]; (e) representative curves by nanocalorimetry^[18]; (f) variation of glass transition temperature with composition^[18]; (g) variation of critical cooling rate with compositions^[18].

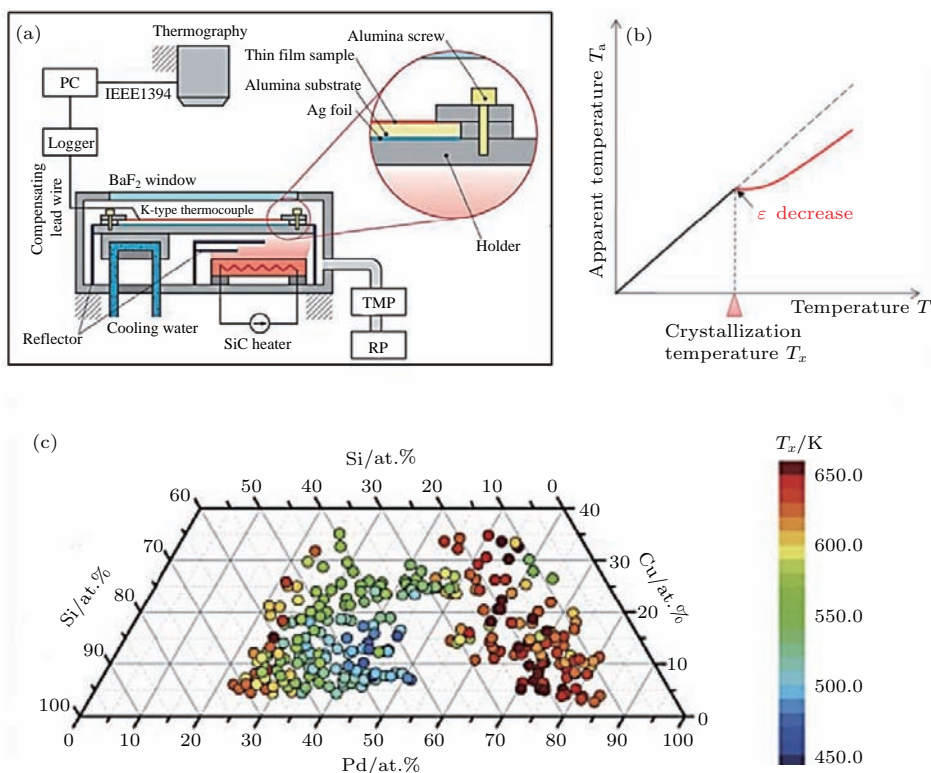


图9 (a) 热成像法测量非晶合金晶化温度的装置示意图^[20]; (b) 发生晶化时, 热成像记录的温度和实际温度之间关系的示意图^[21]; (c) Pd-Cu-Si 三元合金的晶化温度分布图^[21]

Fig. 9. Illustration of crystalline temperature measurement by thermography method^[20]; (b) relationship between apparent temperature by thermography measurement and temperature measured by thermal couple upon crystallization^[21]; (c) variation of crystallization temperature with composition for Pd-Cu-Si ternary alloys^[21].

T_a 会偏离以上线性关系 (图 9 (b))^[21]. 利用这种现象, 他们成功测量了 Pd-Cu-Si 三元体系中晶化温度的分布 (图 9 (c)). 因为玻璃转变过程中温度的变化较小, 用这种方法难以实现对玻璃转变温度的测量.

在过去几十年的非晶合金研究中, 大量的工作集中在探索具有强的非晶形成能力的合金成分上. 非晶形成能力表示一个合金体系形成非晶态的难易程度, 除了可以用临界冷却速率直接表示, 还可以用一定冷却速率下能够获得完全非晶的样品的尺寸进行比较. 获得的样品的尺寸越大, 则这一合金的非晶形成能力也就越强. 由于非晶合金是一种玻璃物质, 因此它们可以用热塑成型的方式进行加工, 表征其难易程度的参数称之为热塑成型能力. 这一参数可以通过吹塑的方法进行量化. 如图 10 (a) 所示, 吹塑的过程中, 如果最后得到的半球的高度越高, 则热塑成型能力越好. 有趣的是, Ding 等^[4] 总结了大量文献数据后发现, 非晶合金

的形成能力和其热塑成型能力之间存在一定的正比关系 (图 10 (b)). 也就是说, 热塑成型能力越好, 其非晶形成能力也就越强. 在这一关系的基础上, Ding 等发展了一种称之为并行吹塑的高通量表征技术 (图 10 (c)), 用以探索具有强非晶形成能力的新型合金 (图 10 (c)). 他们采用多靶磁控溅射沉积技术在硅衬底上制备出组合薄膜, 通过刻蚀的方法在硅衬底背面加工出约 3000 个直径为 0.5 mm 的穿孔, 从而在一个组合样品中获得 3000 个分立的合金成分. 在这些小孔中填入可以分解成气体的粉末材料后将所有孔洞密封. 在连续加热过程中, 粉末在一定温度下开始分解出气体, 产生可以吹塑非晶薄膜的气压, 随着温度的升高, 非晶薄膜的塑性变形越来越大, 当温度达到晶化温度时, 非晶薄膜转变为晶态, 失去热塑成型的能力, 被吹起的非晶薄膜的形状得以保留 (图 10 (c)—(e)). 采用并行吹塑法, 可以在短时间内发现具有强非晶形成能力的合金成分, 从而提高新材料开发的效率.

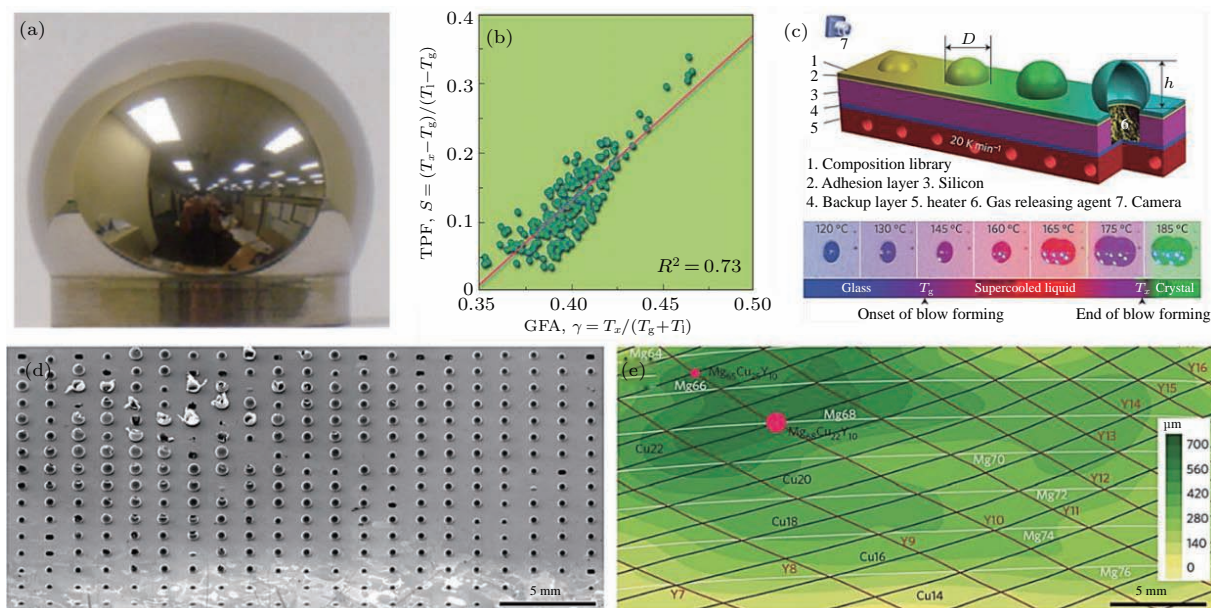


图 10^[4] (a) 非晶合金的吹塑; (b) 热塑成型能力 (TPF) 和非晶形成能力 (GFA) 之间的关系; (c) 并行吹塑示意图; (d) 并行吹塑实验完成后的样品形貌; (e) 吹塑样品高度分布与合金成分分布
 Fig. 10.^[4] (a) Blow forming of metallic glasses; (b) correlation between thermal plastic formability and glass forming ability; (c) schematic of parallel blow forming; (d) materials library after parallel blow forming; (e) height map of blow formed spheres and composition map of materials library.

此外, Guo 等^[22]还开发了微型悬臂梁方法, 通过比较晶态和非晶态之间密度的差别来研究不同合金成分的非晶形成能力. Tsai 等^[17]用激光喷涂方法制备组合材料库, 通过改变激光功率来调控冷却速率, 获得了非晶形成成分范围随冷却速率的变化, 从而确定具有最优非晶形成能力的合金成分.

6 结束语

材料基因组是材料研发的最新理念, 通过高通量制备和表征, 可以极大地加快新材料开发的效率, 缩短从材料研发到实际应用的周期, 降低研发成本. 本文以非晶合金为例, 介绍了相关的高通量制备技术, 其中包括物理掩膜法, 多靶顺序沉积法, 多靶共沉积法, 激光喷涂法等. 通过几个典型案例, 介绍了测量玻璃转变温度、晶化温度、非晶形成能力的高通量表征技术. 值得指出的是, 由于非晶合金具有原子排列无序的特点, 不存在晶体合金中的显微组织, 所以大部分情况下薄膜可以反映块材的性质, 这为高通量制备和表征在非晶合金中的应用提供了便利条件. 有理由相信, 利用高通量制备和表征技术, 一大批新型非晶合金将陆续涌现出来, 针对不同材料性质进行快速筛选后, 有望发现具有

优异综合性能的特种非晶合金材料, 充分发挥非晶合金的优势和特点, 获得广泛应用.

参考文献

- [1] Schroers J, Hodges T M, Kumar G, Raman H, Barnes A J, Quoc P, Waniuk, T A 2011 *Mater. Today* **14** 14
- [2] Johnson W L 2002 *JOM-J. Min. Met. Mat. Soc.* **54** 40
- [3] Wang W H 2007 *Prog. Mater. Sci.* **52** 540
- [4] Ding S Y, Liu Y H, Li Y L, Liu Z, Sohn S, Walker F J, Schroers J 2014 *Nat. Mater.* **13** 494
- [5] Phillips C L, Littlewood P 2016 *APL Mater.* **4** 053001
- [6] Takeuchi I, Lauterbach J, Fasolka M J 2005 *Mater. Today* **8** 18
- [7] Hanak J J 1970 *J. Mater. Sci.* **5** 964
- [8] Yoo Y K, Xue Q Z, Chu Y S, Xu S F, Hangen U, Lee H C, Stein W, Xiang X D 2006 *Intermetallics* **14** 241
- [9] Wang H Z, Wang H, Ding H, Xiang X D, Xiang Y, Zhang X K 2015 *Sci. Tech. Rev.* **33** 31 (in Chinese) [王海舟, 汪洪, 丁洪, 项晓东, 向勇, 张晓琨 2015 科技导报 **33** 31]
- [10] Hata S, Sakurai J, Yamauchi R, Shimokohbe A 2007 *Appl. Surf. Sci.* **254** 738
- [11] Hata S, Yamauchi R, Sakurai J, Shimokohbe A 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 2708
- [12] Liu Y, Padmanabhan J, Cheung B, Liu J B, Chen Z, Scanley B E, Wesolowski D, Pressley M, Broadbridge C C, Altman S, Schwarz U D, Kyriakides T R, Schroers J 2016 *Sci. Rep.* **6** 26950

- [13] Li Y L, Jensen K E, Liu Y H, Liu J B, Gong P, Scanley B E, Broadbridge C C, Schroers J 2016 *ACS Comb. Sci.* **18** 630
- [14] Liu Y H, Fujita T, Aji D P B, Matsuura M, Chen M W 2014 *Nat. Commun.* **5** 3238
- [15] Deng Y P, Guan Y, Fowkes J D, Wen S Q, Liu F X, Phaff G M, Liaw P K, Liu C T, Rack P D 2007 *Intermetallics* **15** 1208
- [16] Tsai P, Flores K M 2015 *Metall. Mater. Trans. A* **46** 3876
- [17] Tsai P, Flores K M 2016 *Acta Mater.* **120** 426
- [18] Gregoire J M, McCluskey P J, Dale D, Ding S Y, Schroers J, Vlassak J J 2012 *Scripta Mater.* **66** 178
- [19] Lee D W, Zhao B G, Perim E, Zhang H T, Gong P, Gao Y L, Liu Y H, Toher C, Curtarolo S, Schroers J, Vlassak J J 2016 *Acta Mater.* **121** 68
- [20] Aono Y, Sakurai J, Ishida T, Shimokohbe A, Hata S 2010 *Appl. Phys. Express* **3** 125601
- [21] Aono Y, Sakurai J, Shimokohbe A, Hata S 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 055601
- [22] Guo Q, Noh J H, Liaw P K, Rack P D, Li Y, Thompson C V 2010 *Acta Mater.* **58** 3633

SPECIAL ISSUE — Progress in research of amorphous physics

Combinatorial fabrication and high-throughput characterization of metallic glasses

Liu Yan-Hui[†]

(Key Laboratory of Extreme Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 1 June 2017; revised manuscript received 23 June 2017)

Abstract

Metallic glasses, which exhibit outstanding mechanical, physical, and chemical properties and rich phenomena, are important technologically and fundamentally. The progress in the field of metallic glasses has largely relied on the development of new glass forming alloys. However, due to the multi-component nature of metallic glass, discovery of new alloy is slow. The fabrication combined with high-throughput characterization under the umbrella of materials genome initiative has been demonstrated to be helpful for accelerating the material discovery. In addition, the big data generated during high-throughput characterization can conduce to understanding the science behind the behaviors of various materials. In the paper, we summarize the techniques that can be used for the combinatorial fabrication of metallic glasses, and relevant approaches to realize the high-throughput characterization.

Keywords: amorphous alloys, metallic glasses, materials genome, high throughput

PACS: 61.43.-j, 61.43.Dq, 61.82.Bg

DOI: 10.7498/aps.66.176106

[†] Corresponding author. E-mail: yanhui.liu@iphy.ac.cn