

专题: 应用磁学

## 高压调控层状磁性材料性质的研究进展\*

岳栋栋<sup>1)</sup> 高鑫<sup>1)</sup> 牟从普<sup>1)2)†</sup> 柳忠元<sup>1)</sup> 翟昆<sup>1)‡</sup>

1) (燕山大学, 高压科学中心, 亚稳材料全国重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学理学院, 河北省微结构材料物理重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2026年1月21日收到; 2026年2月10日收到修改稿)

二维层状范德瓦耳斯材料因其独特的层状结构和优异的性能, 在许多领域中展现出巨大的应用潜力. 相较于三维块体材料, 层状体系层间以弱范德瓦耳斯力耦合, 结构上具有更强的可压缩性, 尤其层间方向上对压力更为敏感. 高压可拓展物相空间, 实现新材料的合成或亚稳相的截留; 在微观上可显著调控其层间结构与相互作用, 引起电子结构的转变等, 从而带来丰富的物理性质. 本文主要介绍与磁性相关的原位高压技术, 并总结高压下层状磁性材料中出现的典型新现象与调控机制, 最后展望高压与多种调控手段的结合, 以及高压相截留在发现新型磁性物态与器件材料中的前景.

**关键词:** 范德瓦耳斯磁性材料, 高压, 亚稳材料, 磁性调控**DOI:** 10.7498/aps.75.20260107**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260107

## 1 引言

高压是一门交叉技术, 与地球科学、材料科学、凝聚态物理等领域具有深度的融合. 当物质置于远超日常环境的高压条件 (可达百万个大气压力量级) 下时, 其晶体结构、电子结构往往会发生显著改变, 带来一些新奇的物理化学现象. 通过高压手段, 可以实现全新的相变路径 (如图 1 所示), 从而合成常压下难以稳定的新材料, 例如金属性氢、非常规超导与强关联新相等, 是探索新材料的重要途径<sup>[1-10]</sup>. 高压科学由此成为推动材料发现与物性调控的重要“加速器”, 也为理解结构-电子-多体相互作用之间的内在关联提供了独特平台.

近年来,  $\text{CrI}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$  等材料被发现即使在单层/少层条件下仍可保持长程磁有序, 开启了范德瓦耳斯磁性材料的研究热潮<sup>[11,12]</sup>. 这类材料

的优势包括: 1) 单原子层厚度下依然能够保持长程磁有序, 具备实现超高密度存储的应用潜力<sup>[13]</sup>; 2) 由于层间通过弱范德瓦耳斯力结合, 使其在异质结构构筑时可以打破晶格匹配的限制, 为自旋电子器件的集成提供了更多可能<sup>[14-16]</sup>; 3) 弱范德瓦耳斯力层间结合与原子级厚度, 使其对外界刺激具有高度可调性, 易于通过外场 (电场、应变、压力和化学调控等) 调控磁交换、磁晶各向异性等微观作用, 而改变材料的宏观性质<sup>[17-20]</sup>.

高压是调控结构的重要手段, 在层状范德瓦耳斯磁性材料中展现出尤为突出的优势. 与三维块体磁性材料相比, 层状体系由于层间弱范德瓦耳斯力连接, 结构上具有更强的可压缩性, 尤其是层间方向上对压力更为敏感. 图 1 总结了高压对层状磁性材料的调控作用. 如图 1 所示, 在外加压力下, 体系容易触发层间自由度的重构过程: 层间距压缩、层间相对滑移、堆垛方式改变等<sup>[21-25]</sup>, 这些都会显著

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1204001)、国家自然科学基金 (批准号: 52272127) 和河北省自然科学基金 (批准号: E2023203002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: congpumu@ysu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: kunzhai@ysu.edu.cn

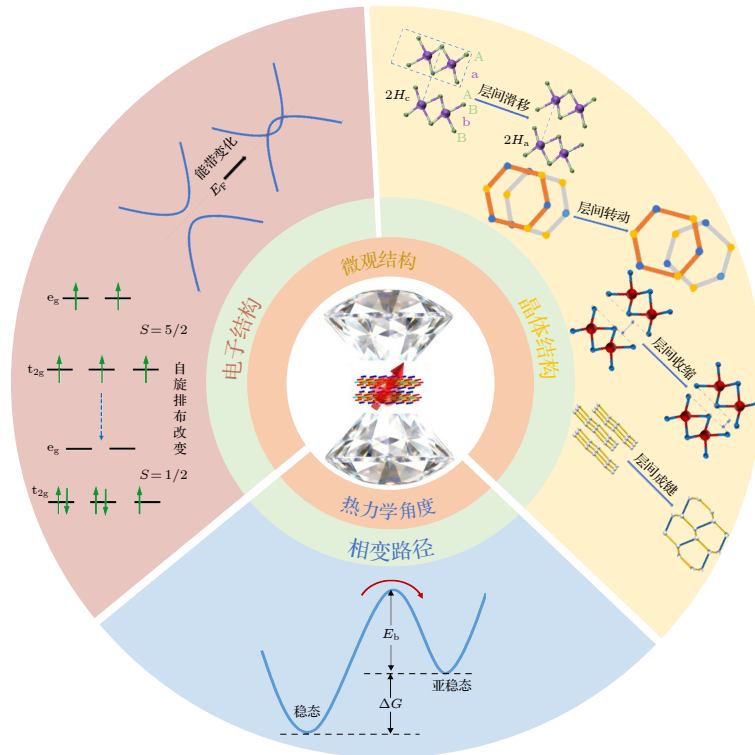


图 1 高压在层状磁性材料中的调控作用

Fig. 1. High pressure tuning effect on layered magnetic materials.

改变层间交换路径和各向异性能. 从电子结构的调控角度来看, 对于巡游的层状铁磁体系 ( $\text{Fe}_x\text{GeTe}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  等), 在这类材料中, 磁有序往往与费米能级附近的态密度、能带色散及费米面拓扑紧密相关, 因此压力通过压缩晶格、增强轨道重叠与层间耦合, 会直接引发能带重整化与费米面重构, 从而改变磁交换作用与宏观磁性能<sup>[26]</sup>.

基于二维磁性材料在自旋器件中的巨大应用潜力, 以及层状磁性材料在高压条件下丰富的物性变化, 本文将围绕高压调控层状磁性材料的最新研究进展进行综述. 将从高压实验技术在磁性材料研究中的应用以及高压对层状磁性材料物性调控的典型现象与机制两个方面进行系统介绍, 旨在展示高压作为一种关键调控手段在探索新磁相、提升关键磁性能参数以及推动二维磁性材料与器件发展中的独特优势与广阔前景.

## 2 与磁性材料研究相关的高压实验技术

高压科学的发展与实验技术的进步是密不可分的, 高压实验需要特殊且精巧的实验方法. 高压技术包含动高压、静高压技术等, 静高压技术与材

料物性研究结合最为紧密, 原位测量技术包含大腔体压腔和金刚石对顶砧技术<sup>[7-10]</sup>. 而基于金刚石对顶砧 (diamond anvil cell, DAC) 技术的原位测量是应用最为广泛的方法, 我们接下来介绍主要与磁性测量相关的高压原位实验技术.

### 2.1 金刚石对顶砧

金刚石对顶砧装置 (图 2(a) 所示) 是高压科学发展史上最重要的发明之一. 其不仅大幅度提升了实验压力, 更为重要的是推动了以 DAC 为核心的高压下物理量原位测量技术的大发展<sup>[10]</sup>. 金刚石对顶砧采用两颗相对放置的金刚石提供压强, 加在两砧面之间金属薄片 (经过预压、打孔) 与两个钻石砧面构成样品腔, 样品位于“狭小”样品腔中. 腔内的平均压力 (指压强, 在高压领域习惯称之为“压力”)  $P = F/A$ , 其中  $F$  为外部加载机构施加的力,  $A$  为金刚石砧面的面积. 金刚石的超硬特性和光谱透明性, 在获取超高压的同时, 为进行原位物理量的测量提供了广阔的研究平台, 基于 DAC 的各种新技术相继涌现, 如 X 射线粉末衍射技术<sup>[27]</sup>、X 射线单晶衍射技术<sup>[28]</sup>、金属垫片和液体传压介质技术<sup>[29]</sup>、红宝石标压技术<sup>[30]</sup>, DAC 与低温、强磁

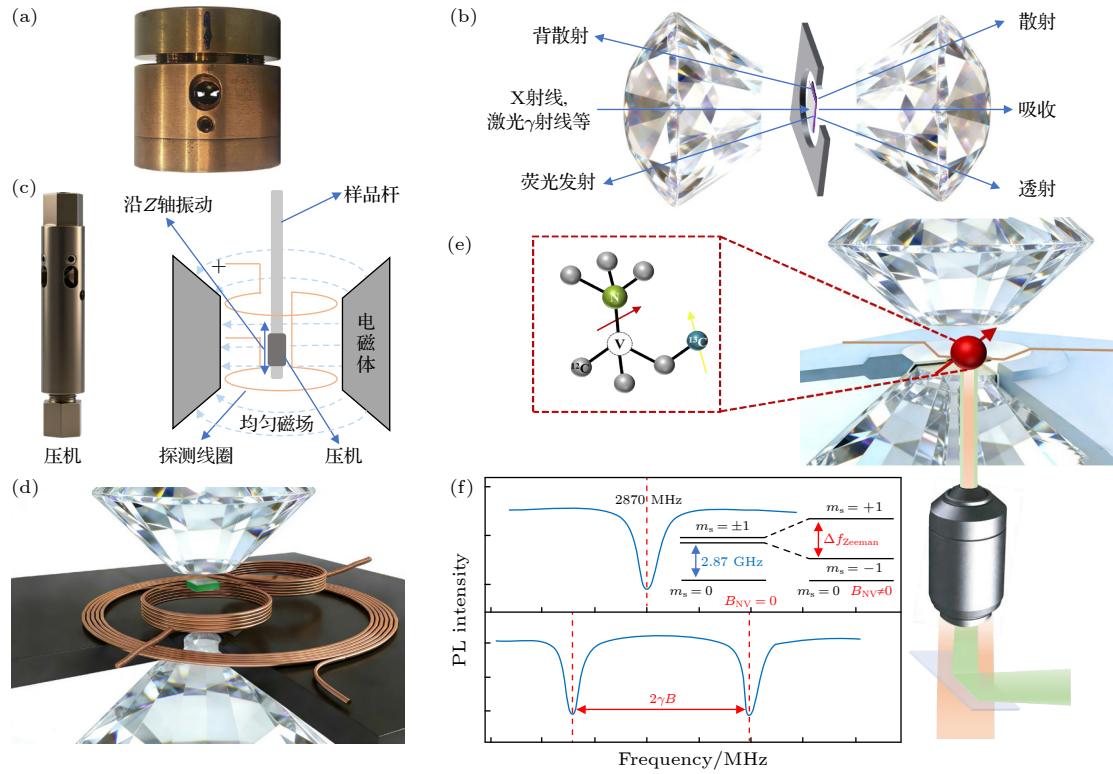


图 2 (a) 金刚石对顶砧压机; (b) 不同光源与密封于金刚石压腔中物质的相互作用, 吸收技术包括 XANES, EXAFS 和 XMCD, 散射技术包括衍射, 共振非弹性散射等; (c) 高压下直流磁化率的测量示意图; (d) 高压条件下交流磁化率测量装置示意图; (e) 高压条件下 ODMR 测量示意图; (f) 零磁场与外加磁场下测量的典型共振光谱, 插图为零磁场和外加磁场对能级的调制作用示意图

Fig. 2. (a) Photograph of a diamond anvil cell. (b) Interactions between different radiation sources and materials sealed in the diamond anvil chamber. Absorption techniques include XANES, EXAFS, and XMCD, while scattering techniques include diffraction and resonant inelastic X-ray scattering, among others. (c) Schematic illustration of direct-current magnetization measurements under high pressure. (d) Schematic illustration of alternating-current magnetization measurements under high pressure. (e) Schematic of the ODMR measurement setup under high pressure. (f) Typical resonance spectra measured under zero magnetic field and applied magnetic field, where the inset illustrates the schematic modulation effect of zero magnetic field and applied magnetic field on the energy levels.

场等综合极端条件的结合<sup>[31]</sup>等, 为现代高压实验技术奠定了基础。

## 2.2 基于光谱、X 射线的非接触测量

以光子(如可见光、X 射线光子、 $\gamma$  射线等)等作为探针, 可透过金刚石与样品进行作用, 产生透射、散射、衍射、荧光发射信号等信息(图 2(b)所示), 从而反映材料在高压下的晶格结构、电子结构与磁性信息. 与 DAC 结合的非接触测量具有如下三点突出优势. 1) 依靠高亮度束线与微束斑, 可对极小样品进行测量, 显著提高弱信号的采集效率<sup>[32]</sup>. 2) 可以获取相关自旋结构信息: 拉曼光谱可以识别结构相变、声子-自旋的耦合; X 射线吸收近边结构(X-ray absorption near-edge structure, XANES)对价态、配位环境和电子结构变化敏感, 可用于研究压力诱导的电荷转移、自旋态转变与配

位重构<sup>[33]</sup>; 扩展 X 射线吸收精细结构(extended X-ray absorption fine structure, EXAFS)则可定量获得近邻原子距离、配位数与无序度, 适合研究在相变前后的局域结构演化<sup>[34]</sup>. X 射线发射谱(X-ray emission spectroscopy, XES)常用于获得自旋态与局域磁矩的变化信息(例如  $K_{\beta}$  发射线形对 3d 过渡金属自旋态敏感), 可用于探测高压下高自旋-低自旋转变等现象<sup>[35]</sup>; 磁圆二色谱(X-ray magnetic circular dichroism, XMCD)利用圆偏振 X 光在磁化样品中的吸收差异, 实现元素分辨的磁性探测, 可用于测量高压下特定元素的自旋与轨道磁矩<sup>[36]</sup>. 3) DAC 还可与低温(低至 mK 量级)、高温(激光加热可达数千 K)、强磁场(超导磁体或脉冲磁场, 可达数十特斯拉)以及电场等多种外场环境集成, 构建多参量极端条件测量平台。

## 2.3 高压磁性测量

测量的总磁矩值属于广度量, 其信号幅度通常与样品体积/质量近似成正比. 在常规条件下, 基于超导量子干涉仪磁强计 (superconducting quantum interference device, SQUID 磁强计) 与振动样品磁强计 (vibrating sample magnetometer, VSM) 能够实现极高灵敏度的磁性测量 ( $10^{-7}$ — $10^{-9}$  emu); 但在高压实验中, 样品往往被限制在活塞圆筒压腔或 DAC 微小腔体内, 质量可低至微克量级, 且高压装置本体 (CuBe、NiCrAl、Re 垫片、金刚石、密封胶等) 会带来显著的背景信号与寄生响应 (压力装置材料可能呈顺磁、抗磁或含微量铁磁杂质), 使得宏观磁性测量面临以下挑战, 目前主要的测量手段包括直流法、交流法与 NV 色心法.

1) 直流法. 通常将一定质量的样品装入非磁高压腔活塞圆筒或者对顶砧装置中, 样品与装置一同在探测线圈中测量, 再将装置背底扣除, 从而得到样品的磁性信号<sup>[37-39]</sup> (图 2(c) 所示).

2) 交流法. 通常绕制成互感线圈的形式, 励磁线圈产生交流磁场  $H_{ac}$  (频率  $f$ ), 样品磁化响应产生磁通变化; 测量线圈检测感应电压; 用锁相放大器得到实部 (对应  $\chi'$ ) 与虚部 (对应  $\chi''$ ) 分量 (图 2(d) 所示). 由于线圈位置更加靠近样品, 可以直接获得样品磁性变化而引起的磁通变化<sup>[40-42]</sup>.

3) NV 色心法. 近几年, 以金刚石氮空位 (NV) 中心为代表的色心量子传感, 为磁性微区测量提供了与传统磁学表征截然不同的路径. NV 中心的光学跃迁对自旋态敏感, 可通过光学方法实现自旋极化与读出, 并利用光学探测磁共振 (optically detected magnetic resonance, ODMR) 将局域磁场 (包括静磁场、交流磁场及磁噪声) 映射为可定量解析的谱线位移与展宽, 从而实现纳米尺度的磁成像与定点测量<sup>[43-48]</sup>. NV 色心传感器进行磁探测通常包括微波激励与荧光采集. 在无外磁场条件下, NV 中心基态为自旋三重态, 其中  $m_s = 0$  与  $m_s = \pm 1$  之间存在零场分裂,  $m_s = \pm 1$  两态近似简并, 对应共振频率约为 2.87 GHz. 采用短波长激光 (如 532 nm) 激发后, 体系在辐射跃迁产生荧光的同时, 也可能经由亚稳态单重态通道发生非辐射跃迁. 该非辐射通道在  $m_s = \pm 1$  态上的发生概率更高, 从而使  $m_s = \pm 1$  态对应的荧光强度低于  $m_s = 0$  态. 因而当施加接近 2.87 GHz 的微波并驱动  $m_s = 0$  至  $m_s = \pm 1$  的共振跃迁时, 部分布居转移至  $m_s = \pm 1$

态会导致荧光强度出现可观测的下降, 形成 ODMR 谱特征 (如图 2(f) 所示). 当存在外磁场或磁性样品的漏磁场时, 塞曼效应会使  $m_s = \pm 1$  态发生劈裂, 其共振频率随磁场在 NV 轴方向上的分量近似线性移动,  $m_s = +1$  与  $m_s = -1$  两共振峰的频率差近似为  $2\gamma_e B$ . 高压条件下, 不同取向的 NV 色心受到不同的局域应力, 其自旋能级结构因此发生变化, ODMR 谱线往往出现更为复杂的变化 (如劈裂、弱化、展宽等). 实验上可根据 ODMR 谱峰位置与劈裂量导出局域磁场, 并进一步用于分析样品高压下的磁化分布、超导体的抗磁响应等<sup>[49-51]</sup>.

## 2.4 高压输运实验技术

由于采用上述提到的直流方法和交流方法在高压条件下直接测量磁性数据时, 通常引入较大背底信号, 难以获取准确磁性信息. 而 NV 色心方法虽具有极高灵敏度, 但仍然具有一定的技术门槛, 因此, 高压下的磁输运测量已经成为研究层状磁性材料的主要方法. 通过高压下磁阻、霍尔电阻等的测量, 来探索磁性、电子结构的变化. 其中, 对高压下层状磁性材料反常霍尔数据的解读, 也是一个重要的研究内容. 针对“微尺度铁磁体磁化率难以定量测量”的长期难题, Qin 等<sup>[52]</sup> 提出一种基于反常霍尔效应 (anomalous Hall effect, AHE)+ 阿罗特 (Arrott) 图的定量分析方法, 可在单个微米级范德瓦耳斯铁磁纳米薄片上原位提取磁化率并识别磁各向异性取向.

### 2.4.1 微纳电极集成与样品转移

在实验技术层面, 与块材样品相比, 层状材料的纳米片 (少层乃至单层) 样品尺寸更小, 针对传统块体材料的手工布线方案操作更为困难, 通常需要借助微纳加工手段将电极集成到金刚石砧面上, 并将纳米级厚度样品定向转移至电极上进行电学测量<sup>[53-56]</sup> (图 3(a), (b) 所示). 微纳电极的集成技术为开展少层样品的高压输运测量提供了重要的技术基础.

### 2.4.2 原位高压条件下转角输运测量

各向异性是材料物性研究的重要内容, 转角下的磁输运测量可以用于揭示超导维度、磁晶各向异性、费米面的几何形状、多铁性起源等<sup>[53,57-61]</sup> (如图 3(c)—(e) 所示). 然而, 在高压 (强磁场、低温) 条件下开展角度依赖的物性测量极具挑战性. 在大

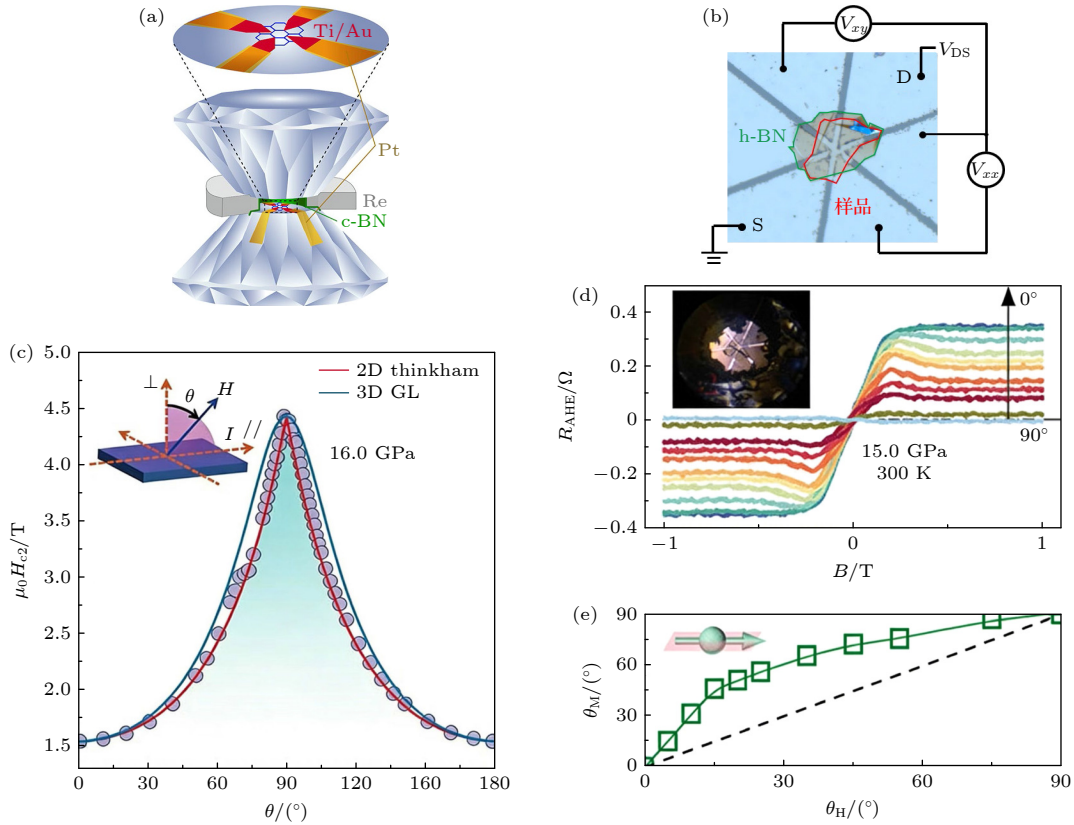


图 3 (a) 金刚石台面集成电极示意图<sup>[55]</sup>; (b) 层状样品转移至金刚石台面电极的光学照片<sup>[56]</sup>; (c) 高压下超导上临界场随角度的变化<sup>[53]</sup>; (d) 霍尔电阻随角度的变化; (e) 通过 Stoner-Wohlfarth 单畴模型对实验结果进行分析,  $\theta_M$ - $\theta_H$  曲线落在图中左上区域, 说明为面内各向异性<sup>[61]</sup>

Fig. 3. (a) Schematic illustration of electrodes integrated on the diamond culet<sup>[55]</sup>; (b) optical image of transferring a layered sample onto electrodes fabricated on the diamond culet<sup>[56]</sup>; (c) angular dependence of the upper critical field of superconductivity under high pressure<sup>[53]</sup>; (d) angular dependence of the Hall resistance; (e) analysis of the experimental results using the Stoner-Wohlfarth single-domain model; the  $\theta_M$ - $\theta_H$  curve falls in the upper-left region of the diagram, indicating in-plane magnetic anisotropy<sup>[61]</sup>.

腔体低温磁体中, 可以将转动装置置于低温腔底部, 但是存在样品腔体积有限、加压装置转动受限、低温下转动角度偏差大以及与常压样品杆无法通用等难题. 近期, Yue 等<sup>[62]</sup> 对传统测量方案进行改进, 采用模块化设计思想, 将转动机械装置与样品杆分离, 并将其置于样品腔顶部. 由于该机械转动部分处于室温环境下, 能够实现高精度的连续转角; 同时设计多种样品托和采用劈裂式磁体提供的横向磁场, 可以实现面内-面内转角与面内-面外配置的转角, 极大地推动了实验技术的发展, 并且揭示了多种层状材料的高压下的磁学性质.

### 3 高压调控层状磁性材料的典型现象

#### 3.1 自旋态的调控

高压可以调控过渡金属离子 (d 电子) 的自旋排布: 在高压条件下, 金属-配体键长压缩导致晶场

分裂能显著增大, 当其超过洪特交换能时, 电子倾向于成对占据低能轨道, 从而驱动高自旋态 $\rightarrow$ 低自旋态的转换. Wang 等<sup>[63-65]</sup> 在  $\text{FePX}_3$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ) 和  $\text{MnPX}_3$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ) 等反铁磁层状材料体系中发现了高压下的自旋交叉现象. 以  $\text{FePX}_3$  ( $X = \text{S}, \text{Se}$ ) 为例, 高压下 Fe 元素的 X 射线发射谱测量结果显示, 在特定压力下,  $K_{\beta'}$  峰消失 (图 4(a)—(c) 所示), 说明 Fe 的 d 电子排布从高自旋态变为低自旋态. 而这一高低自旋态的转换与一阶结构相变相联系, 表现为明显的体积收缩 (10% 以上) (图 4(d), (e) 所示), 同时伴随着半导体性到金属性的转变. 对于  $\text{FePSe}_3$ , 当体系进入低自旋、非磁性且金属性的高压相后, 超导在相变附近出现: 起始  $T_c$  约 2.5 K ( $\sim 9$  GPa) 并在更高压力达到约 5.5 K ( $\sim 30$  GPa) (图 4(f) 所示), 展示了压力驱动自旋转换作为获得非常规结构母体中新超导相的一条可行路径.

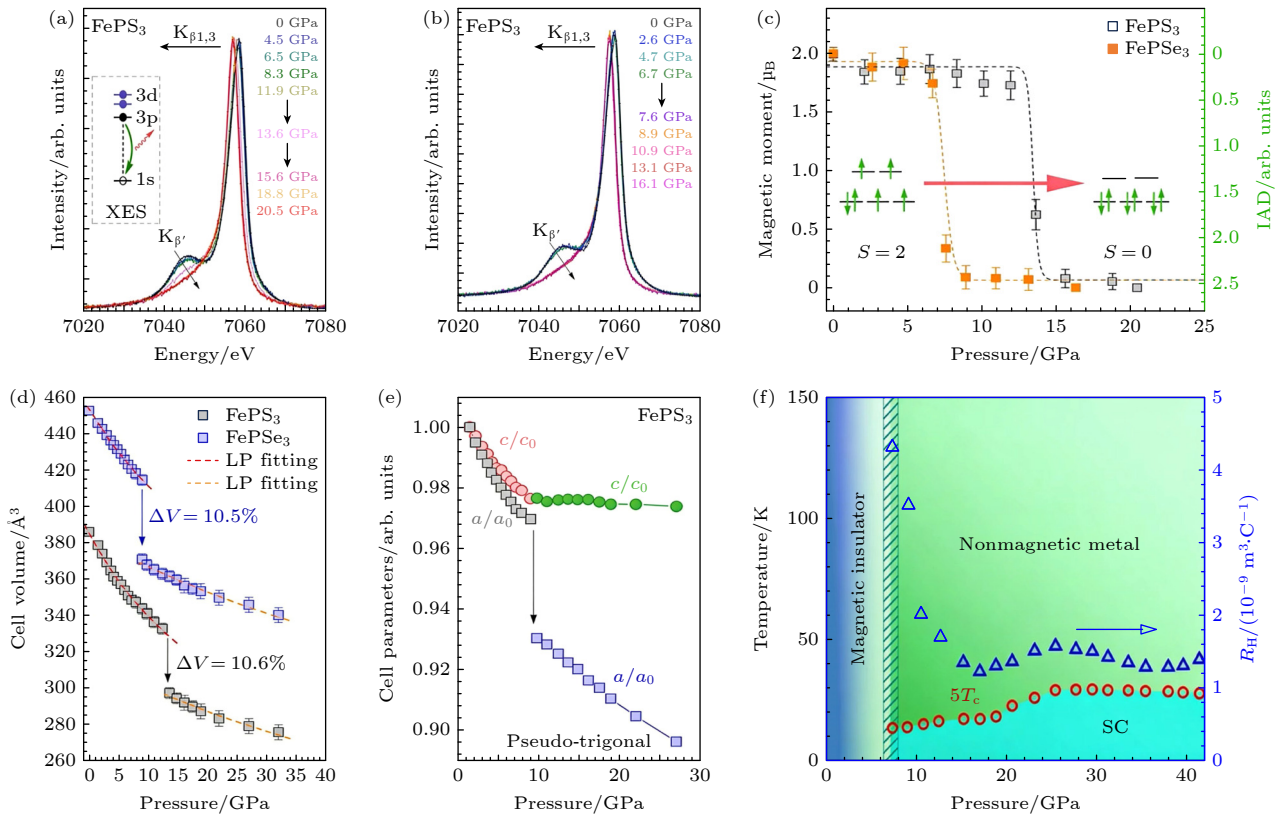


图4 不同外加压力下, (a) FePS<sub>3</sub> 与 (b) FePSe<sub>3</sub> 的 Fe K<sub>β</sub> X 射线发射谱; (c) 由积分绝对差分析得到的 FePS<sub>3</sub> 和 FePSe<sub>3</sub> 的磁矩随压力的变化; (d) FePS<sub>3</sub> 与 FePSe<sub>3</sub> 晶胞体积随压力的变化; (e) FePSe<sub>3</sub> 的晶胞参数随压力的变化; (f) FePSe<sub>3</sub> 的温度-压力相图<sup>[64]</sup>

Fig. 4. (a) Fe K<sub>β</sub> X-ray emission spectra of FePS<sub>3</sub> and (b) FePSe<sub>3</sub> under different applied pressures; (c) pressure dependence of the magnetic moments of FePS<sub>3</sub> and FePSe<sub>3</sub> obtained from the integrals of the absolute values of the difference spectra analysis; (d) unit-cell volume as a function of pressure for FePS<sub>3</sub> and FePSe<sub>3</sub>; (e) pressure dependence of the lattice parameters of FePSe<sub>3</sub>; (f) temperature-pressure phase diagram of FePSe<sub>3</sub><sup>[64]</sup>.

### 3.2 居里温度与磁晶各向异性调控

除了对局域自旋态排布的调控之外, 高压也能够对磁长程序进行调控. 对于两类典型的层状磁性材料 Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub> 和 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>, 其对高压的响应主要体现在居里温度与磁晶各向异性的同步可调 (如图 5(a), (b) 所示). 对于 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub>, 高压同样引起明显的各向异性连续转变: 低压区仍保持强垂直各向异性 (PMA), 而在更高压力下磁易轴经历面外→倾斜→面内的连续旋转; 与此同时 T<sub>c</sub> 随压力呈现“穹顶型 (dome-like)”演化, 可逐步增强并在约 10.3 GPa 附近达到约 480 K, 随后在更高压力下转为下降<sup>[61]</sup>. 对 Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub>, 随压力增大可实现不同磁各向异性铁磁相之间的可控演化: 体系在压力下表现出从面内易轴 (FM1) 到面外易轴 (FM2) 再到近各向同性 (FM3) 磁态的转变, 并伴随居里温度的显著抬升; 尤其在较高压力下出现的 FM3 高温铁磁态可持续至较高温度, 且在卸压后仍可保留, 使材料的居里温度进一步提升到 400 K 以上,

体现出高压诱导亚稳高温铁磁态的截留<sup>[66]</sup>. 可能机制方面, 两类材料的共同点在于高压通过压缩晶格、重塑电子结构来同时影响交换作用与磁晶各向异性能量: 压力增强轨道重叠并推动费米能级附近态密度/费米面的重构, 从而改变磁交换作用与 T<sub>c</sub>; 同时, 自旋-轨道耦合对晶体场环境的敏感性使磁晶各向异性能量随压力显著变化, 导致易磁化轴翻转或趋于各向同性.

与 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 结构类似的 Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> (T<sub>c</sub>~180—230 K), 展现出不同的压力响应特征: 随着压力的升高, Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 的 T<sub>c</sub> 近似单调地下降, 并在临界压力 (~15 GPa) 左右进入顺磁态<sup>[67–69]</sup> (如图 5(c) 所示). Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub> 与 Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> 这种在压力作用下截然不同的响应行为, 可能暗含着其 T<sub>c</sub> 显著差异的微观机制.

### 3.3 磁有序态的调控

高压还可以通过连续压缩层间距并调制键

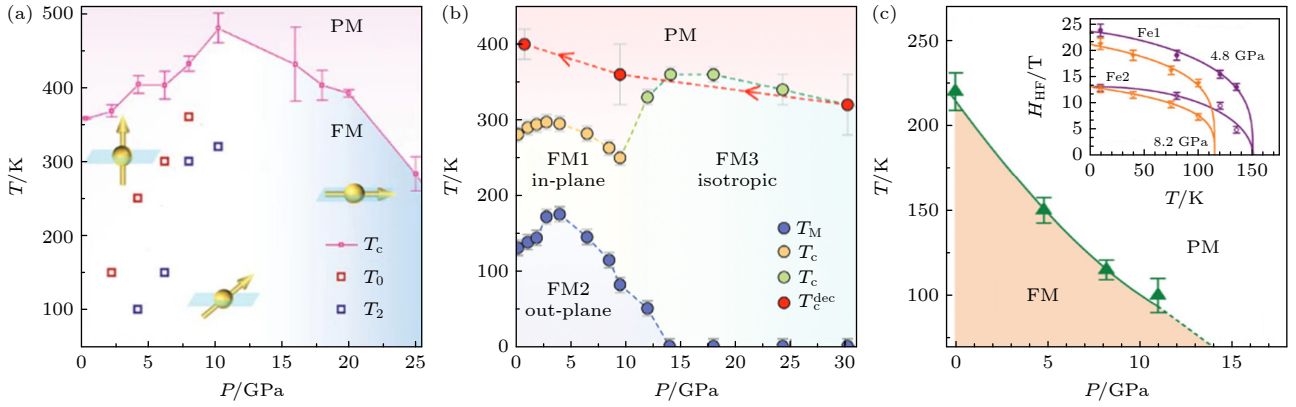


图 5 (a)  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ <sup>[61]</sup>, (b)  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ <sup>[66]</sup> 和 (c)  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  高压下的相图<sup>[68]</sup>; (c) 中的插图为  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  样品的 Fe1 和 Fe2 的超精细场随温度的变化

Fig. 5. (a) High-pressure phase diagram of  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$ <sup>[61]</sup>, (b)  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ <sup>[66]</sup>, and (c)  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ <sup>[68]</sup>. The inset in panel (c) shows the temperature dependence of the hyperfine fields of Fe1 and Fe2 sites in the  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  sample.

长与键角, 从而直接改变层间或层内交换相互作用的强度甚至符号, 从而诱导磁序转变. 例如, 部分 Co 掺杂的  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  可以转变为反铁磁态基态 (图 6(a)), 进行高压调控研究时发现: 在 4.1 GPa 时, 样品由 AFM 态重新转变为 FM 态, 且磁各向异性为面外易轴特征 (图 6(b)—(d)); 当压力增至 12.3 GPa 时,  $T_c$  提升至约 282 K 的最高温度, 而进一步加压后  $T_c$  开始下降, 呈现出类似于母相  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  的“穹顶”型相图 (图 6(e)). 高压 XRD 结果显示, 在 20 GPa 下样品依然没有结构相变的迹象, 说明这种铁磁序的转变是由高压诱导的电子结构转变所导致<sup>[56]</sup>.

高压作用于层间自由度, 除了压缩层间距改变键长和键角外, 另一方面可能是推动层间发生相对滑移、错排等, 从而改变原有的堆垛结构, 引发包括磁有序态改变在内的物性改变. 在  $\text{CrI}_3$  这一典型体系中, 常压下薄层样品为单斜 (monoclinic) 堆垛结构, 这种层间结构对应层间反铁磁耦合; 而在静水高压作用下 ( $\sim 1.8$  GPa), 体系可发生不可逆的单斜向菱方 (rhombohedral) 堆垛转变, 进而其层间耦合由反铁磁转化为铁磁, 样品转化为铁磁相, 该压力诱导的铁磁态可持续到约 60 K, 接近块体  $\text{CrI}_3$  的居里温度尺度<sup>[70,71]</sup>. 上述工作清晰揭示了二维磁体中层间堆垛方式对层间耦合的影响, 从而改变长程磁有序态, 说明压力不仅能通过压缩层间距的方式, 改变层间耦合调控宏观磁性, 也可能触发堆垛重排实现层间交换作用的改变引发新的磁性效应, 为以高压为手段, 实现堆垛工程、转角莫尔磁性与可重构自旋器件提供了实现路径.

#### 4 展望: 高压调控在层状磁性材料中的未来方向

高压的独特优势在于它能够在不引入化学无序的前提下, 以“干净”的方式改变原子间距, 因此特别适用于探索新的磁相、极端磁性态以及压力诱导的新交换机制等. 与此同时, 高压调控也存在固有的局限: 首先, 高压对电子结构调控往往会同时耦合多种结构自由度的变化 (如键长、键角、层间滑移、堆垛重排等), 导致其调控参量不如电场 (离子液体栅压调控等)“纯粹”; 其次, 高压实验的原位表征与器件集成复杂, 且许多压力诱导相在卸压后容易恢复至常压结构, 难以在常压条件下利用. 正因为高压既能把体系推入常压不可达的结构与能带构型, 又面临调控参量与晶格耦合强和高压物相难以截留两方面挑战, 未来研究亟需聚焦以下方向: 一方面发展高压与其他调控手段的协同耦合以实现多参量精细协同调控, 另一方面着力解决磁性高压相在常压下的稳定截留问题, 推动将高压下的新物性转化为常压可用的新材料与新器件平台.

高压与多种调控手段的耦合. 高压作为一个研究平台, 可以与多种调控技术进行结合, 实现单一参量调控到多参量协同调控, 从而在更广泛的参数空间探索和发现新奇磁学性质. 目前一些研究结果也展示综合调控的强大功能: Chen 等<sup>[72]</sup> 在金刚石对顶砧中构建并原位测量场效应晶体管, 实现对  $\text{MoS}_2$  的高压+栅压协同调控, 显著提升了载流子迁移率与接触性能. Yankowitz 等<sup>[73]</sup> 将扭转双层石墨烯与高压调控手段结合, 在转角为  $1.27^\circ$  器件上通过压力诱导出  $T_c$  约 3 K, 比魔角 ( $1.1^\circ$ ) 时常

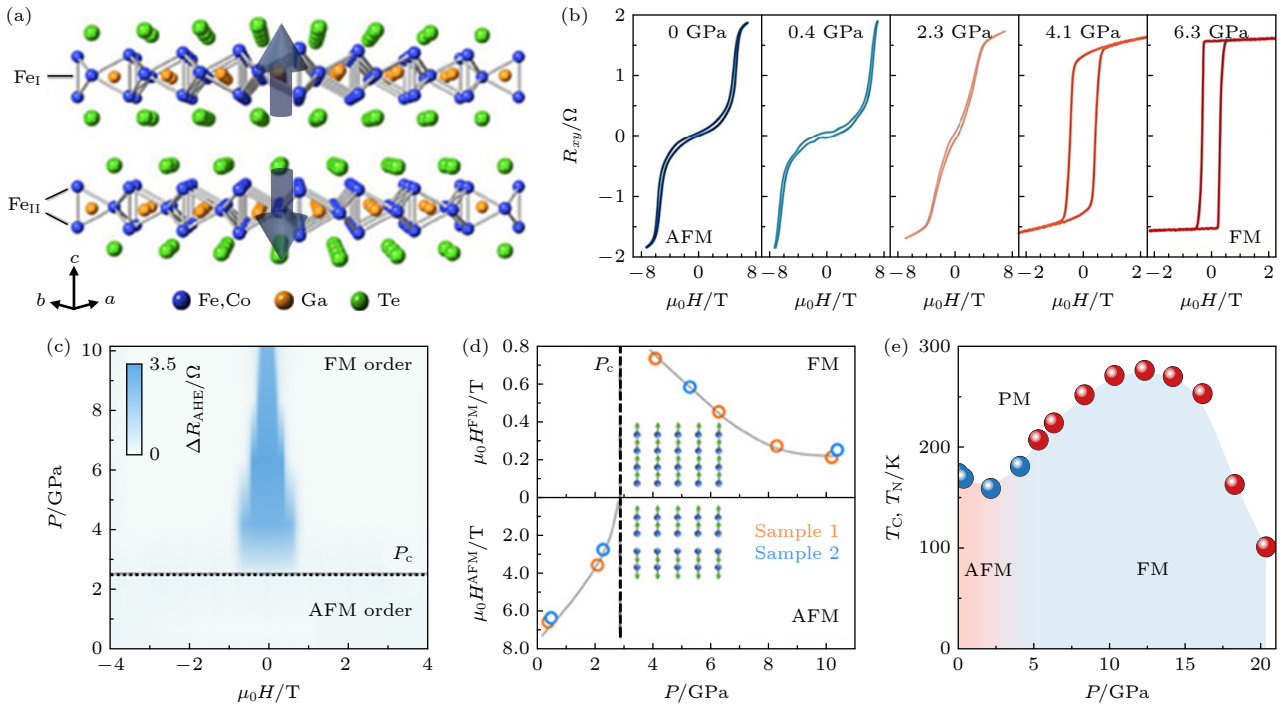


图 6 (a)  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{GaTe}_2$  的晶体结构, 箭头表示磁结构示意图; (b) 不同压力下层状磁体  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{GaTe}_2$  ( $x = 0.24$ ) 纳米片的反常霍尔电阻; (c) 10 K 时, 在相反磁场扫描方向下霍尔信号对压力和磁场的依赖关系, 其中  $\Delta R_{\text{AHE}} = |R_{\text{AHE}}(H_{\text{increase}}) - R_{\text{AHE}}(H_{\text{decrease}})|$  对于面外的铁磁有序,  $\Delta R_{\text{AHE}}$  是非零的; 然而对于反铁磁有序, 由于磁滞回线可以忽略,  $\Delta R_{\text{AHE}}$  的数值接近 0, 所以  $P_c$  表示发生 AFM $\rightarrow$ FM 转变的临界压力; (d) 10 K 时自旋翻转场  $H_c^{\text{AFM}}$  (以 FM 有序的矫顽场  $H_c^{\text{FM}}$ ) 随压力的变化; (e)  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{GaTe}_2$  ( $x = 0.24$ ) 的高压相图<sup>[56]</sup>

Fig. 6. (a) Crystal structure of  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{GaTe}_2$ . The arrows schematically indicate the magnetic configurations. (b) Anomalous Hall resistance of a nanoflake of the layered magnet  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{GaTe}_2$  ( $x = 0.24$ ) under different pressures. (c) Pressure- and magnetic-field-dependent Hall signals at 10 K measured under opposite magnetic-field sweeping directions. Here,  $\Delta R_{\text{AHE}} = |R_{\text{AHE}}(H_{\text{increase}}) - R_{\text{AHE}}(H_{\text{decrease}})|$ , for out-of-plane ferromagnetic ordering,  $\Delta R_{\text{AHE}}$  is nonzero. However, for antiferromagnetic ordering, since the magnetic hysteresis loop is negligible,  $\Delta R_{\text{AHE}}$  is close to 0. Therefore,  $P_c$  denotes the critical pressure at which the AFM-to-FM transition occurs. (d) Pressure dependence of the spin-flop field  $H_c^{\text{AFM}}$  (and the coercive field  $H_c^{\text{FM}}$  for FM ordering) at 10 K. (e) High-pressure phase diagram of  $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_3\text{GaTe}_2$  ( $x = 0.24$ )<sup>[56]</sup>.

见的 0.3—0.4 K 高出近一个量级, 体现出转角工程与高压协同调控的强大能力. Wang 等<sup>[74]</sup> 在石墨烯/六方氮化硼莫尔超晶格中结合高压与栅压调控 (堆垛+高压+栅压), 证明了通过压力可大幅增强莫尔势, 首次观测到理论预言的“三级能隙”. 因此, 高压不再只是单参量调控, 而是一个可与电场、异质堆垛或光场等手段深度耦合的综合平台: 其负责把体系推入新的晶格与能带构型, 其他手段则在此基础上进一步精细调节载流子浓度、近邻相互作用等, 从而构建多维度相图并在特定高压相中实现更丰富的物性表现.

高压相的截留. 从基础材料研究的角度看, 发现新的层状磁性材料依然是一个根本性的问题. 高压拓展了相空间的范围, 提供与常压不同的相变路径, 从而让许多常压不可达的结构与化学构型成为可能, 为发现新型层状材料提供了广阔的空间. 尤其对于层状范德瓦耳斯材料, 其常存在多种堆垛与

层错构型, 高压可降低滑移势垒并稳定在某一堆垛形式下, 若能在卸压后保留, 将成为发现新材料的重要途径.

尽管高压原位测量揭示了极其丰富的结构与物性演化, 将这些高压诱导的物性与结构稳定“截留”至常压仍然面临挑战, 这也构成了下一阶段研究的重点方向. 近年来, 若干策略展现出良好的应用前景. 例如, 朱经武课题组<sup>[75,76]</sup> 提出压力淬灭 (特定压力与温度下快速卸压) 的方式, 利用相变的动力学能垒 (如一阶相变的潜热或结构重排带来的势垒) 使高压诱导的亚稳相截留在常压, 将  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  等材料的高压相的超导相稳定保留至常压. Li 等<sup>[77]</sup> 在  $\text{Rb}_6\text{Re}_6\text{S}_8\text{I}_8$  体系中通过反复进行压力的加载-卸载过程使得高压亚稳相在常压得以保留. 该体系由于  $[\text{Rb}_6\text{I}_2]^{4+}$  骨架柔软且具有塑性, 而  $[\text{Re}_6\text{S}_8\text{I}_6]^{4-}$  团簇则坚硬且具有弹性. 这种刚性差异使得外加压力能够选择性地使骨架发生无定形化, 同时保持簇的

有序状态, 这种结构特点使得高压诱导的亚稳态在卸压后“冻结”到常压, 并且光电流随压缩-卸压循环次数增多而增强. He 等<sup>[78]</sup>在室温下施加 5 GPa 压力并引入扭转变形, 通过剪切应变会引发  $\alpha$ -Ti 到  $\beta$ -Ti 的转变, 且  $\beta$ -Ti 相在卸压后仍能稳定存在, 而纯钛中的  $\beta$  相通常只会在常压高温 (>1155 K) 或极高静水压 (>52 GPa) 下出现. 上述工作说明, 通过引入额外的操作维度, 如变温、剪切力和快速升(降)压等方式, 能够显著提升高压亚稳相在常压条件下的可截留性, 为层状磁性材料高压相的截留提供重要的参考和实现路径.

综上所述, 高压作为一种兼具物性调控、材料合成与新奇相探索能力的手段, 具有极强的扩展性; 尤其在层状范德瓦耳斯体系中, 压力所具备的独特层间调控能力(如层间距压缩、层间耦合增强与堆垛重构)为磁性调控提供了其他外场难以替代的路径. 高压将在层状磁性材料的机理解、性能提升与新相和新材料的发现中持续发挥关键作用, 并有望推动高居里温度、强垂直各向异性及可集成自旋器件材料体系的进一步突破.

## 参考文献

- [1] Zhang L J, Wang Y C, Lv J, Ma Y M 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17005
- [2] Sun L L, Chen X J, Guo J, Gao P W, Huang Q Z, Wang H D, Fang M H, Chen X L, Chen G F, Wu Q, Zhang C, Gu D C, Dong X L, Wang L, Yang K, Li A G, Mao H K, Zhao Z X 2012 *Nature* **483** 67
- [3] Sun H L, Huo M W, Hu X W, Li J Y, Liu Z J, Han Y F, Tang L Y, Mao Z Q, Yang P T, Wang B S, Cheng J G, Yao D X, Zhang G M, Wang M 2023 *Nature* **621** 493
- [4] Xia J, Yan J X, Wang Z H, He Y M, Gong Y J, Chen W Q, Sun T C, Liu Z, Ajayan P M, Shen Z X 2021 *Nat. Phys.* **17** 92
- [5] Pei S H, Deng Q Y, Wang Z H, Xia J 2021 *Chin. J. High Press. Phys.* **35** 030101 (in Chinese) [裴胜海, 邓晴阳, 王曾晖, 夏娟 2021 高压物理学报 **35** 030101]
- [6] Mao H K, Chen X J, Ding Y, Li B, Wang L 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 015007
- [7] Wang N N, Yang M W, Yang Z, Chen K Y, Zhang H, Zhang Q H, Zhu Z H, Uwatoko Y, Gu L, Dong X L, Sun J P, Jin K J, Cheng J G 2022 *Nat. Commun.* **13** 4367
- [8] Sun J P, Jiao Y Y, Yi C J, Dissanayake S E, Matsuda M, Uwatoko Y, Shi Y G, Li Y Q, Fang Z, Cheng J G 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 047201
- [9] Guo S H, Zhang Y F, Bu K J, Zhan Y Q, Lü X J 2025 *Chem. Commun.* **61** 1773
- [10] Mao H K, Chen B, Chen J H, Li K, Lin J F, Yang W G, Zheng H Y 2016 *Matter. Radiat. Extrem.* **1** 59
- [11] Huang B, Clark G, Navarro-Moratalla E, Klein D R, Cheng R, Seyler K L, Zhong D, Schmidgall E, McGuire M A, Cobden D H 2017 *Nature* **546** 270
- [12] Gong C, Li L, Li Z L, Ji H W, Stern A, Xia Y, Cao T, Bao W, Wang C Z, Wang Y, Qiu Z Q, Cava R J, Louie S G, Xia J, Zhang X 2017 *Nature* **546** 265
- [13] Shi S X, Wang X R, Zhao Y R, Zhao W S 2023 *Mater. Today Electron.* **6** 100060
- [14] Geim A K, Grigorieva I V 2013 *Nature* **499** 419
- [15] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A, Castro Neto A 2016 *Science* **353** aac9439
- [16] Gibertini M, Koperski M, Morpurgo A F, Novoselov K S 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 408
- [17] Liu P, Zhang Y, Li K H, Li Y D, Pu Y 2023 *iscience* **26** 107584
- [18] Tang M, Huang J W, Qin F, Zhai K, Ideue T, Li Z Y, Meng F H, Nie A M, Wu L L, Bi X Y, Zhang X R, Zhou L, Chen P, Qiu C Y, Tang P Z, Zhang H J, Wan X G, Wang L, Liu Z Y, Tian Y J, Yoshihiro Iwasa, Yuan H T 2023 *Nat. Electron.* **6** 28
- [19] Cenker J, Sivakumar S, Xie K, Miller A, Thijssen P, Liu Z, Dismukes A, Fonseca J, Anderson E, Zhu X 2022 *Nat. Nanotechnol.* **17** 256
- [20] Deng Y J, Yu Y J, Song Y C, Zhang Z J, Wang N Z, Sun Z Y, Yi Y F, Wu Y Z, Wu S W, Zhu J Y, Wang J, Chen X H, Zhang Y B 2018 *Nature* **563** 94
- [21] Chi Z H, Zhao X M, Zhang H D, Goncharov A F, Lobanov S S, Kagayama T, Sakata M, Chen X J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 036802
- [22] Hromadova L, Martoňák R, Tosatti E 2013 *Phys. Rev. B* **87** 144105
- [23] Wang X F, Chen X L, Zhou Y H, Park C, An C, Zhou Y, Zhang R R, Gu C C, Yang W G, Yang Z R 2017 *Sci. Rep.* **7** 46694
- [24] Zhou Y H, Chen X L, Li N N, Zhang R R, Wang X F, An C, Zhou Y, Pan X C, Song F Q, Wang B G, Yang W G, Yang Z R, Zhang Y H 2016 *AIP Adv.* **6** 075008
- [25] Carter F, Mao Y L, Zhang X, Wang Y, Xiao J 2024 *Chem. Rev.* **124** 1862
- [26] Susilo R A, Jang B G, Feng J J, Du Q H, Yan Z P, Dong H L, Yuan M Z, Petrovic C, Shim J H, Kim D Y, Chen B 2020 *npj Quantum Mater.* **5** 58
- [27] Piermarini G, Weir C 1962 *J. Res. Natl. Bur. Stand. Sect. A* **66A** 325
- [28] Weir C, Block S, Piermarini G 1965 *J. Res. Natl. Bur. Stand. C* **69C** 275
- [29] Piermarini G, Block S, Barnett J 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 5377
- [30] Barnett J, Block S, Piermarini G J 1973 *Rev. Sci. Instrum.* **44** 1
- [31] Wang X, Kamenev K 2014 *Low Temp. Phys.* **40** 735
- [32] Pascarelli S, Mathon O, Aquilanti G 2004 *J. Alloys Compd.* **362** 33
- [33] Sereika R, Jose G C, Huang S, Jin R, Shelton W A, Xie W, Zhao J, Lavina B, Alp E E, Xiao Y, Zhang D, Bi W 2024 *Phys. Rev. B* **110** 075127
- [34] Wilhelm F, Garbarino G, Jacobs J, Vitoux H, Steinmann R, Guillou F, Snigirev A, Snigireva I, Voisin P, Braithwaite D, Aoki D, Brison J P, Kantor I, Lyatun I, Rogalev A 2016 *High Press. Res.* **36** 445
- [35] Xiao Y M, Paul Chow, Shen G Y 2016 *High Press. Res.* **36** 315
- [36] Torchio R, Mathon O, Pascarelli S 2014 *Coord. Chem. Rev.* **277-278** 80
- [37] Iimori R, Hu S J, Mitsuda A, Kimura T 2024 *Commun. Mater.* **5** 235
- [38] Telford E J, Chica D G, Ziebel M E, Xie K C, Manganaro N S, Huang C Y, Cox J, Dismukes A H, Zhu X Y, Walsh J P S,

- Cao T, Dean C R, Roy X 2023 *Adv. Phys. Res.* **2** 2300036
- [39] Zhai K, Su N, Sun J P, Cheng J G, Liu Z Y, Sun Y 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 4173
- [40] Zhou H J, Ding H, Gao X, Shen Z W, Zhai K, Wang B C, Mu C P, Wen F S, Xiang J Y, Xue T X, Shu Y, Wang L, Liu Z Y 2023 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25** 32863
- [41] Chen K Y, Wang N N, Yin Q W, Gu Y H, Jiang K, Tu Z K, Gong C S, Uwatoko Y, Sun J P, Lei H C, Cheng J G 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 247001
- [42] Huang X L, Wang X, Liu M K, Liang Y F, Liu B B, Cui T 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 037403 (in Chinese) [黄晓丽, 王鑫, 刘明坤, 梁永福, 刘冰冰, 崔田 2017 物理学报 **66** 037403]
- [43] Bhattacharyya P, Chen W, Huang X, Chatterjee S, Huang B, Kobrin B, Lyu Y, Smart T J, Block M, Wang E, Wang Z, Wu W, Ma H, Mandyam S, Chen B, Davis E, Geballe Z M, Zu C, Struzhkin V, Jeanloz R, Moore J E, Cui T, Galli G, Halperin B I, Laumann C R, Yao N Y 2024 *Nature* **627** 73
- [44] Wang M Q, Wang Y, Liu Z X, Xu G Y, Yang B, Yu P, Sun H Y, Ye X Y, Zhou J W, Goncharov A F, Wang Y, Du J F 2024 *Nat. Commun.* **15** 8843
- [45] Hsieh S, Bhattacharyya P, Zu C, Mittiga T, Smart T, Machado F, Kobrin B, Höhn T, Rui N, Kamrani M 2019 *Science* **366** 1349
- [46] Yip K Y, Ho K O, Yu K Y, Chen Y, Zhang W, Kasahara S, Mizukami Y, Shibauchi T, Matsuda Y, Goh S K 2019 *Science* **366** 1355
- [47] Lesik M, Plisson T, Toraille L, Renaud J, Occelli F, Schmidt M, Salord O, Delobbe A, Debuisschert T, Rondin L 2019 *Science* **366** 1359
- [48] Tzeng Y K, Ke F, Jia C J, Liu Y Y, Park S, Han M Y, Frost M, Cai X X, Mao W L, Ewing R C, Cui Y, Devereaux T P, Lin Y, Chu S 2024 *Nat. Commun.* **15** 7251
- [49] Liu G Q 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 117601 (in Chinese) [刘刚钦 2025 物理学报 **74** 117601]
- [50] Wang C J, Shi F Z, Wang P F, Duan C K, Du J F 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 130701 (in Chinese) [王成杰, 石发展, 王鹏飞, 段昌奎, 杜江峰 2018 物理学报 **67** 130701]
- [51] Chen H H, Huang X L, Cui T 2024 *Physics* **53** 332 (in Chinese) [陈昊昊, 黄晓丽, 崔田 2024 物理 **53** 332]
- [52] Qin F, Li Z Y, Bi X Y, Zhai K, Ao L Y, Chen P, Chen G Y, Huang J W, Qiu C Y, Liu Z Y, Yuan H T 2024 *Nano Lett.* **24** 15348
- [53] Zhang C R, Huang J W, Zhai K, Akhtari K, Shen Z W, Ao L Y, Li Z Y, Qin F, Chang Y K, Zhou L, Tang M, Dai X T, Qiu C Y, Zhang Y, Wang L, Liu Z Y, Tian Y J, Bahramy M S, Yuan H 2022 *Nat. Commun.* **13** 6938
- [54] Matsumoto R, Irifune T, Tanaka M, Takeya H, Takano Y 2017 *Jpn. J. Appl. Phys.* **56** 05FC01
- [55] Ke F, Zhang L K, Chen Y B, Yin K T, Wang C X, Tzeng Y K, Lin Y, Dong H L, Liu Z X, Tse J S, Mao W L, Wu J Q, Chen B 2020 *Nano Lett.* **20** 5916
- [56] Zhai K, Bi X, Gao X, Yue D D, Ao L Y, Yan J X, Liu X, Nie A M, Mu C P, Cheng Y C, Yuan H T, Liu Z Y 2025 *Adv. Funct. Mater.* 2500793
- [57] Liu G X, Pi M C, Zhou L, Liu Z H, Shen X D, Ye X B, Qin S J, Mi X R, Chen X, Zhao L, Zhou B W, Guo J, Yu X H, Chai Y S, Weng H M, Long Y W 2022 *Nat. Commun.* **13** 2373
- [58] Chai Y S, Chun S H, Cong J Z, Kim K H 2018 *Phys. Rev. B* **98** 104416
- [59] Lu J M, Zheliuk O, Leermakers I, Yuan N F, Zeitler U, Law K T, Ye J T 2015 *Science* **350** 1353
- [60] Shi M Z, Fan K B, Li H P, Pan S Y, Cai J Q, Zhang N, Li H Y, Wu T, Zhang J L, Xi C Y, Xiang Z J, Chen X H 2024 *J. Am. Chem. Soc.* **146** 33413
- [61] Gao X, Zhai K, Fu H X, Yan J X, Yue D D, Ke F, Zhao Y, Mu C P, Nie A M, Xiang J Y, Wen F S, Wang B C, Xue T Y, Wang L, Yuan H T, Liu Z Y 2024 *Adv. Sci.* **11** 2402819
- [62] Yue D D, Gao X, Yu Z P, Zhai K, Liu Z Y 2026 *Rev. Sci. Instrum.* **97** 033901
- [63] Wang Y G, Bai L G, Wen T, Yang L X, Gou H Y, Xiao Y M, Chow P, Pravica M, Yang W G, Zhao Y S 2016 *Angew. Chem.* **128** 10506
- [64] Wang Y G, Ying J J, Zhou Z Y, Sun J L, Wen T, Zhou Y N, Li N N, Zhang Q, Han F, Xiao Y M Paul Chow, Yang W G, Struzhkin V V, Zhao Y S, Mao H K 2018 *Nat. Commun.* **9** 1914
- [65] Wang Y G, Zhou Z Y, Wen T, Zhou Y N, Li N N, Han F, Xiao Y M, Chow P, Sun J L, Pravica M, Cornelius A L, Yang W G, Zhao Y S 2016 *J. Am. Chem. Soc.* **138** 15751
- [66] Li Z Y, Tang M, Huang J W, Qin F, Ao L Y, Shen Z W, Zhang C R, Chen P, Bi X Y, Qiu C Y, Yu Z P, Zhai K, Ideue T, Wang L, Liu Z Y, Tian Y J, Iwasa Y, Yuan H T 2022 *Adv. Mater.* **34** 2201209
- [67] Xu J M, Wang S Y, Wang W J, Zhou H, Chen X L, Yang Z R, Qu Z 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 076202
- [68] Dang N T, Kozlenko D P, Lis O N, Kichanov S E, Lukin Y V, Golosova N O, Savenko B N, Duong D L, Phan T L, Tran T A 2023 *Adv. Sci.* **10** 2206842
- [69] Wang X Q, Li Z Y, Zhang M, Hou T, Zhao J G, Li L, Rahman A, Xu Z L, Gong J B, Chi Z, Gong J B, Chi Z H, Dai R C, Wang Z P, Qiao Z H, Zhang Z M 2019 *Phys. Rev. B* **100** 014407
- [70] Li T X, Jiang S W, Sivadas N, Wang Z F, Xu Y, Weber D, Goldberger J E, Watanabe K, Taniguchi T, Fennie C J, Kin F M, Shan J 2019 *Nat. Mater.* **18** 1303
- [71] Song T C, Fei Z Y, Yankowitz M, Lin Z, Jiang Q, Hwangbo K, Zhang Q, Sun B, Taniguchi T, Watanabe K, McGuire M A, Graf D, Cao T, Chu J H, Cobden D H, Dean C R, Xiao D, Xu X D 2019 *Nat. Mater.* **18** 1298
- [72] Chen Y B, Ke F, Ci P H, Ko C, Park T, Saremi S, Liu H L, Lee Y, Suh J, Martin L W, Ager J W, Chen B, Wu J Q 2017 *Nano Lett.* **17** 194
- [73] Yankowitz M, Chen S, Polshyn H, Zhang Y, Watanabe K, Taniguchi T, Graf D, Young A F, Dean C R 2019 *Science* **363** 1059
- [74] Wang Y P, An J Q, Ye C H, Wang X Q, Mai D, Zhao H Z, Zhang Y, Peng C Y, Watanabe K, Taniguchi T, Sun X Y, Dai R C, Wang Z P, Qin W, Qiao Z H, Zhang Z M 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 046303
- [75] Deng L Z, Wang B S, Halbert C, Schulze D J, Gooch M, Bontke T, Trevor Bontke, Kuo T W, Shi X, Song S W, Salkee N, Yang H D, Ren Z F, Hemley R, Zurekb E, Prasankumar R, Chu C W 2025 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **122** e2423102122
- [76] Wu Z, Deng L Z, Gooch M, Huyan S, Chu C W 2020 *Mater. Today Phys.* **15** 100291
- [77] Li Z Y, Gong J, Zhu Z K, Liu D H, Hu Q Y, Wang Y M, Liu X Q, Zhou S, Luo H, Wang D, Liu X Y, Yang Z X, Tang M, Kong Q Y, Adama N D, Zhang K, Yan S, Zhang L L, Zeng X H, Yu Z H, Xia W, Yuan J, Li M T, Li N N, Dong H L, Zhang Z Y, Shu H Y, Ding Y, Wang D B, Guo Y F, Xu T, Kong L P, Yang W G, Mao H K, Liu G 2025 *Nat. Commun.* **16** 2391
- [78] He Y, Adachi N, Todaka Y, Wang L, Sun Y 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 011906

SPECIAL TOPIC — Applied magnetism

# Research progress in high-pressure tuning of layered magnetic materials\*

YUE Dongdong<sup>1)</sup> GAO Xin<sup>1)</sup> MU Congpu<sup>1)2)†</sup>  
LIU Zhongyuan<sup>1)</sup> ZHAI Kun<sup>1)‡</sup>

1) (*Center for High Pressure Science, State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*Hebei Key Laboratory of Microstructure Materials Physics, School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

( Received 21 January 2026; revised manuscript received 10 February 2026 )

## Abstract

Two-dimensional layered van der Waals materials have enormous potential applications in many fields due to their unique layered structure and excellent properties. Compared with three-dimensional bulk materials, layered systems are coupled by weak van der Waals interactions between layers, endowing them with much higher structural compressibility, particularly along the interlayer direction, which is more sensitive to external pressure. High pressure can expand the accessible phase space, enabling the synthesis of new materials or the retention of metastable phases. On the microscopic level, pressure can significantly tune the interlayer structure and interactions, induce changes in the electronic structure, and consequently give rise to a variety of rich physical properties. This article systematically introduces *in situ* high-pressure experimental approaches, including diamond anvil cells (DACs) combined with X-ray and spectroscopic techniques, high-pressure magnetic transport measurements, and emerging NV-center quantum sensing. It further reviews representative pressure-induced phenomena and underlying tuning mechanisms in layered magnetic materials, such as high-spin to low-spin transitions of transition-metal ions and the accompanying structural phase transitions and superconductivity; substantial enhancement of the Curie temperature ( $T_c$ ) and continuous switching of magnetocrystalline anisotropy; and antiferromagnetic-to-ferromagnetic transitions achieved by modulating exchange interactions or via stacking engineering. Finally, we discuss future directions, including synergistic multi-field control by combining pressure with electric fields and twisted heterostructures, as well as strategies such as pressure quenching to retain high-pressure metastable magnetic phases at ambient conditions. These advances are expected to open new avenues for discovering novel magnetic states and developing high-performance device materials.

**Keywords:** van der Waals magnetic materials, high-pressure, metastable materials, modulation of magnetism

DOI: [10.7498/aps.75.20260107](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260107)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260107](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260107)

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFA1204001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52272127), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. E2023203002).

† Corresponding author. E-mail: [congputu@ysu.edu.cn](mailto:congputu@ysu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [kunzhai@ysu.edu.cn](mailto:kunzhai@ysu.edu.cn)



## 高压调控层状磁性材料性质的研究进展

岳栋栋 高鑫 牟从普 柳忠元 翟昆

### Research progress in high-pressure tuning of layered magnetic materials

YUE Dongdong GAO Xin MU Congpu LIU Zhongyuan ZHAI Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060808 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260107

CSTR: 32037.14.aps.75.20260107

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260107>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 二维非层状磁性材料的研究进展

Research advances in two-dimensional non-layered magnetic materials

物理学报. 2025, 74(22): 227501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251177>

#### 范德瓦耳斯材料的原位应变工程与应用

*In-situ* strain engineering and applications of van der Waals materials

物理学报. 2024, 73(11): 110701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240353>

#### 几种范德瓦耳斯铁电材料中新奇物性的研究进展

Research progress of novel properties in several van der Waals ferroelectric materials

物理学报. 2022, 71(12): 127305 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220349>

#### 二维范德瓦耳斯铁电材料的研究进展

Recent progress of two-dimensional van der Waals ferroelectric materials

物理学报. 2026, 75(1): 127305 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251367>

#### 二维范德瓦耳斯材料的超导物性研究及性能调控

Two-dimensional van der Waals: Characterization and manipulation of superconductivity

物理学报. 2022, 71(18): 187401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220638>

#### 固态色心高压下量子磁探测研究进展

Research progress of quantum magnetic sensing of solid-state color centers under high pressure

物理学报. 2026, 75(4): 187401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251370>