

# 高压下过渡金属二硫属化物的超导电性

黄艳萍<sup>1</sup> 迟振华<sup>1</sup> 崔田<sup>1,2,†</sup>

(1 宁波大学物理科学与技术学院 高压物理科学研究院 宁波 315211)

(2 吉林大学物理学院 超硬材料国家重点实验室 长春 130012)

2021-09-23收到

† email: cuitian@nbu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220404

## Pressure-tunable superconductivity in transition-metal dichalcogenides

HUANG Yan-Ping<sup>1</sup> CHI Zhen-Hua<sup>1</sup> CUI Tian<sup>1,2,†</sup>

(1 Institute of High Pressure Physics, School of Physical Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(2 State Key Laboratory of Superhard Materials, College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

**摘要** 过渡金属二硫属化物是一类典型的二维类石墨烯层状结构的材料, 相比于石墨烯的全碳元素组成以及无带隙的电子结构特点, 具有更丰富的元素组成、多样的微观结构和奇异的物理性质。过渡金属二硫属化物强烈的各向异性以及在催化、光伏器件和储能材料等领域的优异表现, 引起了科学家们浓厚的研究兴趣。它们的层间范德瓦耳斯间隙、层间范德瓦耳斯相互作用、层间堆垛次序对压力非常敏感, 易于通过压力调控其晶体结构和电子能带结构, 进而发生电子基态的变化。过渡金属二硫属化物的电子基态可以是莫特绝缘体、激子绝缘体、电荷密度波、半导体、(拓扑)半金属、金属, 甚至是超导体。在常压条件下, 部分过渡金属二硫属化物具有超导电性。实验表明, 压力可以诱导过渡金属二硫属化物非超导体发生超导转变, 或者提高超导母体的超导转变温度。文章以典型的过渡金属二硫属化物为例, 概述了其在高压调控下超导电性的响应, 并简要讨论产生超导电性的物理机制。

**关键词** 高压, 过渡金属二硫属化物, 超导电性

**Abstract** Transition metal dichalcogenides (TMDs) are typical two-dimensional graphene-like layered structure materials. Compared with graphene's all-carbon composition and bandgap-free electronic structure, TMDs have more abundant element composition, various crystal structure and novel physical properties. Their strong anisotropy and excellent performance in catalysis, photovoltaic devices and energy storage materials have aroused great interest of scientists. These layered structure TMDs are very sensitive to pressure due to their interlayer stacking mode and weak interlayer van der Waals forces, and it is easy to alter their crystal structure and electronic band under high pressure, and further to change the electronic ground state. they span a wealth of electronic ground states encompassing Mott insulators, excitonic insulators, charge density waves, semiconductors, (topological) semimetals, metals, and superconductors. Some pristine polymorphs can even exhibit intrinsic superconductivity at ambient pressure. Experiments show that extrinsic superconductivity can be induced or enhanced in a multitude of pristine polymorph TMDs via external pressure. In this review, the emergence and evolution of superconductivity in these polymorphs upon application of pressure is addressed.

**Keywords** high pressure, transition-metal dichalcogenides, superconductivity

# 1 引言

压强是指物体单位面积上所受到的垂直压力，单位是帕斯卡(Pa)，1个标准大气压(atm)= $1.01325 \times 10^5$  Pa。在高压科学中，人们习惯性地称压强为压力，其常用单位是GPa，除此之外，还经常用到bar，它们之间的转换关系是 $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10^4 \text{ bar}$ 。与温度、化学组分类似，压力(强)也是一个非常重要的热力学参量<sup>[1-6]</sup>，对物质的结构和性质有着重要的影响。高压泛指一切高于常压条件的压力环境，高压环境在日常生活中比比皆是，比如，电压力锅中的压力大概在1.5 atm，汽车轮胎中的压力大概在2—3 atm，而蒸汽系统中的压力环境可以达到20 atm左右。同时，高压还广泛地存在于宇宙中，比如，对地球来说，其内部就是一个处于高温高压环境下的物质体系，其中心的压力超过了350 GPa。而银河系中土星和木星内部的压力环境大概可以达到2—10 TPa。也就是说，自然界中的压力跨度可能在60个数量级以上<sup>[7]</sup>，如图1所示。

高压科学研究是从18世纪中期慢慢发展起来的，J.坎顿对水的压缩性进行了实验研究。随后，阿马加(Amagat)在19世纪末发明了活塞压力

计。而对高压相变的研究则起源于塔曼利(Tammann)测量了物质的体积在压力变化时出现的不连续现象，这些工作都属于高压物理研究的初始阶段。发展到20世纪50年代以后，高压物理科学有了重大突破，德里卡莫通过固体的电子谱、稀土盐类的光谱、有机化合物的电子谱等工作将高压研究推向了一个新的高潮<sup>[8-11]</sup>。而今，科研人员通过金刚石对顶砧加压装置获得的最高压力已经超过了500 GPa<sup>[12, 13]</sup>。并且越来越多的常压实验测试手段已经可以成熟地运用在高压物质科学的研究当中，比较常见的有高压拉曼光谱、高压布里渊光谱、高压同步辐射XRD、高压吸收光谱、高压电磁学测量等诸多技术<sup>[14-17]</sup>。

高压可以广泛地应用在凝聚态物理科学中，物质在几万、几十万甚至上百万大气压的高压作用下，其内部原子之间的距离被压缩，使得原子之间的相互作用大大增强，从而使键合性质发生改变，出现不同于常压时的新结构及新现象。比较典型的例子有：石墨在高温高压的条件下可以转换成完全不同于原来物性的金刚石<sup>[18-21]</sup>；金属钠在高压的作用下从金属变成了透明的绝缘体<sup>[22]</sup>；简单的双原子分子氢气在压力作用下也会呈现出很多不同的结构，并且理论预测氢气很有可能从原来的绝缘体变成超导体<sup>[23-25]</sup>。近几年在一系列

富氢化合物中发现了高压诱导的高于200 K甚至接近室温的超导转变现象，例如 $\text{H}_3\text{S}$ 、 $\text{LaH}_{10}$ 等二元体系<sup>[26-28]</sup>和C-S-H三元体系<sup>[29]</sup>。这些结果显示高压对提高超导转变温度和深入认识高温超导体的物理本质起到了重要作用。

基于高压等极端条件对物质结构与性质影响的重要性，为了深入认识二维层状材料压力诱导超导电性的规律及内在的机理，本文以典型的过渡金属二硫属化物(transition metal dichalcogenides, TMDs)为例，概述其在高压调控下超导电性的响应，并简要讨论产生超导电性的物理机制。

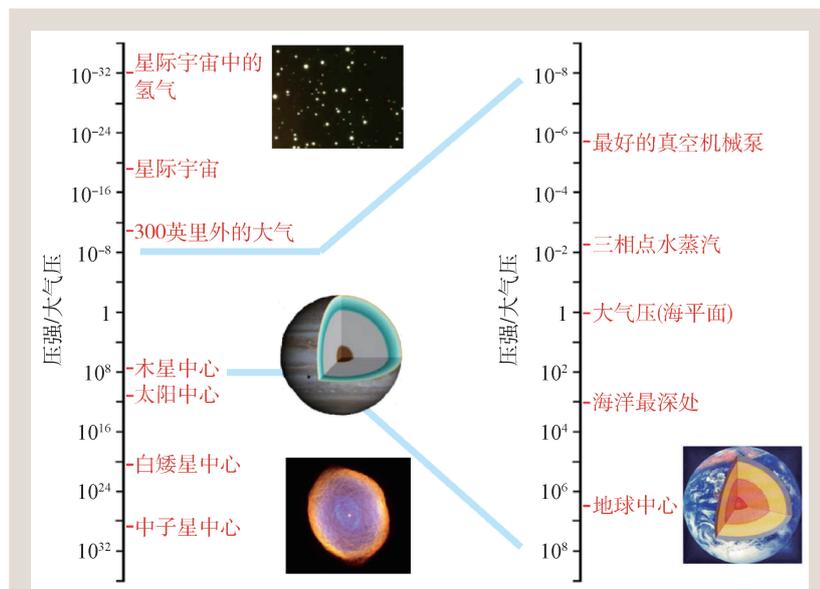


图1 自然界中压力范围跨度示意图<sup>[7]</sup>

## 2 层状结构过渡金属二硫属化物

### 2.1 晶体结构

典型的层状结构过渡金属二硫属化物主要是由元素周期表中第IVB, VB, VIB族过渡金属元素和硫族元素组成的二元化合物。其化学式可以表示为 $MX_2$ , 其中 $M$ 代表过渡金属元素, 如Ti, Nb, Ta, Mo, W等,  $X$ 代表硫属元素, 如S, Se, Te。从结构上来讲, 其基本结构单元为 $X-M-X$ 三明治结构, 层内的 $X-M$ 通过强的共价键或离子键耦合, 层间的 $X-X$ 通过弱的范德瓦耳斯相互作用耦合。根据单胞中 $X-M-X$ 三明治单元的数目及 $MX_6$ 多面体配位方式的不同, 可分为1T相(八面体配位, 三方结构), 1T'相(畸变八面体配位, 单斜结构),  $T_d$ 相(畸变八面体配位, 正交结构), 2H相(三角棱镜配位, 六方结构)和3R相(三角棱镜配位, 菱方结构)等等, 如图2所示<sup>[30]</sup>。由于不同的过渡金属元素 $d$ 电子的数目及其与硫属元素特定的组合方式, 过渡金属二硫属化物的热力学稳定相通常为其中一种结构, 而其他结构则为热力学亚稳相。由于IVB族过渡金属原子和硫族原子之间强的离子键耦合, 其二硫属化物的晶体结构主要为八面体配位的1T相(三方结构); 由于VB族过渡金属原子和硫属原子之间适度的离子键耦合, 其二硫属化物的晶体结构既可以是八面体配位的1T相, 也可以是三角棱镜配位的2H相; 由于VIB族过渡金属原子和硫属原子之间的强共价键耦合, 其二硫属化物的晶体结构主要是三角棱镜配位的2H相。

### 2.2 电子结构

过渡金属二硫属化物多样的化学组成和丰富的结构导致其具有丰富的电学性能, 它的电子能带结构强烈依赖于过渡金属原子的配位环境及其 $d$ 电子数目。不同的电学性能起源于过渡金属原子的电子对非成键 $d$ 能带的填充状态, 如图3所示<sup>[31]</sup>。当 $d$ 轨道部分填充的时候, 具有(半)金属导

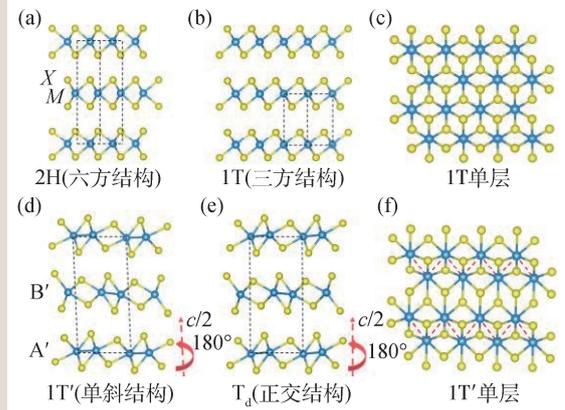


图2 几种典型的过渡金属二硫属化物的晶体结构<sup>[30]</sup>

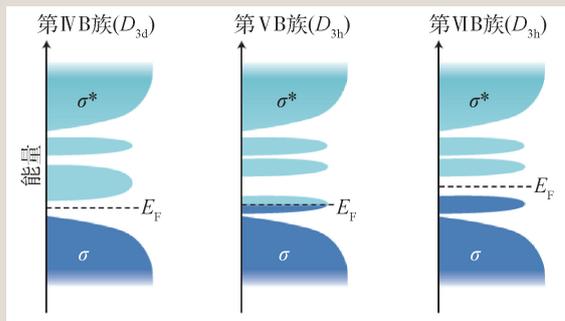


图3 第IVB、VB、VIB族TMDs成键态( $\sigma$ )和反成键态( $\sigma^*$ )带隙内 $d$ 轨道的填充示意图<sup>[31]</sup>

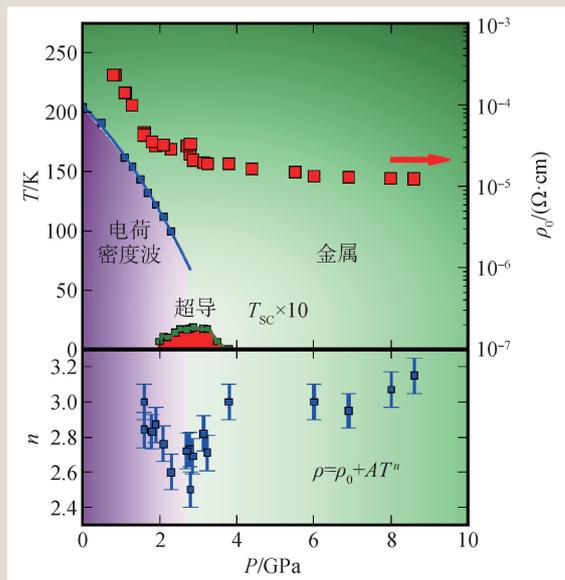


图4 1T-TiSe<sub>2</sub>的压力—温度相图(上图)以及温度因子随压力的变化情况(下图), 温度因子表明在临界压力3 GPa附近存在量子涨落<sup>[32]</sup>

电性; 当 $d$ 轨道完全填满的时候, 具有绝缘性或半导体性。第IVB族过渡金属二硫属化物具有空

的  $d$  能带，通常是半导体或半金属(图 3(a))。第 VB 族过渡金属二硫属化物的  $d$  能带部分填充，通常是金属(图 3(b))。第 VIB 族过渡金属二硫属化物的 1T 相通常是金属，而 2H 相通常是半导体(图 3(c))。电荷密度波(charge density wave, CDW)，即与晶格周期(非)共度的电荷密度的周期性调制，通常出现在第 IVB 和第 VB 族过渡金属二硫属化物，在低温下与超导共存竞争。常压条件下，

2H-NbS<sub>2</sub>, 2H-NbSe<sub>2</sub>, 2H-TaS<sub>2</sub>, 2H-TaSe<sub>2</sub>, 1T'-MoTe<sub>2</sub>, 1T-MoS<sub>2</sub>, 1T'-MoS<sub>2</sub>, 1T'-WS<sub>2</sub>等均具有超导电性。

### 3 压力诱导的超导电性

#### 3.1 第 IVB 族过渡金属二硫属化物

对于第 IVB 族过渡金属二硫属化物来说，其晶体结构只有 1T 相。常压条件下，1T-TiSe<sub>2</sub> 的电子学基态为电荷密度波或激子绝缘体。A. F. Kusmartseva 等人通过高压低温电输运测量发现了压力诱导 1T-TiSe<sub>2</sub> 的超导电性<sup>[32]</sup>。如图 4 所示，发生于 200 K 附近的电荷密度波转变被压力逐渐抑制并在 3 GPa 左右消失。超导电性在 2 GPa 左右开始出现并一直持续到 4 GPa，呈现一个圆顶形状的超导区域。Y. I. Joe 等人利用高压 X 射线衍射研究电荷密度波序，在 1T-TiSe<sub>2</sub> 的压力—温度相图中确立了一个量子临界点的存在。有趣的是，他们在 3 GPa 左右观察到一个再入的非公度相，说明一个利夫希茨三临界点(Lifshitz tricritical point)存在于超导圆顶之上<sup>[33]</sup>。这些研究表明：超导的出现不是由于电荷密度波的消失，而是由于电荷密度波畴壁的形成，与铜氧化物的高温超导现象类似。

1T-TiTe<sub>2</sub> 是费米液体的一个典型代表。相比于同结构的 1T-TiSe<sub>2</sub>，1T-TiTe<sub>2</sub> 在低温时并没有发生电荷密度波转变，而比 1T-TiSe<sub>2</sub> 更强的自旋—轨道耦合和费米能级附近增强的  $p$ - $d$  轨道杂化，使得 1T-TiTe<sub>2</sub> 的费米面形貌更易于受到外部因素的影响。前人分别从结构及超导电性方面研究了其在高压下的相图。U. Dutta 等人通过高压低温电输运测量发现了压力诱导的超导电性，有趣的是，1T-TiTe<sub>2</sub> 在准静水压和非静水压条件下的行为并不完全相同。在准静水压条件下，当压力达到 5 GPa 时出现超导转变，随着压力的增大，超导转变温度缓慢增大至 5.3 K，整个准静水压力区间，并没有出现其他的量子竞争序。而在非静水压条件下，当压力达到 1.8 GPa 时，100 K 附近的电阻出现了一个类似驼峰的转变，类似于准公度的 CDW 转变，当压力达到 6 GPa 左右时，CDW 被抑制，同时超导转变出现，并且超导电性在卸

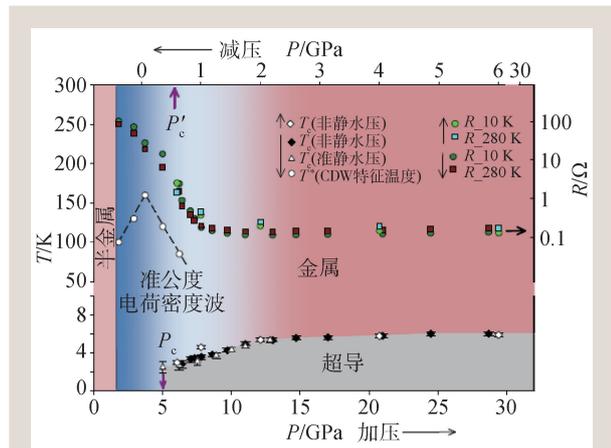


图5 1T-TiTe<sub>2</sub>的压力—温度相图<sup>[34]</sup>

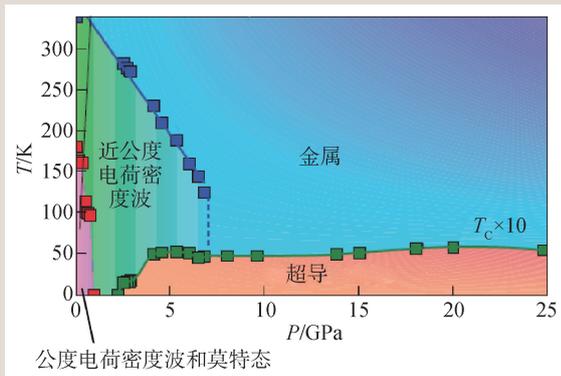


图6 1T-TaS<sub>2</sub>的压力—温度相图<sup>[35]</sup>

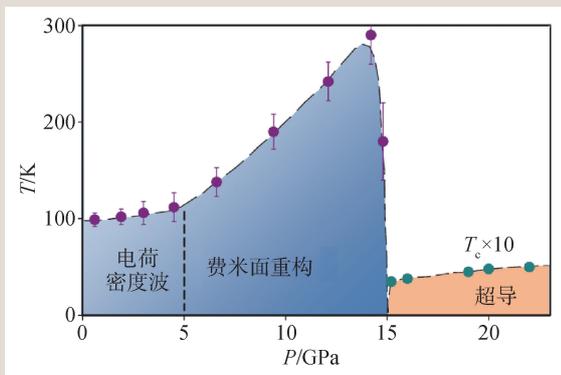


图7 1T-VSe<sub>2</sub>的压力—温度相图<sup>[36]</sup>

压到常压的过程中仍然可以保持<sup>[34]</sup>，如图5所示。对于非静水压和准静水压下不同现象的原因，可能是在非静水压下1T-TiTe<sub>2</sub>发生了不可逆的晶体结构相变。

### 3.2 第VB族过渡金属二硫属化合物

1T-TaS<sub>2</sub>作为量子自旋液体的候选材料，是已知的唯一具有莫特相和电荷密度波转变的过渡金属二硫属化合物。B. Sipoš等人发现了压力诱导1T-TaS<sub>2</sub>的超导电性<sup>[35]</sup>。如图6所示，莫特局域化和公度电荷密度波相在0.8 GPa左右被压力完全抑制。近公度电荷密度波相则可持续到7 GPa。首个超导迹象在近公度电荷密度波相中出现并在3—25 GPa的压力范围内保持在5 K左右。

S. Sahoo等人通过高压低温电输运测量研究了1T-VSe<sub>2</sub>中电荷密度波随压力的演化及超导电性的出现<sup>[36]</sup>。如图7所示，与等结构的1T-TiSe<sub>2</sub>和1T-TaS<sub>2</sub>相反，电荷密度波转变随压力升高逐渐增强直到5 GPa，随后电荷密度波转变随压力升高急剧增强直到14 GPa，此时电荷密度波转变温度达到290 K。继续加压，电荷密度波被压力急剧抑制，超导电性在15 GPa左右出现。

王铂森等人通过同时测量高压低温电阻率和磁化率观测到了在公度电荷密度波附近压力诱导1T-TaSe<sub>2</sub>的超导电性<sup>[37]</sup>。如图8所示，在4.5 GPa超导出现，在6.5 GPa左右，体超导出现并伴随着公度电荷密度波的坍塌。在6.5 GPa以上，超导转变临界温度随压力升高单调提升。超导转变温度在15 GPa达到最大值5.3 K。

### 3.3 第VIB族过渡金属二硫属化合物

迟振华等人通过高压低温电输运测量结合高压拉曼散射和同步辐射X射线衍射研究发现了压力诱导2H-MoS<sub>2</sub>的金属化及超导电性<sup>[38, 39]</sup>。

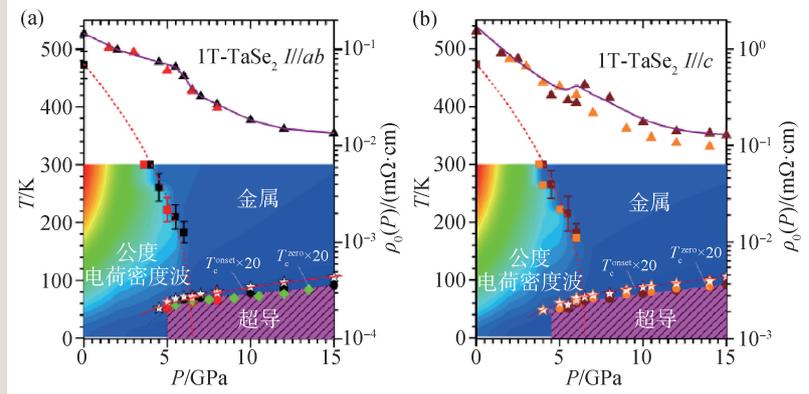


图8 1T-TaSe<sub>2</sub>的压力—温度相图 (a)电流平行于ab平面；(b)电流平行于c轴<sup>[37]</sup>

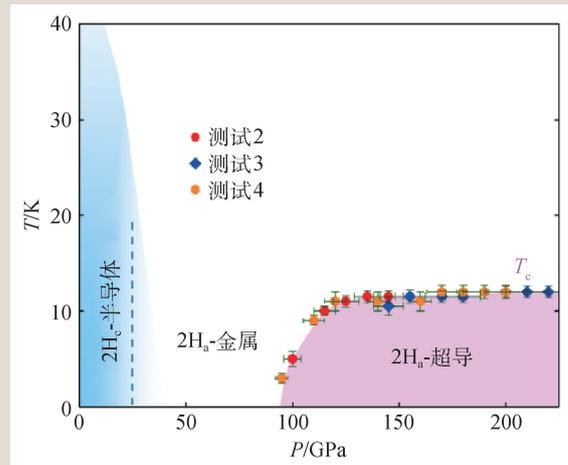


图9 2H-MoS<sub>2</sub>的压力—温度相图<sup>[39]</sup>

30 GPa的电阻—温度曲线在270 K附近有一个鼓包，随着压力升高，鼓包逐渐被抑制并在60 GPa左右完全消失。继续加压到70 GPa，电阻—温度曲线呈现典型的金属导电行为。超导电性在90 GPa左右开始出现。超导转变临界温度从5 K逐渐提高到11 K，最后在200 GPa左右达到12 K。超导转变通过施加外磁场测量得到进一步验证，超导转变临界温度被外磁场明显抑制。

如图9所示，由2H<sub>c</sub>-MoS<sub>2</sub>到2H<sub>a</sub>-MoS<sub>2</sub>的等结构金属化相变从20 GPa左右开始，至40 GPa左右结束。超导转变从90 GPa左右开始出现，超导转变临界温度随压力增大逐渐提升，并在很宽的压力范围内保持在12 K附近。高压同步辐射X射线衍射研究表明，一直到155 GPa，2H<sub>a</sub>-MoS<sub>2</sub>不发生结构相变、分解及非晶化。密度泛函理论计算表明超导电性的出现与电子结构中一个新的平

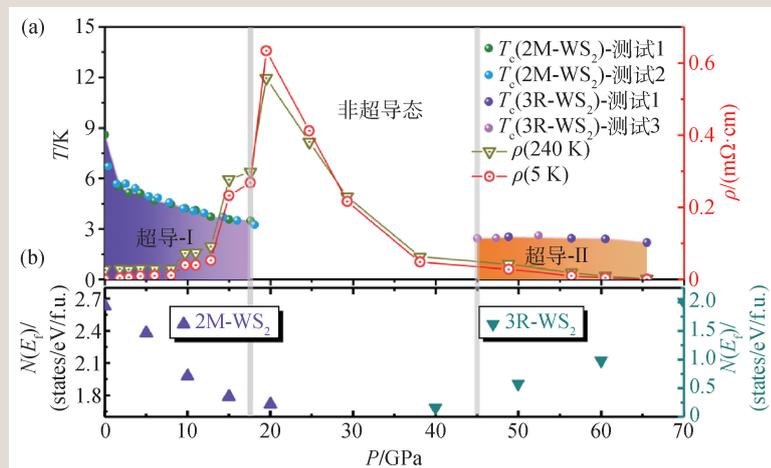


图10 (a) 2M-WS<sub>2</sub>在高压下的相图, 以及在240 K和5 K的电阻率; (b) 2M-WS<sub>2</sub>和3R-WS<sub>2</sub>在费米面处的态密度N(E<sub>F</sub>)随压力的变化<sup>[40]</sup>

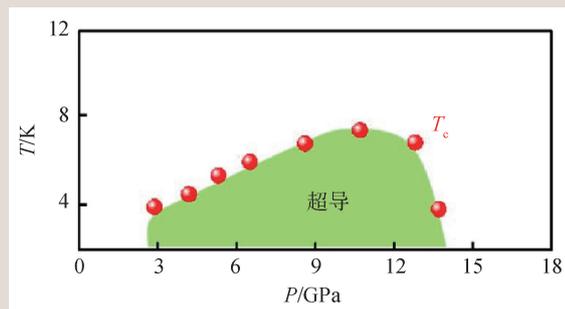


图11 2M-WSe<sub>2</sub>的超导温度随压力的变化情况<sup>[41]</sup>

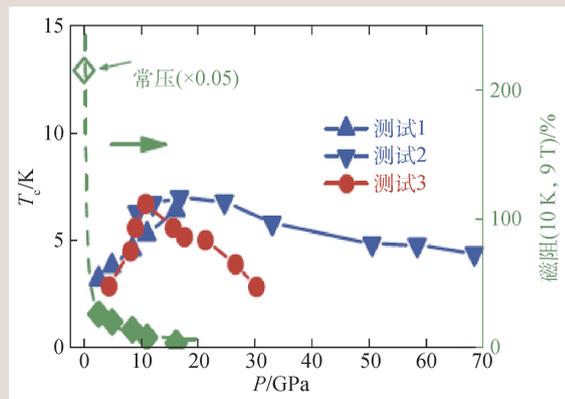


图12 T<sub>d</sub>-WTe<sub>2</sub>的压力—温度相图<sup>[42]</sup>

费米口袋的出现有关。

黄晓丽等人还深入地研究了2M-WS<sub>2</sub>在高压下的晶体结构以及超导电性的演变。2M-WS<sub>2</sub>在常压下固有的超导转变温度随外加压力逐渐降低直至消失。高压下发生了由2M向呈半导体特性的3R-WS<sub>2</sub>的结构相变过程。单胞内S-W-S原子层由2M相的2个变为3R相的3个, 层间距大幅度减小

使单胞体积在20 GPa发生了5.1%的塌缩。随着压力的增加, 3R-WS<sub>2</sub>在48.8 GPa发生了半导体—金属的转变并伴随着超导转变的出现, 超导转变温度约为2.5 K。结合理论计算结果, 2M-WS<sub>2</sub>超导转变温度的降低以及3R-WS<sub>2</sub>超导的出现可能与费米面处态密度随压力的变化有关, 如图10所示。该工作首次报道了第六副族硫化物中关于3R相的高压研究以及超导转变的出现<sup>[40]</sup>。

对于同样是2M结构的WSe<sub>2</sub>也出现了超导电性, 李全军等人

发现当压力达到4 GPa左右时, 开始出现超导, 并在11 GPa时超导转变温度达到最高值, 然后随着压力的增大, 超导转变温度开始降低<sup>[41]</sup>, 呈现出明显的超导圆顶, 如图11所示。

WTe<sub>2</sub>通常以正交结构稳定存在, 是第一个被预言的第二类外尔半金属, 具有超大不饱和磁阻的特征。宋风麒等人发现T<sub>d</sub>-WTe<sub>2</sub>中超导电性在2.5 GPa左右开始出现, 在17 GPa左右, 超导转变临界温度迅速提升到7 K, 然后随着压力升高, 超导转变温度逐渐降低, 呈现一个超导圆顶<sup>[42]</sup>, 如图12所示。然而, 孙力玲等人的研究表明: 超导电性在10.5 GPa左右开始出现, 伴随着巨磁阻效应被压力完全抑制, 同时霍尔系数符号发生从正到负的变化<sup>[43]</sup>, 如图13所示。孙建等人认为超导电性的出现可归因于压力诱导的正交相到单斜相的结构相变。电子—声子耦合计算预言了和实验值非常接近的超导转变临界温度, 表明高压下T<sub>d</sub>-WTe<sub>2</sub>是传统的BCS超导体<sup>[44]</sup>。另一个典型的外尔半金属1T'-MoTe<sub>2</sub>在压力诱导下也呈现出了超导圆顶的现象<sup>[45]</sup>。

## 4 总结与展望

本文简要概述了压力对过渡金属二硫属化物超导电性的调控作用, 其超导电性的起源包括但

不限于压力诱导的电荷密度波转变被抑制、费米面附近态密度增强、电—声耦合强度增强及结构相变等。对于第IVB族和第VB族过渡金属二硫属化物的1T相，电荷密度波形成的物理机制不是传统的费米面嵌套，而可能是激子或能带型扬—特勒(Jahn—Teller)效应。在1T-TiSe<sub>2</sub>的温度—压力相图中，超导电性的出现伴随着电荷密度波被压力逐渐抑制并最终消失，在电荷密度波区域附近呈现一个超导穹顶，与非常规超导体如重费米子超导体、铁基超导体和铜氧化物超导体类似。因为电荷密度波和超导电性都来源于费米面不稳定和电子—声子耦合，所以电荷密度波振幅的涨落有可能是1T-TiSe<sub>2</sub>中超导电子库珀配对的媒介。然而，由于超导穹顶区域远离电荷密度波的量子临界点，所以电荷密度波和超导电性之间关联性不强，超导电性可能是常规的s波超导。1T-TaS<sub>2</sub>和2H-MoS<sub>2</sub>的温度—压力相图不呈现超导穹顶，与1T-TiSe<sub>2</sub>截然不同，表明超导电性产生的物理机制不同。

第VB族和第VIB族过渡金属二硫属化物中超导电子库珀配对可能主要是通过电子—声子耦合，而第IVB族过渡金属二硫属化物中超导电子库珀配对的媒介可能主要是电荷密度波振幅的涨落。值得一提的是，压力诱导拓扑半金属1T'-MoTe<sub>2</sub>和T<sub>d</sub>-WTe<sub>2</sub>的超导电性为拓扑超导研究提

## 参考文献

[1] Mujica A, Rubio A, Muñoz A *et al.* Rev. Mod. Phys., 2003, 75: 863  
 [2] Hemley R J, Ashcroft N W. Phys. Today, 1998, 51: 26  
 [3] Jayaraman A. Rev. Sci. Instrum., 1986, 57: 1013  
 [4] Parise J B. Rev. Mineral. Geochem., 2006, 63: 205  
 [5] Stoffer D. Science, 1997, 278: 1576  
 [6] Williams Q, Hemley R J. Annu. Rev. Earth. Pl. Sc., 2001, 29: 365  
 [7] Ashcroft N W. Condensed Matter at Higher Densities. In: High Pressure Phenomena. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Vol. 147, IOS Press, 2002, p151  
 [8] Housley R M, Dash J G, Nussbaum R H. Phys. Rev., 1964, 136: A464  
 [9] Clendenen G L, Drickamer H G. Phys. Rev., 1964, 135: A1643  
 [10] Moyzis Jr J A, DePasquali G, Drickamer H G. Phys. Rev., 1968, 172: 665  
 [11] Debrunner P, Vaughan R W, Champion A R *et al.* Rev. Sci. In-

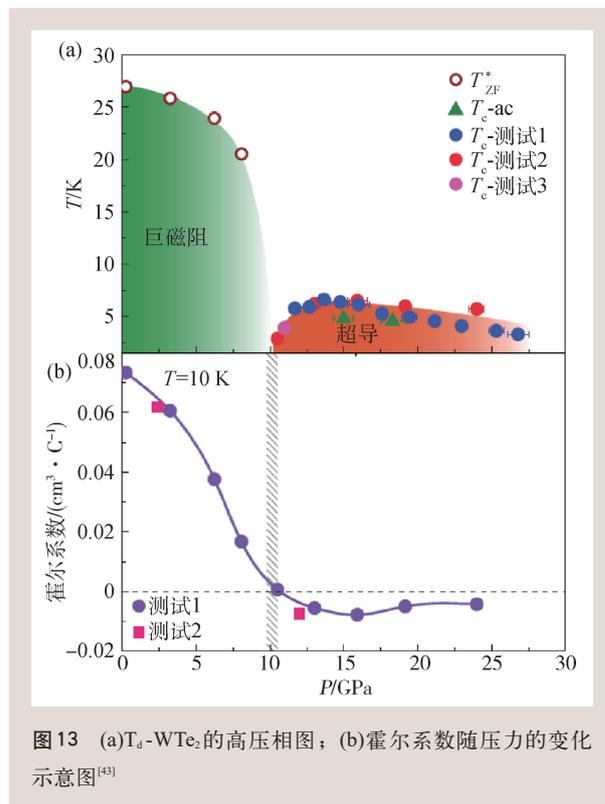


图13 (a)T<sub>d</sub>-WTe<sub>2</sub>的高压相图；(b)霍尔系数随压力的变化示意图<sup>[43]</sup>

供了一个平台。电子—电子相互作用，电子—声子耦合及自旋—轨道耦合在压力诱导过渡金属二硫属化物超导电性中都发挥着一定作用。关于过渡金属二硫属化物在高压下超导电性的机制还存在很多值得研究的问题，希望本文的回顾、梳理和探讨为后续的理论 and 实验研究提供有益的参考。

strum., 1966, 37: 1310

[12] Ruoff A L, Luo H, Vohra Y K. J. Appl. Phys., 1991, 69(9): 6413  
 [13] Ruoff A L, Xia H, Xia Q. Rev. Sci. Instrum., 1992, 63(10): 4342  
 [14] Weinstein B A, Piermarini G J. Phys. Rev. B, 1975, 12: 1172  
 [15] Hirsch K R, Holzapfel W B. Rev. Sci. Instrum., 1981, 52: 52  
 [16] Sassen K, Sonnenschein R. Rev. Sci. Instrum., 1982, 53: 644  
 [17] Spain I L, Black D R. Rev. Sci. Instrum., 1985, 56: 1461  
 [18] Akaiishi M, Kanda H, Yamaoka S. Science, 1993, 259(5101): 1592  
 [19] Chepurov A I, Yelisseyev A P, Zhimulev E I *et al.* Inorg. Mater., 2008, 44: 377  
 [20] Lv S J, Hong S M, Yuan C S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2009, 95(24): 242105  
 [21] Liu X B, Ma H A, Zhang Z F *et al.* Diam. Relat. Mater., 2011, 20(4): 468  
 [22] Ma Y M, Eremets M, Oganov A R *et al.* Nature, 2009, 458: 182

[23] Wigner E, Huntington H B. *J. Chem. Phys.*, 1935, 3: 764

[24] Mao H K, Bell P M, Hemley R J. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 55: 99

[25] Lorenzana H E, Silvera I F, Goettel K A. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 63: 2080

[26] Drozdov A P, Erements M I, Troyan I A *et al.* *Nature*, 2015, 525: 73

[27] Drozdov A P, Kong P P, Minkov V S *et al.* *Nature*, 2019, 569: 528

[28] Somayazulu M, Ahart M, Mishra A K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122: 027001

[29] Snider E, Dasenbrock G N, McBride R *et al.* *Nature*, 2020, 586 (7829): 373

[30] Fang Y *et al.* *Adv. Mater.*, 2019, 31: 1901942

[31] Chhowalla M, Shin H S, Eda G *et al.* *Nature Chem.*, 2013, 5: 263

[32] Kusmartseva A F, Sipos B, Berger H *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 103: 236401

[33] Joe Y I, Chen X M, Ghaemi P *et al.* *Nature Phys.*, 2014, 10: 421.

[34] Dutta U, Malavi P S, Sahoo S *et al.* *Phys. Rev. B*, 2018, 97: 060503(R)

[35] Sipos B, Kusmartseva A F, Akrap A *et al.* *Nature Mater.*, 2008, 7: 960

[36] Sahoo S, Dutta U, Harnagea L *et al.* *Phys. Rev. B*, 2020, 101: 014514

[37] Wang B S, Liu Y, Ishigaki K *et al.* *Phys. Rev. B*, 2017, 95: 220501(R)

[38] Chi Z H, Zhao X M, Zhang H D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113: 036802

[39] Chi Z H, Chen X L, Yen F *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120: 037002

[40] Zhang W T, Fang Y Q, Tian F B *et al.* *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12: 3321

[41] Fang Y Q, Dong Q, Pan J *et al.* *J. Mater. Chem. C*, 2019, 7: 8551

[42] Pan X C, Chen X L, Liu H M *et al.* *Nature Commun.*, 2015, 6: 7805

[43] Kang D F, Zhou Y Z, Yi W *et al.* *Nature Commun.*, 2015, 6: 7804

[44] Lu P C, Kim J S, Yang J *et al.* *Phys. Rev. B*, 2016, 94: 224512

[45] Qi Y P, Naumov P G, Ali M N *et al.* *Nature Commun.*, 2016, 7: 11038

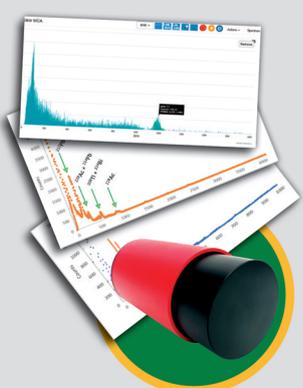
**SP5630EN - 环境监测套件**  
伽马辐射测量

**CAEN edu Educational Tools**

**有效的教培必须包含实际的伽马能谱采集和分析等实操课程!**

**知识点**

- 能量刻度
- 环境本底测量
- 被动测氡
- 样品和峰值识别
- 环境样品测量





EDUCATIONAL HANDBOOK  
FREE DOWNLOAD



探索我们周围的环境!

**官方授权代理商(中国):**  
北京中检维康电子技术有限公司

[www.phyclover.com](http://www.phyclover.com)  
电话: 86-10-88026700  
邮箱: info@phyclover.com

[www.caen.it/educational](http://www.caen.it/educational)  
**CAEN edu**