

高压下的铁基超导体: 现象与物理

郭静 吴奇 孙力玲

Pressure-induced phenomena and physics in iron-based superconductors

Guo Jing Wu Qi Sun Li-Ling

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 207409 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181651

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181651>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[新型交生结构自掺杂铁基超导体](#)

Self-doped iron-based superconductors with intergrowth structures

物理学报.2018, 67(20): 207406 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181355>

[高压下的铁基超导体: 现象与物理](#)

Pressure-induced phenomena and physics in iron-based superconductors

物理学报.2018, 67(20): 207409 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181651>

[新型 FeSe 基超导材料研究进展](#)

Research progress on FeSe-based superconducting materials

物理学报.2018, 67(20): 207412 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181701>

[铁基超导 1111 体系 CaFeAsF 的单晶生长和物性研究](#)

Single crystal growth and physical property study of 1111-type Fe-based superconducting system CaFeAsF

物理学报.2018, 67(17): 177401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181371>

[压力下碱金属铁硒基超导体中的现象与物理](#)

Phenomena and findings in pressurized alkaline iron selenide superconductors

物理学报.2015, 64(21): 217406 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.217406>

专题: 铁基高温超导体发现十周年

高压下的铁基超导体: 现象与物理*

郭静¹⁾ 吴奇¹⁾ 孙力玲^{1)2)†}

1)(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2018年9月4日收到; 2018年9月27日收到修改稿)

始于2008年的铁基超导体研究续写了高温超导发展史的新篇章. 回顾过去十年对铁基超导体的研究, 在理论、实验及应用方面都取得了辉煌的成绩, 丰富了人们对高温超导电性的认识, 为突破高温超导机理研究、最终实现超导材料的人工设计与更广泛的应用奠定了坚实的基础. 本文主要介绍了通过高压实验研究手段在铁基超导体的研究中取得的一些重要进展及呈现出的新现象和新物理, 例如压致超导现象、压力导致的超导再进入现象、压力对超导转变温度的提升效应、压力研究对铁基超导体超导转变温度的预测、相分离结构对超导电性的影响及反铁磁-超导双临界点的发现等. 希望这些高压研究结果与本文报道的其他各类实验与理论研究成果一起, 为全面、深入地理解铁基超导体勾画出一幅较为完整的物理图像.

关键词: 铁基超导体, 高压, 量子相变, 磁有序

PACS: 74.70.Xa, 74.62.Fj, 74.25.-q

DOI: 10.7498/aps.67.20181651

1 引言

1986年铜氧化物超导体的发现翻开了高温超导研究的历史篇章^[1]. 在随后铁基超导体发现前的22年时间里, 人们对超导电性的认识有了根本的转变, 对超导电性研究的手段也更加完备^[2-14]. 但是, 在高温超导新材料的探索方面, 除了以CuO₂为基本超导结构单元的各种类型铜氧化物超导体外, 并未发现新的高温超导体. 2008年, 铁基超导体(以FeAs为基本超导结构单元, 后来又发现了FeSe基本超导结构单元)的发现^[15,16], 为高温超导体的研究带来了新的机遇和挑战. 人们在原有铜氧化物超导体研究中积累的关于高温超导体知识的基础上, 利用各类先进的实验手段及理论积累对铁基超导体进行了全方位的、高效的研究, 在过去的十年里取得了大量关于铁基超导体的研究成果^[17-73]. 这些研究成果极大地丰富了人们对高

温超导体的认识, 人们期待通过对铁基超导体和铜氧化物超导体共性的研究, 在高温超导机理研究方面能很快有所突破. 但是, 在铁基超导体发现十年后的今天, 高温超导机理仍被认为是21世纪凝聚态物理研究的重大挑战之一^[74-76]. 目前面对的高温超导研究现状, 正如美国著名物理学家Anderson^[77]指出的, 现有的高温超导实验结果已处于一个“过定(over determined)”的状态. 这应该是指产生高温超导理论突破所需要的实验积累已经足够充分了, 因而, 可能更加需要的是对各类实验结果全方位的综合和对比, 是对现有理论的“去粗取精”, “去伪存真”, 从而实现高温超导机理研究的突破. 为推动铁基超导体乃至高温超导体的深入研究和全面理解, 本文介绍一些高压实验研究方面的重要进展.

最近几年, 已有一些关于铁基超导体高压研究的综述文章发表^[39,78-80]. 由于作者研究兴趣、知识的广度和深度以及篇幅的限制, 本文只在铁

* 中国科学院B类先导项目(批准号: XDB25000000)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2017YFA0302900, 2016YFA0300300, 2017YFA0303103)和自然科学基金(批准号: 11427805, U1532267, 11604376)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: llsun@iphy.ac.cn

砷基和铁硒基这两类超导体中分别选取了几项我们认为对高温超导电性研究意义相对重要、且相关科研人员和广大读者可能会感兴趣的高压下铁基超导体研究的实验结果进行重点介绍,因而,肯定会有很多重要的铁基超导体高压实验结果并未在本文介绍,对于这部分内容,感兴趣的读者可以在已发表的综述文章中 [17,39,78-80] 获得更多的信息.

2 铁砷基超导体

2008年春,日本东京大学Kamihara等 [15] 发现在母体材料LaFeAsO中掺杂F元素可以实现超导转变温度达26 K的超导电性,这一突破性发现引起了凝聚态物理研究领域的极大关注,掀起了继铜氧化物超导体后对高温超导体研究的又一热潮,翻开了高温超导研究的新篇章.

2.1 压力下超导电性增强的启示

压力作为一种“干净”的调控手段 [81],曾在液氮温区铜氧化物高温超导体的发现中发挥了关键作用 [4-6,9]. 铁基超导体一出现, Takahashi等 [35] 就利用金刚石对顶压砧技术对LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}化合物进行了高压输运测量,发现其超导转变温度(T_c)在4 GPa下从常压的26 K提高到43 K,如图1所示. 这一结果表明体积的压缩对提高铁砷基超导体转变温度会产生重要影响,预示着采用小半径稀土原子替代的方法可能会提升这类超导体的超导转变温度. 随后,赵忠贤研究组 [46-52] 采用高温高压合成的方法,并利用小半径稀土元素(如Ce, Pr, Nd, Sm等)替代La,率先成功合成出了一系列 T_c 达到50 K以上的1111体系超导体,并创造了这类超导体55 K的最高 T_c 纪录. 可以说,在铁砷

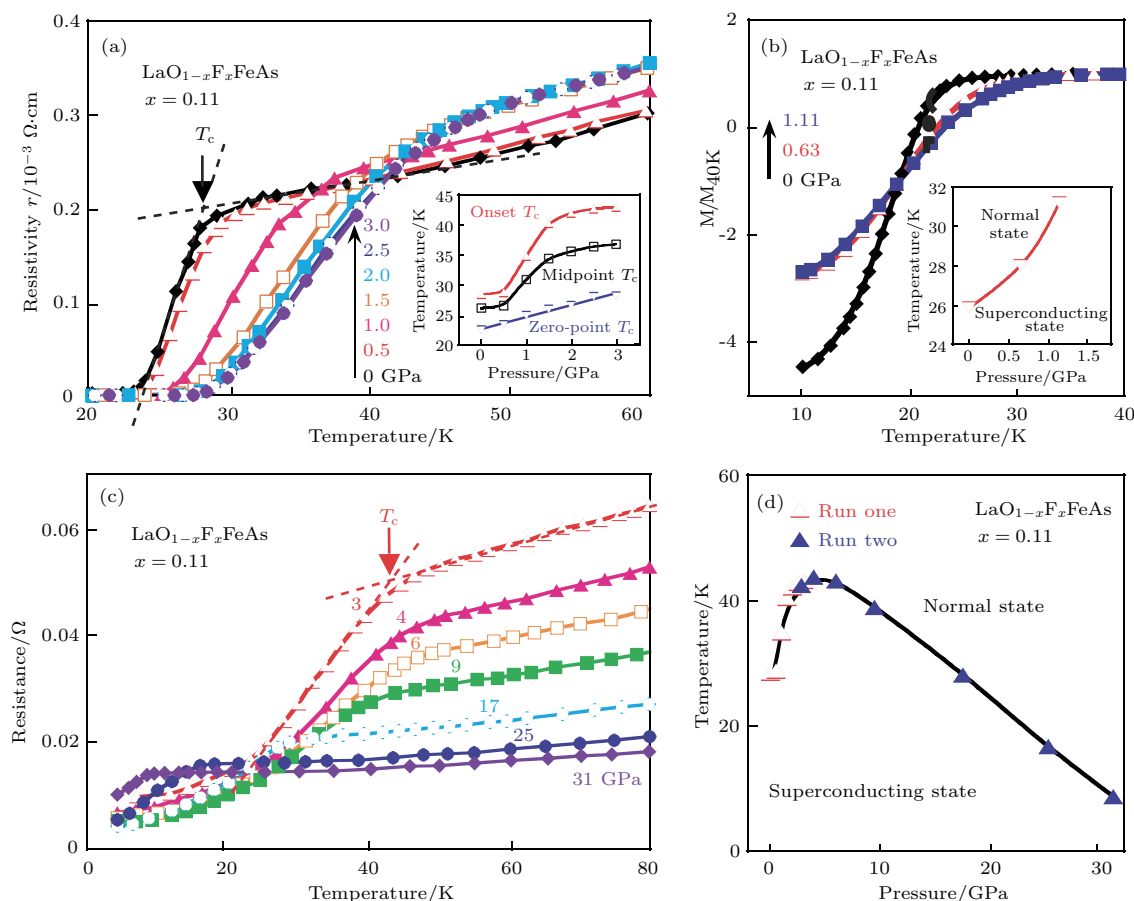


图1 压力下LaO_{0.89}F_{0.11}FeAs的超导电性 (a) 利用活塞型压腔测量的结果; (b) 不同 T_c 时压力下样品超导电性的抗磁性; (c) 通过金刚石压砧装置测量的结果,表明这个超导体的 T_c 在压力下有所提升; (d) 温度-压力相图. 本图摘自参考文献 [35]
 Fig. 1. Superconducting properties in compressed LaO_{0.89}F_{0.11}FeAs: (a) Results obtained from measurements in a piston-cylinder pressure device; (b) magnetic dependence of T_c under pressure; (c) results obtained from measurements in a DAC, showing pressure-induced enhancement of T_c in the superconductor; (d) pressure-temperature phase diagram. Reproduced with permission from Ref. [35].

基超导新材料的探索中, 高压实验结果对高温超导新材料探索的重要“指引作用”再次得到体现. 同时也揭示了压力引起的关键晶格参数的微小变化对铜基和铁基两类不同高温超导体的 T_c 产生决定性的影响 [4-6,82,83], 这是本文想要强调的高压研究所揭示的两类高温超导体的共性特点之一.

2.2 压力研究对铁砷基超导体超导转变温度的预测

1111 体系铁砷基超导体发现之后, 人们对其开展了大量的高压研究 [35,84-99], 发现含有不同组分的超导化合物的 T_c 对压力的响应不同. Yi 等 [85] 对具有最佳氧含量的 $\text{SmFeAsO}_{0.85}$ 和 $\text{NdFeAsO}_{0.85}$ 进行高压下原位电阻等物性测量, 发现其 T_c 随压力的升高持续下降. 而 $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ 和高氧缺位的 $\text{LaFeAsO}_{0.3}$ 以及过量氟掺杂的 $\text{LaFeAsO}_{0.5}\text{F}_{0.5}$ 的 T_c 则在压力下先升高后降低, 形成具有拱形的 T_c -P 关系相图 [86], 如图 2 所示. 如果将每个样品的 T_c 随着压力变化的曲线向常压方向延长, 发现所有样品与零压力相交的 T_c 点都处于不高于 60 K 的温度范围内. 因此他们提出, 以 FeAs 为基本超导单元的超导体可能实现的最高超导温度不会超过 60 K. 到目前为止, 获得的 FeAs 基超导体的实验结果均符合这一预测. 实验结果与铁基超导体中存在 As-Fe-As 最佳键角和最佳阴离子高度的研究结果是一致的 [82,83].

在上述对镧系元素 1111 体系铁砷基超导体研究的基础上, Wang 等 [100,101] 对近年发现的含铜系

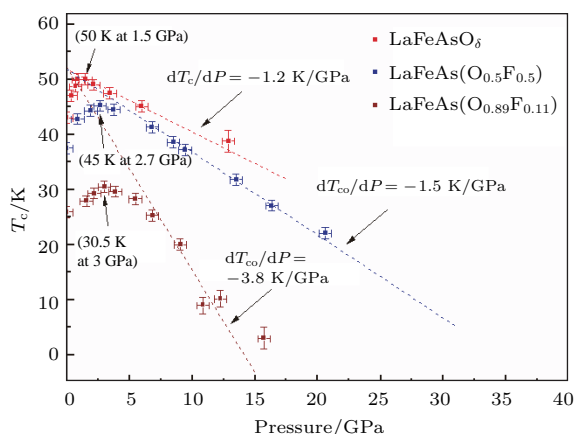


图2 LaFeAsO_δ , $\text{LaFeAs}(\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5})$ 和 $\text{LaFeAs}(\text{O}_{0.89}\text{F}_{0.11})$ 样品的 T_c 与压力的关系相图. 本图摘自参考文献 [86]

Fig. 2. Diagram of superconducting T_c vs. pressure for LaFeAsO_δ , $\text{LaFeAs}(\text{O}_{0.5}\text{F}_{0.5})$ and $\text{LaFeAs}(\text{O}_{0.89}\text{F}_{0.11})$ sample. Reproduced with permission from Ref. [86].

元素 1111 体系铁基超导体 ThFeAsN 的高压行为进行了系统研究. 发现其 T_c 随 As—Fe—As 键角或阴离子高度的变化规律与镧系是一致的. 这表明, 以 FeAs 为“超导基因” [102] 的 1111 体系中, 镧系或铜系元素插层对超导电性的影响规律是相同的.

2.3 压力导致的超导电性

随着对铁基超导材料的进一步探索, 人们又发现了铁砷化合物的另一个家族, 具有 ThCr_2Si_2 结构的“122”体系 $M\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ 和 Eu). 常压下, 该体系的母体基态是具有反铁磁的金属, 在低温下会出现从四方相到正交相的结构相变, 同时伴随着反铁磁相变 [103-108]. 通过化学掺杂引入载流子可以抑制反铁磁有序, 诱发超导转变出现, T_c 最高达到 38 K [109-115]. 尤其令人感兴趣的是, 相对于其他铁砷基超导体, 该体系对外部物理压力及化学内压力的响应都非常敏感. $M\text{Fe}_2\text{As}_2$ 母相和 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ (晶体结构可描述为在 CaFe_2As_2 晶格中交替用 Pt_3As_8 中间层来置换 Fe_2As_2 层) 中的反铁磁转变在压力调控下均能得到明显的抑制, 继而出现超导电性 [116-126]. 为此, 我们建立了通用压力-温度相图, 如图 3 所示. 值得一提的是, 用等价态的 P 替代 As, 虽然没有引入载流子, 但由于阴离子半径不同, 这种替代相当于引入了化学内压力, 同样也能导致该体系出现超导电性 [54,127,128].

未掺杂的 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ 化合物为反铁磁半导体, 用 Pt 部分替代 FeAs 层中的 Fe, 可使其出现超导电性 [129,130]. 由于 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_5$ 化合物具有独特的半导体特性的中间层, 使其在已发表的铁基超导体研究论文中占有特殊的地位. Gao 等 [126] 通过高压原位电阻、交流磁化率、霍尔测量及同步辐射 X 射线结构分析等综合实验手段对该化合物进行了研究, 发现压力在有效抑制样品中的反铁磁长程序后, 导致了超导电性的出现, 如图 4 所示. 获得的温度-压力相图清楚地显示出在 3.5—7.0 GPa 压力范围有一拱形的超导区域. 高压原位同步辐射结构分析结果表明, 在本研究的压力范围内没有结构相变发生. 对比温度-压力电子相图和 Fe 位掺 Pt 的温度-掺杂电子相图, 可以看出两者之间有明显的相似和不同. 在 4.1 GPa 以内, 压力和电子掺杂对体系的反铁磁转变温度、超导转变温度的影响十分相似, 然而在

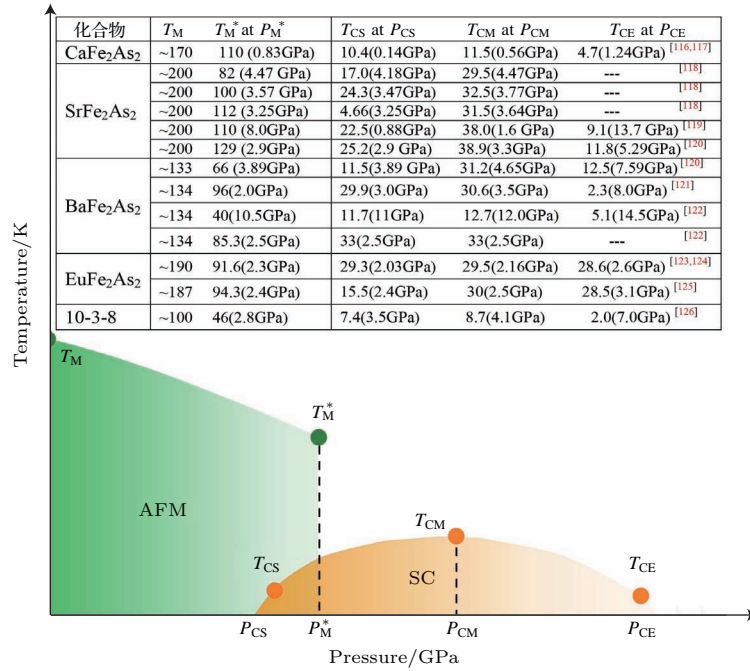


图3 铁砷基122体系及10-3-8体系(Ca₁₀(Pt₃As₈)(Fe₂As₂)₅) 超导体压力-温度通用相图 其中 T_M 代表常压下磁有序转变温度; T_M^* 代表压力下测得的最终的磁有序转变温度, P_M^* 为相应的压力; T_{CS} 代表压力下超导出现的温度, P_{CS} 为相应的压力, T_{CM} 代表压力下超导转变最高温度, P_{CM} 为相应的压力, T_{CE} 为压力下最终测得的超导转变温度, P_{CE} 为相应的压力

Fig. 3. The schematic phase diagram of iron-based 122 systems and Ca₁₀(Pt₃As₈)(Fe₂As₂)₅(10-3-8) compound under pressure. T_M represents the magnetic transition temperature at ambient pressure; T_M^* is the temperature where the magnetic transition ends under pressure and P_M^* is the corresponding pressure; T_{CS} is the temperature where superconducting occurs under pressure and P_{CS} is the corresponding pressure, T_{CM} is the highest T_c achieved at high pressure and P_{CM} is the corresponding pressure; T_{CE} is the temperature where the superconductivity ends at high pressure and P_{CE} is the corresponding pressure.

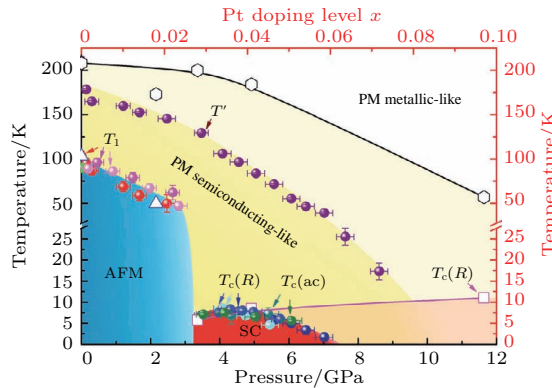


图4 Ca₁₀(Pt₃As₈)(Fe₂As₂)₅ 样品的温度-压力相图及其与温度-掺杂相图的对比, 表明两种调控手段在一定压力及低掺杂区域的等效性, 以及在高压和重掺杂区域的不等效性 空心数据点来自Pt掺杂的10-3-8样品的温度-掺杂相图^[129,130], 实心蓝色和青色圆点为高压电阻测量获得的 T_c , 深青色圆点代表高压交流磁化率测量得到的 T_c ; 紫色实心点代表从金属态到半导体态转变的温度 T' , 粉色和红色实心点代表反铁磁转变温度, 是由电阻对温度的一阶导数得到的; SC代表超导区域, AFM代表反铁磁相, PM代表顺磁相. 本图摘自参考文献^[126]

Fig. 4. Temperature-pressure electronic phase diagram for the 10-3-8 phase, and scaled temperature-doping phase diagram, showing their equivalence in the range of moderate pressure and light doping and nonequivalence in the range of higher pressure and heavy doping. Open symbols are the corresponding data from the temperature-doping phase diagram of Pt-doped 10-3-8^[129,130]. The navy and cyan solid circles represent the T_c values obtained from high-pressure resistance ($T_c(R)$) and the dark cyan solid circles represent the T_c value measured from high-pressure ac susceptibility ($T_c(ac)$) measurements. The purple solid circles represent the crossover temperature (T') from metallic state to semiconducting-like state. The red and pink solid circles show the AFM transition temperature determined by the temperature derivative of electrical resistance dR/dT obtained at different pressures. SC represents the superconducting region. AFM represents the antiferromagnetic phase. PM represents the paramagnetic phase. Reproduced with permission from Ref. ^[126].

更高压力下, 该系统的 T_c 随压力的变化关系与随电子掺杂的变化关系完全不同, 表明两种途径诱发超导电性的直接起因是不同的. 另外, 这类化合物的电子相图中不存在反铁磁和超导共存的两相区, 这与其他已知的铁砷基 122 型超导体不同. 高压原位霍尔测量结果表明, 压力导致的电子从电荷库层到铁砷层的转移为实现超导电性提供了载流子. 值得注意的是掺杂和压力下其载流子都是电子型的, 对这两类超导相图的对比显示在一定的压力和掺杂范围内其对反铁磁的抑制和对超导电性的诱发作用是类似的, 但在更高的压力和掺杂比例下, 两种量子调控方法所产生的结果则完全不同 [129–131]. 这一压力与掺杂的对比研究清晰地展示了压力和掺杂效应对超导这一宏观量子态的影

响在作用机理上的不同.

2.4 铁砷基超导体中反铁磁-超导双临界点的发现

$\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$ (112 型) 铁砷基超导体是近年发现的新型铁砷体系. 该类超导体具有独特的单斜结构, 其结构可以描述为 FeAs 层和 (Ca/La)-As-(Ca/La) 层沿着 c 轴方向堆叠而成. 特别是具有金属性的 As-As 锯齿形链状插层的存在, 使得它的晶体结构和电子结构与 122 型铁基超导体有本质的区别 [132–135]. 在 $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{FeAs}_2$ 体系中, 当掺杂量在 $x = 0.15$ – 0.25 之间时出现超导电性, 该掺杂区间内超导与反铁磁是共存的 [136]. 然而, 在 $x > 0.25$ 的区域, 样品具有单一的反铁磁态 [137].

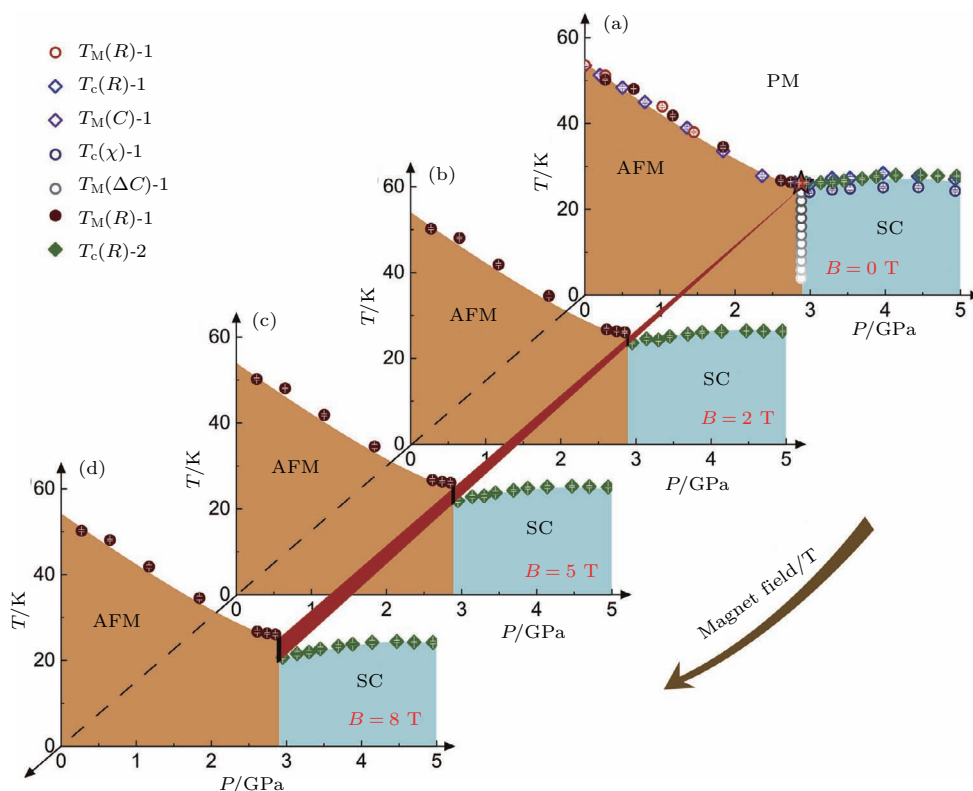


图5 不同磁场下 $\text{Ca}_{0.73}\text{La}_{0.27}\text{FeAs}_2$ 单晶样品的温度-压力相图 PM, AFM 和 SC 分别代表顺磁、反铁磁和超导相; 洋红色圆圈和菱形代表在静水压环境下两轮电阻测量以及比热测量得到的反铁磁转变温度; 绿的实心菱形和蓝的空心菱形分别代表第一轮电阻测量及交流比热测量得到的超导转变温度; 红星代表双临界点的位置, 这是由依赖压力的 T_M 和 T_c 的外延线的交点确定的; 灰色圆圈是从热容测量结果获得的数据; 径向红线显示了磁场对 T_c 的抑制作用. 本图摘自参考文献 [138]

Fig. 5. Temperature-pressure phase diagrams obtained at different magnetic fields for $\text{Ca}_{0.73}\text{La}_{0.27}\text{FeAs}_2$ single crystals. The acronyms PM, AFM, and SC stand for paramagnetic, antiferromagnetic, and superconducting phases, respectively. The magenta-colored circles and custom diamonds represent the temperature of the AMF phase transition detected from two-run electrical resistance measurements ($T_M(R-1)$ and $T_M(R-2)$) and heat capacity $T_M(C)$ measurements under hydrostatic pressure conditions. The green diamonds and blue circles stand for the superconducting transition temperature determined from the resistance $T_c(R-1)$ and ac susceptibility $T_c(ac)$ measurements, respectively. The position of the red star denotes the location of the bi-critical point, which is determined by an intersection of extrapolated lines of the pressure-dependent T_M and T_c . The gray circles are the data extracted from the heat capacity results. The radial red line shows the suppressed tendency of T_c by the magnetic field. Reproduced with permission from Ref. [138].

Zhou 等^[138]对 $\text{Ca}_{0.73}\text{La}_{0.27}\text{FeAs}_2$ 样品进行了系统的高压研究, 得到了该样品在压力下的相图, 如图 5 所示. 随着压力的增加, 材料的反铁磁 (AFM) 转变温度逐渐被抑制, 并在临界压力下突然消失, 同时超导转变突然出现, 其超导体积分高达 90% 以上, 表明具有体超导电性. 尤其, 超导 (SC) 转变起始温度 (T_c) 与反铁磁转变温度 (T_M) 消失的温度基本相同, 具有这种相变特征的点通常被称为双临界点 (bi-critical point). 这是首次在高温超导体中发现这种 AFM-SC 双临界点. 二十多年前, SO(5) 超导理论曾通过对铜氧化物超导体的研究对双临界点的存在提出了预测^[139], 并认为如果有这样的双临界点存在, 它在磁场的作用下应该不会被分离成独立的 T_M 和 T_c . 而本研究不仅首次在高温超导体中发现了反铁磁-超导转变双临界点, 而且发现该双临界点在磁场作用下表现出 T_M 和 T_c 的分离行为, 这为深刻理解高温超导电性提出了新的研究内容.

2.5 双磁性层超导体中稀土元素层对超导电性的影响

EuFe_2As_2 是铁砷基 122 型超导体中比较独特的一员, 除了 FeAs 层在较高温度下发生反铁磁转变外, 其 Eu 离子插层在 20 K 附近也呈现出磁有序, 而且其磁性可与超导电性共存^[123–125,140]. 对于这种两种不同磁性层共存的系统, 插层中的磁性与超导电性的关系是一个受到关注的重要问题. Guo 等^[141]对 $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 单晶超导样品进行了系统的高压研究, 如图 6 所示. 随着压力的升高, 其 T_c 不断下降, 而 Eu 离子插层的磁转变温度 T_m 则不断上升, 其 Eu 离子插层的磁性 (由于超导样品中的 Eu 离子磁性没有定论, 所以这里称其为 unknown magnetism, UM) 与超导电性在 0–0.5 GPa 这样一个窄的压力范围内是共存的. 随着压力的继续升高, UM 转变为铁磁 (FM) 性, 此时超导电性消失. 这一实验结果表明, UM 态可以从超导态中产生并与超导态共存, 但压力下 FM 态的出现则阻止了超导态的形成. 高压同步辐射 XRD 实验结果表明该样品在所研究的压力范围内并没有发生结构相变, 但是在 9 GPa 附近发现 c 轴有明显的塌缩. 高压同步辐射吸收 (XAS) 实验表明部分 Eu 离

子的价态随着压力的升高从二价向三价转变, 因而, 样品在压力下所表现的体积的塌缩可能是由价态转变所致. 该研究首次从 $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 中 Eu 离子插层的磁性对导电层超导电性的影响的角度综合研究了压力下该插层的磁性、FeAs 层的超导电性、Eu 离子价态及晶格参数的演化过程及相互关联, 提出压力下 Eu 离子价态的升高有助于 $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 中 Eu 离子插层的磁性从 UM 到 FM 的转变, 但是不利于稳定样品的超导电性.

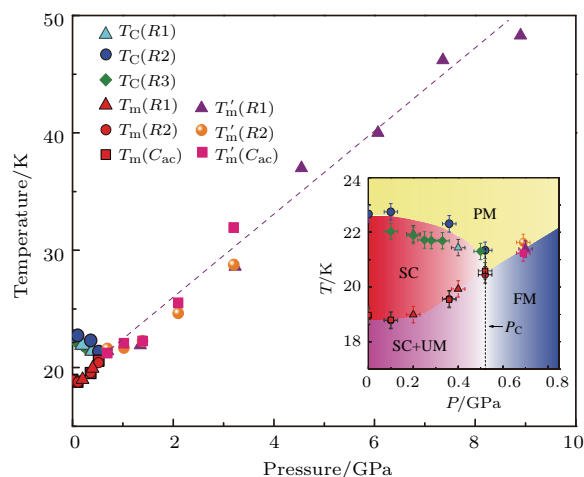


图 6 $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 样品的压力-温度相图 $T_c(R1)$, $T_c(R2)$ 和 $T_c(R3)$ 代表从不同轮的高压电阻测量中获得的超导转变温度; $T_m(R1)$, $T_m(R2)$ 和 $T_m(Cac)$ 分别代表从不同轮的高压电阻和交流磁化率测量中获得的 PM-UM 的起始转变温度; $T'_m(R1)$, $T'_m(R2)$ 和 $T'_m(Cac)$ 分别代表从不同轮的高压电阻和交流比热测量中获得的 PM-FM 的起始转变温度; 图中 T_c 为超导转变临界温度, T_m 为 PM-UM 的转变温度, T'_m 为 PM-FM 的转变温度; $T_c(R2)$ 为样品在静水压环境中测量得到的数据, $T_c(R1)$ 和 $T_c(R3)$ 为样品在准静水压环境中测量得到的数据. 本图摘自参考文献^[141]

Fig. 6. Pressure-Temperature phase diagram of the $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ sample. $T_c(R1)$, $T_c(R2)$, and $T_c(R3)$ stand for superconductivity transition temperatures obtained from different runs' resistance measurements; $T_m(R1)$, $T_m(R2)$ and $T_m(Cac)$ represent the onset temperature of PM-UM transitions of the intercalated layers, which are determined from different runs' resistance and ac-calorimetric measurements, respectively. $T'_m(R1)$, $T'_m(R2)$ and $T'_m(Cac)$ represent the onset temperature of PM-FM transitions, which are determined from different runs' resistance and ac-calorimetric measurements, respectively. $T_c(R2)$ is obtained from the sample subjected to hydrostatic pressure, and $T_c(R1)$ and $T_c(R3)$ are obtained from the sample subjected to quasi-hydrostatic pressure. Reproduced with permission from Ref. ^[141].

3 铁硒基超导体

铁硒化合物中的超导电性是吴茂昆研究组^[16]于2008年在 $\text{FeSe}_{1-\delta}$ 中发现的,其超导转变温度为8 K.该体系化合物空间群为 $P4/nmm$,具有典型的反 PbO 型晶体结构,仅由 FeSe 层沿 c 轴堆垛而成.

3.1 压力导致超导转变温度的大幅提高

Medvedev等^[36]对 FeSe 超导体进行了高压研究,发现其超导转变温度随压力的升高而大幅度提高,在8.9 GPa时 T_c 达到36.7 K(见图7).高压X射线衍射结果显示该材料在压力下出现由正交到四方相再到六角相的转变,表明该类化合物晶体结构的变化会对其电子结构及超导转变温度产生巨大的影响.此外,NMR的研究结果显示在压力下自旋涨落增强,预示着这可能是压力下该材料 T_c 大幅提高的原因^[142].

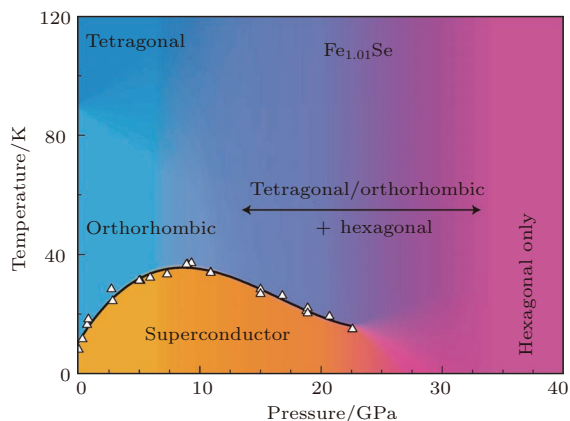


图7 $\text{Fe}_{1.01}\text{Se}$ 压力下的电子相图 常压下 $\text{Fe}_{1.01}\text{Se}$ 在90 K时发生从四方到正交的结构畸变,在8.9 GPa时超导转变温度(T_c)达到最大值36.7 K,在更高压力下,样品完全转变为六角相并表现出半导体行为.本图摘自参考文献^[36]

Fig. 7. Electronic phase diagram of $\text{Fe}_{1.01}\text{Se}$ as a function of pressure. At no applied pressure, $\text{Fe}_{1.01}\text{Se}$ undergoes a tetragonal to orthorhombic structural distortion at 90 K. The maximum T_c observed is 36.7 K at 8.9 GPa. At high pressures, the sample is solely hexagonal, and shows semiconducting behavior. Reproduced with permission from Ref. ^[36].

3.2 二次超导现象的发现

2010年,中国科学院物理研究所的陈小龙研究组^[143]和浙江大学方明虎研究组^[55,144]分别在 FeSe 层间插入碱金属K和 Tl/K , Tl/Rb ,发现了具

有磁性超晶格相分离结构的新型铁硒基超导体,其空间群为 $I4/mmm$,与 BaFe_2As_2 同结构,其超导转变温度在32 K左右.该超导体系的发现壮大了铁基超导家族,为非常规超导体的研究与探索及应用开辟了新的方向,提供了新的机遇.对该体系的后续研究表明,在 FeSe 层状化合物中插入 Rb , Cs 等元素,都可以合成与 KFe_2Se_2 和 $(\text{TlK}/\text{TlRb})\text{Fe}_2\text{Se}_2$ 具有相同晶体结构但存在相分离的超导体,并且能获得较高的超导转变温度^[55,145].这类超导体的结构特点是具有微观尺度的相分离,其常态的基本组织特征是具有组分为 $A'_2\text{Fe}_4\text{Se}_5$ ($A' = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}, \text{Tl/K}, \text{Tl/Rb}$)的绝缘相和超导电相^[146-154],这与其他类铁基超导体有明显区别^[15,19,48,80].这类铁硒基超导体的绝缘相具有很强的反铁磁磁矩,而且其反铁磁序寄居于具有棋盘型铁离子格子中铁离子空位形成的 $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$ 超晶格中^[155,156],如图8所示.对于该类超导体为何能够在这样强的磁背景下具有如此高的超导

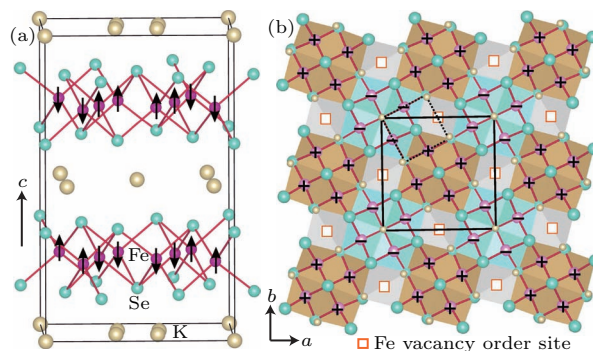


图8 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.6}\text{Se}_2$ 处于低温 $I4/m$ 晶胞的晶体结构和磁结构 (a) 顶部和底部的 Fe-Se 层,包括在 $c/2$ 的水平平面上形成的镜像的磁矩取向; (b) 顶层 Fe-Se 层的俯视图,黑色实线标记了 $I4/m$ 晶胞,铁空位 $\text{Fe}(1)$ 标记为方格,全占据的铁位 $\text{Fe}(2)$ 标记为紫色圆点,其中+或-号代表仅含 c 轴方向分量的磁矩方向,高温的 $I4/mmm$ 晶胞用虚线标记,低温 $I4/m$ 晶胞是一个 $\sqrt{5} \times \sqrt{5} \times 1$ 的超晶格.本图摘自参考文献^[155]

Fig. 8. Crystal and magnetic structure of $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.6}\text{Se}_2$ in the low-temperature $I4/m$ unit cell: (a) The top and bottom Fe-Se layers, including magnetic moment orientation, form a mirror image of each other by the horizontal plane at $c/2$; (b) top view of the top Fe-Se layer. The black solid line marks the $I4/m$ unit cell. The iron vacancy site $\text{Fe}(1)$ is marked by the open square, and the fully occupied $\text{Fe}(2)$ site by the purple circle with the + or - sign indicating magnetic moment direction that has only the c -axis component. The high-temperature $I4/mmm$ unit cell is marked by the dashed line, for which the low-temperature $I4/m$ unit cell is a $\sqrt{5} \times \sqrt{5} \times 1$ supercell. Reproduced with permission from Ref. ^[155].

临界温度, 以及反铁磁和铁离子有规律的缺位如何对超导电性产生影响等问题备受关注^[157–159].

Sun等^[37]对铁硒基超导体 $\text{Tl}_{0.6}\text{Rb}_{0.4}\text{Fe}_{1.67}\text{Se}_2$ 和 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ 进行了高压下的研究, 发现其常压超导相在压力下被抑制后, 在11 GPa附近出现压力诱导的二次超导相, T_c 最高达到48.7 K (如图9所示). 随后, 他们通过高压下的电输运性质测量和X射线散射测量发现了 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ ($x = 1.7$ 和1.78)超导体中存在压力驱动的量子临界转变. 当压力处在9.2–10.3 GPa之间时, 体系从费米液体转变为非费米液体, 同时从反铁磁态转变为顺磁态, 并伴随常压超导电性消失和第二个压力导致超导相的出现. 由此, 他们提出该体系压力导致的二次超导现象很可能与这一量子临界现象相关^[160].

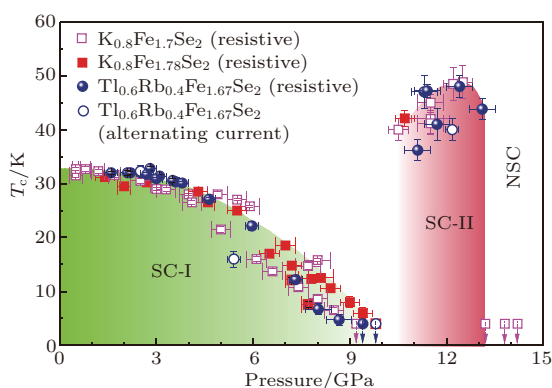


图9 $\text{Tl}_{0.6}\text{Rb}_{0.4}\text{Fe}_{1.67}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ 和 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.78}\text{Se}_2$ 的压力-超导转变温度(T_c)相图. 其中的数据点代表从高压电阻和交流磁化率测量得到的数据; 带下箭头的符号代表在低至4 K的温度范围内没有观察到超导电性; $\text{Tl}_{0.6}\text{Rb}_{0.4}\text{Fe}_{1.67}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ 和 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.78}\text{Se}_2$ 在压力下均呈现两个在约10 GPa的临界压力下分离的超导相区域(SC-I相和SC-II相), NSC代表压力高于13.2 GPa的非超导区域; 当压力为12.5 GPa时, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ 的最大 T_c 高达48.7 K; 当压力大于13.2 GPa时, 样品变为不超导. 本图摘自参考文献^[37].

Fig. 9. Pressure-superconducting transition temperature (T_c) phase diagram for $\text{Tl}_{0.6}\text{Rb}_{0.4}\text{Fe}_{1.67}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ and $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.78}\text{Se}_2$. The symbols represent the pressure-temperature conditions at which T_c values were observed from the resistive and alternating current susceptibility measurements; symbols with downward arrows represent the absence of superconductivity to the lowest temperature (4 K). All $\text{Tl}_{0.6}\text{Rb}_{0.4}\text{Fe}_{1.67}\text{Se}_2$, $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$, and $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.78}\text{Se}_2$ samples show two superconducting regions (SC-I and SC-II) separated by a critical pressure at about 10 GPa. NSC is the non-superconducting region at pressure > 13.2 GPa. The maximum T_c is found to be 48.7 K in $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.7}\text{Se}_2$ at a pressure of 12.5 GPa. At higher pressures > 13.2 GPa, the samples are non-superconducting. Reproduced with permission from Ref. ^[37].

3.3 相分离结构与超导电性的关系

为了揭示反铁磁绝缘相(245相)在实现超导转变中的作用, 进而理解 $A_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ 体系的超导机理问题, Gao等^[161]对 $A_2\text{Fe}_4\text{Se}_5$ ($A = \text{K}, \text{Tl}/\text{Rb}$)绝缘体系(245相)进行了系列的高压研究. 发现245相的绝缘体行为在高压下被完全抑制, 并且在此过程中出现了一个中间的金属(M')态. 随着压力增加, 245相中的Mott绝缘(MI)态和中间态(M' 态)在相当大的压力区间内共存, 直到10 GPa左右, Mott绝缘态被 M' 态完全取代, 系统进入完全的金属态. 对 $\text{K}_{0.8}\text{Fe}_{1.60}\text{Se}_2$ 的原位高压XRD测量结果表明, 此时体系中的铁空位有序被完全破坏. 对比纯245相化合物相图和超导样品相图还发现, 此压力下对应超导样品中的超导电性也消失了. 即MI态、铁空位序、SC-I相消失于同一个临界压力附近. 相应的理论计算表明, 在该类化合物中, M' 态是连接绝缘相(MI)和常压超导相的“桥梁”, MI态和 M' 态的共存与相互作用是超导产生的必要条件.

随后Gu等^[162]对 $\text{Rb}_{0.8}\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ 样品进行了压力和化学掺杂双调控, 并通过高压X射线衍射研究了在调控演化过程中Fe空位起到的作用. 发现在压力作用下, 无Te掺杂的 $\text{Rb}_{0.8}\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ 超导体和其他 $A_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$ 超导材料一样, 常压超导相在压力下逐渐被抑制. 通过Te的化学掺杂, 常压超导相也同样会不断被抑制. 当Te掺杂达到 $x = 0.4$ 时, 常压超导相消失. 分析认为, 这很可能与化学掺杂逐渐破坏体系反铁磁长程序相关. 另外发现, 代表Fe空位有序的超晶格峰并没有随化学掺杂而改变, 不同Te掺杂的系列样品中的Fe空位在压力下表现出相似的行为. 这一研究结果揭示了化学掺杂可以破坏反铁磁长程序, 而无法彻底改变Fe空位序的存在, 而外部压力可以彻底摧毁Fe空位有序.

4 启示与展望

高压下铁基超导体呈现出的丰富物理现象为我们提供了许多有重要价值的启示, 让我们面对高温超导研究的挑战能够继续前行. 本文通过对这些现象和可能物理内涵的综合分析, 提出两个方面的问题, 以期对更好地理解超导电性有所帮助.

一方面, 如何统一理解晶体结构对超导电性的影响. 对铁基和铜氧化物这类由过渡族金属元素与磷硫族元素构成的化合物超导体的高压研究结

果表明, 这些超导体中的超导单元晶格特征参数的微小变化都会对超导转变温度产生决定性的影响^[4-6,82,83], 说明这类超导体中精细的结构变化会引起电子轨道、自旋等相互作用的精细变化, 进而对其电子结构产生重要影响. 有趣的是, 最近在对全部由过渡族金属元素构成的合金(如高熵合金和商用的NbTi合金)超导体开展的高压研究结果展示了与这种现象相反的行为^[163,164]. 这类合金的 T_c 对压力产生的变形在达到一定的变形量后基本不发生变化(Ta-Nb-Hf-Zr-Ti的体积收缩为21.6%, NbTi合金体积收缩为34.7%), 表明其 T_c 对晶格精细结构的不敏感性. 由此, 提出这样一个问题: 过渡族金属化合物与过渡族合金的超导机理有何异同? 尤其, 后者表现出的压力行为完全不同于可用BCS理论描述的含有满d轨道元素超导体(如Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, Sn, Pb)对压力的响应行为. 这类合金超导体还是非常规超导体吗? 是否应该对所有这些压力调控的超导现象(乃至对掺杂和磁场调控中的超导现象)有一个更好的、统一的理解?

另一方面, 磁性与超导电性的关系问题. 铜氧化物和铁基超导体中都存在与超导相邻或实空间共存的磁有序结构. 对245铁基超导体的高压研究表明: 静态的相分离结构与超导相之间存在密切的关联性, 并且分离相的特征结构决定了超导电性的存在. 而在欠掺杂的空穴型铜氧化物超导体中, 赝能隙通常被认为是产生于具有动态磁涨落的相分离结构, 与纯245相一样是不超导的基态^[161,165], 但两种超导体表现出不同的行为. 那么, 不同的分离相对超导电性产生作用的区别是什么? 此外, 考虑到欠掺杂结构中相分离的存在, 对于具有拱形超导转变温度的超导体, 是否非超导分离相对拱形超导区域的形成产生了决定性的作用? 如不存在相分离, 是否在112型铁砷基超导体中发现的磁有序相和超导相之间的一级相变现象具有更普遍的意义?

铁基超导体的发现为开展高温超导体的研究与探索新型高温超导材料带来了新的机遇和挑战. 我们必须清醒地认识到, 铁基与铜氧化物超导体这两次高温超导的历史性突破都是产生于“偶然”(serendipity)的实验发现, 而不是正确理论指引的结果. 因而, 对于高温超导研究, 目前正面临着来自两个方面的重大挑战: 一是被列为21世纪凝聚态物理研究重大挑战的高温超导机理的破解; 二是对新的更加适合实际应用的高温超导体的探索.

显然, 这两者是相辅相成、互相促进的. 我们认为, 当前的超导理论研究应该充分总结和综合现有各类理论与实验相符合的成功之处, 并在此基础上, 突破现有理论中与实验结果不符的局限性的束缚, 通过完善现有理论乃至建立新的能够统一描述产生高温超导电性起源的“呈展物理(emergence physics)”图像, 进而实现在理论上对高温超导电性的全面、深刻和准确的理解, 为探索新型高温超导体及促进其更广泛的应用提供坚实的理论基础.

感谢本文中综述所涉及的我发表文章的合作者(按姓氏排序)曹光早教授、Robert Cava教授、陈根富研究员、陈仙辉院士、陈晓嘉教授、陈小龙研究员、戴希教授、方明虎教授、方忠研究员、冯济教授、黄清镇教授、郭建刚研究员、李建奇研究员、毛河光院士、Ni Ni教授、任志安研究员、俞榕教授、Jams Schilling教授、Katsuya Shimizu教授、斯其苗教授、Vladimir Sidorov教授、王楠林教授、王霖研究员、杨杰副研究员、衣玮副研究员、张昌锦研究员、张广铭教授、张裕恒院士、赵忠贤院士在相关研究中做出的贡献. 感谢上海光源和中国科学院高能物理研究所同步辐射装置及合肥强磁场对我们在大科学装置上开展高压实验所提供的设备保障和技术支持.

参考文献

- [1] Bednorz J G, Müller K A 1986 *Z. Phys. B* **64** 189
- [2] Pickett W E 1989 *Rev. Mod. Phys.* **61** 433
- [3] Dagotto E 1994 *Rev. Mod. Phys.* **66** 763
- [4] Chu C W, Gao L, Chen F, Huang Z J, Meng R L, Xue Y Y 1993 *Nature* **365** 323
- [5] Gao L, Xue Y Y, Chen F, Xiong Q, Meng R L, Ramirez D, Chu C W, Eggert J H, Mao H K 1994 *Phys. Rev. B* **50** 4260
- [6] Schilling A, Cantoni M, Guo J D, Ott H R 1993 *Nature* **363** 56
- [7] Orenstein J, Millis A J 2000 *Science* **288** 468
- [8] Damascelli A, Hussain Z, Shen Z X 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 473
- [9] Chen X J, Struzhkin V V, Yu Y, Goncharov A F, Lin C T, Mao H K, Hemley R J 2010 *Nature* **466** 950
- [10] Armitage N P, Fournier P, Greene R L 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 2421
- [11] Fischer O, Kugler M, Maggio-Aprile I, Berthod C, Renner C 2007 *Rev. Mod. Phys.* **79** 353
- [12] Meng J Q, Liu G D, Zhang W T, Zhao L, Liu H Y, Jia X W, Mu D X, Liu S Y, Dong X L, Zhang J, Lu W, Wang G L, Zhou Y, Zhu Y, Wang X Y, Xu Z Y, Chen C T, Zhou X J 2009 *Nature* **462** 335
- [13] Hashimoto M, Nowadnick E A, He R H, Vishik I M, Moritz B, He Y, Tanaka K, Moore R G, Lu D H, Yoshida

- Y, Ishikado M, Sasagawa T, Fujita K, Ishida S, Uchida S, Eisaki H, Hussain Z, Devereaux T P, Shen Z X 2015 *Nat. Mater.* **14** 37
- [14] Chu C W, Deng L Z, Lv B 2015 *Physica C* **514** 290
- [15] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, Hosono H 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 3296
- [16] Hsu F C, Luo J Y, Yeh K W, Chen T K, Huang T W, Wu M P, Lee Y C, Huang Y L, Chu Y Y, Yan D C, Wu M K 2008 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105** 14262
- [17] Dagotto E 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 849
- [18] Paglione J, Greene R L 2010 *Nat. Phys.* **6** 645
- [19] Mazin I I 2010 *Nature* **464** 183
- [20] Zhang P, Yaji K, Hashimoto T, Ota Y, Kondo T, Okazaki K, Wang Z J, Wen J S, Gu G D, Ding H, Shin S 2018 *Science* **360** 182
- [21] Miao H, Qian T, Shi X, Richard P, Kim T K, Hoesch M, Xing L Y, Wang X C, Jin C Q, Hu J P, Ding H 2015 *Nat. Commun.* **6** 6056
- [22] Mou D X, Liu S Y, Jia X W, He J F, Peng Y Y, Zhao L, Yu L, Liu G D, He S L, Dong X L, Zhang J, Wang H D, Dong C H, Fang M H, Wang X Y, Peng Q J, Wang Z M, Zhang S J, Yang F, Xu Z Y, Chen C T, Zhou X J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 107001
- [23] He S L, He J F, Zhang W H, Zhao L, Liu D F, Liu X, Mou D X, Ou Y B, Wang Q Y, Li Z, Wang L L, Peng Y Y, Liu Y, Chen C Y, Yu L, Liu G D, Dong X L, Zhang J, Chen C T, Xu Z Y, Chen X, Ma X C, Xue Q K, Zhou X J 2013 *Nat. Mater.* **12** 605
- [24] Zhang Y, Ye Z R, Ge Q Q, Chen F, Jiang J, Xu M, Xie B P, Feng D L 2012 *Nat. Phys.* **8** 371
- [25] Zhao J, Huang Q, de la Cruz C, Li S L, Lynn J W, Chen Y, Green M A, Chen G F, Li G, Li Z, Luo J L, Wang N L, Dai P C 2008 *Nat. Mater.* **7** 953
- [26] de la Cruz C, Huang Q, Lynn J W, Li J Y, Ratcliff II W, Zerstky J L, Mook H A, Chen G F, Luo J L, Wang N L, Dai P C 2008 *Nature* **453** 899
- [27] Lynn J W, Dai P 2009 *Physica C* **469** 469
- [28] Xie T, Gong D L, Ghosh H, Ghosh A, Soda M, Masuda T, Itoh S, Bourdarot F, Regnault L P, Danilkin S, Li S L, Luo H Q 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 137001
- [29] Lu X Y, Park J T, Zhang R, Luo H Q, Nevidomskyy A H, Si Q M, Dai P C 2014 *Science* **345** 657
- [30] Yin J X, Wang J H, Wu Z, Li A, Liang X J, Mao H Q, Chen G F, Lv B, Chu C W, Ding H, Pan S H 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 067401
- [31] Yin J X, Wu Z, Wang J H, Ye Z Y, Gong J, Hou X Y, Shan L, Li A, Liang X J, Wu X X, Li J, Ting C S, Wang Z, Hu J P, Hor P H, Ding H, Pan S H 2015 *Nat. Phys.* **11** 543
- [32] Zhou R, Li Z, Yang J, Sun D L, Lin C T, Zheng G Q 2013 *Nat. Commun.* **4** 2265
- [33] Grafe H J, Paar D, Lang G, Curro N J, Behr G, Werner J, Hamann-Borrero J, Hess C, Leps N, Klingeler R, Büchner B 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 047003
- [34] Ji G F, Zhang J S, Ma L, Fan P, Wang P S, Dai J, Tan G T, Song Y, Zhang C L, Dai P C, Normand B, Yu W Q 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 107004
- [35] Takahashi H, Igawa K, Arii K, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H 2008 *Nature* **453** 376
- [36] Medvedev S, McQueen T M, Troyan I A, Palasyuk T, Eremets M I, Cava R J, Naghavi S, Casper F, Ksenofontov V, Wortmann G, Felser C 2009 *Nat. Mater.* **8** 630
- [37] 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, Dai X, Mao H K, Zhao Z X 2012 *Nature* **483** 67
- [38] Sun J P, Matsuura K, Ye G Z, Mizukami Y, Shimozawa M, Matsubayashi K, Yamashita M, Watahige T, Kasahara S, Matsuda Y, Yan J Q, Sales B C, Uwatoko Y, Cheng J G, Shibauchi T 2016 *Nat. Commun.* **7** 12146
- [39] Chu C W, Lorenz B 2009 *Physica C* **469** 385
- [40] Luetkens H, Klauss H H, Kraken M, Litterst F J, Dellmann T, Klingeler R, Hess C, Khasanov R, Amato A, Baines C, Kosmala M, Schumann O J, Braden M, Hamann-Borrero J, Leps N, Kondrat A, Behr G, Werner J, Büchner B 2009 *Nat. Mater.* **8** 305
- [41] Drew A J, Niedermayer Ch, Baker P J, Pratt F L, Blundell S J, Lancaster T, Liu R H, Wu G, Chen X H, Watanabe I, Malik V K, Dubroka A, Rössle M, Kim K W, Baines C, Bernhard C 2009 *Nat. Mater.* **8** 310
- [42] Kondo T, Santander-Syro A F, Copie O, Liu C, Tillman M E, Mun E D, Schmalian J, Bud'ko S L, Tanatar M A, Canfield P C, Kaminski A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 147003
- [43] Wen H H 2012 *Rep. Prog. Phys.* **75** 112501
- [44] Wang Q Y, Li Z, Zhang W H, Zhang Z C, Zhang J S, Li W, Ding H, Ou Y B, Deng P, Chang K, Wen J, Song C L, He K, Jia J F, Ji S H, Wang Y Y, Wang L L, Chen X, Ma X C, Xue Q K 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 037402
- [45] Sun Y, Zhang W H, Xing Y, Li F S, Zhao Y F, Xia Z C, Wang L L, Ma X C, Xue Q K, Wang J 2014 *Sci. Rep.* **4** 6040
- [46] Yang J, Li Z C, Lu W, Yi W, Shen X L, Ren Z A, Chen G C, Dong X L, Sun L L, Zhou F, Zhao Z X 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 082001
- [47] Chen X H, Wu T, Wu G, Liu R H, Chen H, Fang D F 2008 *Nature* **453** 761
- [48] Ren Z A, Lu W, Yang J, Yi W, Shen X L, Li Z C, Che G C, Dong X L, Sun L L, Zhou F, Zhao Z X 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2215
- [49] Ren Z A, Che G C, Dong X L, Yang J, Lu W, Yi W, Shen X L, Li Z C, Sun L L, Zhou F, Zhao Z X 2008 *Europhys. Lett.* **83** 17002
- [50] Chen G F, Li Z, Wu D, Li G, Hu W Z, Dong J, Zheng P, Luo J L, Wang N L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 247002
- [51] Yang J, Shen X L, Lu W, Yi W, Li Z C, Ren Z A, Che G C, Dong X L, Sun L L, Zhou F 2009 *New J. Phys.* **11** 025005
- [52] Ren Z A, Yang J, Lu W, Yi W, Che G C, Dong X L, Sun L L, Zhao Z X 2008 *Mater. Res. Innovations* **12** 105
- [53] Wen H H, Mu G, Fang L, Yang H, Zhu X Y 2008 *Europhys. Lett.* **82** 17009
- [54] Ren Z, Tao Q, Jiang S, Feng C M, Wang C, Dai J H, Cao G H, Xu Z A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 137002

- [55] Fang M H, Wang H D, Dong C H, Li Z J, Feng C M, Chen J, Yuan H Q 2011 *Europhys. Lett.* **94** 27009
- [56] Qiu X, Zhou S Y, Zhang H, Pan B Y, Hong X C, Dai Y F, Eom M J, Kim J S, Ye Z R, Zhang Y, Feng D L, Li S Y 2012 *Phys. Rev. X* **2** 011010
- [57] Analytis J G, Chu J H, McDonald R D, Riggs S C, Fisher I R 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 207004
- [58] Qiu Y M, Bao W, Zhao Y, Broholm C, Stanev V, Tesanovic Z, Gasparovic Y C, Chang S, Hu J, Qian B, Fang M H, Mao Z Q 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 067008
- [59] Terashimaa K, Sekibab Y, Bowenc J H, Nakayamab K, Kawaharab T, Satob T, Richarde P, Xuf Y M, Lig L J, Caog G H, Xug Z A, Dingc H 2009 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **106** 7330
- [60] Wu M K, Wang M J, Yeh K W 2013 *Sci. Technol. Adv. Mater.* **14** 014402
- [61] Deguchi K, Takano Y, Mizuguchi Y 2012 *Sci. Technol. Adv. Mater.* **13** 054303
- [62] Kimber S A J, Kreyssig A, Zhang Y Z, Jeschke H O, Valenti R, Yokaichiya F, Colombier E, Yan J, Hansen T C, Chatterji T, Mc-Queeney R J, Canfield P C, Goldman A I, Argyriou D N 2009 *Nat. Mater.* **8** 471
- [63] Hosono H, Kuroki K 2015 *Physica C* **514** 399
- [64] Singh D J 2009 *Physica C* **469** 418
- [65] Tafti F F, Juneau-Fecteau A, Delage M- René de Cotret S, Reid J-Ph, Wang A F, Luo X G, Chen X H, Doiron-Leyraud N, Taillefer L 2013 *Nat. Phys.* **9** 349
- [66] Kuzmicheva T E, Kuzmichev S A, Mikheev M G, Ponomarev Y G, Tchesnokov S N, Eltsev Y F, Pudalov V M, Pervakov K S, Sadakov A V, Usoltsev A S, Khlybov E P, Kulikova L F 2013 *Europhys. Lett.* **102** 67006
- [67] Lu Z Y, Yan X W, Gao M, Xiang T 2011 *Physics* **40** 527 (in Chinese) [卢仲毅, 闫循旺, 高淼, 向涛 2011 物理 **40** 527]
- [68] Li J Q, Song Y J, Ma C, Yang H X, Shi H L, Wang Z W, Wang Z, Tian H F, Cao G L 2011 *Physics* **40** 516 (in Chinese)[李建奇, 宋源军, 马超, 杨槐馨, 施洪龙, 王秩伟, 王臻, 田焕芳, 曹高龙 2011 物理 **40** 516]
- [69] Bao W 2011 *Physics* **40** 535 (in Chinese) [鲍威 2011 物理 **40** 535]
- [70] Guo J G, Jin S F, Wang G, Wang S C, Zhu K X, Zhou T T, Lai X F, He M, Chen X L 2011 *Physics* **40** 510 (in Chinese) [郭建刚, 金士锋, 王刚, 王顺冲, 朱开兴, 周婷婷, 赖晓芳, 贺蒙, 陈小龙 2011 物理 **40** 510]
- [71] Ding H, Qian T, Wang X P 2011 *Physics* **40** 523 (in Chinese) [丁洪, 钱天, 汪晓平 2011 物理 **40** 523]
- [72] Luo X G, Wu T, Chen X H 2017 *Physics* **46** 499 (in Chinese) [罗习刚, 吴涛, 陈仙辉 2017 物理 **46** 499]
- [73] Song C L, Wang L L, Ma X C, Xue Q K 2015 *Chin. Sci. Bull.* **60** 2739
- [74] Mihailovic D 2017 *Springer Ser. Mater. Sci.* **255** 201
- [75] Xiang T, Xue J 2017 *Physics* **46** 514 (in Chinese) [向涛, 薛健 2017 物理 **46** 514]
- [76] Ruan W, Wang Y Y 2017 *Physics* **46** 521 (in Chinese) [阮威, 王亚愚 2017 物理 **46** 521]
- [77] Anderson P W 2016 arXiv: 1612.03919
- [78] Guo J, Sun L L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 217406 (in Chinese) [郭静, 孙力玲 2015 物理学报 **64** 217406]
- [79] Yi W, Wu Q, Sun L L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 037402 (in Chinese) [衣玮, 吴奇, 孙力玲 2017 物理学报 **66** 037402]
- [80] Sefat A S 2011 *Rep. Prog. Phys.* **74** 124502
- [81] Mao H K, Chen X J, Ding Y, Li B, Wang L 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 015007
- [82] Lee C H, Iyo A, Eisaki H, Kito H, Fernandez-Diaz M T, Ito T, Kihou K, Matsuhata H, Braden M, Yamada K 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 083704
- [83] Mizuguchi Y, Hara Y, Deguchi K, Tsuda S, Yamaguchi T, Takeda K, Kotegawa H, Tou H, Takano Y 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 054013
- [84] Takahashi H, Okada H, Igawa K, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H, Matsubayashi K, Uwatoko Y 2009 *J. Supercond. Novel Magn.* **22** 595
- [85] Yi W, Sun L L, Ren Z A, Lu W, Dong X L, Zhang H J, Dai X, Fang Z, Li Z C, Che G C, Yang J, Shen X L, Zhou F, Zhao Z X 2008 *Europhys. Lett.* **83** 57002
- [86] Yi W, Zhang C, Sun L L, Ren Z A, Lu W, Dong X L, Li Z C, Che G C, Yang J, Shen X L, Dai X, Fang Z, Zhou F, Zhao Z X 2008 *Europhys. Lett.* **84** 67009
- [87] Zocco D A, Hamlin J J, Baumbach R E, Maple M B, McGuire M A, Sefat A S, Sales B C, Jin R, Mandrus D, Jeffries J R, Weir S T, Vohra Y K 2008 *Physica C* **468** 2229
- [88] Okada H, Igawa K, Takahashi H, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H, Matsubayashi K, Uwatoko Y 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 113712
- [89] Kawakami T, Kamatani T, Okada H, Takahashi H, Nasu S, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 123703
- [90] Zocco D A, Baumbach R E, Hamlin J J, Janoschek M, Lum I K, McGuire M A, Sefat A S, Sales B C, Jin R, Mandrus D, Jeffries J R, Weir S T, Vohra Y K, Maple M B 2011 *Phys. Rev. B* **83** 094528
- [91] Takahashi H, Soeda H, Nukii M, Kawashima C, Nakanishi T, Imura S, Muraba Y, Matsuiishi S, Hosono H 2015 *Sci. Rep.* **5** 7829
- [92] Sun L L, Dai X, Zhang C, Yi W, Chen G F, Wang N L, Zheng L R, Jiang Z, Wei X J, Huang Y Y, Yang J, Ren Z A, Lu W, Dong X L, Che G C, Wu Q, Ding H, Liu J, Hu T D, Zhao Z X 2010 *Europhys. Lett.* **91** 57008
- [93] Tamilselvan N R, Kanagaraj M, Murata K, Yoshino H, Arumugam S, Yamada A, Uwatoko Y, Kumararaman S 2014 *J. Supercond. Novel Magn.* **27** 1381
- [94] Takeshita N, Iyo A, Eisaki H, Kito H, Ito T 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 075003
- [95] Takahashi H, Okada H, Igawa K, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H 2009 *Physica C* **469** 413
- [96] Takabayashi Y, McDonald M T, Papanikolaou D, Margadonna S, Wu G, Liu R H, Chen X H, Prassides K 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 9242
- [97] Lorenz B, Sasmal K, Chaudhury R P, Chen X H, Liu R H, Wu T, Chu C W 2008 *Phys. Rev. B* **78** 012505
- [98] Zhou Y Z, Sidorov V A, Petrova A E, Penkov A A, Pinyagin A N, Zhao Z X, Sun L L 2016 *J. Supercond. Novel Magn.* **29** 1105

- [99] Selvan G K, Bhoi D, Arumugam S, Midya A, Mandal P 2015 *Supercond. Sci. Technol.* **28** 015009
- [100] Wang C, Wang Z C, Mei Y X, Li Y K, Li L, Tang Z T, Liu Y, Zhang P, Zhai H F, Xu Z A 2016 *J. Am. Chem. Soc.* **138** 2170
- [101] Wang H H, Guo J, Shao Y T, Wang C, Cai S, Wang Z, Li X D, Li Y C, Cao G H, Wu Q, Sun L L 2018 *Europhys. Lett.* DOI: 10.1209/0295-5075
- [102] Hu J P 2016 *Sci. Bull.* **61** 561
- [103] Jeevan H S, Hossain Z, Kasinathan D, Rosner H, Geibel C, Gegenwart P 2008 *Phys. Rev. B* **78** 052502
- [104] Ni N, Nandi S, Kreyssig A, Goldman A I, Mun E D, Bud'ko S L, Canfield P C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 014523
- [105] Krellner C, Caroca-Canales N, Jesche A, Rosner H, Ormeci A, Geibel C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 100504
- [106] Chen G F, Li Z, Dong J, Li G, Hu W Z, Zhang X D, Song X H, Zheng P, Wang N L, Luo J L 2008 *Phys. Rev. B* **78** 224512
- [107] Huang Q, Qiu Y, Bao W, Green M A, Lynn J W, Gasparovic Y C, Wu T, Wu G, Chen X H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 257003
- [108] Tegel M, Rotter M, Weiß V, Schappacher F M, Pöttgen R, Johrendt D 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 452201
- [109] Sharma S, Bharathi A, Chandra S, Reddy V R, Paulraj S, Satya A T, Sastry V S, Gupta A, Sundar C S 2010 *Phys. Rev. B* **81** 174512
- [110] Sefat A S, Jin R Y, McGuire M A, Sales B C, Singh D J, Mandrus D 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 117004
- [111] Li L J, Luo Y K, Wang Q B, Chen H, Ren Z, Tao Q, Li Y K, Lin X, He M, Zhu Z W, Cao G H, Xu Z A 2009 *New J. Phys.* **11** 025008
- [112] Ni N, Thaler A, Kracher A, Yan J Q, Bud'ko S L, Canfield P C 2009 *Phys. Rev. B* **80** 024511
- [113] Saha S R, Drye T, Kirshenbaum K, Butch N P, Zavalij P Y, Paglione J 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 072204
- [114] Leithe-Jasper A, Schnelle W, Geibel C, Rosner H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 207004
- [115] Han F, Zhu X Y, Cheng P, Mu G, Jia Y, Fang L, Wang Y L, Luo H Q, Zeng B, Shen B, Shan L, Ren C, Wen H H 2009 *Phys. Rev. B* **80** 024506
- [116] Lee H, Park E, Park T, Sidorov V A, Ronning F, Bauer E D, Thompson J D 2009 *Phys. Rev. B* **80** 024519
- [117] Baek S H, Lee H, Brown S E, Curro N J, Bauer E D, Ronning F, Park T, Thompson J D 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 227601
- [118] Kotegawa H, Kawazoe T, Sugawara H, Murata K, Tou H 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 083702
- [119] Igawa K, Okada H, Takahashi H, Matsuishi S, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H, Matsubayashi K, Uwatoko Y 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 025001
- [120] Colombier E, Bud'ko S L, Ni N, Canfield P C 2009 *Phys. Rev. B* **79** 224518
- [121] Ishikawa F, Eguchi N, Kodama M, Fujimaki K, Einaga M, Ohmura A, Nakayama A, Mitsuda A, Yamada Y 2009 *Phys. Rev. B* **79** 172506
- [122] Yamazaki T, Takeshita N, Kobayashi R, Fukazawa H, Kohori Y, Kihou K, Lee C H, Kito H, Iyo A, Eisaki H 2010 *Phys. Rev. B* **81** 224511
- [123] Ren Z, Zhu Z W, Jiang S A, Xu X F, Tao Q, Wang C, Feng C M, Cao G H, Xu Z A 2008 *Phys. Rev. B* **78** 052501
- [124] Miclea C F, Nicklas M, Jeevan H S, Kasinathan D, Hossain Z, Rosner H, Gegenwart P, Geibel C, Steglich F 2009 *Phys. Rev. B* **79** 212509
- [125] Kurita N, Kimata M, Kodama K, Harada A, Tomita M, Suzuki H S, Matsumoto T, Murata K, Uji S, Terashima T 2011 *Phys. Rev. B* **83** 214513
- [126] Gao P W, Sun L L, Ni N, Guo J, Wu Q, Zhang C, Gu D C, Yang K, Li A G, Jiang S, Cava R J, Zhao Z X 2014 *Adv. Mater.* **26** 2346
- [127] Shi H L, Yang H X, Tian H F, Lu J B, Wang Z W, Qin Y B, Song Y J, Li J Q 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 125702
- [128] Jiang S, Xing H, Xuan G F, Wang C, Ren Z, Feng C M, Dai J H, Xu Z A, Cao G H 2009 *J. Phys.: Condens. Matter* **21** 382203
- [129] Ni N, Allred J M, Chan B C, Cava R J 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **108** 1019
- [130] Löhnert C, Stürzer T, Tegel M, Frankovsky R, Friederichs G, Johrendt D 2011 *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** 9195
- [131] Xiang Z J, Luo X G, Ying J J, Wang X F, Yan Y J, Wang A F, Xiang Z J, Luo X G, Ying J J, Wang X F, Yan Y J, Wang A F 2012 *Phys. Rev. B* **85** 224527
- [132] Kudo K, Mizukami T, Kitahama Y, Mitsuoka D, Iba K, Fujimura K, Nishimoto N, Hiraoka Y, Nohara M 2014 *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** 025001.
- [133] Katayama N, Kudo K, Onari S, Mizukami T, Sugawara K, Sugiyama Y, Kitahama Y, Iba Keita, Fujimura Kazunori, Nishimoto N, Nohara M, Sawa H 2013 *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** 123702
- [134] Saha S R, Drye T, Goh S K, Klintberg L E, Silver J M, Grosche F M, Sutherland M, Munsie T J S, Luke G M, Pratt D K, Lynn J W, Paglione J 2014 *Phys. Rev. B* **89** 134516
- [135] Gati E, Köhler S, Guterding D, Wolf B, Knöner S, Ran S, Bud'ko S L, Canfield P C, Lang M 2012 *Phys. Rev. B* **86** 220511
- [136] Kawasaki S, Mabuchi T, Maeda S, Adachi T, Mizukami T, Kudo K, Nohara M, Zheng G Q 2015 *Phys. Rev. B* **92** 180508
- [137] Jiang S, Liu C, Cao H, Birol T, Allred J M, Tian W, Liu L, Cho K, Krogstad M J, Ma J, Taddei K M, Tanatar M A, Hoesch M, Prozorov R, Rosenkranz S, Uemura Y J, Kotliar G, Ni N 2016 *Phys. Rev. B* **93** 054522
- [138] Zhou Y Z, Jiang S, Wu Q, Sidorov V A, Guo J, Yi W, Zhang S, Wang Z, Wang H H, Cai S, Yang K, Jiang S, Li A, Ni N, Zhang G M, Sun L L, Zhao Z X 2017 *Sci. Bull.* **62** 857
- [139] Zhang S C 1997 *Science* **275** 1089
- [140] Banks H B, Bi W, Sun L L, Chen G F, Chen X H, Schilling J S 2011 *Physica C* **471** 476

- [141] Guo J, Wu Q, Feng J, Chen G F, Kagayama T, Zhang C, Yi W, Li Y C, Li X D, Liu J, Jiang Z, Wei X J, Huang Y Y, Shimizu K, Sun L L, Zhao Z X 2015 *Europhys. Lett.* **111** 57007
- [142] Imai T, Ahilan K, Ning F L, McQueen T M, Cava R J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 177005
- [143] Guo J G, Jin S F, Wang G, Wang S C, Zhu K X, Zhou T T, He M, Chen X L 2010 *Phys. Rev. B* **82** 180520
- [144] Wang H D, Dong C H, Li Z J, Mao Q H, Zhu S S, Feng C M, Yuan H Q, Fang M H 2011 *EPL* **93** 47004
- [145] Wang A F, Ying J J, Yan Y J, Liu R H, Luo X G, Li Z Y, Wang X F, Zhang M, Ye G J, Cheng P, Xiang Z J, Chen X H 2011 *Phys. Rev. B* **83** 060512
- [146] Cao C, Dai J H 2011 *Phys. Rev. B* **83** 193104
- [147] Yan X W, Gao M, Lu Z Y, Xiang T 2011 *Phys. Rev. B* **83** 233205
- [148] Ricci A, Poccia N, Campi G, Joseph B, Arrighetti G, Barba L, Reynolds M, Burghammer M, Takeya H, Mizuguchi Y, Takano Y, Colapietro M, Saini N L, Bianconi A 2011 *Phys. Rev. B* **84** 060511
- [149] Wang Z, Song Y J, Shi H L, Wang Z W, Chen Z, Tian H F, Chen G F, Guo J G, Yang H X, Li J Q 2011 *Phys. Rev. B* **83** 140505
- [150] Chen F, Xu M, Ge Q Q, Zhang Y, Ye Z R, Yang L X, Jiang J, Xie B P, Che R C, Zhang M, Wang A F, Chen X H, Shen D W, Hu J P, Feng D L 2011 *Phys. Rev. X* **1** 021020
- [151] Wang C N, Marsik P, Schuster R, Dubroka A, Rössle M, Niedermayer Ch, Varma G D, Wang A F, Chen X H, Wolf T, Bernhard C 2012 *Phys. Rev. B* **85** 214503
- [152] Yuan R H, Dong T, Song Y J, Zheng P, Chen G F, Hu J P, Li J Q, Wang N L 2012 *Sci. Rep.* **2** 221
- [153] Li W, Ding H, Li Z, Deng P, Chang K, He K, Ji S H, Wang L L, Ma X C, Hu J P, Chen X, Xue Q K 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 057003
- [154] Ding X X, Fang D L, Wang Z Y, Yang H, Liu J Z, Deng Q, Ma G B, Meng C, Hu Y H, Wen H H 2013 *Nat. Commun.* **4** 1897
- [155] Bao W, Huang Q Z, Chen G F, Green M A, Wang D M, He J B, Qiu Y M 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 086104
- [156] Ye F, Chi S, Bao W, Wang X F, Ying J J, Chen X H, Wang H D, Dong C H, Fang M H 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 137003
- [157] Mazin I I 2011 *Physics* **4** 26
- [158] Bao W 2015 *J. Phys.: Condens. Matter* **27** 023201
- [159] Bao W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 087405
- [160] Guo J, Chen X J, Dai J H, Zhang C, Guo J G, Chen X L, Wu Q, Gu D C, Gao P W, Yang L H, Yang K, Dai X, Mao H K, Sun L L, Zhao Z X 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 197001
- [161] Gao P W, Yu R, Sun L L, Wang H D, Wang Z, Wu Q, Fang M H, Chen G F, Guo J, Zhang C, Gu D C, Tian H F, Li J Q, Liu J, Li Y C, Li X D, Jiang S, Yang K, Li A G, Si Q, Zhao Z X 2014 *Phys. Rev. B* **89** 094514
- [162] Gu D C, Wu Q, Zhou Y Z, Gao P W, Guo J, Zhang C, Zhang S, Jiang S, Yang K, Li A G, Sun L L, Zhao Z X 2015 *New J. Phys.* **17** 073021
- [163] Guo J, Wang H H, von Rohrc F, Wang Z, Cai S, Zhou Y Z, Yang K, Li A G, Jiang S, Wu Q, Cava R J, Sun L L 2017 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **114** E13144
- [164] Guo J, Lin G C, Cai S, Xi C Y, Zhang C J, Sun W S, Wang Q L, Yang K, Li A G, Wu Q, Zhang Y H, Xiang T, Cava R J, Sun L L 2018 *arXiv:1808.07215*
- [165] Giraldo-Gallo P, Galvis J A, Stegen Z, Modic K A, Balakirev F F, Betts J B, Lian X, Moir C, Riggs S C, Wu J, Bollinger A T, He X, Božović I, Ramshaw B J, McDonald R D, Boebinger G S, Shekhter A 2018 *Science* **361** 479

SPECIAL TOPIC — Tenth anniversary of the discovery of iron-based high temperature superconductors

Pressure-induced phenomena and physics in iron-based superconductors^{*}

Guo Jing¹⁾ Wu Qi¹⁾ Sun Li-Ling^{1)2)†}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 4 September 2018; revised manuscript received 27 September 2018)

Abstract

The discovery of Fe-based superconductor in 2018 opened an illustrious chapter in the history of high temperature superconductors. Over the past ten years, many progresses on experiments, theories and applications have been achieved in the studies of Fe-based superconductors, which have greatly enriched the basic knowledge on the superconductivity of high temperature (T_c) superconductors and laid a solid foundation for uncovering superconducting mechanism of high- T_c superconductors and expanding their applications. In this review article, we present some important progresses and new phenomena/physics exhibited in the pressurized Fe-based superconductors, including pressure-induced superconductivity, pressure-induced reemergence of superconductivity, pressure-enhanced superconducting temperature, the prediction on the highest superconducting temperature for Fe-based superconductors via high pressure studies, the effect of the separated phase structure on the superconductivity and the discovery of a bi-critical point between antiferromagnetic and superconducting phases. It is expected that these high pressure experimental results on Fe-based superconductors, together with the results reported in the same issue through other experimental and theoretical methods, can aid to outline a more complete physical picture for a more comprehensive and deeper understanding on Fe-based superconductors.

Keywords: Fe-based superconductors, high pressure, quantum critical transition, antiferromagnetic phase

PACS: 74.70.Xa, 74.62.Fj, 74.25.-q

DOI: [10.7498/aps.67.20181651](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181651)

^{*} Project supported by the Strategic Priority Research Program(B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB25000000), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2017YFA0302900, 2016YFA0300300, 2017YFA0303103), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11427805, U1532267, 11604376).

[†] Corresponding author. E-mail: llsun@iphy.ac.cn