磁相变材料专题·编者按

相变行为普遍存在于物质世界,是材料学和凝聚态物理领域关注的基本现象和重要课题.经典相变伴随着体系的对称破缺,可以由以序参量为基本热力学参量的朗道相变理论完美地描述.相变过程中,不同物态之间相互转化,伴随着丰富的临界现象.作为固态相变中的一类相变,马氏体相变不发生原子的长程扩散,只有原子的短程位移.温度、应力等外部自由度可以驱动马氏体相变的发生,并对外输出应变、电阻变化、潜热等物理效应.马氏体相变的研究已有一百多年的历史,且作为形状记忆合金材料的物理基础已在人类生活中有实际应用,并使得形状记忆合金成为一类重要的智能材料,在未来智能技术中表现出重要的应用前景.

自从磁场驱动马氏体相变于2006年被报道以来,磁场成为调控磁性形状记忆合金的一个新变量.磁性形状记忆合金的研究也促进了磁相变材料的发展.狭义的磁相变材料是指兼有磁性和马氏体相变的磁性形状记忆合金.类似于铁电性与铁磁性耦合的多铁材料,磁性形状记忆合金材料兼有铁弹性和铁磁性,也属于一类多铁性材料.广义的磁相变材料还可以包括居里相变、铁磁-反铁磁相变等具有较弱的磁晶协同变化的相变材料.这类磁相变材料主要是指传统的磁热/磁制冷材料.基于相变行为,磁相变材料可以表现出磁驱动应变、磁电阻、磁热效应、热磁发电等不同的物理效应,有望应用于磁驱线性马达、磁驱动机械手、磁传感器、磁制冷、热磁发电机等方面.

作为广义的磁相变材料,传统磁热材料如LaFeSi和MnFePSi等一直受到持续的研究.在提高这些材料晶格熵变的同时,人们更加关注其力学性能、加工成型、导热性、抗腐蚀性及循环稳定性等.当前,磁热材料研究的发展趋势表现为:利用机器学习方法来预测新材料,结合基于材料基因工程的高通量制备表征技术来探索新的材料体系;用金属增强相复合、塑性变形、增材制造等特殊工艺改善填料几何结构以构建宽温区、大磁热效应的工质;广泛利用各类大科学装置表征技术深入研究磁热效应及相关材料体系;开发液氢至液氮温区的基于磁相变的富重稀土化合物,以及液氢及以下温区的稀土金属盐、稀土有机无机杂化材料和磁性量子临界材料等.

基于磁性马氏体相变的磁相变材料可分为四个家族,分别为FePt/Pd合金、Heusler合金、MM'X六角合金、全过渡族d-metal Heusler合金.半个世纪以来,Heusler合金一直是磁相变材料的主流体系.在Heusler合金中,先后出现了一系列磁性形状记忆合金和磁场驱动形状记忆合金.在磁场驱动磁相变的研究中,Co元素“铁磁激活效应”的提出是一个重要策略,这大大增加了母相和马氏体两相间的磁化强度差,实现了一系列磁场驱动的相变.MM'X是过去10年被集中研究的另一个磁相变体系.在这个体系中,发现了“居里温度窗口”效应.在两相居里温度之间,利用顺磁和铁磁态之间大的磁化强度差,实现磁场驱动马氏体相变.同时,为了实现磁性和相变的同步调控,还提出了“等结构合金化”的方法,这促进了一系列磁相变新材料的发现.

在具有优异性能的同时,磁相变材料也存在一些缺点.作为金属间化合物,磁相变材料的典型缺点就是本征脆性,这一度成为磁相变材料实用化的瓶颈.2015年,全过渡族d-metal Heusler合金应运而生.这类磁相变材料可以具有已有磁相变材料的相变行为,并具有传统磁相变材料所不具有的特性,即优异的力学性能.这得益于这类合金中的d-d共价键所带来的较强的韧性.力学性能的优势使得磁相变材料在实际应用中具有良好的力学稳定性.

引用格式: 刘恩克, 刘剑, 王敦辉. 磁相变材料专题·编者按. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 067501

Liu E K, Liu J, Wang D H. Special topic: Magnetic phase-transformation materials (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 067501, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0144

和机械可加工性,有望打破传统磁相变材料脆性大的应用瓶颈.

利用晶格相变的热效应进行固态制冷一直是马氏体相变材料的一个重要应用出口. 在经历了对磁相变材料磁热效应的长期研究之后,近年来固态制冷已经展现出以磁场、应力场、电场等多场耦合调控多卡效应的趋势. 其中,应力场下的弹热及压热效应成为重要的研究方向. 而该方向所面临的问题之一依然是材料的本征脆性,且这一问题在力场循环载荷条件下尤显突出. 全过渡族d-metal Heusler合金极大地解决了这一方向面临的瓶颈问题,还表现出更加显著的相变热效应,或将成为未来固态相变制冷的理想工质之一.

当前,磁相变材料的研究已在国际上形成了规模,对磁相变物理的理解也已经逐渐深入而全面,人们正积极寻找磁相变材料在智能社会发展道路上的应用出口. 其中,基于相变热效应的多场调控下的固态制冷技术正蓬勃发展. 中国在磁相变材料及相变热效应制冷领域具有相当大的研究规模,已经在国际上形成了重要的影响力,并在很多地方引领这个方向的发展.

为及时体现中国磁相变材料的发展现状,特组织本期专题,以综述、学术论文和观点的方式,涵盖了磁性马氏体相变材料、磁热材料、磁结构表征、热效应表征、磁相变理论计算等方向,共计19篇论文. 这些论文将使读者对磁相变材料的研究现状、发展趋势和应用前景有全面、深入的理解,推动该领域相关技术的交流和进步,并为相关人员提供学科发展方向上的认识和帮助.

刘恩克¹, 刘剑², 王敦辉³

1. 中国科学院物理研究所, 北京 100190

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201

3. 杭州电子科技大学, 杭州 310018