

本刊专稿

非晶物质的前沿发展现状与未来展望

柯海波¹, 周靖¹, 童星¹, 汪卫华^{1,2*}

摘要 中国嫦娥五号采回的月壤中发现了超过 30% 的玻璃质成分,进一步证实非晶物质在宇宙中广泛存在,看似杂乱无章的非晶物质结构背后可能隐藏着拓扑序和不均匀性,因而非晶物质具有奇异的遗传、敏感和弛豫行为,表现出一系列优异物理化学特性,如极致的稳定性、超塑性、超强力学行为和优异软磁性能等。基于序调控和高通量技术开发出的新一代 Zr 基、Fe 基非晶合金更是成功应用于如折叠手机铰链、新能源汽车电机等核心部件,非晶材料展现出不可替代的应用优势。非晶物质的未来发展应引入新的材料研发范式,重视工艺创新的重要性,推动多学科领域的交叉融合,发挥先进表征技术和大科学装置的优势,打造产学研用全链条创新模式,进而积极助力非晶材料与物理领域的快速发展,拓展其在高新技术领域的应用。

关键词 非晶物质;玻璃;非晶合金;序调控

从古埃及法老崇拜的彩色玻璃,到欧洲文艺复兴中窥探上帝奥秘的望远镜,至现代信息时代承载信息传输和交互的光纤,无不与非晶物质息息相关。作为物质世界中最平常和最多样化,人类应用最古老和最广泛的材料之一,非晶物质对人类的生活、科学的发展、社会的进步,甚至文化、艺术和宗教都产生过极大的影响,它还在中西方文化和文明的差异与分歧中起到至关重要的作用。

2021 年,诺贝尔物理学奖授予意大利科学家 Giorgio Parisi,以表彰他对理解复杂无序系统的开创性贡献,这也说明无序体系的科学问题研究具有重大意义。2022 年,是联合国大会确定的国际玻璃年,也是联合国第一次以单一材料来命名一个年份,突出反映了非晶态的玻璃在科技、经济、文化和社会等诸多

领域中不可或缺的重要地位。正如诺贝尔物理学奖 Philip W. Anderson 指出的“凝聚态物理领域最深邃的也是悬而未决的问题可能是玻璃的本质和玻璃化转变”。对非晶物质的深入认识,对非晶材料最新前沿进展进行总结展望,能够促使人们更加重视非晶等新材料的创新与发展,进一步推动人类科技发展和文明进步。作为一种独特的材料,非晶物质必将在未来发挥更重要的作用,让人类生活变得更美好。

1 无处不在的非晶物质

非晶物质在自然界中无处不在,我们每个人无时无刻都在与非晶材料打交道,然而就如人类常常忽略空气的重要性一样,人们容易对隐藏在生活中的非晶物质视而不见。那什么是非晶物质呢?从科学的角度定义,非晶物质是指原子或颗粒等基本单元无序堆积形成的凝聚态物质,其组成单元长程排列无序、存

1. 松山湖材料实验室,东莞 523808

2. 中国科学院物理研究所,北京 100190

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 广东省基础与应用基础研究重大项目(2019B030302010)

作者简介: 柯海波,研究员,研究方向为非晶合金的研发及应用探索,电子信箱: kehaibo@sslab.org.cn; 汪卫华(通信作者),研究员,中国科学院院士,研究方向为非晶态材料与物理,电子信箱: whw@iphy.ac.cn

引用格式: 柯海波,周靖,童星,等. 非晶物质的前沿发展现状与未来展望[J]. 科技导报, 2025, 43(15): 20-38; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00268

在 多 体 强 相 互 作 用，从 微 观 上 具 有 类 似 液 体 的 微 观 结 构，但 宏 观 上 表 现 出 固 体 的 行 为。例 如，常 见 的 材 料 如 塑 料、玻 璃、松 香、石 蜡、沥 青、琥 珀、橡 胶 等 都 是 非 晶 态 固 体；生 物 体 等 软 物 质、液 体、胶 体、颗 粒 物 质 也 是 广 义 的 非 晶 态 物 质；行 星 星 体 包 括 地 球 实 际 上 也 可 以 看 作 是 大 的 结 构 单 元 组 成 的 非 晶 体。另 外，非 晶

物 质 也 广 泛 存 在 于 宇 宙 物 质 中，中 国 嫦 娥 五 号 采 回 的 月 壤 中 发 现 玻 璃 质 成 分 可 超 过 30%，图 1^[1]是 嫦 娥 五 号 采 回 的 月 壤 中 发 现 的 微 米 级 玻 璃 球 与 玻 璃 纤 维，这 种 地 质 级 时 间 的 玻 璃 中 记 录 了 月 球 上 重 要 的 撞 击 过 程 和 撞 击 历 史 的 信 息，是 未 来 月 球 探 测 任 务 的 理 想 采 样 目 标。

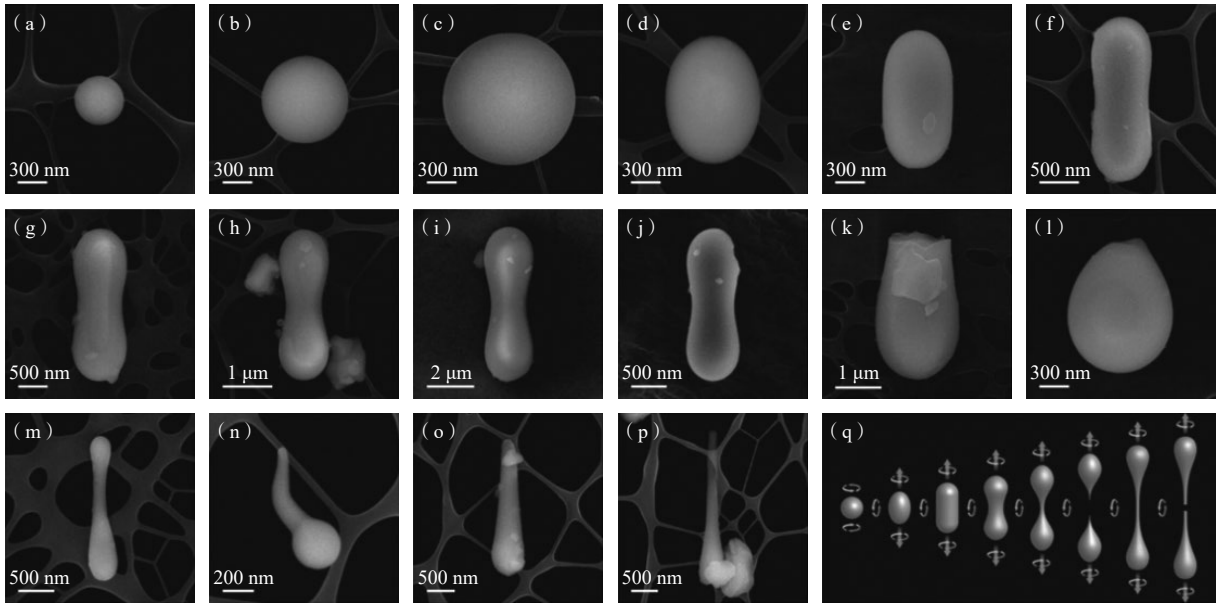
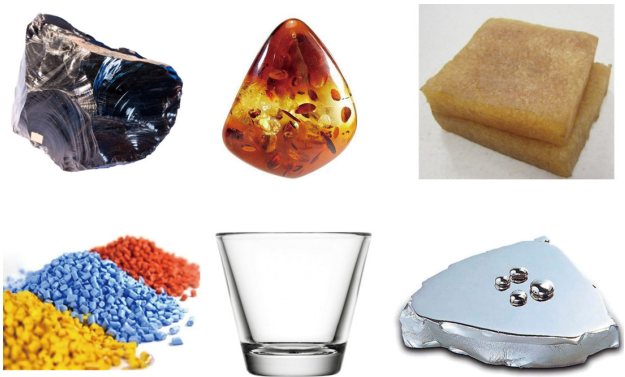


图 1 嫦 娥 五 号 采 回 的 月 壤 中 发 现 的 微 米 级 玻 璃 球 与 玻 璃 纤 维

非 晶 物 质 具 有 多 样 性，典 型 的 非 晶 物 质 包 括 玻 璃、非 晶 固 体（如 非 晶 半 导 体、非 晶 合 金 等）、非 晶 高 分 子（塑 料、橡 胶、琥 珀 等）、胶 体 和 颗 粒 体 物 质 等。软 物 质、过 冷 液 体 也 包 括 在 非 晶 的 范 畴 内。不 同 尺 度 基 本 单 元 都 能 组 成 传 统 意 义 上 的 非 晶 态 系 统：从 微 米 级 小 球 单 元 组 成 的 胶 体 非 晶，到 细 胞 单 元 组 成 的 非 晶 态，再 到 由 一 群 蚂 蚁 单 元 组 成 的 蚁 群 都 表 现 出 非 晶 态 特 征，几 乎 所 有 不 同 价 键 的 物 质 都 能 形 成 非 晶 态。传 统 非 晶 塑 料 和 玻 璃 材 料 是 与 钢 材、水 泥、木 材 并 列 的 基 础 材 料；铁 基 非 晶 合 金 具 有 良 好 的 软 磁 性 能，能 够 替 代 传 统 的 硅 钢 以 制 作 变 压 器 铁 芯。玻 璃 复 合 纤 维 制 成 的 光 纤 是 现 代 通 信 的 关 键 材 料 等。总 之，从 非 晶 物 质 的 范 畴 看，其 林 林 总 总 地 充 斥 整 个 世 界，非 晶 物 质 应 该 被 归 类 为 独 立 于 液 态、晶 体 固 态、气 态 的 常 规 物 质 的 第 四 态。图 2^[2]列 出 一 些 典 型 的 非 晶 固 体，包 括 自 然 界 中 天 然 存 在 的 黑 曜 石、琥 珀、橡 胶，也 包 括 常 见 的 人 工 合 成 塑 料、氧 化 物 玻 璃、非 晶 态 合 金 等。人 类 的 许 多 食 物、药 物 其 实 也 是 非 晶 物 质，生 物 体（如 动

物、植 物）也 大 多 是 由 非 晶 态 软 物 质 所 组 成。对 量 子 力 学 做 出 卓 越 贡 献 的 著 名 科 学 家 薛 定 谔 在 他 的 著 作 《生 命 是 什 么》开 篇 中 就 说 道：“非 晶 物 质 是 生 命 的 物 质 载 体，细 胞 中 最 重 要 的 物 质 染 色 体 就 是 非 晶 态。”宇 宙 中 大 部 分 水 也 是 以 非 晶 态 的 形 式 存 在 的。非 晶 合 金 作 为 非 晶 物 质 家 族 中 的 年 轻 成 员，直 至 1959 年



注：上 图 依 次 是 火 山 玻 璃、琥 珀、天 然 橡 胶 等 自 然 中 存 在 的 非 晶 物 质；
下 图 依 次 是 塑 料、普 通 玻 璃、非 晶 合 金 等 人 造 的 非 晶 物 质

图 2 多 样 化 的 非 晶 物 质

才由美国加州理工大学 Duwez 等^[3]在实验中偶然得到,目前已成为航天、航空、军事等领域和手机、手提电脑等设备制造争相选用的时尚材料。

作为凝聚态物质的重要基石和组成部分,非晶物质中蕴含的科学如非晶形成、结构等问题,对其他学科研究和技术领域进步有着非常重要的意义。如玻璃转变问题的解决对包括材料科学、生物学、制药、食品工业等都有极大的帮助。解决非晶失稳问题对于预防地震、泥石流等地质灾害,确保水利大坝的工程安全等有重要的指导作用。

2 非晶物质的最新研究进展

2.1 非晶结构中独特的“序”

非晶物质千变万化,种类繁多,表现出丰富多彩的物理和化学性能,然而,最新的研究表明它们在微观上存在着共同的结构特征。

1) 长程无序。与晶体有序的原子排列方式不同,非晶物质的原子或分子在长程上呈现杂乱的排列,利用高分辨透射电子显微镜可看出,非晶合金无序原子结构和普通晶态金属中整齐排列的原子晶格之间的显著差异(图 3(a)与(b)),并且这种长程无序在衍射花样上呈现宽化的晕和弥散的环,与晶体的锐利衍射峰形成对比;图 3(c)^[3-5]为不同非晶物质的无序微观原子或分子结构示意图,可以看出非晶物质在长程上不存在周期平移序,即呈现长程无序。

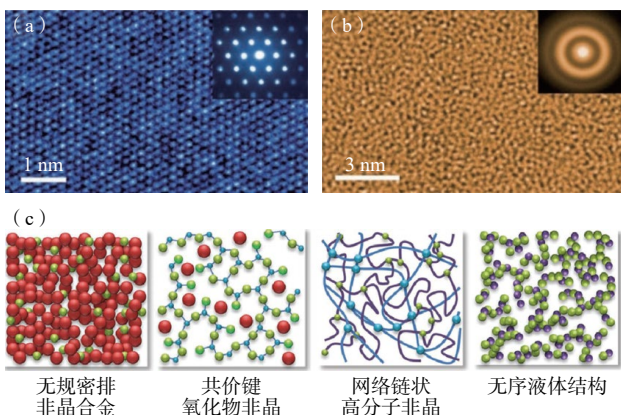


图 3 晶态金属(a)和非晶合金(b)的高分辨透射电子显微镜照片对比;不同非晶物质的无序微观原子/分子排列结构示意图(c)

2) 短程有序。尽管长程无序是其本质特征,但非晶物质中存在短程的有序结构,这种短程有序性与晶

体相似,尺度在 1 nm 左右,可被视为非晶物质的结构单元。越来越多的实验和模拟证据表明,在长程无序的非晶物质中存在各种各样的短程序,如二十面体团簇。已有研究证明利用 145 种不同的多面体(短程序)通过自组装堆砌,可以得到许多复杂的物质体系包括晶体、非晶、液体、液晶等^[4],表明短程序是构成非晶物质的重要结构单元。例如,对于非晶合金而言,美国空军实验室 Miracle^[6]利用塑料小球密排研究发现非晶金属并非原子的无规密堆,而是由很多原子团簇密堆而成。然而,通常的衍射手段难以获取短程有序的信息和图像。目前,短程序主要采用同步辐射、球差电子显微技术、核磁共振等实验技术得到。图 4(a)是利用消球差电子显微技术实现埃尺度相干电子衍射直接探测到非晶合金原子近邻及次近邻结构的非晶短程序结构,可以解析出非晶合金中存在的团簇结构^[7];最近发展的三维重构技术(atomic electron tomography, AET),可以进一步通过球差校正电子显微采集样品不同倾转角度下原子分辨的结构信息,通过基于傅里叶变换的循环重构算法得到原子分辨的三维结构,实现了非晶材料三维原子结构的排列信息(图 4(b))^[8]。

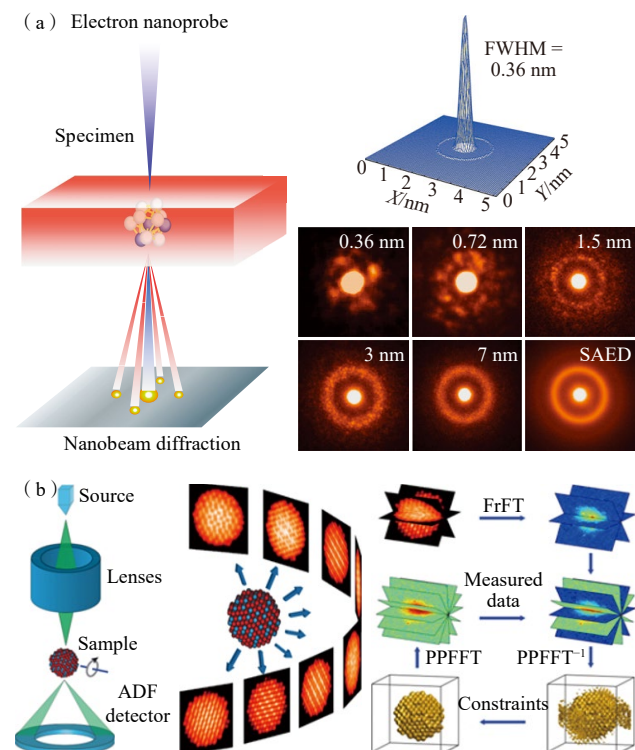


图 4 通过消球差电子显微技术(a)与 AET 确定非晶合金的局域原子团簇结构(b)

3) 拓扑序。拓扑学研究几何图形或空间在连续变形下保持不变的性质,只考虑物质间的位置关系而不考虑其距离和大小。拓扑学以深刻而基本的方式展现物质形体之间的关联,帮助人们了解物质的空间几何结构的存在形式,并对现代半导体电子器件的设计和制造、万维网的设计、交通运输规划、动画设计甚至对大脑神经元的结构有革命性的作用。近代物理中,寻找拓扑不变量、拓扑相变概念已然成为凝聚态物理的热点和革命。非晶物质具有和晶体类似的短程序,其短程序仅在原子间距和键角上有些畸变,但在拓扑上两者是相同的。液体在凝固过程中,无论形成晶态还是非晶态,可能保持其短程拓扑序。目前,描述非晶物质的序参量大多是基于局域原子结构或者最近邻原子的几何特征给出的,缺乏具有高度概

括性的拓扑不变性。将拓扑思想和方法引入无序结构研究中,通过寻找合适的具有特殊拓扑属性的参量来分类表征相应的原子集合,可望简化对非晶结构及其动力学的描述,建立更加简洁和有效的结构性能关系。现有研究表明,非晶合金在构型空间和动力学空间都存在非平庸的拓扑结构,这些拓扑结构可能与非晶合金中的本征缺陷密切相关,在具有类共价键结构的 CeAl 非晶合金中已观察到长程拓扑序。最新的研究表明,非晶合金动力学空间也存在类似的拓扑漩涡结构,这些拓扑结构可能对应于非晶合金的本征缺陷,并与其形变中的塑性事件有着密切的关联(图 5)^[9],因此,对理解非晶合金的形变机制至关重要。这些工作表明,看似杂乱无章的非晶物质结构背后可能隐藏着拓扑序,这对解决非晶物质复杂结构难题带来新思路。

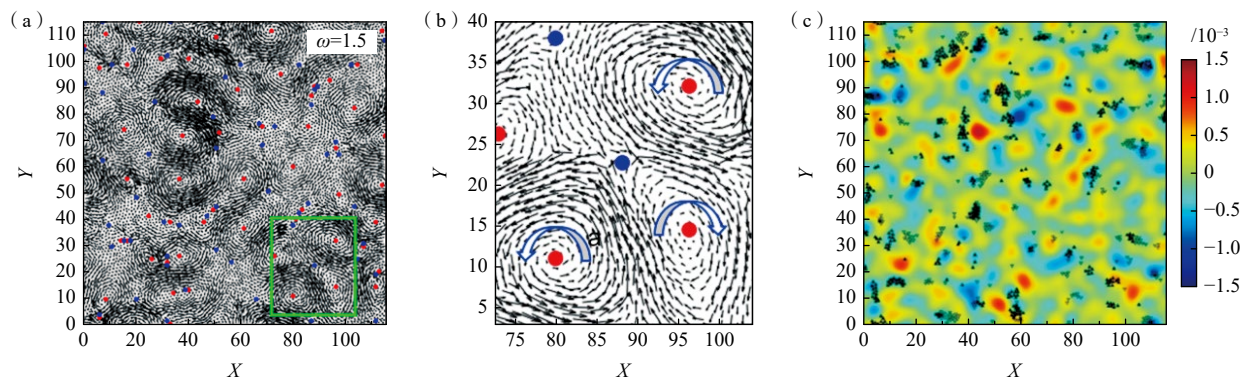


图5 非晶合金中的拓扑序“缺陷”及其与塑性事件的关联性:正常模式下的特征向量(a);4个+1缺陷(涡流,红色)和2个-1缺陷(反涡流,蓝色)(b);应变 $\gamma=0.025$ 时,拓扑缺陷(彩色地图)和塑性事件(符号)的电荷密度场分布(c)

4) 结构非均匀性。在宏观上,非晶物质呈现出均匀性和各向同性。然而在微观上,人们利用透射电镜、原子力显微镜、同步辐射 X 射线纳米 CT 和超声显微镜等众多实验证据证明(图 6)^[10-12],在纳米到 $1\mu\text{m}$ 的尺度上,非晶物质在结构和动力学上是不均匀

的,并且这种不均匀性被认为是非晶物质的本质特征。通过调控不均匀性,可实现非晶性能的精准调控和优化设计,如可提升非晶合金的塑性形变能力,增强其弛豫动力学行为等。

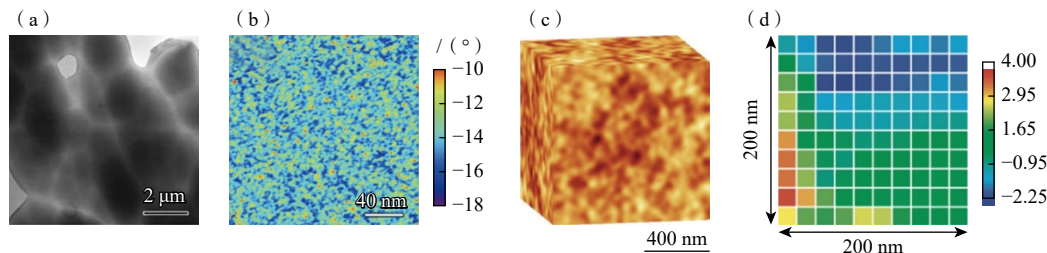


图6 利用透射电镜(a)、原子力显微镜(b)、同步辐射 X 射线纳米 CT(c)和超声显微镜(d)表征的非晶合金微观非均匀性结构

2.2 非晶物质奇异的特征行为

2.2.1 遗传性

遗传性又称继承性,指一个体系所具有的包括静态属性及动态操作的性质自然地成为其子类的性质,及类与子类之间属性的传递。众多研究表明,非晶物质具有结构和性能的遗传性特征。非晶物质的结构与其形成液体及主要组元之间的相似性,被称为结构遗传性。研究发现,液态的局域团簇结构和非晶的团簇结构高度类似,都以短程有序为特征,且液态和非晶态的短程有序与长程无序特征很相似。图 7(上)^[13]

为非晶合金结构“基因”遗传图谱,研究发现非晶与金属晶体之间存在着明显的结构同源性,非晶合金隐含拓扑序继承了面心立方或体心立方晶格结构的组元的球周期序列,表明在快速冷却过程中,一些晶体结构中所特有的原子排布规律以某种特殊的方式被“遗传”到非晶物质中。非晶结构遗传的观点为衡量合金非晶形成能力强弱,探索非晶形成能力强的体系提供了新的理论思路,也为认识非晶物质的晶化、本质提供了一个微观结构演化的物理图像。

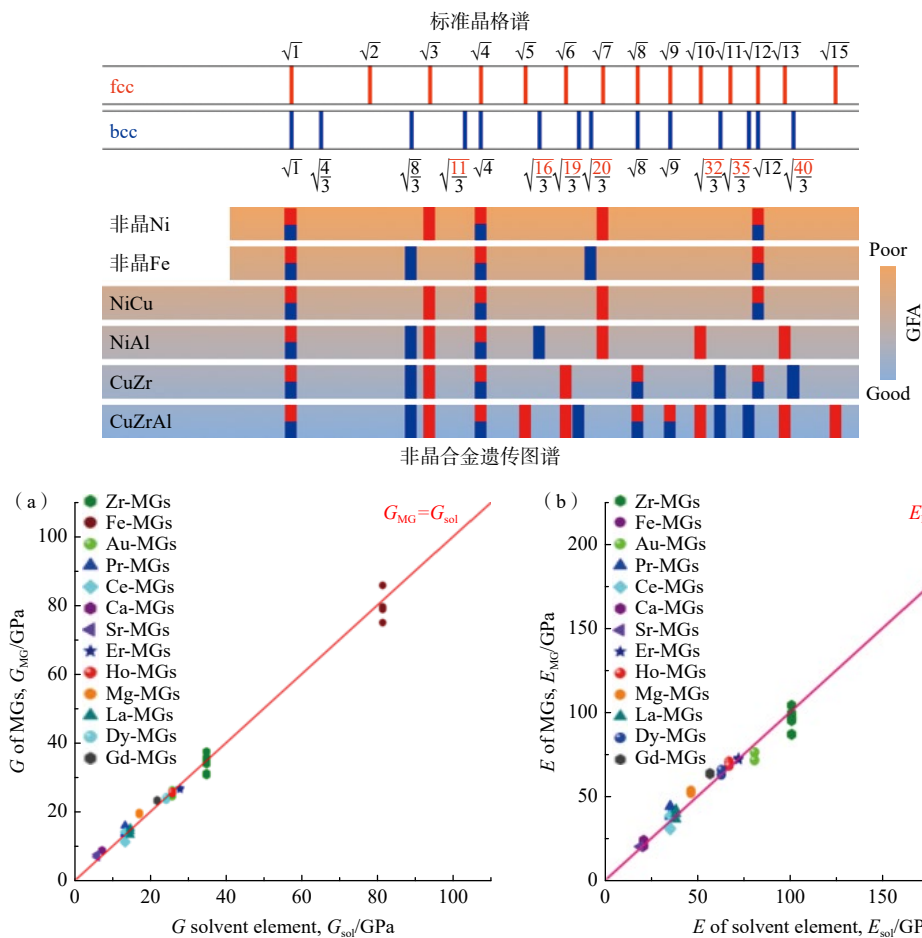


图7 非晶合金结构“基因”遗传图谱(上)。非晶合金遗传继承了 fcc 和 bcc 晶格结构的球周期序,且这种结构遗传与非晶形成能力之间存在密切关系;非晶合金的切变模量与杨氏模量均与其主元线性相关,表明其模量遗传自主元(下)

非晶合金的电子结构也具有遗传性。纯稀土金属与稀土基非晶合金在高压下的变化具有很多相似之处,例如镧系(如 Ce 基等)非晶合金在高压下发生非晶到非晶的多形态转变,这与 Ce 的 4f 电子在压力作用下由局域化的 4f¹ 电子态向巡游态的 4f⁰ 电子态转变,同时伴随着体积的塌缩。这种结构遗传性为设

计具有特殊功能和性质的新型材料提供了新途径。非晶物质的性能也具有遗传性。非晶形成液体或者其主组元的某些物理性质可以传递给非晶态。如非晶体系液体脆度系数 m (表征黏滞系数 η 随温度 T 变化的参数) 和非晶物质的泊松比之间有关联,强液体形成的非晶泊松比小,脆弱的液体形成的非晶泊松比

大。图 7(下)^[14]非晶合金弹性模量的数据统计表明,大多数非晶合金体系的模量 M 和其主组元的模量类似,尽管其主组元在非晶合金中的含量一般都小于 70%,即非晶的弹性模量具有遗传性。由于非晶物质的模量和其本身的很多性质相关联,所以模量遗传性表明非晶合金其他物性可能也有遗传性。

非晶态物质结构和性能遗传性为认识和研究非晶的结构、结构非均匀性、形成能力和玻璃转变,以及结构和性能的关系提供了不同的思路,为探索新型非晶材料、调控非晶材料的性能提供了新方法。

2.2.2 敏感性

非晶物质的另一个重要特征是对外界影响的敏感性,即非晶物质对外界的作用(如温度、力、磁场、杂质、时间等)特别敏感。例如,生活中一滴卤水就能使一锅豆腐浆凝结成豆腐;只要有一个 S 原子加入天然橡胶的 200 个 C 原子中,就可以使天然橡胶液汁转变成弹性非晶固体。这 2 个例子都显示出非晶物质的一大特性:一点小的外加的物理或化学反应可以

引起非晶物质力学性质或结构等的极大变化。这种响应的敏感性在日常生活、工业领域有重要的应用。

非晶合金同样具有优良的应变敏感性,其高达 >2% 的弹性极限是一般合金材料的几十倍,非晶合金同时又将金属优良的导电性较好地保留下来。因此,非晶合金纤维和薄膜是优良的应变敏感材料。图 8(a)^[15]是非晶合金纤维制备的电阻式应变传感器,其量程可达商业化箔式应变片的 4.0~8.5 倍,而尺寸仅为最小商业化箔式应变片的 1/16,同时其电阻相对变化率与应变关系曲线的线性度极高,应变敏感系数很高,高热稳定性,高刚度,方便安装,是趋近于完美电阻式应变传感器。利用非晶薄膜材料的敏感特性,可以开发柔性高性能应变传感器—非晶皮肤,其柔性好很容易弯曲超过 180°,通过膜厚调控实现视觉的“透明”性。由于非晶合金皮肤保留了金属材料高电导率,电阻与应变之间有完美的线性关系,稳定性好、弹性范围大(室温下的理论弹性极限为 4.2%),且响应快、信号转换方便,因此可用于高灵敏监测手指弯曲程度等仿生学应用^[16]。

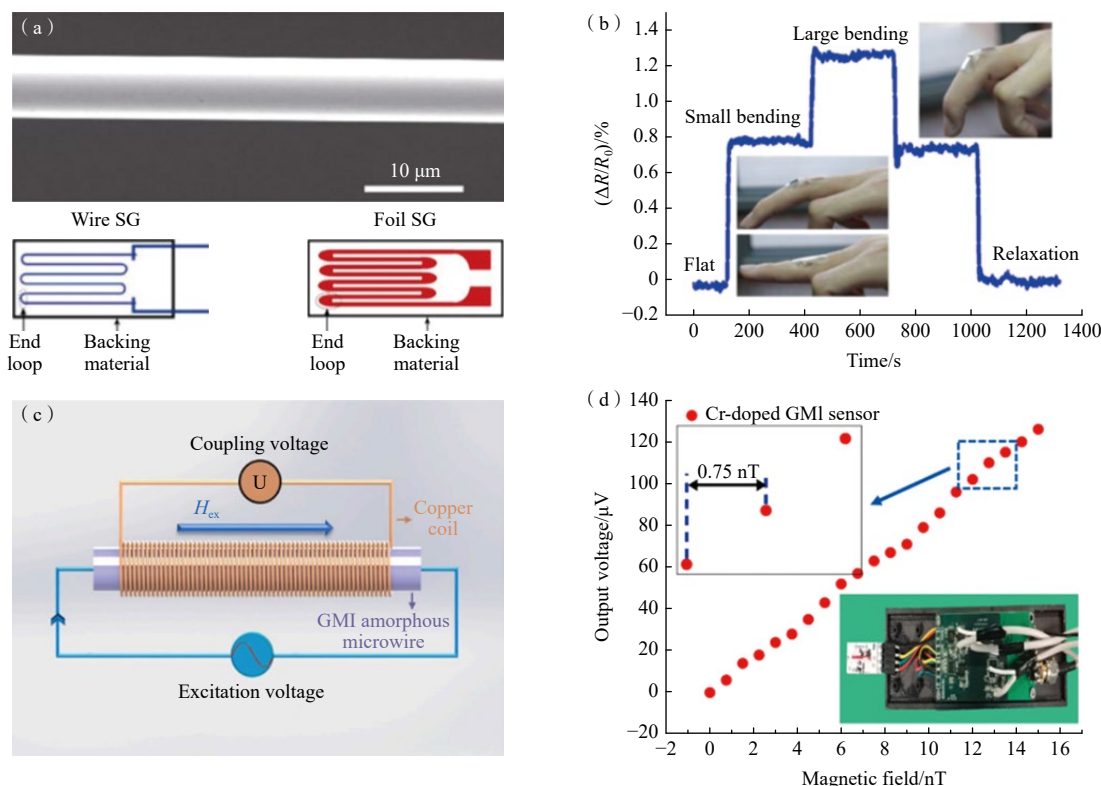


图 8 利用 Pd 基非晶合金制成的电阻式应变传感器(a);利用非晶合金薄膜制成电子皮肤能够敏感监测手指的弯曲程度(b);利用非晶合金丝制备高灵敏度 GMI 传感器(c, d)

巨磁阻抗(giant magneto impedance, GMI)传感器作为一种新型的磁敏传感器,具有响应快、灵敏度高

和小型化等优点。核心部件磁性微米丝的成分设计和结构调控成为影响 GMI 传感器性能的主要原因。

为提升其灵敏度,通常需要磁性微米丝具有高效 GMI 效应(即高阻抗变化率和磁场灵敏度),非晶合金材料表现出高导电率和环形磁导率特征,因此有望克服传感器在弱磁场中灵敏度大幅衰减的弊端,实现极高的探测灵敏度。近期,松山湖材料实验室利用一种具有超晶格-纳米晶核壳结构的非晶微米丝,设计出高灵敏度 GMI 传感器^[17]。该团队连续制备出微米级高尺寸均匀性的 Cr-doped Co 基非晶丝,利用皮秒激光热处理获得一种超晶格-纳米晶特殊的核壳结构,由于其极高的环形磁畴密度和强度,大幅提升其弱磁场中的灵敏度(1743 mV/Oe),弱磁中本征 GMI 性能高达 78%,为普通非晶微米丝的 4 倍,利用其制备的 GMI 传感器可在低至 pT 级探测分辨率的地磁通信中实现精准定位,这种高灵敏度 GMI 传感器在生物医学、定位导航、无损检测等弱磁场领域展现出广阔的应用前景。

2.2.3 复杂的弛豫行为

非晶物质形成需要特定的热力学、动力学和化学条件,非晶物质能量处于亚稳态,因此弛豫与老化无时无刻不在,是非晶的本征特性之一。非晶形成体系随温度不同,动力学弛豫时间涵盖 12~14 个数量级的巨大时间尺度差异(时间跨度 10^{-14} ~ 10^6 s),弛豫频率涉及 10^{14} ~ 10^{-5} Hz。同时,非晶表现出复杂的弛豫动力学行为,其弛豫时间符合扩展的指数方程(Kohlrausch-Williams-Watts 方程,简称 KWW 方程): $\varphi(t)=\exp[-(t/\tau)^n]$,其中, $0<n<1$ 。更为重要的是,时间和非晶物质的特性密不可分,非晶的结构和性能从其形成那一刻起就会随时间不停地发生演化,因此,非晶物质需要在包含时间的四维空间中,丹麦非晶物理学家 Dyre 领导的研究中心名称就叫“玻璃和时间”。非晶的物理性能随时间发生结构弛豫是不可逆的,如非晶塑料和橡胶会老化,非晶合金也会晶化;但是令人惊奇的是,有些非晶物质如松香、琥珀等,可以在严酷的自然环境中稳定存在千万年。因此,非晶复杂性带来的稳定性对其应用服役十分必要,也很有趣;与此同时,在非晶复杂相互作用系统中,这种随时间不可逆的物理及化学过程是使系统微扰和耗散得以进行的必要条件,是维持平衡和进一步演化的前提。

玻璃具有和液体类似的微观结构,通常被称为冻结的液体。但最新的研究发现,在金属玻璃这类紧密

堆积的玻璃固体中存在继承了高温液体动力学行为的类液原子,这些类液体原子在室温下仍可以快速地扩散,表现出与高温液体的动力学相同的 Arrhenius 关系(图 9)^[18],意味着在液体冷却过程中一些原子可以延续高温液体的 Arrhenius 关系至玻璃固体中,导致了玻璃固体室温下的超快滞弹性和低温下的快动力学耗散峰。

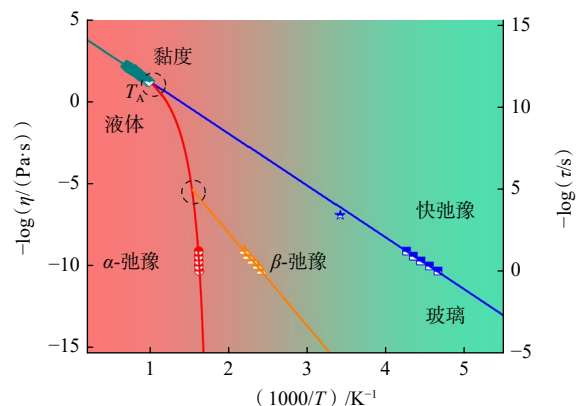


图9 YCo 金属玻璃复杂的弛豫谱

2.3 非晶物质极致的性能

2.3.1 长期稳定性

非晶物质相对晶体具有较高的能量和熵,是热力学上的亚稳态。相比晶态,非晶态具有较高的势能,理论上非晶物质是不稳定的,会通过弛豫、结晶、长大,最后衰变、晶化成稳定的晶态物质。但是,非晶向晶态弛豫或者晶化过程需要克服能垒,不同的非晶物质会呈现出截然不同的稳定性。例如,第一个被发现的 Au-Si 非晶合金在室温下 3 h 就开始发生晶化,24 h 后样品完全晶化,而单质非晶合金则在室温下几乎不能稳定存在。令人惊讶的是,有些非晶物质能表现出超稳定性,颠覆了对亚稳非晶材料的固有观念。比如在实验室制备的 Ce 基金属玻璃,在接近其玻璃化温度经历 18 年的长期老化中,依旧保持着完美的非晶态,热力学稳定性优于大多数通过气相沉积制备的超稳玻璃薄膜,甚至能与上亿年老化的琥珀相媲美^[19],展现了非晶物质具有令人震惊的高稳定性;对中国嫦娥五号采回的月壤中玻璃研究发现,这些月球表面上的玻璃小球至少已经存在 15 亿年(图 10)^[20]。证明了非晶物质可以是最稳定的固态物质。

稳定的非晶物质具有重要的科学意义和应用价值。例如,稳定的非晶材料可用于核废料的封装材

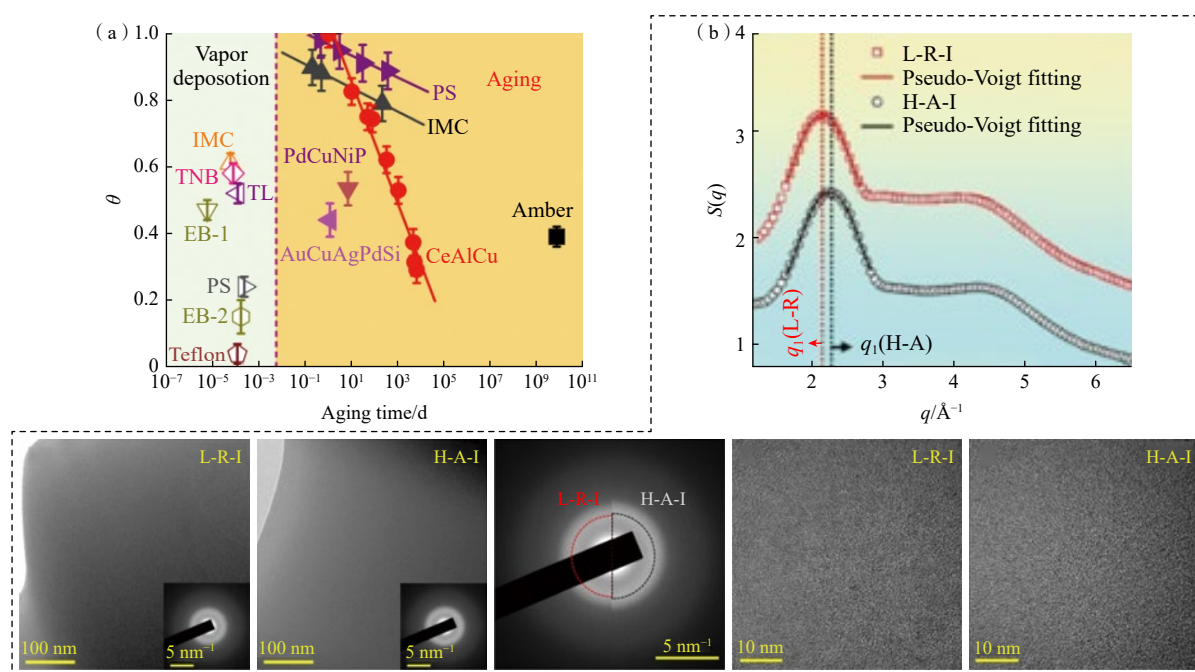


图 10 Ce 基金属玻璃的超稳定性(a)和嫦娥五号月壤玻璃的超凡稳定性(b)

料,因为核废料的辐射需要上万年的时间才能衰减掉。稳定的高分子非晶材料可以大大延缓其老化过程,增加材料使用寿命。在玻璃上微加工、刻蚀纳米结构去编码信息,可研制出寿命超长的玻璃光盘,其容量高达 360 TB。由于非晶玻璃具有超高的物理、化学稳定性,因此这种五维光碟能确保数据在非常长的时间里不会丢失,理论上在温度高达 190°C 的环境中可维持长达上亿年。目前,商业化微软玻璃硬盘已经问世,其单片 75 G 像素级存储有千年质保期。

2.3.2 超塑性

很多非晶物质具有明显的玻璃转变温度点 T_g ,当温度高于 T_g 时,非晶物质就变成过冷液体,在过冷液态,非晶体系具有类似液体的异常低的流变抗力、异常高的流变性,即超塑性。这种超塑性赋予非晶材料无与伦比的成型能力。生活中有很多常见的例子,如玻璃的吹塑成型技术就是典型超塑性特性的应用。非晶玻璃材料史上一项里程碑式的进展是古罗马时代发明的玻璃超塑性成型技术,即玻璃吹塑成型的技术。通过这项技术,玻璃被制造成形状精美、高雅、复杂的酒杯等器皿和工艺品,也使得玻璃的加工成为一门艺术。

块体非晶合金和其他非晶玻璃一样具有较稳定的过冷液相区和较低的 T_g ,其过冷液态可以在几十摄

氏度甚至 100 多摄氏度的温区较长时间存在。具有稳定的过冷液态也是非晶合金相比一般金属材料的另一项特殊的性质。因此,非晶合金具有出色的超塑性变形能力,铸造成型性很强,可以在远低于熔点的温度实现超塑性成型。其中,Ce 基金属塑料甚至具有和有机塑料类似的低温超塑性,如在开水中即可进行超塑性成形、弯曲、拉伸、压缩和复印等精密加工,且加工制造成本低廉^[21]。利用非晶合金这一金属材料独特的超声振动诱导塑性,使焊接表面“低温超塑性”而发生冶金结合,成功实现了非晶材料在水、海水、酒精以及液氮环境下的多种形式焊接^[21]。还可以利用“低温软化”的特性链接其他材料,比如将非晶合金嵌入到其他构件,将非晶合金作为铆钉进行铆接等。超声振动下非晶材料在液体环境中的复杂制造成型,可为极端条件(深空深海)下的制造提供新的思路。在消费电子领域,利用非晶合金的超塑性进行压铸精密成型,已实现华为折叠屏手机的铰链、智能手表的表壳等产品批量化制造(图 11)^[21-22],因此非晶合金在精密制造中展现出重要应用和研究价值。

2.3.3 软磁特性

现代电子电力设备逐渐向小型化、高效化和节能化发展,这对软磁合金材料的软磁性能提出了更高的要求。非晶合金由于其独特的无序结构,表现出极其

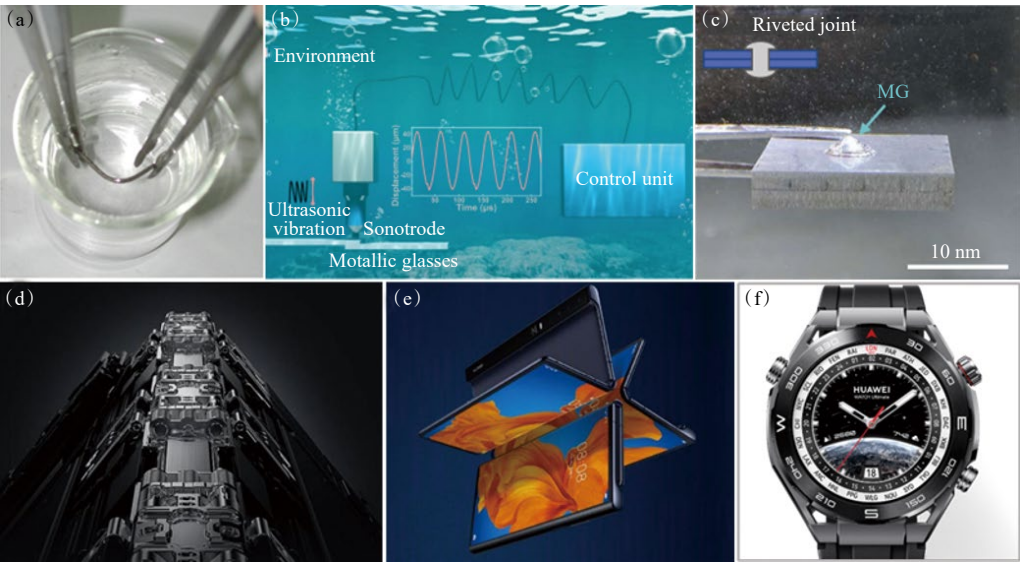


图 11 在开水中即可超塑变形的 Ce 基“金属塑料”(a); 非晶合金的水下超声焊接及铆钉成型(b-c); 利用非晶合金的超塑性压铸制造的华为折叠屏手机铰链和非凡大师腕表表壳(d-f)(图片来源: 华为官网)

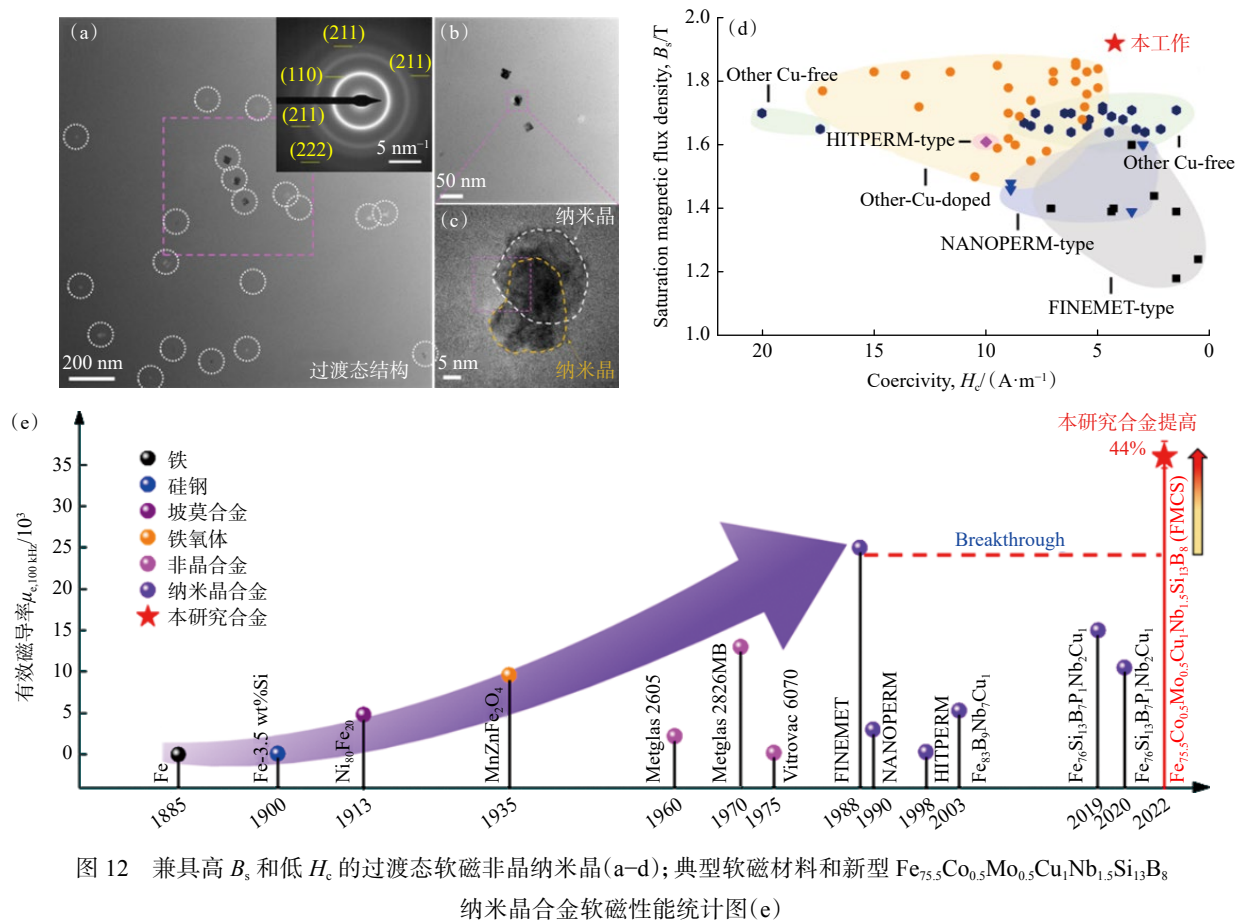


图 12 兼具高 B_s 和低 H_c 的过渡态软磁非晶纳米晶(a-d); 典型软磁材料和新型 Fe_{75.5}Co_{0.5}Mo_{0.5}Cu₁Nb_{1.5}Si₁₃B₈ 纳米晶合金软磁性能统计图(e)

优异的软磁性能, 如高磁导率、低矫顽力、低损耗等特点, 广泛应用于各类电力电子的磁性器件中, 具有显著的节能环保优势。2022 年, 松山湖材料实验室通过全新成分设计思路, 成功开发出了一种结构介于传

统非晶合金和纳米晶合金之间的新型软磁合金材料, 表现出超高的磁感应强度 B_s (高达 1.94 T) 和低至 4.3 A/m 的低矫顽力 H_c , 打破了铁基非晶纳米晶合金体系中 B_s 和 H_c 之间的互斥关系, 可以应用在如高速

电机、大功率光伏并网逆变器等现代电子产品中(图 12(a-d))^[23]。此外,对非晶合金进行合适的热处理,可在非晶基体上析出细小、均匀的纳米晶体,从而得到纳米晶软磁合金,该类材料同样具有意想不到的优异软磁性能。图 12(e)^[24]是近期松山湖材料实验室和中国科学院物理所在非晶合金前驱体基础上开发出具有最高高频磁导率的新型软磁非晶纳米晶合金材料,在 100 kHz 下的有效磁导率高达 36000(比目前磁导率最高的 FeSiBCuNb 纳米晶合金高 44%),并且随着频率的提高,优势变得更加显著,同时表现出较高饱和磁感应强度(1.42 T)、低损耗(120 kW/m³ @0.2 T, 100 kHz)。该材料还具有较低的材料成本和良好的玻璃形成能力。对于实现高频电子器件以及高速电机的高效率、小体积和大功率的优势起着至关重要的作用。可以看到,Fe 基等非晶合金/纳米晶材料拥有优异的软磁性能,被誉为新型绿色能源材料,在电机、变压器、电感等电工装备领域具有广阔的市场和应用前景。

2.3.4 力学高强度与超耐磨

非晶合金由于没有晶体中的位错、晶界等缺陷,因而非晶合金的强度、硬度、断裂韧性、耐磨、弹性等特性在金属材料中处在高端水平,创造了结构材料的多项性能纪录。2019 年,中国科学院物理所采用材料基因工程理念开发了独特的高通量实验方法,研发的 Ir-Ni-Ta-(B)非晶合金在高温力学性能、加工成型性能、耐蚀性等方面表现出前所未有的综合优势^[25]。Ir-

Ni-Ta-(B)非晶合金的玻璃转变温度超过 800℃,比目前工程应用最为广泛的锆基非晶合金高出 400℃。在常温下,Ir-Ni-Ta-(B)非晶合金的强度约为 5.1 GPa,是普通钢材的 10 倍以上,即使在超过 700℃ 的高温条件下,Ir-Ni-Ta-(B)非晶合金仍能保持 3.7 GPa 的强度,远远超过传统的高温合金和高熵合金的强度。随后,团队继续开发了利用纳米压痕技术施加大变形量诱导剪切带和裂纹形成的高通量表征方法,结合压痕形貌表征,在 Ir-Ni-Ta 组合样品中的富 Ta 区域发现了具有极低摩擦系数和磨损率的非晶合金。在室温大气环境中,采用金刚石球头进行摩擦测试,该富 Ta 非晶合金的摩擦系数仅为 0.05,采用 G-Cr 合金球头测试,摩擦系数也只有 0.15。最为值得关注的是,该富 Ta 非晶合金的磨损率只有~10⁻⁷ mm³/Nm。这样的摩擦磨损性能已经接近相似测试条件下类金刚石材料的摩擦磨损性能(图 13(a))^[26]。最近,科学家们系统研究了壁厚仅 20 nm 的 Zr 基和 Ni 基非晶合金纳米管在氧过饱和固溶(>20 at%)时的弹性行为,发现非晶合金纳米管的变形回复能力随变形量的增加而增大,压缩应变达到 23.1% 时非晶合金纳米管能够产生高达 14.1% 的弹性变形回复(图 13(b))^[27]。非晶合金纳米管的超弹性远远超过文献报道的形状记忆合金、橡胶金属、结构复合材料、块体非晶合金和高熵合金等块体超弹性金属(变形回复 1%~7%),也远远超过形状记忆合金纳米柱、非晶合金纳米线、非晶合金纳米片等微纳米超弹性金属(变形回复 4%~8%)。

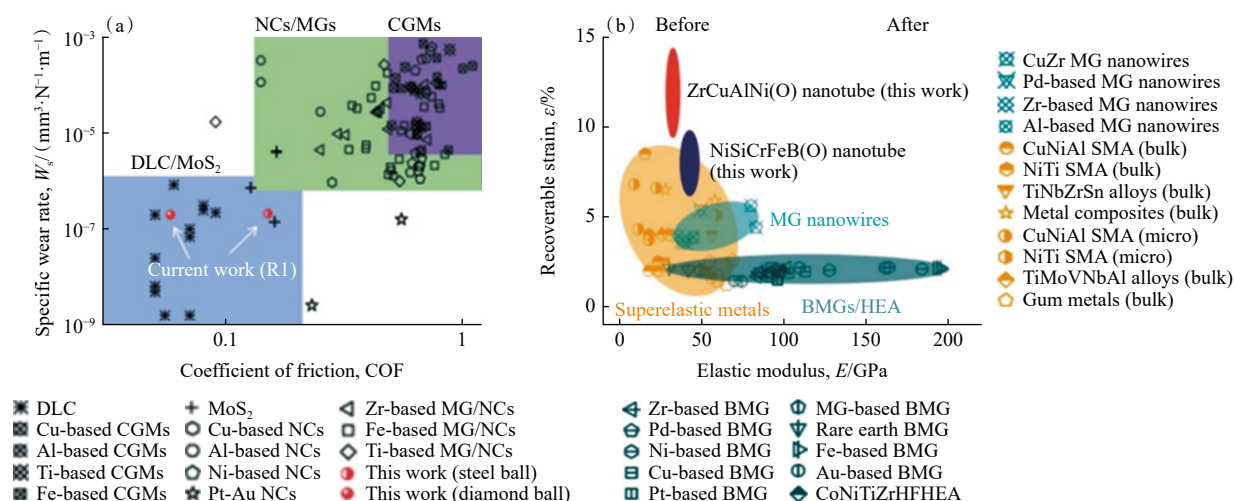


图 13 基于纳米压痕高通量技术筛选出具有类金刚石摩擦磨损性能的非晶合金(a);具有超弹性的非晶合金纳米管与其他超弹性金属材料性能对比(b)

2.4 非晶物质带来的颠覆性(熵调控)

非晶材料由于其复杂性、结构无序、动力学非均匀性的结构和动力学特征,具有复杂的能垒图或者更多的熵态。因此,调控系统的熵也是设计和探索非晶材料的有效思路。通过熵调控可以调控非晶的形成能力、稳定性等特征,也能够调控其力学、物理等性能。熵调控(即序调控)是继结构调控和成分调控之后发展出的探索新型材料的全新方向。高熵合金、高熵非晶、非晶形成能力的提高、块体非晶合金的获得,实际上都是通过熵设计实现的(图 14)^[2]。通常可以通过 2 种方式进行熵调控。一是通过对非晶材料形成、凝固条件、组元和成分的选择和控制来改变熵态,从而调控非晶材料的性能;二是通过对非晶物质进行微量掺杂、退火、高压、超声、辐照、热冷循环等来改变非晶物质的熵,调控其物性。

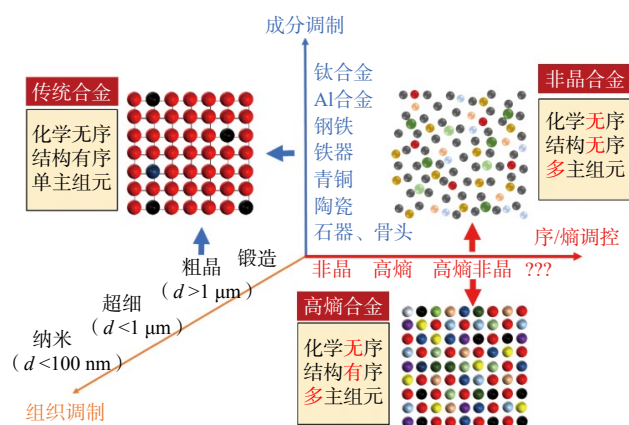


图 14 序/熵调控是探索无序材料的新途径

例如,中国科学家将高熵调控设计理念应用到玻璃领域,采用激光加热熔化-无容器凝固方法,成功制备了具有超高硬度和杨氏模量的氧化物高熵玻璃,该高熵玻璃具有破纪录的硬度(12.58 GPa)和模量(177.9 GPa),以及优异的断裂韧性(1.52 MPa·m^{0.5})和良好的可见光-近中红外波段透过性(最大为 86.8%)。在硬度、模量和断裂韧性上远超目前康宁公司的主流产品——大猩猩六代手机屏幕玻璃。

熵调控其实是改变物质的复杂性,物质复杂到一定程度就产生突变,达到新的层次。生命就是生物物质不断复杂,达到新等次的产物。Anderson 当年振臂一呼“More is different”迎来了凝聚态物理的大发展。在非晶物质,Complex is different! 通过物质的结构、化学、构型的复杂性,增加熵成为设计和探索非

晶材料的一个思路。

2.5 非晶应用展现的强生命力

非晶材料曾在人类历史进程、科学发展中起到举足轻重的作用,很多应用改变了科学史、人类文明史,如透明玻璃应用于望远镜、显微镜、阴极射线管、温度计、光谱仪的分光镜等科学仪器对早期科学发展作出巨大贡献;窗户玻璃、塑料、玻璃器皿、橡胶等非晶材料给人类生活带来了巨大便利和进步等。表 1 列举了非晶物质科学研究和玻璃材料发展史大事记。非晶物质和材料科学就是一门在服务于人类生活的过程中产生并不断发展的学科,这也是非晶材料具有强大生命力的原因。

非晶合金作为非晶物质和材料家族的新成员,具有非晶物质本征的动力学、热力学特征,兼具高强、高韧性、高硬度、耐腐蚀、抗辐照、独特的表面特性,催化、净成型等特性。过去十几年,条带非晶合金材料已经有大规模的应用,在国内形成很大的产业链(有近百条非晶合金生产企业)和广大的市场。中国已是继日本之后,世界上第二个拥有非晶合金变压器原材料量产的国家,形成了 1000 亿元以上的非晶铁芯高端制造产业集群,为国家电力系统的节能减排作出了积极贡献。然而,块体非晶合金的大规模工业应用一直没有突破,这将给中国的非晶合金应用研究带来了难得的机遇。因为中国已聚集各种创新转化的充足资源,包括人才、设备平台、资本、产业集群、政府新机制、新政策导向等,已形成一种健康的、有利于科技成果产业化的优越环境。未来,块体非晶合金的规模应用有望在中国取得突破。

实际上,非晶合金最成熟和广泛的应用是在非晶磁性方面。目前,第三代半导体材料促使电子技术高频化、高效化、小型化,其产业应用环境要求器件软磁材料高磁感、高频化、低损耗,高频应用环境下对电力电子器件的要求是形状复杂、高频稳定和小型轻量^[28]。目前主流的软磁材料包括纯铁、硅钢、坡莫合金、铁硅铝合金和铁氧体材料等综合高频性能难以兼具,直接影响第三代半导体材料功效的最大限度发挥。多类铁磁性非晶合金具有高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力以及低饱和磁致伸缩,使得它们的软磁性能远优于传统硅钢片材料及传统的晶体结构的磁性材料。Fe 基、Ni 基和 Co 基非晶合金条带和

表 1 非晶物质科学研究和玻璃材料发展史大事记一览表

非晶事件	年代和地点	用途和意义
黑曜石	约75000年前, 旧石器时代	箭头, 削切刀
人工制造玻璃	5000~9000年前, 埃及、巴比伦	装饰品, 护身符
第一个玻璃工厂建立	约公元前1200年前, 埃及	生产空心玻璃管, 有色玻璃器皿, 玻璃成为商品
发现玻璃升温软化特性, 发明玻璃吹制工艺和成型技术	约公元前1世纪, 叙利亚人	生产出酒杯、器皿等形状复杂的用具, 大大拓展了玻璃的用途
发明玻璃制备助熔剂	古罗马	大大降低了玻璃制备原料的熔点, 导致更纯净透明玻璃的大量生产
罗马成为玻璃制造业的中心, 玻璃材料使用普及	公元1世纪, 罗马	东西方对玻璃材料的态度, 使用普及的分水岭
窗户玻璃的发明	1400年, 欧洲	人类聚集区域大大北移
教会介入玻璃生产	9~14世纪, 大马士革、君士坦丁堡和开罗	教堂的高窗玻璃; 导致玻璃技术和工艺不断改进
高质量铅玻璃(光学)	1500年, 英国	显微镜的发明(惠更斯)导致生物学革命; 望远镜的发明(伽利略)、三棱镜(牛顿)导致天文学、光学和近代科学革命
温度计玻璃发明	1603年, 意大利伽利略	温度的精确和可重复测定, 促进实验科学热力学的发展
实验室玻璃器皿	1800年代, 英国法拉第	促进化学革命
科学研究引入玻璃领域	19世纪末, 德国肖特	促进大量新型玻璃材料的发明
非晶热塑性塑料	20世纪40年代, 德国, 美国	改变生活方式
非晶形成理论的建立	20世纪50年代, David Turnbull	促进新的非晶材料的发明
非晶结构模型的提出	20世纪60年代, 英国John Desmond Bernal, 美国Paul J. Flory	加深对非晶物质结构和性能关系认识, 促进非晶物质学科的形成
非晶合金的发明	1960年, 美国Pol Duwez	新的磁性、能源材料
非晶电子结构研究	20世纪60~70年代, 美国Philip W. Anderson, 英国Nevill F. Mott	非晶半导体, 非晶硅太阳能电池
软磁非晶合金	20世纪70年代, 日本增本键	高效能源转换材料
非晶合金带材短流程, 连续喷铸大规模制备工艺	20世纪70年代, 陈鹤寿	铁芯, 5G通信, 新能源汽车, 高速电机等
超纯SiO ₂ 光纤	20世纪70年代, 英国, 高琨	导致通信、网络、信息革命
固相反应非晶化的发明	美国Carl C. Koch, William L. Johnson	非晶涂层、粉末的应用
高性能块体非晶合金	20世纪90年代, 日本A. Inoue, 美国William L. Johnson	非晶合金在高新技术领域广泛应用
高熵合金, 高熵非晶合金	2000年代, 中国台湾, 中国科学院物理所	新材料设计理念, 高新技术领域应用

丝材因为其优异的高频软磁特性已经得到广泛应用。非晶合金条带也已成为各种变压器、电感器、传感器、磁屏蔽材料、无线电频率识别器等理想铁芯材料, 是电力、电力电子和电子信息领域不可缺少的重要基础材料, 其制造技术也已相当成熟, Co 基非晶丝材在传感器、磁探测等领域有广泛的应用。非晶软磁在软磁材料的历史发展历程(图 15), 直接体现了非晶合金软磁, 以及从非晶合金发展出来的纳米软磁和复合材料在软磁材料中的重要地位。

非晶合金在高新技术领域或将有很多重要应用, 如

图 16^[2]所示。例如, 非晶合金在变形中具有自锐特性, 可用于制造新型穿甲弹(图 16(a)); 非晶合金具有抗交变温度、抗腐蚀和抗辐照的特性, 能够满足航天器大型展开机构苛刻的性能要求。NASA 曾经与加州理工学院的 Johnson 教授合作, 利用非晶合金制作太阳风的采集器(图 16(b)), 安装在起源号宇宙飞船上, 成功获得了 0.1 g 太阳物质, 用于研究太阳, 即太阳系的起源。非晶合金也可以作为光学反射部件, 避免了传统金属(金属基复合材料)的晶体组织缺陷对光学加工精度的影响, 其良好的充填流动性、超精密复写

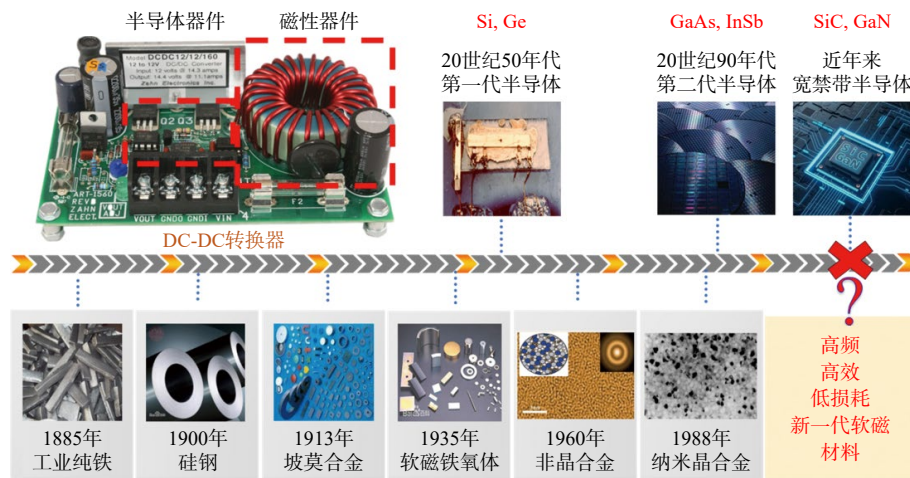


图 15 第三代半导体材料促使电子技术高频化、高效化、小型化,但软磁材料的发展瓶颈直接影响第三代半导体材料功效的最大限度发挥

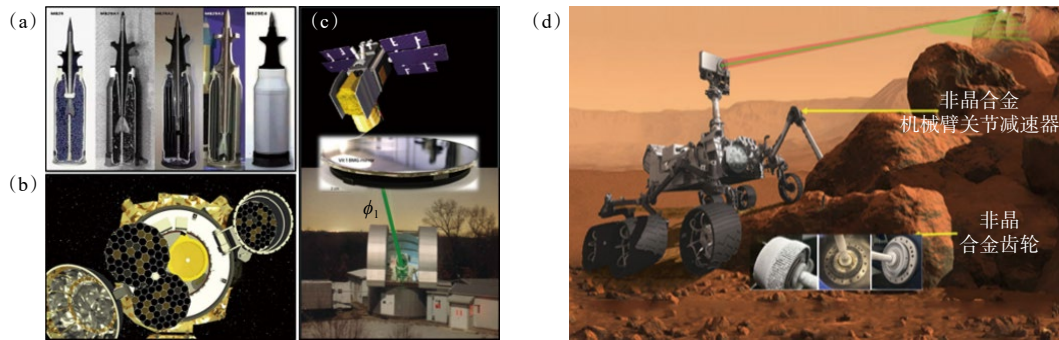


图 16 非晶合金在军事及航天上的应用。非晶合金穿甲弹(a);非晶合金太阳风收集器(b);非晶合金反射镜(c);非晶合金柔性齿轮(d)

特性、近零凝固收缩特性以及数倍于工程材料的硬度与强度特性,可采用精密制造净成型的结构功能一体化反射镜,目前 NASA 正在积极探索具有结构功能一体化的高性能非晶合金光学材料,从而更加适应未来型号短制造流程、高性能光学产品的需求(图 16(c))。此外,非晶合金板具有优异的抗撞击效应,是空天卫星、航天器防护的备选材料。图 16(d)是美国发射到火星上的火星车,其非晶合金齿轮为 NASA 火星登陆计划作出了贡献。火星车的一些机构件齿轮使用非晶合金制成。非晶合金齿轮在没有任何润滑剂、 -200°C 低温以及交变温度和风沙环境下,长时间提供强大的扭矩和平滑转向。

非晶物质的基础和技术研究及应用是相辅相成、交替发展的,非晶材料已成为人类广泛使用、不可或缺的重要材料。天然非晶材料的使用帮助人类进入文明时代。非晶物质(如透明玻璃)在科学起源和发展、艺术的进步、生活质量和品质的提高中厥功至

伟;水泥、塑料等非晶材料改变了人们生活和居住的面貌;光纤把我们带入信息时代;非晶材料的制备和成型技术使得新型非晶材料不断涌现,熵或者序调控成为探索材料的新途径和理念,导致非晶复合材料、高熵材料的发现;非晶合金的发明极大地提升和丰富了金属材料的力学、物理性能,使得古老的金属材料的面貌焕然一新,非晶合金也成为合金材料的新贵;低维非晶材料具有很多独特的功能特性,大大拓展了非晶材料的用途,加深了对非晶物质基本问题的理解;对玻璃转变的认识促使发展了很多高新技术,如保鲜技术、制药技术、储藏技术、分流技术等,并深化对很多自然现象的认识。

3 非晶物质未来发展的挑战与建议

3.1 引入新的材料研发范式(材料基因、数据驱动)

21 世纪以来,材料基因工程、大数据、人工智能

等技术快速发展,深刻地改变着材料研发的格局和范式,极大地推动了材料研发和应用的进步,在非晶物质的研究中引入这些新理念和新方法,将对非晶物质领域的发展产生颠覆性影响,可极大提高新材料的研发效率、降低研发周期与成本。

材料基因工程引入了“理性设计—高效实验—大数据技术”融合的新型研发模式,以显著提升新材料研发效率,实现材料研发范式的变革(图 17)^[29]。这包括发展材料高效计算、高通量实验、大数据等关键技术,构建了“计算、实验、数据库”三大基础创新平台。这些平台深度融合、协同创新,加速了新材料的研发和工程应用。

机器学习通过融合计算机科学和统计学的理念,让计算机拥有自主学习的能力,其核心关联着人工智能和数据科学。机器学习在许多领域已经取得了显著成果,尤其是在材料设计方面,甚至 Norquist 教授研究发现被视为“失败”的实验数据中也包含了重要信息。机器学习为解决非晶材料领域的关键问题提供了新的途径,它可以应用于以下方面:(1) 基于结构

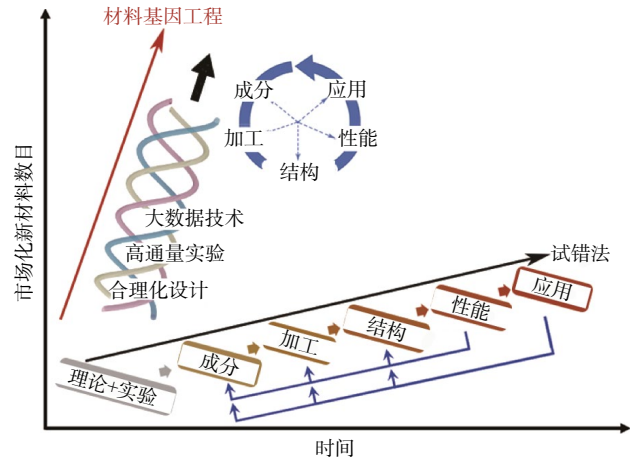


图 17 材料基因工程变革研发模式

相似性分析非晶材料的结构特征;(2) 分析模拟或实验获得的结构、动力学、力学性能等数据,建立结构与性能之间的关联;(3) 分析现有实验数据得到模型,并根据模型预测合金的成分和其非晶形成能力。这些应用已经取得了一些成果,例如,中国科学院物理研究所使用支持向量机方法对可能的新材料进行预测(图 18(a, b))^[30]。基于材料基因组计划发展起来的

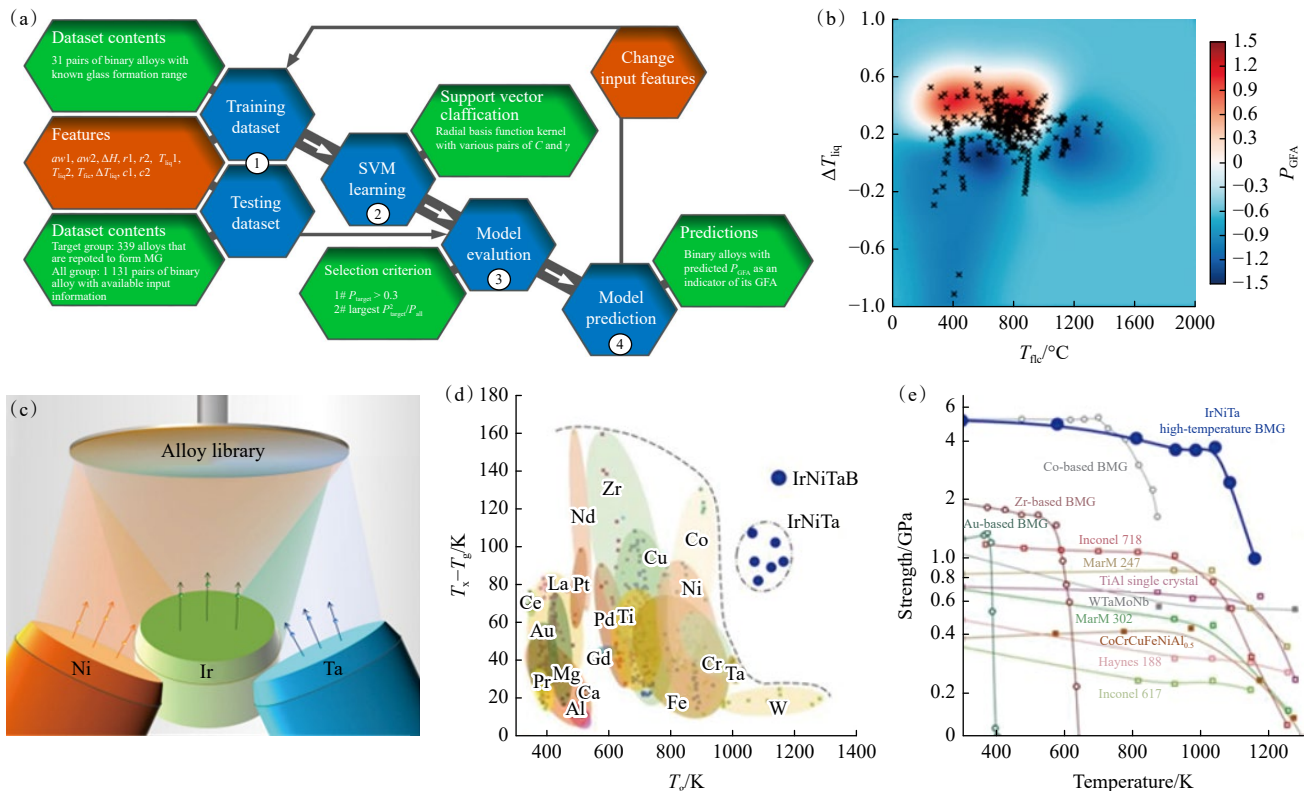


图 18 应用案例。利用数据库进行机器学习建立模型,实现高非晶形成能力的预测(a, b);利用高通量制备表征技术开发出具有高玻璃转变温度和高温高强新型块体非晶合金(c-e)

高通量制备与表征技术为非晶合金新成分的高效开发提供了一种更为理想的途径。例如,美国耶鲁大学 Schroers 团队^[31]利用高通量制备和表征的思路,设计了巧妙的高通量制备和表征方法,优选出 Mg 基非晶合金最大形成能力成分点,比传统的方法要节约时间 3000 倍。2019 年中国科学院物理所汪卫华院士团队^[25]基于材料基因工程理念设计开发出一种全新的 Ir-Ni-Ta-(B)块体金属玻璃,其玻璃转变温度高达 1162 K,且 1000 K 时的强度高达 3.7 GPa,远远超出此前报道的块体金属玻璃和传统的高温合金(图 18(c-e))。这

些工作证实了材料基因工程在非晶合金研发中的有效性和高效率。

另外,数据驱动的材料探索可进一步提升新材料的研发效率。中国科学院物理所柳延辉团队通过建立特定性能或性能关联的数据库,并打通高通量实验和实验数据自动分析的关键环节,实现了非晶合金新材料的高通量、流程化研发。基于这一研发模式,发现了非晶形成能力的 Δq -GFA 新判据(图 19)^[32],大幅提高研发非晶合金新材料的效率,并成功预测出非晶合金新材料体系。

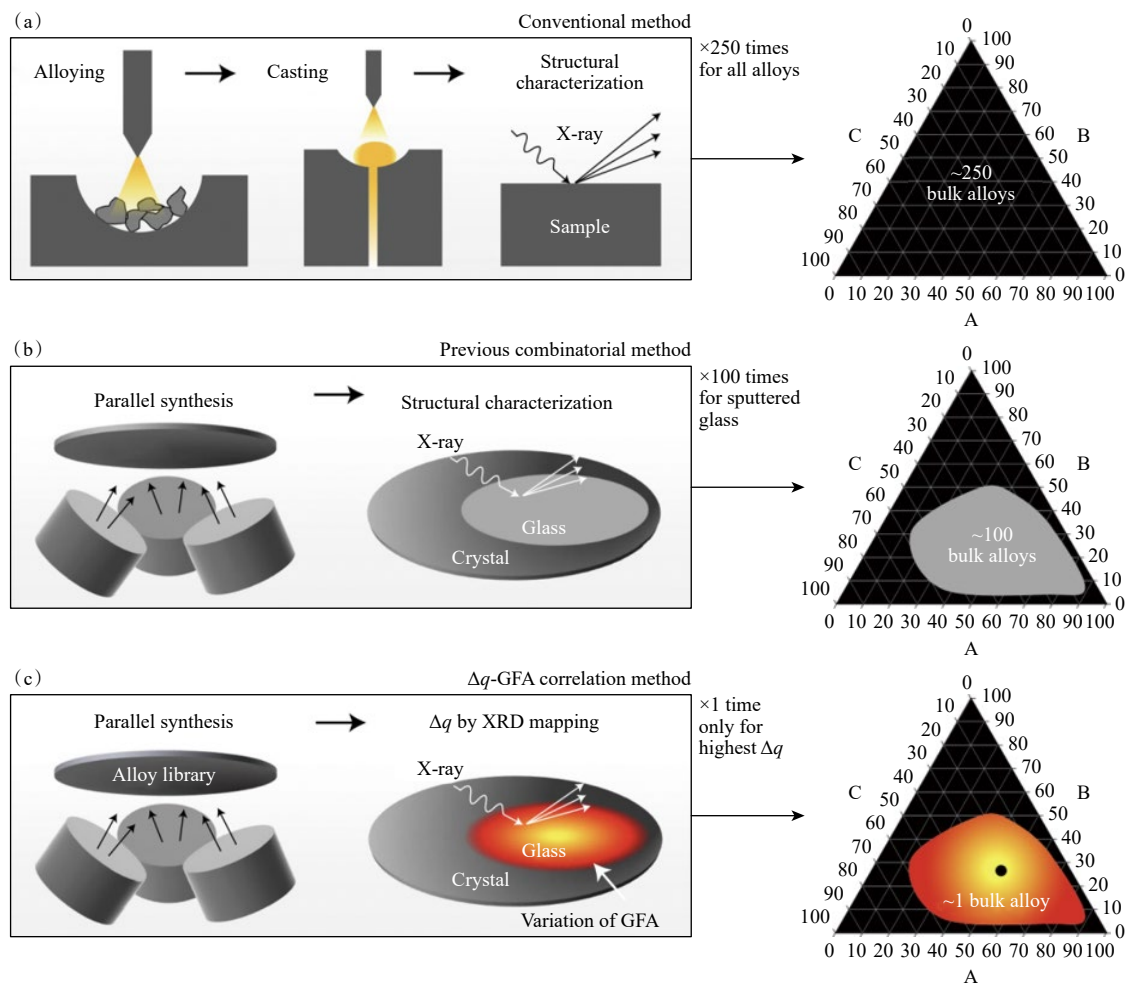


图 19 基于数据驱动的非晶形成能力新判据大幅提升了新体系的开发效率:对于单个三元合金系,常规的试错法~250 个块体合金;高通量~100 个;新判据~个数

材料基因工程的高通量技术颠覆了非晶合金领域 60 年来的材料研发常规路径,为解决新材料探索难题提供新途径,为高性能非晶合金设计提供新思路。基于大数据和机器学习的人工智能引领新一轮科技革命,有望解决合金玻璃形成能力等关键问题,

帮助高效预测新材料。

3.2 重视工艺创新的重要性

回顾传统非晶玻璃的发展历史,助溶剂、吹铸、浮法平板、离子交换等工艺的创新极大地促进玻璃材料的发展与应用;回顾非晶合金的发展历史,每次研

究高峰同样离不开制备工艺的创新发展引起的非晶形成能力突破(图 20)。其中,第 1 代是微米级非晶带材, Duwez 在 1960 年首次采用熔体快速冷却技术制备,开创了非晶合金研究新纪元;第 2 代是基于固态反应非晶化形成的非晶粉末与薄膜,1980—1990 年科学家提出新方法,带来了第 2 个高潮期;第 3 代是毫米级块体非晶合金,从 1990 年至今,通过吸铸工艺创新与合金成分设计共同提高非晶形成能力,形成了第 3 个高潮期(图 20)^[2]。每次技术突破和非晶形成能力研究进展都将带来领域革命。因此,对非晶合金材料而言,未来的突破取决于新工艺创新对非晶形成能力的攻克,从而获得更大非晶形成尺寸的新材料。

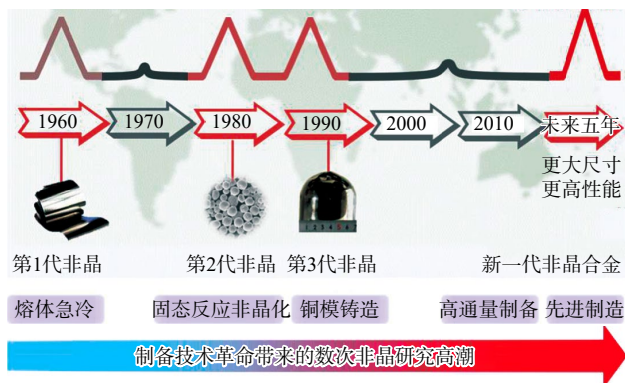


图 20 制备工艺创新对非晶材料的发展起到至关重要的作用

目前,非晶形成能力主要依赖于急冷凝固这种“自上而下”的工艺,实现对抑制形核的控制。先进制造技术基于“自下而上”的策略,可避开了非晶形成的临界冷却速率的限制,同时解决传统成形加工技术难以完成的复杂构件成形制造难题。目前,已经发展出多种非晶的先进制造技术(图 21)^[33],包括 3D 打印技术、声制造技术、光制造技术、基于半固态成形、基于超塑性的连续成形,以及原子制造等,这些技术为突破非晶形成尺寸与非晶形成体系的限制提供了新工艺技术。由此可见,制备和加工工艺的创新一直是非晶材料发展与应用的关键所在,非晶材料未来的发展与突破同样离不开工艺创新。

3.3 推动非晶物质与其他学科领域的交叉融合

随着科技不断进步,不同科学研究领域之间的交叉融合逐渐成为主流趋势,这种交叉可能带来跨越性的发展和突破性的成果。非晶物质科学领域也不例外,通过多学科的交叉,为解决该领域长期存在的关

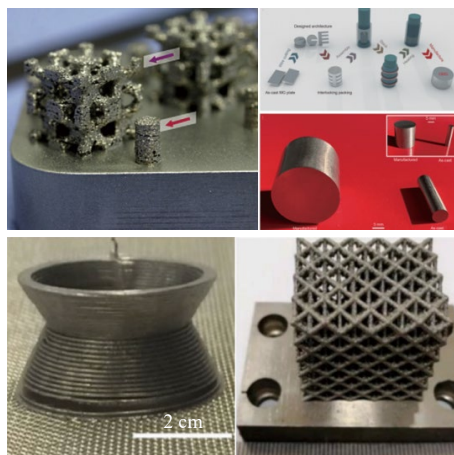


图 21 基于先进制造技术有望突破非晶形成尺寸与复杂成形难题

键科学问题提供了新的研究思路,同时也可能建立和发展出具有重要科学意义和潜在应用价值的前瞻性研究方向(图 22)^[2]。这种跨学科的渗透和深入融合是非晶物质科学发展的趋势。



图 22 非晶物质研究与其他学科领域的交叉融合

在结构材料方面,非晶材料如玻璃、混凝土、非晶聚合物、橡胶和非晶合金在力学性能和综合性能方面取得了显著成功。相较于传统结构材料,非晶材料在极端条件下表现出更高的强度、断裂韧性和屈服强度,如锆基非晶合金在穿甲、破甲弹中的应用。非晶合金的发现还催生了新型结构材料家族,如高熵合金、准晶、金属间化合物等。

在力学方面,非晶物质的力学行为与晶态固体材料迥然不同,涉及多个方面,包括塑性流动机制、连续介质本构模型、形变机制、局域化剪切带、强度理论和断裂机理。对非晶物质力学行为的研究将有助于丰富和发展传统力学理论。

非晶体系类似于活性物质体系和生命体系,是典型的远离平衡态的系统。非晶物质形成的玻璃转变提出了新问题和挑战,对热力学和非平衡态统计物理学的发展产生促进作用。

在信息科学方面,非晶材料包括合金导体、半导体和绝缘体,满足信息材料对多功能特征的集成要求。非晶材料在信息科学领域的广泛应用包括新型微纳器件的设计原理、工作机制、集成和可靠性,以及自旋电子学器件等。

在能源、环境、催化和生物医用材料领域,非晶合金展现了广泛的应用潜力。其在储氢、废水处理、光敏材料等方面的性能使其成为最具潜力的材料之一,同时在生物医用材料领域有着广泛的研究价值和应用前景。

在空间材料领域,对月壤玻璃的研究可以获取月球起源和演化的重要历史信息。月壤玻璃可以像天然照相机一样记录下不同年代月球内部和表面的演化信息,可作为容器长期保存 ^3He 和液态水等月球资源,作为月球时钟记录火山活动和撞击事件的编年史。利用非晶合金制造的反射镜、柔性齿轮可为人类建设月球基地、探索火星资源发挥不可替代的作用。

3.4 发挥先进表征技术及大科学装置的优势与作用

新的实验技术是解决非晶物质基本科学问题和技术难题的关键,目前非晶材料的研究模式长期依赖于科学直觉和经验积累,要想实现快速发展的新模式,需要充分利用和结合现代先进表征技术与大科学装置,获取非晶物质在原子、电子结构层面的结构信息,并建立结构和性能内在的相关性。如利用消球差电子显微技术成功实现了埃尺度相干电子衍射,可在真实空间检测非晶材料原子近邻及次近邻结构信息;采用AET实现对非晶材料进行多角度成像并结合计算机重建出三维原子结构。大科学装置如散裂中子源、同步辐射光源在研究非晶材料的原子尺度结构方面具有不可替代的作用;同步辐射光源中的X射线光子关联谱可覆盖更小的空间尺度和更慢的时间尺度,为

原子尺度慢动力学研究提供了更强有力的手段;基于同步辐射的自由电子激光具有高亮度、宽波段、高偏振、高相干性等特点,为在高空间分辨率和高时间分辨率下研究非晶物质的动力学行为提供可能。阿秒光源装置具有超高时间分辨率和亚原子尺度的超高空间分辨率,可用于获取液体到非晶转变过程中原子、电子动力学演化的高时空分辨图像,为破解玻璃转变的世纪难题提供了可能。这些先进表征技术和大科学装置可为非晶材料科学家快速发现新材料、洞察材料物理、揭示材料新现象的强大作用和潜能提供助力。

3.5 打造产学研用全链条创新模式

在非晶合金领域,中国已经成为国际非晶合金材料及其应用技术研发的重要力量,当前中国在非晶材料基础研究方面已处于国际先进水平,中国相关专利申请量全球排名第一,然而却缺少如日立金属这样的国际水平龙头企业;我们有庞大的非晶合金应用市场,然而目前市场上使用的材料体系多是国外团队早期开发的体系,缺乏具有国内知识产权或者牌号的非晶合金体系。主要原因是国内强大的实验室非晶合金研发能力与企业、市场之间缺乏有效衔接,使得“产学研用”结合不紧密、创新链和产业链不完整。面对这种现状,必须将材料基础研究、工业化制造、应用技术融合发展,集中开发具有自主知识产权的非晶材料工程化、产业化核心制备技术,推动非晶材料面向能源、信息、高端制造等高新产业的应用技术发展,形成以企业为主体、市场为导向、“产学研”相结合的技术创新体系,为中国非晶材料的市场开发和工程化应用提供有力的技术支撑。

目前,中国经过数十年的基础与应用基础研究积累,已经聚集起各类优势资源,包括最强大的青年科学家队伍,最庞大的产业化工师队伍,最齐备的规模化制备设备与产业化平台,最好的政策导向与成果转化机制。因此,进一步推进实验室研发和企业应用相互合作,打造产学研用全链条创新模式和协作关系,制定健全中国非晶合金的生产制造、使用标准,引导非晶合金产业科学、合理、规范发展,坚持非晶材料产业化技术工艺、应用技术并重的原则,抢占国际非晶材料应用技术制高点,非晶材料的未来必将属于中国。

4 结语

剑桥大学历史学家 Macfarlane 在他的著作《The Glass Bathyscaphe》中指出,非晶态玻璃之所以重要不仅在于它能够给我们提供遮蔽和储藏的场所,更重要的是它拓展了我们人类两个重要的器官——眼睛和大脑的功能。一个没有非晶物质的世界将会动摇现代化进程的根基:基于显微镜认识细胞、病毒和细菌后,人类的寿命得以延长;获得基因知识后,明白人何以为人;基于望远镜明白天文学知识后,了解到我们在宇宙中所处的位置;基于镜子让我们第一次能够看清自己,开启了人在社会重新定位的序幕;基于光纤我们真正实现了古人梦寐以求的“千里眼”和“顺风耳”,使距离不再遥远。对这些概念性突破而言,地球上没有任何东西比非晶物质(玻璃)的影响更大。非晶物质不仅给人类的生活带来无限的便利与遐想,更重要的是,对非晶物质科学的研究孕育着无限的可能,已成为科研工作者新理念、新思想的源泉。非晶物质,让未来变得更美好!

参考文献 (References)

- [1] Zhao R, Shen L Q, Xiao D D, et al. Diverse glasses revealed from Chang'E-5 lunar regolith[J]. *National Science Review*, 2023, 10(12): nwad079.
- [2] 汪卫华. 非晶物质——常规物质第四态: 第二卷[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [3] Klement W, Willens R H, Duwez P. Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys[J]. *Nature*, 1960, 187(4740): 869–870.
- [4] Damasceno P F, Engel M, Glotzer S C. Predictive self-assembly of polyhedra into complex structures[J]. *Science*, 2012, 337(6093): 453–457.
- [5] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. *物理学进展*, 2013, 33(5): 177–351.
- [6] Miracle D B. A structural model for metallic glasses[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(10): 697–702.
- [7] Hirata A, Guan P F, Fujita T, et al. Direct observation of local atomic order in a metallic glass[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(1): 28–33.
- [8] Miao J W, Ercius P, Billinge S J L. Atomic electron tomography: 3D structures without crystals[J]. *Science*, 2016, 353(6306): aaf2157.
- [9] Wu Z W, Chen Y X, Wang W H, et al. Topology of vibrational modes predicts plastic events in glasses[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2955.
- [10] Liu Y H, Wang D, Nakajima K, et al. Characterization of nanoscale mechanical heterogeneity in a metallic glass by dynamic force microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(12): 125504.
- [11] Huang B, Ge T P, Liu G L, et al. Density fluctuations with fractal order in metallic glasses detected by synchrotron X-ray nano-computed tomography[J]. *Acta Materialia*, 2018, 155: 69–79.
- [12] Wagner H, Bedorf D, Küchemann S, et al. Local elastic properties of a metallic glass[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(6): 439–442.
- [13] Wu Z W, Li M Z, Wang W H, et al. Hidden topological order and its correlation with glass-forming ability in metallic glasses[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6035.
- [14] Wang W H. The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses[J]. *Progress in Materials Science*, 2012, 57(3): 487–656.
- [15] Yi J, Huo L S, Zhao D Q, et al. Toward an ideal electrical resistance strain gauge using a bare and single straight strand metallic glassy fiber[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(4): 609–613.
- [16] Xian H J, Cao C R, Shi J A, et al. Flexible strain sensors with high performance based on metallic glass thin film[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(12): 121906.
- [17] Pei C Q, Zhang B, Xie J Y, et al. Superlattice-shelled nanocrystalline core structural design for highly sensitive GMI sensors[J]. *Acta Materialia*, 2023, 255: 119088.
- [18] Chang C, Zhang H P, Zhao R, et al. Liquid-like atoms in dense-packed solid glasses[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(11): 1240–1245.
- [19] Zhao Y, Shang B S, Zhang B, et al. Ultrastable metallic glass by room temperature aging[J]. *Science Advances*, 2022, 8(33): eabn3623.
- [20] Chen Z Q, Zhao Y, Chi X, et al. Geological timescales' aging effects of lunar glasses[J]. *Science Advances*, 2023, 9(45): eadi6086.
- [21] Zhang B, Zhao D Q, Pan M X, et al. Amorphous metallic plastic[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(20): 205502.
- [22] Li L Y, Li X, Huang Z Y, et al. Joining of metallic glasses in liquid via ultrasonic vibrations[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6305.
- [23] Li X S, Zhou J, Shen L Q, et al. Exceptionally high saturation magnetic flux density and ultralow coercivity via an amorphous-nanocrystalline transitional microstructure in an FeCo-based alloy[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(50):

- 2205863.
- [24] Zhou J, Li X S, Hou X B, et al. Ultrahigh permeability at high frequencies via A magnetic-heterogeneous nanocrystallization mechanism in an iron-based amorphous alloy[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(40): 2304490.
- [25] Li M X, Zhao S F, Lu Z, et al. High-temperature bulk metallic glasses developed by combinatorial methods[J]. *Nature*, 2019, 569(7754): 99–103.
- [26] Li F C, Li M X, Hu L W, et al. Achieving diamond-like wear in Ta-rich metallic glasses[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(22): 2301053.
- [27] Li F C, Zhang Z B, Liu H R, et al. Oxidation-induced superelasticity in metallic glass nanotubes[J]. *Nature Materials*, 2024, 23(1): 52–57.
- [28] Silveyra J M, Ferrara E, Huber D L, et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world[J]. *Science*, 2018, 362(6413): eaao0195.
- [29] 宿彦京, 付华栋, 白洋, 等. 中国材料基因工程研究进展[J]. *金属学报*, 2020, 56(10): 1313–1323.
- [30] Sun Y T, Bai H Y, Li M Z, et al. Machine learning approach for prediction and understanding of glass-forming ability[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, 8(14): 3434–3439.
- [31] Ding S Y, Liu Y H, Li Y L, et al. Combinatorial development of bulk metallic glasses[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(5): 494–500.
- [32] Li M X, Sun Y T, Wang C, et al. Data-driven discovery of a universal indicator for metallic glass forming ability[J]. *Nature Materials*, 2022, 21(2): 165–172.
- [33] Cheng Z, Ouyang D, Pauly S, et al. 3D printing of bulk metallic glasses[J]. *Materials Science and Engineering: Reports*, 2021, 145: 100625.

Current status and future prospects of cutting-edge development of amorphous materials

KE Haibo¹, ZHOU Jing¹, TONG Xing¹, WANG Weihua^{1,2*}

1. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This article focuses on amorphous matters and reviews recent advances in amorphous materials and physics. More recently, more than 30% of the lunar soil collected by China's Chang'e-5 mission was found to be glassy, further confirming the widespread existence of amorphous matter in the universe. Topological order and inhomogeneity may be hidden behind the seemingly chaotic structure of amorphous materials, so amorphous matters have strange genetic, sensitive and relaxation behaviors, and show a series of excellent physical and chemical properties, such as extreme stability, super-plasticity, super mechanical behavior and excellent soft magnetic properties. The new generation of Zr-based and Fe-based amorphous alloys developed based on order regulation and high flux technology are successfully applied to core components such as folding mobile phone hinges and new energy vehicle motors, indicating that amorphous matters have irreplaceable application advantages. The future development of amorphous matters should focus on introducing a new paradigm of material research, attaching importance to the importance of process innovation, promoting the cross-integration of multi-disciplinary fields, giving full play to the advantages of advanced characterization technology and large scientific devices, and creating a whole-chain innovation model for production, university and research, so as to actively promote the rapid development of amorphous materials and physics, and expand the application of amorphous matters in high-tech fields. Make the future of mankind a better place.

Keywords amorphous matter; glass; amorphous alloy; order regulation ●



(责任编辑 赵庆圆)