

应变玻璃拨开马氏体相变研究中的“疑云”

▶ 本报记者 李洋

在材料科技的漫长探索中,“既强且柔”始终是近乎理想的研发目标:像钢一样承受巨力而不易断裂,犹如塑料般灵活弯曲而不僵硬。这一特性曾被视为科幻构想,直到应变玻璃态合金的出现,让梦想照进现实。

“我们发现了一种新的物质状态——应变玻璃,它不仅是科学上的新奇现象,更重要的是它的独特性质使其在多个重大工程中展现出非凡价值,并有望在生物医疗、机器人等领域获得广泛应用。”在近日举行的甬江实验室第三届全球青年科技精英论坛上,甬江实验室智能材料研究中心主任任晓兵以翔实的数据和丰富的案例,向与会者分享他在应变玻璃领域的最新科研进展与应用探索。

拨开迷雾 破解百年科学“疑云”

应变玻璃,是一种兼具晶体有序性和非晶玻璃相变特征的全新物质状态。该发现突破了百年来科学界对固态物质的晶体-玻璃二元认知基本框架,具有重要的科学意义。

“我们发现应变玻璃这种新物质状态,是从研究一个困扰科学界很久的问题开始,即金属合金里的‘预马氏体条纹相’到底是什么。这个现象1960年就在多种合金中被观察到了,但一直没人能说清它的本质。”任晓兵说,这朵“飘浮在百年马氏体研究大厦上空的‘疑云’”,虽然今天已经普遍被观察到了,但却无人能解释其物理本质。

关键的突破灵感来自一次乘飞机旅行的观察。当看到万米高空中的(-50摄氏度)的云层时,任晓兵意识到这些既非气态、液态也非固态的冰晶体浮云,实际上代表了一种独立于传统三态(气-液-固)的特殊物态。这个思考激发了他的灵感:晶体中的“预马氏体条纹相”是否是一种基于晶态的“云”——一种特殊固体物态?

顺着这个思路,他进一步思考固体的两种基本状态:晶体和非晶体(比如玻璃)。晶体像冰,是液体(水)在确定温度值状态凝固而成,原子排列整齐;非晶体像果冻,是液体变黏稠后冻成,原子排列乱,而且能像拔丝地瓜那样拉丝。那金属里的“固体变固体”(比如马氏体相变)会不会也有类似情况?普通的马氏体相变就像液体变晶体,可以看成晶体中的原子围绕

平衡位置的无规振动(他称此状态为“应变液体”)在某个“凝固点”以下整齐地振动到新的位置;那会不会有一种像玻璃一样的状态,上述“应变液体”在降温时的无序振动被逐渐冻结,就像固体里的“果冻”?

2005-2007年,任晓兵团队在世界上首次发现了一类奇特的“应变玻璃态合金”,它兼具晶体的有序结构和非晶体的黏弹性行为,并将其命名为应变玻璃(strain glass)。它们通过两个关键实验证实这一发现:一是发现它虽是晶体但具有非晶体类似的黏稠性,二是发现它具有类似非晶能拉丝一样的特性,这些关键实验证实“预马氏体条纹相”的确是一种基于晶体的特殊玻璃——应变玻璃。经过数年深入探究,团队提出了相关理论,这一发现开辟了固态物质研究的新领域,为设计全新特性材料提供了可能。

刚柔并济 应变玻璃独特魅力

从专业角度定义,应变玻璃是一种具有“晶体-玻璃二象性”的新型物态:在微观上保持晶体长程有序结构,宏观上却表现出典型玻璃特征(黏弹性、宽温域转变等)。

对此,任晓兵解释说:可以用“晶体中的应变浮云”形象比喻:就像蓝天中飘浮的云朵(短程有序的纳米马氏体微区)与大气(晶体基体)共存,这些“应变浮云”赋予材料独特的力学响应特性;也可以把应变玻璃理解成晶体状态下的一种特殊“果冻”,它在微观结构上是晶体基体中分布着动态响应的“活”纳米马氏体微区,物理特性上兼具宽温域响应(类似玻璃)和高强韧性(继承晶体优点)。

应变玻璃的发现,对于凝聚态物理的发展,既拓展了固态相变理论,又为设计新型功能材料提供了新思路,可能引发对传统物态分类的重新思考。与传统材料相比,应变玻璃最引人注目的独特之处是其“强柔并济”的特性。

任晓兵将其比作生活中的美



任晓兵(左)与团队成员分析实验结果。

食“拔丝红薯”。他解释道,应变玻璃与黏稠态的糖在物理上是相似的,糖浆在凝固过程中并没有明确的凝固点,而是在一个宽温域下逐渐硬化,这不同于水结冰这类有固定凝固点的转变。应变玻璃合金的这种特性能够提供宽温域下的稳定性能,这对于材料的实际应用是非常关键的。

出于对未来大规模生产的考虑,该团队选择了一种商用镍钛合金作为基础材料,这种合金具有高强度的潜力,而且在市场上容易获取。他们首先通过冷变形的方法使其呈现高强度的应变玻璃状态,然后开始尝试改变各个工艺参数,密切观察材料强度和柔性的变化情况。

2024年9月,任晓兵团队在《自然》(Nature)杂志报道中提到的这种兼具钢材强度与塑料柔性的“强柔并济”合金材料,是应变玻璃领域最新最前沿的研究成果,显示了应变玻璃的独特魅力。它利用应变玻璃在宽温域对外力的响应特性,同时通过工艺过程对应变玻璃的基体加入“马氏体种子”进一步加大材料对外力的响应幅度,进而获得与高分子材料接近的超柔特性同时保持超高强度,实现了“既强且柔”的罕见特性。科学新闻杂志《新科学家》(New Scientist)称该材料“可能催生诸多未来技术”。

任晓兵坦言,在研究过程中,团队也遇到过质疑,一个常见的质疑是:“你把普遍观察到的‘预马氏体条纹相’取了一个

新名称——应变玻璃,这算是新发现吗?”

对此,任晓兵团队的回答是:这是“知其然”和“知其所以然”的关系,就像普遍观察到的自由落体现象和理解背后的万有引力的关系。60年前开始大量报道的“预马氏体条纹相/纳米马氏体”现象只是一个实验观察,但无人能解释其物理本质及起源,而他们发现它具有玻璃的基本特征则确立了它的物理本质是晶体-玻璃二象性两种矛盾状态的对立统一体;而对该现象物理本质的揭示则带来利用该新物态设计研发全新材料的重大机遇,这是仅知道“预马氏体条纹相”这个现象所无法达到的。

应变玻璃的发现,除了突破传统认知框架外,对凝聚态物理、材料科学等相关学科的理论发展也具有潜在影响。就像波粒二象性开创了量子力学,进而催生了量子计算机等一系列成果一样,应变玻璃这一兼具晶体和非晶体特性的新物质状态,其发现也有望在未来推动相关学科和技术的重大发展。

跨界赋能 为材料应用打开新大门

应变玻璃的发现,为材料科学打开了新的大门。这种材料的特性如同“拔丝红薯”中的糖——没有明确的凝固点,在宽温域内逐渐变化,从-100摄氏度到100摄氏度,甚至接近绝对零度(0K)的极端环境下,性能依然稳

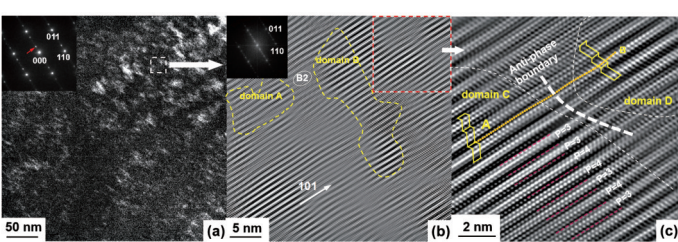
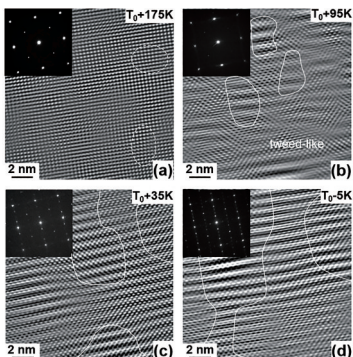
定。“应变玻璃已在一些尖端技术中完成应用落地。这些场景对材料的要求极为苛刻,既要在极宽温域保持超大弹性与超高柔性,能通过温度触发实现大变形,又得具备超高强度,而应变玻璃合金的特性恰好完美匹配这些需求。”任晓兵补充道,其他方向的应用研发也在紧锣密鼓推进:无折痕超柔薄板、生物医疗用超柔导丝、基于应变玻璃的减震器件等,都在从实验室到实用化的路径上稳步前行。他还透露,未来这种材料有望拓展到人工心脏、人形机器人、人工肌肉等更广阔领域,提供更多此前难以实现的技术可能。

如今,这种材料已从实验室走向医疗、新能源等领域的应用测试。胃镜检查给人们带来的痛苦或将成为历史,用它制成的柔性光纤器械,既能深入体内又不损伤组织,让医疗检查更舒适。风电产业的维护难题有望解决:叶片根部的紧固件采用这种材料后,通过8%的宏观收缩实现“永不松动”,从热力学稳定态锁定连接,彻底告别海上、山顶风电的高危人工检修,甚至好莱坞电影中机器人一拳击穿墙壁的场景,也因它的超高强度与柔性结合成为可能:用它制成的人工肌肉,性能远超人体肌肉,却能像生物组织般自然驱动。

甬江实验室等研究机构正全力推动其大规模产业化落地。“当前只是应变玻璃应用研究的开始,今后还有巨大的潜力有待挖掘,期待与工程界一起探讨未来的应用。”任晓兵对未来充满期待:目前应变玻璃研究主要集中在金属合金中,而应变玻璃从理论上不受具体材料限制,可以在陶瓷中实现,初步的研究发现它可以实现陶瓷的低温增韧;还可以在具有电学性质和磁学性质的材料中实现,这些材料与应变玻璃的结合会实现超高的电致伸缩或磁致伸缩特性。

或许不久的将来,人们可以看到机器人如人类般灵活运动,飞行器机翼像鸟翼般自然伸缩,风电叶片在无人维护下稳定运转,而其背后正是这种应变玻璃态合金在默默发挥作用——用科技的力量,让“刚柔并济”从想象变为现实。

其实,这种材料的意义,远不止于技术突破。当它从实验室走向生产线,从尖端领域渗透到民生领域,改变的不仅是产品性能,更是人类应对极端环境的信心。那些曾经因材料限制而搁置的构想,正随着应变玻璃态合金的成熟,一步步走向现实。



左图:应变玻璃“浮云”在170摄氏度宽温域中的响应。

右图:应变玻璃——飘浮在晶体中的“浮云”(可动的晶格应变微区)及其放大图。(受访者供图)