

压力下铁砷基化合物的超导电性研究

衣玮 吴奇 孙力玲

Superconductivities of pressurized iron pnictide superconductors

Yi Wei Wu Qi Sun Li-Ling

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 037402 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.037402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.037402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压下富氢化合物的结构与奇异超导电性

Structures and novel superconductivity of hydrogen-rich compounds under high pressures

物理学报.2017, 66(3): 036102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.036102>

Li₂C₂ 中电声耦合及超导电性的第一性原理计算研究

First-principles study of electron-phonon coupling and superconductivity in compound Li₂C₂

物理学报.2015, 64(21): 214701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.214701>

铁基超导体 FeSe_{0.5}Te_{0.5} 表面隧道谱的研究

Investigation of scanning tunneling spectra on iron-based superconductor FeSe_{0.5}Te_{0.5}

物理学报.2015, 64(9): 097401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097401>

时效 Ag-7wt.%Cu 合金的微观组织、电阻率和硬度

Microstructure, resistivity, and hardness of aged Ag-7wt.%Cu alloy

物理学报.2017, 66(2): 027401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.027401>

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: 高压下物质的新结构与新性质研究进展

压力下铁砷基化合物的超导电性研究*

衣玮¹⁾ 吴奇¹⁾ 孙力玲^{1)2)†}

1)(中国科学院物理研究所, 北京 100190)

2)(中国科学院大学, 北京 100190)

(2016年12月13日收到; 2017年1月10日收到修改稿)

随着高压实验设备与技术的不断发展, 压力作为对物质状态调控的独立变量在凝聚态物理研究中得到了越来越广泛的应用. 高压研究对发现新材料、新现象、新规律及其形成机理的理解和对相关理论的验证起到了不可替代的重要作用, 近年来在对铁基超导体超导电性的高压研究中取得的诸多重要研究进展充分说明了这一点. 本文简要介绍了在压力下铁砷基超导体中呈现出的一些有趣的物理现象及其所反映出的物理内涵, 例如, 压力下对1111体系超导电性的研究在指导常压下用小离子半径元素替代获得最高超导转变温度的铁砷基超导体和推测铁砷基超导体超导转变温度上限等方面起到了重要作用; 压力可抑制122体系母相的磁有序进而诱发超导电性, 并揭示出Eu-122体系中Eu离子插层的磁有序与FeAs层超导电性的关系; 在新型铁砷基超导体 $\text{Ca}_{0.73}\text{La}_{0.27}\text{FeAs}_2$ 中发现的压致双临界点现象等. 希望本文能对读者了解铁砷基超导体的高压研究进展情况有所帮助.

关键词: 高压, 超导电性, 铁砷基超导体

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

DOI: 10.7498/aps.66.037402

1 引言

2008年初, 日本东京工业大学的Hosono教授研究组^[1]首次报道了在氟(F)掺杂的铁砷化合物 LaFeAsO (1111体系)中发现了超导转变温度(T_C)为26 K的超导电性, 从此揭开了继铜氧化物高温超导体之后高温超导材料探索及超导机理研究的新篇章. 铁砷基超导体和铜氧化物高温超导体类似, 也具有层状准二维晶体结构, 主要由FeAs层和中间插层构成. 根据这一特点, 具有不同种类插层结构的铁砷基超导体被分为 $\text{ReFeAs}(\text{O}/\text{F})$ (Re 为稀土元素)“1111”体系^[1], AFeAs (A 为碱金属元素)“111”体系^[2], ARFeAs_2 (AR 为稀土元素掺杂的碱土金属元素)“112”体系、 MFe_2As_2 (M 为碱土金属、碱金属及Eu)“122”体系^[3]以及由122体系

衍生出的更复杂的“21311”, “10-3-8”体系等^[4,5]. 图1为四种主要铁砷基超导体体系的晶体结构.

压力(P)作为一种极端的实验条件和重要的物理维度以及对研究材料状态的独特调控方式, 在凝聚态物理及材料科学等相关前沿科学研究领域中发挥着重要的作用. 作为独立于温度和化学组分之外的一个参量, 压力在物质科学研究中的作用是其他参量无法替代的. 压力最基本的效应就是使材料内部原子间距缩小, 从而影响到材料的物理、化学性质, 进而使材料呈现出新现象、新规律及新性质. 在压力的作用下, 材料中会产生结构相变、金属-绝缘体转变以及超导转变等丰富的物理现象^[6-9]. 了解压力下 T_C 的变化规律对超导机理的理解有重要的意义外, 对指导常压下提高 T_C 、设计新型超导体和探索新材料也有很大帮助. 比如, 在提高铁基

* 国家自然科学基金(批准号: 91321207, 11427805)、中国科学院B类先导项目(批准号: XDB07020300)和国家重点研发计划(批准号: 2016YFA0300300)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: llsun@iphy.ac.cn

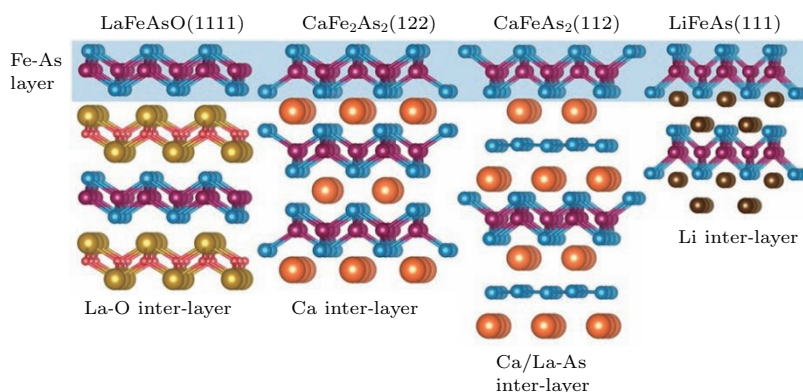


图1 四类主要铁砷基超导体的晶体结构, 其中FeAs层为超导“基因”层(如蓝色背景所示)

Fig. 1. The crystal structures of 1111-type, 122-type, 112-type and 111-type iron pnictide superconductors, displaying the same superconducting Fe-As layers with different inter-layers.

超导体的 T_C 的探索研究中, 1111体系超导体 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ 的 T_C 在压力下有所上升^[10,11], 启发了赵忠贤团队用具有较小离子半径的Sm替代La, 并采用高温高压合成的方法使 T_C 提高到55 K^[12], 为铁基超导体的快速发展做出了关键的贡献。

常压下的研究表明, 铁砷基超导体的 T_C 与铁砷层的As—Fe—As键角以及阴离子As相对于Fe层的高度有直接关系^[13–15]. 压力是一种调制晶体结构、改变原子间距和成键角度的“纯净”手段, 不像化学掺杂那样向研究体系中引进化学复杂性. 铁砷基超导体对于压力的敏感性使得高压研究手段能在铁基超导体超导电性的研究方面发挥重要作用。

本文围绕压力下研究比较多的两种铁砷基超导体(1111体系及122体系)和其他几类有趣的铁砷基超导体的高压研究进展, 介绍铁砷基超导体在高压研究方面的概况. 希望能为读者对铁砷基超导体高压行为的了解勾画出一个粗略的轮廓, 更希望能为理论和实验上开展更加深入的研究提供一组较为系统的关于压力下行为的实验结果, 进而为非常规超导机理的破解提供有用的信息. 本文所列举的研究实例包括了作者所在的课题组和国内外其他研究小组在铁砷基超导体高压研究方面取得的部分研究结果。

2 压力下的1111体系

1111体系化合物(ReFeAsO , Re 为La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd等稀土元素)在室温下具有四方的Zr—CuSiAs型准二维晶体结构(空间群为 $P4/nmm$),

由铁砷(FeAs)层和稀土氧(Re-O)层构成. 其中, FeAs层是超导层, 而 Re-O 层是载流子库层(提供载流子). 这种各司其职又互相关联的准二维插层结构的特点与铜氧化物超导体相似. 对这类化合物在不同位置上的组分替代、掺杂和施加外部压力等均被认为是提高铁砷基超导体 T_C 的有效方法。

未掺杂的1111体系化合物在常压下并不超导. 在降温过程中, 先发生从四方相到正交相的结构相变, 然后, 在更低温度下出现反铁磁有序态^[16–24]. 通过化学掺杂或外部压力可以抑制反铁磁有序态, 诱发超导转变. 例如, LaFeAsO 和 SmFeAsO 在压力下其结构相变温度(T_S)和反铁磁转变温度(T_M)均会被抑制, 随后出现超导电性. LaFeAsO 的最高 T_C 在12 GPa压力下达到最高值(21 K), 而 SmFeAsO 的 T_C 在9 GPa压力下为11 K^[25].

Lu等和Takahashi等分别对 $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ 材料进行了高压研究, 发现 T_C 的压力效应为正(T_C 随压力增加而升高)^[10], 在4 GPa压力下其 T_C 达到43 K^[11]. 据此, 赵忠贤团队率先通过用其他小半径的稀土元素如Ce, Pr, Nd, Sm等替代La-1111中的La提高了 T_C , 其中 $\text{SmFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1}$ ^[12], $\text{SmFeAsO}_{0.85}$ ^[26]及 $\text{Gd}_{0.8}\text{Th}_{0.2}\text{FeAsO}$ ^[23]的 T_C 均可达到55 K左右. Yi等^[27]在对采用高压方法合成的一系列La-Sm混合稀土的1111体系超导体 $\text{La}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeAsO}_{0.85}$ 的研究中发现随着离子半径相对较小的Sm含量的不断增加(La含量的不断减少), 其 T_C 逐步提高. 这一结果证实了单纯通过施加化学内压力就可以提高1111体系超导体的 T_C . 同时, 也使人们对1111体系超导体在外部压力下其 T_C 能否进一步提高产生了浓厚的兴趣. 1111体系在压力下所表现出的一些物理现象, 为人们对这

类超导体的理解提供了直接的实验依据。

2.1 铁砷基1111体系超导体的最高 T_C 推测

常压下含有不同稀土元素的1111体系化合物的 T_C 对压力的响应不尽相同。人们对1111体系化合物开展了大量的高压研究,取得了许多实验结果(如表1所列)。由该表可见,Pr_{0.75}Sr_{0.25}FeAsO、欠掺杂Sm-1111体系及所有La-1111体系化合物的超导性都具有正的压力效应,而最佳掺杂和过掺杂的Sm-1111体系以及Ce-1111, Nd-1111, Gd-1111超导体的超导性都具有负的压力效应。

Yi等^[28]在高压下原位电阻等物性测量研究中发现,具有最佳氧含量的SmFeAsO_{0.85}和Nd-FeAsO_{0.85}随着压力的升高其 T_C 会下降,其压力效应(dT_C/dP)分别为-2.0 K/GPa和-2.6 K/GPa。综合考虑实验与理论计算结果,他们认为压力对超导性的负作用主要归因于压力导致了其费米面附近态密度的降低。Lu等^[29]发现高压合成的过量氟掺杂样品LaFeAsO_{0.4}F_{0.6}常压下的 T_C 为41 K。随后Yi等^[30]发现,高氧缺位样品LaFeAsO_{0.3}从名义组分上看属于过掺杂样品,常压下的 T_C 为43 K,而在1.5 GPa的压力下其 T_C 达到50 K。过量氟掺杂的LaFeAsO_{0.5}F_{0.5}样品其常压下的 T_C 为37.5 K,在压力2.7 GPa下达到45 K。LaFeAs(O_{0.89}F_{0.11})常压下的 T_C 为26 K,在压力3 GPa下达到30.5 K。三种材料在压力作用下均形成具有拱形 T_C - P 关系的相图。其中LaFeAs(O_{0.89}F_{0.11})的高压研究结果与Zocco等^[31]对LaFeAs(O_{0.89}F_{0.11})的高压研究取得的结果基本一致,而过量氟掺杂的LaFeAs(O_{0.5}F_{0.5})的高压研究数据与Takahashi等^[11]对LaFeAs(O_{0.89}F_{0.11})的高压研究结果相符合。

常压下LaFeAsO_{0.3}的 T_C 为43 K,这是La-1111体系超导体在常压下迄今为止达到的最高 T_C 。在压力的作用下,其 T_C 迅速提高,压力效应为7.5 K/GPa。在约1.5 GPa压力下达到50 K的最大值,之后呈线性下降($dT_C/dP = -1.2$ K/GPa),直到该实验的最高压力(约13 GPa)。可见,虽然常压下LaFeAsO_{0.3}的 T_C 要比LaFeAs(O_{0.89}F_{0.11})高,但是二者 T_C 的压力效应都是先正后负。

将上述实验结果进行整理可得到 T_C 与压力的关系,如图2所示。如果对每个样品的 T_C 随着压力

升高而下降部分的 T_C - P 数据进行拟合,并反向延长至常压,发现所有样品在常压下的 T_C 都在55 K左右。由此,Yi等^[30]认为这些实验结果表明铁砷基超导体可实现的极限 T_C 可能不会超过60 K。的确如此,到目前为止在块体铁砷基超导体中尚未发现 T_C 突破此推测极限的情况。

表1 具有1111结构的铁砷基超导体的常压 T_C 与高压 T_C 的对比。表中AP- T_C 为常压下的超导转变温度;Max- T_C 为最高 T_C (包括压力下); P_{max} 为最高 T_C 对应的压力值; P_h 为所研究的最高压力;AP为常压条件

Table 1. The T_C values of iron pnictide superconductors with 1111 type structure obtained at ambient pressure and high pressure. AP, ambient pressure; Max- T_C , the highest T_C (including the T_C achieved at high pressure); P_{max} , the pressure where the maximum T_C is achieved; P_h , the highest pressure applied for the investigations.

Materials ^{Ref.}	AP- T_C /K	Max- T_C /K	P_{max} /GPa	P_h /GPa
LaFeAsO _{1-x} F _x				
$x = 0$ ^[25,32,33]	—	21	12	35
$x = 0.05$ ^[25]	25	28	3	20
$x = 0.11$ ^[11,34]	26	43	4	30
$x = 0.14$ ^[50]	19	43	5	17
$x = 0.50$ ^[30]	35	45	2.7	20
LaFeAsO _{0.3} ^[30]	43	50	1.5	13
LaFeAsO _{0.82} H _{0.18} ^[35]	36	52	6	19
CeFeAsO _x F _{1-x}				
$x = 0.12$ ^[31]	40	—	AP	18
$x = 0.16$ ^[36]	41	—	AP	15.8
$x = 0.30$ ^[36]	46	—	AP	16.5
Pr _{0.75} Sr _{0.25} FeAsO ^[37]	17	34	6	20
NdFeAsO _{0.85} ^[28]	52	—	AP	7.3
NdFeAsO _{0.6} ^[38]	54	—	AP	18
SmFeAsO _{1-x} F _x				
$x = 0$ ^[39]	—	11	5	28
$x = 0.10$ ^[40]	12	—	AP	1.2
$x = 0.13$ ^[41]	25.6	—	AP	1.5
$x = 0.20$ ^[40]	49	—	AP	1.09
$x = 0.30$ ^[41]	43	—	AP	1.5
SmFeAsO _{0.85} ^[28]	55	—	AP	6.8
SmFeAsO _{0.8} H _{0.2} ^[35]	55	—	AP	15
GdFeAsO _{0.85} ^[42]	53	—	AP	5.3
GdFe _{0.9} Co _{0.1} AsO ^[43]	19	—	AP	2.9

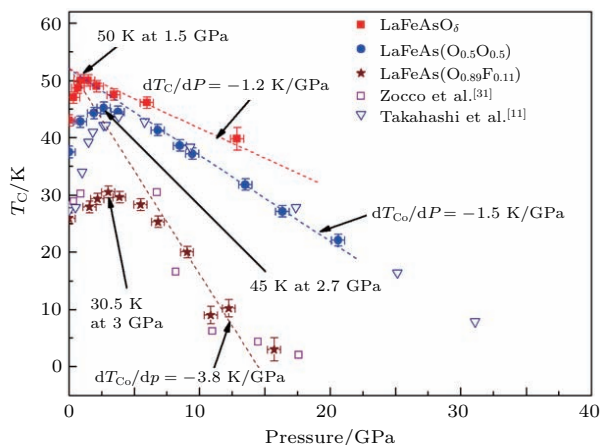


图2 在常压下具有不同 T_C 的La-1111体系的 T_C - P 相图
Fig. 2. Temperature-pressure phase diagram of the La-1111 samples.

2.2 压力下Ce-1111超导体中超导电性与近藤效应的竞争

Sun等[36]对 x 为0.1和0.3的 $CeFeAsO_{1-x}F_x$ 的铁砷基超导体开展高压下的电阻测量、X射线衍射测量以及X射线吸收谱研究,发现了在压力作用下 $CeFeAsO_{1-x}F_x$ 从超导态到非超导态的转变(如图3所示).

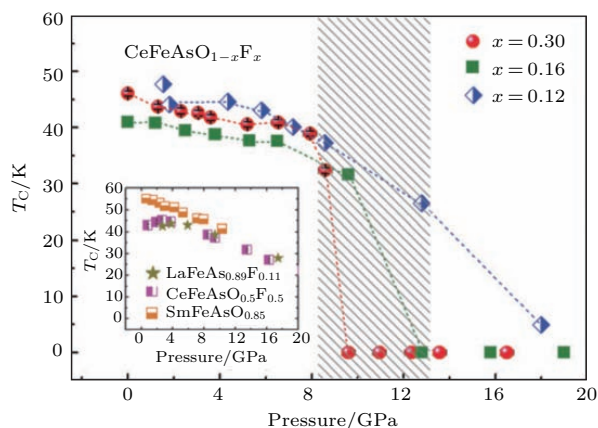


图3 $CeFeAsO_{1-x}F_x$ (x 为0.12, 0.16及0.3)[34,36]的 T_C - P 相图, 插图为 $SmFeAsO_{0.85}$, $LaFeAsO_{0.5}F_{0.5}$ 和 $LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}$ 的 T_C - P 相图

Fig. 3. Pressure dependence of the superconducting transition temperature (T_C) for $CeFeAsO_{1-x}F_x$ ($x = 0.12, 0.16$ and 0.3) [34,36] samples. The inset shows the plots of T_C - P for $SmFeAsO_{0.85}$, $LaFeAsO_{0.5}F_{0.5}$ and $LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}$ superconductors.

电阻测量表明, $CeFeAsO_{1-x}F_x$ 的 T_C 随着压力的升高而缓慢下降. 大约在8 GPa压力以上, 其 T_C 突然骤降然后超导消失[34,36]. 比较不同F掺杂

量的 $CeFeAsO_{1-x}F_x$ 样品, 发现F掺杂量越高的样品在压力作用下 T_C 降低并消失的越迅速. 与周期表中位于Ce两侧的Sm和La的1111体系超导样品的 T_C - P 相图相比较, 发现其他 Re -1111体系超导体在压力作用下并没有出现这种类似现象. 虽然也出现 T_C 下降, 但是直到20 GPa, 超导转变依然没有消失. 高压下原位X射线衍射以及X射线吸收谱研究发现, 在超导电性消失的临界压力点下, 样品的晶格发生了坍塌, 同时Ce离子的价态发生了变化. 他们认为这种Ce-1111超导体中 T_C 在压力作用下突然消失的现象可能源于这种超导体中存在的超导相和近藤效应的相互竞争.

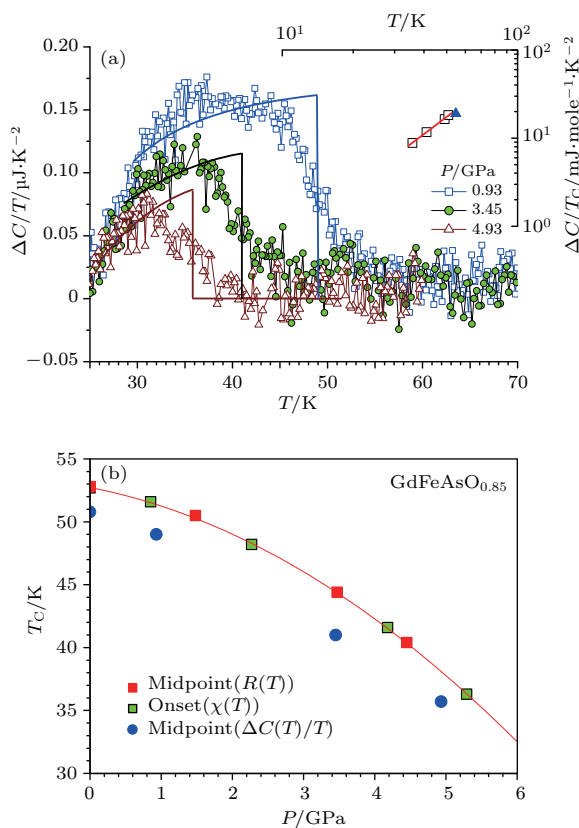


图4 (a) 不同压力下 $GdFeAsO_{0.85}$ 的比热测量结果, 插图为 $\Delta C/T_C$ 对温度的依赖关系, 其中蓝色实心三角形为常压下 $SmFeAsO_{0.6}$ 的比热测量结果[44]; (b) $GdFeAsO_{0.85}$ 的 T_C - P 相图, 其中红色方形和绿色方形分别为电阻测量和磁化率测量结果, 蓝色圆形为比热测量结果

Fig. 4. (a) The temperature (T) dependence of the excess specific heat of $GdFeAsO_{0.85}$ ($\Delta C/T$) related with superconducting transition at different pressures, the inset shows $\Delta C/T_C$ vs T in a log-log scale, bold triangle represents the ambient pressure data for $SmFeAsO_{0.6}$ [44]; (b) T_C - P phase diagram of $GdFeAsO_{0.85}$, obtained from resistance, alternating current susceptibility and specific heat measurements.

2.3 Gd-1111 超导体超导电性的高压抑制

Zhou 等^[42]对最佳氧空位的 $\text{GdFeAsO}_{0.85}$ 多晶样品开展了高压下的超导电性研究, 包括低温下的电阻测量、交流磁化率测量以及比热测量, 发现随着压力的增加其 T_C 单调下降. 此外, 他们还对该样品进行了高压原位比热 (C) 测量, 这是首次报道的关于铁砷基 1111 体系超导体的高压比热测量结果. 图 4(a) 为不同压力下比热的测量结果和分析, 可见, $\Delta C/T_C$ 与 T^2 成正比 (见插图). 将高压下电阻测量、磁化率测量以及比热测量得到的 T_C - P 关系汇总于图 4(b), 发现压力对于 $\text{GdFeAsO}_{0.85}$ 的 T_C 的影响并非线性的. 在低压范围内, T_C 的压力效应约为 -1.4 K/GPa, 而在 5 GPa 附近时, 压力效应达到 -4.9 K/GPa. 由此, 他们推测大概在 10 GPa 附近 $\text{GdFeAsO}_{0.85}$ 的超导电性将会完全消失, 该结论还有待进一步的实验验证.

3 压力下的 122 体系

122 体系的铁基超导体 $M\text{Fe}_2\text{As}_2$ (M 为碱金属、碱土金属或 Eu) 具有 ThCr_2Si_2 型晶体结构, 与 1111 体系相似之处是都具有包含 FeAs 层的准二维结构, 不同之处在于其 FeAs 层之间的插层由金属阳离子层替代了 Re -O 层. 下面分三种情况介绍这类材料的超导电性在高压下的研究进展.

3.1 A-122 ($A = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$) 体系 T_C 的压力效应

碱金属插层的 122 体系超导体 $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ (A 为 Na, K, Rb, Cs, 简称为 A-122) 在常压下具有超导电性^[3,45-55], 施加外部压力后, 其 T_C 随压力的变化不尽相同. 图 5 中是 A-122 体系主要成员 T_C 的高压研究结果. Tafti 等^[56-58]发现在压力不高于 2.5 GPa 时, 其 T_C 均先降低后升高, 构成 V 形 T_C - P 相图. 比如, KFe_2As_2 在常压下其 T_C 为 3.6 K, 当压力为 1.75 GPa 时, 其 T_C 下降到 1.6 K, 然后又随着压力的增加而升高; RbFe_2As_2 在常压下其 T_C 为 2.5 K, 在 1.1 GPa 压力作用下其 T_C 下降到 1.2 K, 随后又随着压力的增加而升高; 类似的 T_C - P 相图在 CsFe_2As_2 中也被观察到^[56-58]. 对于 A-122 体系中 T_C 的压力效应由负变正的物理解释, 科学家们开展了一系列高压研究和讨论. Tafti 等^[56]指出

K-122 的 T_C 在压力作用下的 V 形转变是由于其超导配对从 d 波到 s 波的变化所致. 而 Taufour 等^[59]和 Terashima 等^[60]则认为这是由于能带结构在临界压力以上发生了改变. 此外, 高压下的核磁共振研究认为, 这种 V 形的 T_C - P 关系与自旋涨落相关^[61,62].

KFe_2As_2 的 T_C 对传压介质和加压方式很敏感. Nakajima 等^[63]利用金刚石对顶砧, 在以 NaCl 为传压介质进行的高压研究中发现, 压力为 15 GPa 以上时, K-122 出现了一个新的超导相, 而且 T_C 随着压力的增大而降低. Ying 等^[64]利用金刚石对顶砧, 以液体 Daphne 7373 为传压介质对 K-122 的高压研究中, 在约 16 GPa 压力以上同样发现了这一新的超导相. 而 Wang 等^[65]采用立方六面对顶砧对 K-122 的研究中, 在 17.5 GPa 的静水压力环境下并没有发现上述新的超导相.

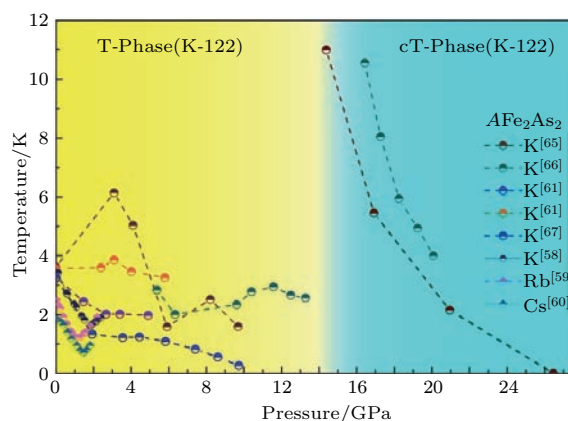


图 5 $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ (A 为 K, Rb 和 Cs) 的 T_C - P 相图, 不同的背底颜色用来区分 K-122 的四方相结构 (T-phase) 和坍塌四方相结构 (cT-phase)

Fig. 5. The temperature-pressure phase diagram of $A\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($A = \text{K}, \text{Rb}, \text{and Cs}$). The yellow region and blue region show the pressure dependence of T_C in the T-phase and cT-phase, respectively.

压力作用下 A-122 的晶体结构会从四方相 (T-phase) 转变成坍塌的四方相 (cT-phase). K-122 的四方相到坍塌四方相转变的临界压力约为 15 GPa^[63,64], Na-122 的临界压力约为 4 GPa^[66]. K-122 新的高温超导相的出现, 对应于结构为 cT 相的压力区域 (如图 5).

3.2 Ae-122 ($Ae = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) 体系的高压研究

当 $M\text{Fe}_2\text{As}_2$ 体系中的 M 为碱土金属时, 常压下的母相材料在低温下出现晶体结构相变 (从四方

相 $I4/mmm$ (ThCr_2Si_2 型结构) 到正交相 $Fmmm$ ($\beta\text{-SrRh}_2\text{As}_2$ 型结构), 同时伴有反铁磁相变 (即 $T_S = T_M$). 含有不同碱土金属的这类化合物, 其相变温度有所不同, 比如, CaFe_2As_2 的 T_S (或 T_M) 约为 170 K^[67,68], SrFe_2As_2 的 T_S (或 T_M) 约为 205 K^[69], BaFe_2As_2 的 T_S (或 T_M) 约为 132 K^[70] (140 K^[71]). 通过化学掺杂可以压制 T_S 和 T_M , 诱发超导转变, 例如, 采用过渡金属 TM (TM 为 Co, Ni, Pd, Rh, Ru, Pt, Ir 等) 在 Fe 位掺杂的 $\text{Ae}(\text{Fe}_{1-x}\text{TM}_x)_2\text{As}_2$ 在常压下均表现出超导电性^[72-82]. 此外, 外部压力作用同样可以诱发该体系的超导转变.

研究发现, Ae -122 体系化合物的超导电性对压力环境的敏感性极强, 相同样品在轴压和静水压力环境下的实验结果相差很大, 如进入超导态的起始压力, 最高 T_C 以及最高 T_C 对应的临界压力等在不同的压力环境下均有所不同^[83-86].

例如, 对 BaFe_2As_2 单晶样品采用不同传压介质的高压研究就出现了几种不同的结果^[87-91]. Alireza 等^[87] 报道, 在 2.8 GPa 压力下出现超导态, 随后在 4.5 GPa 压力下其 T_C 最高达到 29 K. 而 Mani 等^[90] 报道, BaFe_2As_2 在 1.5 GPa 的压力下最高 T_C 为 35 K. Kimber 等^[92] 则报道, 在 5.5 GPa 的压力下其最高 T_C 为 31 K. 结果表明: 相对静水压而言, 轴压更有利于 BaFe_2As_2 中超导态的出现.

再如, Sr -122 体系中, 压力对于结构相变和磁相变温度的抑制速率大概在 -10 K/GPa 到 -13 K/GPa 之间^[93,94]. 值得注意的是静水压力环境的不同, 会得到不同的高压实验结果 (虽然它们的趋势相近). Takahashi 等^[95] 在高压下电阻测量中发现, 在 1.5 GPa 压力下超导转变的起始温度出现在 11.5 K; 当压力约为 4 GPa 时 T_C 达到 34 K, 随着压力的继续增加 T_C 开始降低. 而 Alireza 等^[87] 在高压下磁测量中发现, 在 3.1 GPa 压力下 T_C 为 25 K, 在 3.8 GPa 压力下 T_C 达到 27 K 的最高值, 随后下降.

压力环境对于 T_C 的影响在 Ca -122 中表现尤为突出. 对于 CaFe_2As_2 的高压研究发现, 在准静水压约 0.5 GPa 下, T_C 约为 10 K^[96-100]. 而当采用氦气为传压介质的更好的静水压条件下, 却没有出现超导态^[85]. 可见, 即使对同一样品, 使用不同的传压介质得到的温度-压力相图也有所不同^[84].

Torikachvili 等^[96] 报道了 Ca -122 在比较低的压力 (0.23 GPa) 下便出现超导电性, 在 0.5 GPa 下 T_C 升高到 12 K. 而 Park 等^[97] 在 0.69 GPa 下发现其最高 T_C 约为 13 K.

此外, 对于掺杂的 Ba -122 体系超导体, 因掺杂情况不同, 其 T_C 的压力效应也不尽相同. 如电子欠掺杂的超导体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ 中, 超导态与反铁磁态共存, 在 2.4 GPa 压力下, 其反铁磁有序温度从 66 K 下降到约 52 K, 而 T_C 由 11 K 升高到 21 K^[101,102]; 对于最佳掺杂及过掺杂的样品, 压力对 T_C 的影响却微乎其微^[103]; 而对于空穴最佳掺杂的 $\text{Ba}_{0.55}\text{K}_{0.45}\text{Fe}_2\text{As}_2$ 而言, T_C 的压力效应为 -2 K/GPa^[96].

3.3 高压下 Eu -122 中 Eu 价态的变化及磁有序与超导电性的竞争

不同于 AeFe_2As_2 , EuFe_2As_2 含有 4f 电子, 因而具有一些独特的性质. 由于 Eu^{2+} ($4f^7$ 电子构型) 的离子半径相对于 Eu^{3+} ($4f^6$ 电子构型) 的离子半径大, 在压力作用下 Eu -122 中的 Eu 离子容易发生从二价到三价的价态变化. 因而, 施加外部压力或在 As 位采用等价态磷的掺杂引入化学内压力均能导致 Eu 离子价态的变化, 同时诱发超导电性^[104,105].

Sun 等^[106] 在常压下对 EuFe_2As_2 , $\text{EuFe}_2\text{As}_{1.4}\text{P}_{0.6}$ 以及 $\text{EuFe}_{1.715}\text{Co}_{0.285}\text{As}_2$ 中的 Eu 离子通过室温 X 射线吸收谱进行价态表征的研究中发现, 只在 $\text{EuFe}_2\text{As}_{1.4}\text{P}_{0.6}$ 超导体中存在 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 的混价态, 如图 6 (a) 所示, 并确定了其 Eu 离子的平均价态为 2.32. 在高压下对 EuFe_2As_2 中的 Eu 通过原位 X 射线吸收谱进行价态表征, 发现在压力的作用下, 谱权重由 Eu^{2+} 向 Eu^{3+} 的转移, 如图 6 (b) 所示, 插图中给出了 Eu 的平均价态与压力的关系. 在 2.8 GPa 下, EuFe_2As_2 中的 Eu 离子平均价态约为 2.3, 这与常压下 $\text{EuFe}_2\text{As}_{1.4}\text{P}_{0.6}$ 中的 Eu 离子的平均价态 (2.32) 接近. EuFe_2As_2 在 2.8 GPa 下, 其晶胞体积受到压缩后与同结构的 $\text{EuFe}_2\text{As}_{1.4}\text{P}_{0.6}$ 在常压下的晶胞体积相近. Terashima 等^[107] 报道 EuFe_2As_2 在压力 2.8 GPa 下的 T_C 为 30 K, 与常压下 $\text{EuFe}_2\text{As}_{1.4}\text{P}_{0.6}$ 的 T_C (26 K)^[108] 也相近.

对于 EuFe_2As_2 的高压研究还发现, 随着压力的增加, FeAs 层的反铁磁有序态被压力压制后出现了超导电性. 在压力下 Eu -122 体系中的超导电性

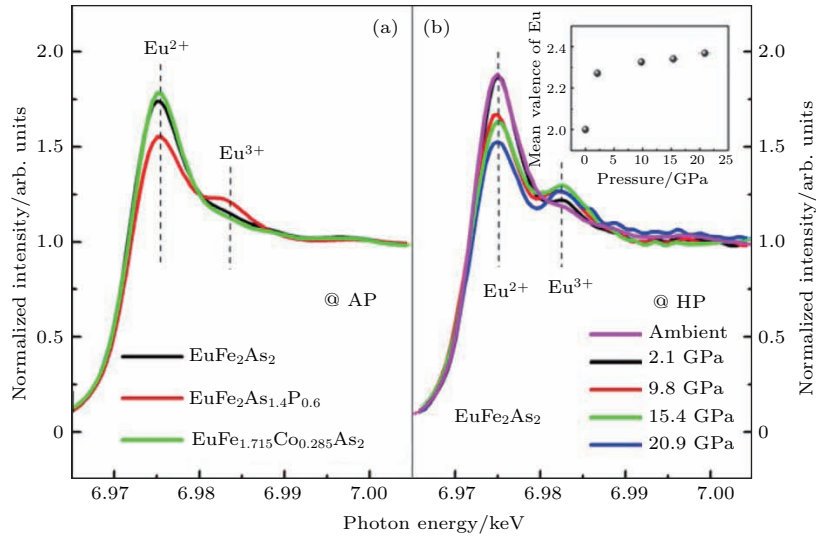


图6 (a)常压下 EuFe_2As_2 , $\text{EuFe}_2\text{As}_{1.4}\text{P}_{0.6}$ 和 $\text{EuFe}_{1.715}\text{Co}_{0.285}\text{As}_2$ 的 X 射线吸收谱; (b) 不同压力下 EuFe_2As_2 的 X 射线吸收谱, 插图所示为 EuFe_2As_2 中 Eu 的平均价态与压力的关系
 Fig. 6. (a) X-ray absorption spectra data obtained at ambient pressure for the three samples; (b) X-ray absorption spectra data for EuFe_2As_2 obtained at different pressures. The inset shows the plot of pressure vs mean valence of Eu ions in EuFe_2As_2 .

与其价态变化的关联性是一个十分有趣的问题. 理解这些问题对于我们理解超导机理大有裨益. 对于由磁性导电层和非磁性插层组成的非常规超导体如铜氧化物超导体和大多数的铁基超导体而言, 其超导性的出现与导电层的长程反铁磁序的抑制紧密相关.

由于 Eu-122 体系中存在两种不同磁性起源的结构层 (FeAs 层和 Eu 离子层) [18], 所以在铁基超导体成员中它具有特殊性 [109,110]. 对于这种独特的体系, Eu 插层中的磁性与该样品超导性的关系是备受关注的前沿问题. Guo 等 [111] 对 $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 单晶样品开展了系统和深入的高压研究, 包括原位电阻测量、比热测量、X 射线衍射测量及 X 射线吸收测量. 如图 7 所示, 随着压力的升高, T_C 不断下降, 而 Eu 离子插层的磁有序态转变温度 (T_m) 不断上升, 其有序态与超导态在很窄的压力范围 (0—0.5 GPa) 内是共存的. 随着压力的继续升高, 当 Eu 离子插层的磁有序转变温度高于 T_C 时, 超导性消失. 高压同步辐射 X 射线衍射实验结果表明: $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 在所研究的压力范围内并没有发生结构相变, 但是在 9 GPa 压力附近发现 c 轴有明显的塌缩. 高压同步辐射吸收实验结果表明, Eu 离子的价态随着压力的升高从二价向三价转变. 可见压致体积塌缩是促进 Eu 价态转变的主要原因. 该研究首次综合研究了压力下

Eu 离子插层的磁性对 FeAs 层的超导电性影响, 提出了 Eu 离子插层磁有序转变温度低于 T_C 时, 超导

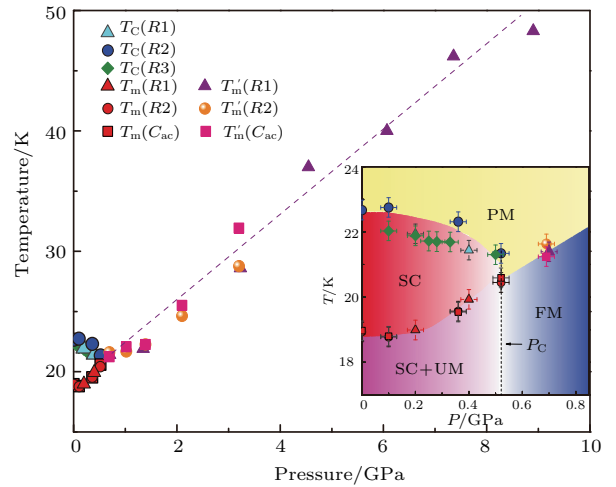


图7 $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ 的压力-温度相图, 图中 T_C 为超导转变临界温度, T_m 为 PM-UM 的转变温度, T'_m 为 PM-FM 的转变温度
 Fig. 7. Pressure-Temperature phase diagram of the $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.81}\text{P}_{0.19})_2$ sample. $T_C(R)$ stands for superconducting transition temperature determined from electrical resistance measurements; $T_m(R)$ and $T_m(C)$ represent the onset temperature of PM-UM transition of the Eu ions, which are obtained from electrical resistance and heat capacity measurements; $T'_m(R)$ and $T'_m(C)$ represent the onset temperature of PM-FM transition, which are obtained from electrical resistance and heat capacity measurements.

电性可与Eu离子层的磁有序态共存. 当Eu离子层磁有序的转变温度高于 T_C 时, 超导电性不再存在. 这些研究结果丰富了人们对铁基超导体中磁性插层的有序态与超导态间相互作用的认识.

4 其他体系铁砷基超导体的高压研究

对于准二维插层结构的铁砷基超导体, 在不改变FeAs超导层的基础上, 插入不同的中间插层可以在调制载流子浓度的同时, 改变化学内压力以及FeAs层与插层间的相互作用进而实现对超导态的调制. 例如, 在122体系的基础上, 通过复杂的插层结构, 增加FeAs层之间距离便成为了材料物理学家探索新型超导材料的又一个有效途径. 如 $Sr_2VO_3FeAs(21311)$ 便是具有复杂插层结构的一类122体系铁基超导体. 其中间插层为复杂的 $Sr_4V_2O_6$ 层^[4]. 其常压下 T_C 为36.4 K, 而在4 GPa压力下其 T_C 提高到约46 K^[112]. $Sr_2Mg_2Ti_{0.7}O_3FeAs$ 同样具有复杂的插层结构, 其 T_C 在常压下为37 K, 而在4.2 GPa压力下其 T_C 提高到43 K^[113]. 此外, 还有下列几种重要的FeAs基超导体在压力下表现出有趣的行为.

4.1 两种111体系压致超导电性变化的比较

111体系超导体 $AFeAs$ ($A = Li, Na$)具有 Cu_2Sb 型的插层结构, 空间群为 $P4/nmm$ (与1111体系超导体一样), FeAs层之间的插层为碱金属离子层. Gooch等^[114]对LiFeAs的高压研究中发现 T_C 的压力效应为 -1.5 K/GPa, 这与Zhang等^[115]对LiFeAs开展的高压研究的结果一致. 而 $Na_{1-x}FeAs$ 在3 GPa压力下其 T_C 从26 K升高到31 K, 随后随着压力继续增加 T_C 迅速下降(如图8所示)^[116]. 高压原位X射线衍射测量结果表明^[117], As—Fe—As的键角是决定 T_C 的关键因素. 由于Li离子半径比Na离子半径小, 所以LiFeAs的压力效应处于NaFeAs的 T_C - P 相图中 T_C 下降的阶段.

4.2 具有复杂晶体结构10-3-8体系的压致超导电性及其与掺杂效应的对比

$Ca_{10}(Pt_3As_8)(Fe_2As_2)_5$ 是一种新型的具有更为复杂插层结构的铁砷基化合物(简称为10-

3-8体系), 其晶体结构可描述为在 $CaFe_2As_2$ 晶格中交替插入 Pt_nAs_8 中间层, 即在一个晶胞中以 $Ca-Pt_nAs_8-Ca-Fe_2As_2$ 复杂的层状形式堆垛而成^[118-124]. 未掺杂的10-3-8化合物为反铁磁半导体. 通过用Pt部分替代其FeAs层中的Fe, 可诱导超导电性的出现^[121-124].

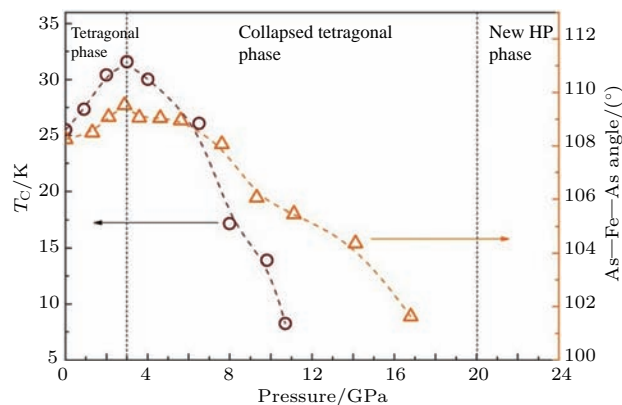


图8 NaFeAs的 T_C , As—Fe—As键角以及晶体结构与压力的依赖关系

Fig. 8. The pressure dependence of T_C , As—Fe—As bond angle and crystalline structure of NaFeAs.

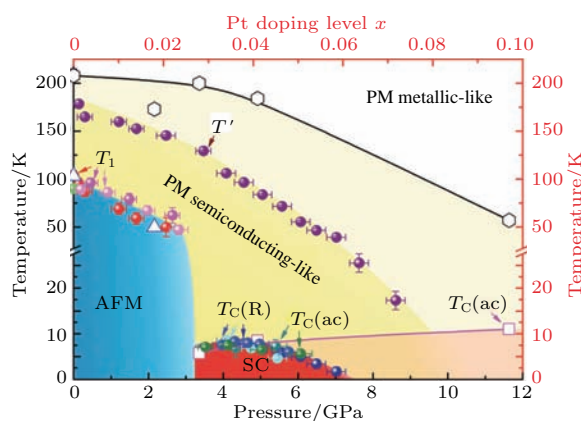


图9 $Ca_{10}(Pt_3As_8)(Fe_2As_2)_5$ 单晶样品的温度-压力相图及其与温度-掺杂相图的对比(实心绿点和蓝点代表压力下的超导转变温度 T_C , 空心四方型代表Fe位Pt掺杂得到的 T_C)

Fig. 9. Temperature-pressure electronic phase diagram for the $Ca_{10}(Pt_3As_8)(Fe_2As_2)_5$, and scaled temperature-doping phase diagram.

Gao等^[5]通过高压原位电阻测量、交流磁化率测量、霍尔测量及同步辐射X射线结构分析等综合实验手段, 对这类具有复杂插层结构的化合物进行了深入、系统的高压研究. 他们发现压力可有效地抑制样品中的反铁磁长程序, 诱发超导电性. 在压力小于2.5 GPa以下时, 10-3-8化合物表现出半导体特征. 低温下其反铁磁转变温度随着压力的增加而下降. 在压力为3.5 GPa处, 其反铁磁有序态被抑制, 样品进入超导态(如图9所示).

将温度-压力电子相图和Fe位Pt掺杂的温度-掺杂电子相图相对比,发现在4.1 GPa以内,压力和电子掺杂对该体系的反铁磁转变温度的抑制和 T_C 的影响十分相似.然而在更高压力下,压力和电子掺杂对该体系 T_C 的影响则完全不同,表明两种途径对费米面拓扑性质的影响是不同的.这些实验结果为进一步深入开展对铁基超导体的实验和理论研究提供了重要的信息.

4.3 压力下112体系相图中的双临界点

$Ca_{1-x}La_xFeAs_2$ (简称为AR-112)体系是一个新型铁砷基体.与 MFe_2As_2 相比,这类超导体的晶体结构可以描述为FeAs层与复杂的(Ae/Re)-As-(Ae/Re)插层构成.空间群为 $P2_1$ (No. 4).当La掺杂量为0.15时,其晶体结构才稳定,并且反铁磁态与超导态共存^[125].当La掺杂大于0.25后,该体系具有纯的反铁磁态^[126].

Zhou等^[127]对具有纯反铁磁态的 $Ca_{0.73}La_{0.27}FeAs_2$ 开展了高压原位电阻测量、交流磁化率测量以及比热测量等.他们发现压力可以使其反铁磁有序态被逐渐抑制,在反铁磁转变温度(T_M)突然消失的压力点,超导态同时出现.而且,其 T_M 与 T_C 的数值非常接近,几乎相交于一点.这是首次从实验上在高温超导体的 T_C - P 相图中发现的具有双临界点的反铁磁与超导相变.这一发现不

仅对112体系超导体的超导电性有了更为深刻的理解,而且对于其他具有3d电子的超导体中超导电性与反铁磁关系的理解也具有重要的意义.

5 压力对各类铁砷基超导体超导转变温度的影响

铁砷基化合物在压力作用下其超导电性表现出丰富的变化.图10中归纳了压力对主要的铁砷基化合物 T_C 的影响.由图10(a)可见,在压力作用下,常压下不超导的1111, 122, 112及10-3-8等多个体系的母相材料及过掺杂或者欠掺杂的铁砷基化合物在压力作用下可以实现超导.随着压力的继续增加, T_C 升高到一个最大值后开始下降甚至消失.拱形的 T_C - P 相图是铁砷基超导体的一个共性. SmFeAsO在压力作用下出现超导态后, T_C 并没有明显的升高.在一定压力范围内其 T_C 基本不变,随后开始出现下降. SmFeAsO的这种特殊性可能与其晶体结构中As-Fe-As的键角接近铁砷基超导体最佳的键角有关.相对铜氧化物,铁砷基超导体的压力效应更为敏感.常压下不超导的铁砷基化合物,在较低压力作用下其反铁磁序就会被抑制,随后出现超导态并达到最高 T_C .在已报道的铁砷基化合物中, EuFe₂As₂的压致超导转变温度为最高(41 K).

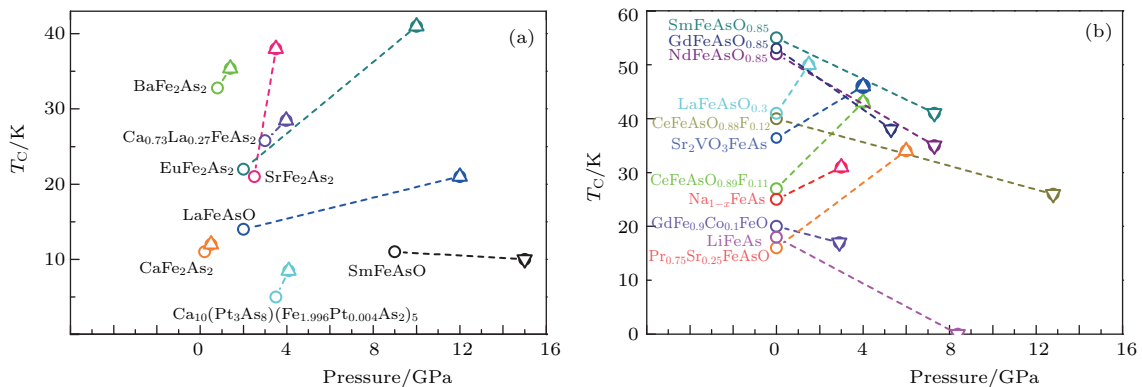


图10 主要铁砷基超导体的 T_C 与压力的依赖关系 包括: $Ca_{0.73}La_{0.27}FeAs_2$ ^[42], $EuFe_2As_2$ ^[104], $LaFeAsO$ ^[25], $CaFe_2As_2$ ^[87], $SrFe_2As_2$ ^[94], $BaFe_2As_2$ ^[90], $SmFeAsO$ ^[25], $Ca_{10}(Pt_3As_8)(Fe_{1.996}Pt_{0.004}As_2)_5$ ^[5], $SmFeAsO_{0.85}$ ^[28], $GdFeAsO_{0.85}$ ^[42], $NdFeAsO_{0.85}$ ^[28], $LaFeAsO_{0.3}$ ^[30], $CeFeAsO_{0.88}F_{0.12}$ ^[31], Sr_2VO_3FeAs ^[112], $LaFeAsO_{0.89}F_{0.11}$ ^[11], $Na_{1-x}FeAs$ ^[116], $GdFe_{0.9}Co_{0.1}AsO$ ^[43], $LiFeAs$ ^[114]和 $Pr_{0.75}Sr_{0.25}FeAsO$ ^[37]; Δ 表示压力调控 T_C 上升可达到的最大值及相应的压力, ∇ 表示 T_C 在压力作用下降低的温度,其所对应的压力为报道的研究压力范围; (a)图中 \circ 表示压力作用下超导态出现时的 T_C , (b)图中 \circ 表示常压下的 T_C

Fig. 10. The pressure dependence of T_C for iron pnictide superconductors. Δ represents the T_C that is increased under pressure, ∇ stands for the T_C that is decreased under pressure; \circ in figure (a) represents the T_C that is emerged by the application of pressure; \circ in figure (b) represents the T_C that exits at ambient pressure.

图 10(b) 中汇总了常压下超导的主要铁砷基超导体的 T_C 在压力作用下的变化趋势. 可见, 对于很多在常压下超导的铁砷基超导体, 如 La-1111, 空穴掺杂的 Pr-1111, Na-111 以及具有复杂插层结构的 21311 体系在压力作用下, T_C 会继续升高, 达到最高 T_C 后再缓慢下降, 构成了拱形的 T_C - P 相图. 此外, 最佳掺杂的 Sm-1111, Gd-1111, Nd-1111 体系以及 Li-111 体系超导体在压力作用下其 T_C 的降低可以归纳为 As—Fe—As 键角偏离了最优值^[13-15]. 有趣的是 Ce-1111 中 As—Fe—As 键角在压力作用下朝着最佳值方向变化, 但其 T_C 却是下降的, 其原因在于 Ce 离子在压力作用下由 Ce^{3+} 向 Ce^{4+} 变化, 导致超导态与近藤效应的竞争, 从而抑制了 T_C 的升高^[36].

6 结束语

自 2008 年铁基超导体被发现以来, 对铁基超导体的研究一直是高温超导研究领域的主攻方向. 其中, 高压下铁砷基超导体的研究对促进铁基超导体的研究发挥了重要的作用. 在压力下铁砷基超导体表现出丰富的物理现象, 启示着人们开展对铁基超导新材料的探索及其超导机理的研究. 例如, 在压力下对 1111 体系超导电性的研究在指导常压下用小离子半径元素替代从而获得了最高 T_C 铁砷基超导体和推测铁砷基超导体超导转变温度上限等方面起到了重要作用; 压力可抑制 122 体系母相的磁有序进而诱发超导电性, 并揭示出 Eu-122 体系中的 Eu 离子插层中的磁有序与 FeAs 层超导电性的关系; 在新型铁砷基超导体 $Ca_{0.73}La_{0.27}FeAs_2$ 中发现的压致双临界点现象等. 这些实验结果为人们理解铁砷基超导体的电子结构与晶体结构的变化关系以及磁性与超导电性的关系等高温超导研究的核心问题提供了重要的实验依据. 毫无疑问, 在 Onnes 首次开展高压下超导电性研究^[128]90 多年后的今天, 基于现代技术的高压下的超导研究更应该是值得我们继续开展和充满期待的研究方向.

感谢赵忠贤院士给予本文的指导. 感谢与作者共同发表本综述中所涉及文章的合作者: Robert Cava 教授、车广灿研究员、陈根富研究员、陈仙辉教授、戴希研究员、丁洪研究员、董晓莉研究员、方忠研究员、冯济教授、郭静副研究员、Ni Ni 教授、任志安研究员、Katsuya Shimizu 教授、

Vladimir Sidorov 教授、王楠林教授、张广铭教授、赵忠贤院士和周放研究员等. 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对我们相关高压实验的支持.

参考文献

- [1] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, Hosono H 2008 *J. Am. Chem. Soc.* **130** 3296
- [2] Wang X C, Liu Q Q, Lü Y X, Gao W B, Yang L X, Yu R C, Li F Y, Jin C Q 2008 *Solid State Commun.* **148** 538
- [3] Rotter M, Tegel M, Johrendt D 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 107006
- [4] Zhu X Y, Han F, Mu G, Cheng P, Shen B, Zeng B, Wen H H 2009 *Phys. Rev. B* **79** 220512
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Matsuoka T, Shimizu K 2009 *Nature* **458** 186
- [8] Ma Y M, Eremets M, Oganov A R, Xie Y, Trojan I, Medvedev S, Lyakhov A O, Valle M, Prakapenka V 2009 *Nature* **458** 182
- [9] Kang D F, Zhou Y Z, Yi W, Yang C L, Guo J, Shi Y G, Zhang S, Li A G, Yang K, Wu Q, Zhang G M, Sun L L, Zhao Z X 2015 *Nat. Commun.* **6** 7804
- [10] Lu W, Yang J, Dong X L, Ren Z A, Che G C, Zhao Z X 2008 *New J. Phys.* **10** 063026
- [11] Takahashi H, Igawa K, Arii K, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H 2008 *Nature* **453** 376
- [12] 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
- [13] Mizuguchi Y, Hara Y, Deguchi K, Tsuda S, Yamaguchi T, Takeda K, Kotegawa H, Tou H, Takano Y 2010 *Supercond. Sci. Tech.* **23** 054013
- [14] Lee C H, Iyo A, Eisaki H, Kito H, Fernandez-Diaz M T, Kumai R, Miyazawa K, Kihou K, Matsuhata H, Braden M, Yamada K 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 44
- [15] Konzen L M N, Sefat A S 2016 arXiv: 1611.03400 [cond-mat.supr-con]
- [16] 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, Buchner B 2009 *Nat. Mater.* **8** 305
- [17] Rotundu C R, Keane D T, Freelon B, Wilson S D, Kim A, Valdivia P N, Bourret-Courchesne E, Birgeneau R J 2009 *Phys. Rev. B* **80** 144517
- [18] 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

- [19] Jesche A, Krellner C, de Souza M, Lang M, Geibel C 2010 *Phys. Rev. B* **81** 134525
- [20] Qiu Y, Bao W, Huang Q, Yildirim T, Simmons J M, Green M A, Lynn J W, Gasparovic Y C, Li J, Wu T, Wu G, Chen X H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 257002
- [21] Chen Y, Lynn J W, Li J, Li G, Chen G F, Luo J L, Wang N L, Dai P C, dela Cruz C, Mook H A 2008 *Phys. Rev. B* **78** 064515
- [22] Martinelli A, Palenzona A, Tropeano M, Putti M, Ferdeghini C, Profeta G, Emerich E 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 227001
- [23] Wang C, Li L J, Chi S, Zhu Z W, Ren Z, Li Y K, Wang Y T, Lin X, Luo Y K, Jiang S A, Xu X F, Cao G H, Xu Z A 2008 *Europhys. Lett.* **83** 67006
- [24] Drew A J, Niedermayer C, 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, Rossle M, Kim K W, Baines C, Bernhard C 2009 *Nat. Mater.* **8** 310
- [25] Takahashi H, Okada H, Igawa K, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H, Matsubayashi K, Uwatoko Y 2009 *J. Supercond. Nov. Magn.* **22** 595
- [26] 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
- [27] Yi W, Yang J, Shen X L, Lu W, Li Z C, Ren Z A, Che G C, Dong X L, Zhou F, Sun L L, Zhao Z X 2008 *Supercond. Sci. Tech.* **21** 125002
- [28] 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
- [29] Lu W, Shen X L, Yang J, Li Z C, Yi W, Ren Z A, Dong X L, Che G C, Sun L L, Zhou F, Zhao Z X 2008 *Solid State Commun.* **148** 168
- [30] 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
- [31] 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
- [32] Okada H, Igawa K, Takahashi H, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H, Matsubayashi K, Uwatoko Y 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 113712
- [33] Kawakami T, Kamatani T, Okada H, Takahashi H, Nasu S, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 123703
- [34] 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
- [35] Takahashi H, Soeda H, Nukii M, Kawashima C, Nakanishi T, Iimura S, Muraba Y, Matsuishi S, Hosono H 2015 *Sci. Rep.* **5** 7829
- [36] 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
- [37] Tamilselvan N R, Kanagaraj M, Murata K, Yoshino H, Arumugam S, Yamada A, Uwatoko Y, Kumararaman S 2014 *J. Supercond. Nov. Magn.* **27** 1381
- [38] Takeshita N, Iyo A, Eisaki H, Kito H, Ito T 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 075003
- [39] Takahashi H, Okada H, Igawa K, Kamihara Y, Hirano M, Hosono H 2009 *Physica C* **469** 413
- [40] 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
- [41] Lorenz B, Sasmal K, Chaudhury R P, Chen X H, Liu R H, Wu T, Chu C W 2008 *Phys. Rev. B* **78** 012505
- [42] Zhou Y Z, Sidorov V A, Petrova A E, Penkov A A, Pinyagin A N, Zhao Z X, Sun L L 2016 *J. Supercond. Nov. Magn.* **29** 1105
- [43] Selvan G K, Bhoi D, Arumugam S, Midya A, Mandal P 2015 *Supercond. Sci. Tech.* **28** 015009
- [44] Ju J, Huynh K, Tang J, Li Z F, Watahiki M, Sato K, Terasaki H, Ohtani E, Takizawa H, Tanigaki K 2010 *J. Phys. Chem. Solids* **71** 491
- [45] Karpinski J, Zhigadlo N D, Katrych S, Bukowski Z, Moll P, Weyeneth S, Keller H, Puzniak R, Tortello M, Daghero D, Gonnelli R, Maggio-Aprile I, Fasano Y, Fischer O, Rogacki K, Batlogg B 2009 *Physica C* **469** 370
- [46] Sasmal K, Lü B, Lorenz B, Guloy A M, Chen F, Xue Y Y, Chu C W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 107007
- [47] Goko T, Aczel A A, Baggio-Saitovitch E, Bud'ko S L, Canfield P C, Carlo J P, Chen G F, Dai P C, Hamann A C, Hu W Z, Kageyama H, Luke G M, Luo J L, Nachumi B, Ni N, Reznik D, Sanchez-Candela D R, Savici A T, Sikes K J, Wang N L, Wiebe C R, Williams T J, Yamamoto T, Yu W, Uemura Y J 2009 *Phys. Rev. B* **80** 024508
- [48] Zhao K, Liu Q Q, Wang X C, Deng Z, Lü Y X, Zhu J L, Li F Y, Jin C Q 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 222203
- [49] Jeevan H S, Hossain Z, Kasinathan D, Rosner H, Geibel C, Gegenwart P 2008 *Phys. Rev. B* **78** 092406
- [50] Anupam, Paulose P L, Jeevan H S, Geibel C, Hossain Z 2009 *J. Phys.: Condens. Matter* **21** 265701
- [51] Qi Y P, Gao Z S, Wang L, Wang D L, Zhang X P, Ma Y W 2008 *New J. Phys.* **10** 123003
- [52] Rotter M, Pangerl M, Tegel M, Johrendt D 2008 *Angew. Chem. Int. Edit.* **47** 7949
- [53] Zhang Z, Wang A F, Hong X C, Zhang J, Pan B Y, Pan J, Xu Y, Luo X G, Chen X H, Li S Y 2015 *Phys. Rev. B* **91** 024502
- [54] Friederichs G M, Schellenberg I, Pottgen R, Duppel V, Kienle L, der Gueinne J S A, Johrendt D 2012 *Inorg. Chem.* **51** 8161
- [55] Gooch M, Lü B, Sasmal K, Tapp J H, Tang Z J, Guloy A M, Lorenz B, Chu C W 2010 *Physica C* **470** S276
- [56] Tafti F F, Ouellet A, Juneau-Fecteau A, Faucher S, Lapointe-Major M, Doiron-Leyraud N, Wang A F, Luo X G, Chen X H, Taillefer L 2015 *Phys. Rev. B* **91** 054511
- [57] Tafti F F, Juneau-Fecteau A, Delage M E, de Cotret S R, Reid J P, Wang A F, Luo X G, Chen X H, Doiron-Leyraud N, Taillefer L 2013 *Nat. Phys.* **9** 349

- [58] Tafti F F, Clancy J P, Lapointe-Major M, Collignon C, Faucher S, Sears J A, Juneau-Fecteau A, Doiron-Leyraud N, Wang A F, Luo X G, Chen X H, Desgreniers S, Kim Y J, Taillefer L 2014 *Phys. Rev. B* **89** 134502
- [59] Taufour V, Foroozani N, Tanatar M A, Lim J, Kaluarachchi U, Kim S K, Liu Y, Lograsso T A, Kogan V G, Prozorov R, Bud'ko S L, Schilling J S, Canfield P C 2014 *Phys. Rev. B* **89** 220509
- [60] Terashima T, Kihou K, Sugii K, Kikugawa N, Matsumoto T, Ishida S, Lee C H, Iyo A, Eisaki H, Uji S 2014 *Phys. Rev. B* **89** 134520
- [61] Wang P S, Zhou P, Dai J, Zhang J, Ding X X, Lin H, Wen H H, Normand B, Yu R, Yu W Q 2016 *Phys. Rev. B* **93** 085129
- [62] Eilers F, Grube K, Zocco D A, Wolf T, Merz M, Schweiss P, Heid R, Eder R, Yu R, Zhu J X, Si Q M, Shibauchi T, Lohneysen H V 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 237003
- [63] Nakajima Y, Wang R X, Metz T, Wang X F, Wang L M, Cynn H, Weir S T, Jeffries J R, Paglione J 2015 *Phys. Rev. B* **91** 060508
- [64] Ying J J, Tang L Y, Struzhkin V V, Mao H K, Gavriliuk A G, Wang A F, Chen X H, Chen X J 2015 *arXiv: 1501.00330 [cond-mat.supr-con]*
- [65] Wang B S, Matsubayashi K, Cheng J G, Terashima T, Kihou K, Ishida S, Lee C H, Iyo A, Eisaki H, Uwatoko Y 2016 *Phys. Rev. B* **94** 020502(R)
- [66] Stavrou E, Chen X J, Oganov A R, Wang A F, Yan Y J, Luo X G, Chen X H, Goncharov A F 2015 *Sci. Rep.* **5** 9869
- [67] Ronning F, Klimczuk T, Bauer E D, Volz H, Thompson J D 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 322201
- [68] 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
- [69] Krellner C, Caroca-Canales N, Jesche A, Rosner H, Ormeci A, Geibel C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 100504
- [70] Sefat A S, McGuire M A, Jin R, Sales B C, Mandrus D, Ronning F, Bauer E D, Mozharivskiy Y 2009 *Phys. Rev. B* **79** 094508
- [71] Rotter M, Tegel M, Johrendt D, Schellenberg I, Hermes W, Pottgen R 2008 *Phys. Rev. B* **78** 020503
- [72] 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
- [73] Sefat A S, Jin R Y, McGuire M A, Sales B C, Singh D J, Mandrus D 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 117004
- [74] 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
- [75] Ni N, Thaler A, Kracher A, Yan J Q, Bud'ko S L, Canfield P C 2009 *Phys. Rev. B* **80** 024511
- [76] Saha S R, Drye T, Kirshenbaum K, Butch N P, Zavalij P Y, Paglione J 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 072204
- [77] Leithe-Jasper A, Schnelle W, Geibel C, Rosner H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 207004
- [78] 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
- [79] Qi Y P, Wang L, Gao Z S, Wang D L, Zhang X P, Ma Y W 2009 *Physica C* **469** 1921
- [80] Kirshenbaum K, Saha S R, Drye T, Paglione J 2010 *Phys. Rev. B* **82** 144518
- [81] Kumar N, Nagalakshmi R, Kulkarni R, Paulose P L, Nigam A K, Dhar S K, Thamizhavel A 2009 *Phys. Rev. B* **79** 012504
- [82] Qi Y P, Wang L, Gao Z S, Wang D L, Zhang X P, Wang C L, Yao C, Ma Y W 2011 *New J. Phys.* **13** 033022
- [83] Sefat A S 2011 *Rep. Prog. Phys.* **74** 124502
- [84] Kotegawa H, Kawazoe T, Sugawara H, Murata K, Tou H 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 083702
- [85] Yu W, Aczel A A, Williams T J, Bud'ko S L, Ni N, Canfield P C, Luke G M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 020511
- [86] Colombier E, Bud'ko S L, Ni N, Canfield P C 2009 *Phys. Rev. B* **79** 224518
- [87] Alireza P L, Ko Y T C, Gillett J, Petrone C M, Cole J M, Lonzarich G G, Sebastian S E 2009 *J. Phys.: Condens. Matter* **21** 012208
- [88] Duncan W J, Welzel O P, Harrison C, Wang X F, Chen X H, Grosche F M, Niklowitz P G 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 052201
- [89] Fukazawa H, Takeshita N, Yamazaki T, Kondo K, Hirayama K, Kohori Y, Miyazawa K, Kito H, Eisaki H, Iyo A 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 105004
- [90] Mani A, Ghosh N, Paulraj S, Bharathi A, Sundar C S 2009 *Europhys. Lett.* **87** 17004
- [91] Matsubayashi K, Katayama N, Ohgushi K, Yamada A, Munakata K, Matsumoto T, Uwatoko Y 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 073706
- [92] 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, McQueeney R J, Canfield P C, Goldman A I, Argyriou D N 2009 *Nat. Mater.* **8** 471
- [93] Kumar M, Nicklas M, Jesche A, Caroca-Canales N, Schmitt M, Hanfland M, Kasinathan D, Schwarz U, Rosner H, Geibel C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 184516
- [94] 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
- [95] Takahashi H, Okada H, Igawa K, Arii K, Kamihara Y, Matsuishi S, Hirano M, Hosono H, Matsubayashi K, Uwatoko Y 2008 *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** 78
- [96] Torikachvili M S, Bud'ko S L, Ni N, Canfield P C 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 057006
- [97] Park T, Park E, Lee H, Klimczuk T, Bauer E D, Ronning F, Thompson J D 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 322204
- [98] Torikachvili M S, Bud'ko S L, Ni N, Canfield P C, Hanahs S T 2009 *Phys. Rev. B* **80** 014521
- [99] Lee H, Park E, Park T, Sidorov V A, Ronning F, Bauer E D, Thompson J D 2009 *Phys. Rev. B* **80** 024519
- [100] Kreyssig A, Green M A, Lee Y, Samolyuk G D, Zajdel P, Lynn J W, Bud'ko S L, Torikachvili M S, Ni N, Nandi S, Leao J B, Poulton S J, Argyriou D N, Harmon B N, McQueeney R J, Canfield P C, Goldman A I 2008 *Phys. Rev. B* **78** 184517

- [101] Ahilan K, Balasubramaniam J, Ning F L, Imai T, Sefat A S, Jin R, McGuire M A, Sales B C, Mandrus D 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 472201
- [102] Ni N, Thaler A, Yan J Q, Kracher A, Colombier E, Bud'ko S L, Canfield P C, Hannahs S T 2010 *Phys. Rev. B* **82** 024519
- [103] Ahilan K, Ning F L, Imai T, Sefat A S, McGuire M A, Sales B C, Mandrus D 2009 *Phys. Rev. B* **79** 214520
- [104] Uhoya W, Tsoi G, Vohra Y K, McGuire M A, Sefat A S, Sales B C, Mandrus D, Weir S T 2010 *J. Phys.: Condens. Matter* **22** 292202
- [105] Miclea C F, Nicklas M, Jeevan H S, Kasinathan D, Hossein Z, Rosner H, Gegenwart P, Geibel C, Steglich F 2009 *Phys. Rev. B* **79** 212509
- [106] Sun L L, Guo J, Chen G F, Chen X H, Dong X L, Lu W, Zhang C, Jiang Z, Zou Y, Zhang S, Huang Y Y, Wu Q, Dai X, Li Y C, Liu J, Zhao Z X 2010 *Phys. Rev. B* **82** 134509
- [107] Terashima T, Kimata M, Satsukawa H, Harada A, Hazama K, Uji S, Suzuki H S, Matsumoto T, Murata K 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 083701
- [108] Ren Z, Tao Q, Jiang S A, Feng C M, Wang C, Dai J H, Cao G H, Xu Z A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 137002
- [109] 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
- [110] Xiao Y, Su Y, Meven M, Mittal R, Kumar C M N, Chatterji T, Price S, Persson J, Kumar N, Dhar S K, Thamizhavel A, Brueckel T 2009 *Phys. Rev. B* **80** 174424
- [111] 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
- [112] Kotegawa H, Kawazoe T, Tou H, Murata K, Ogino H, Kishio K, Shimoyama J 2009 *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** 123707
- [113] Sato S, Ogino H, Kawaguchi N, Katsura Y, Kishio K, Shimoyama J, Kotegawa H, Tou H 2010 *Supercond. Sci. Tech.* **23** 045001
- [114] Gooch M, Lü B, Tapp J H, Tang Z, Lorenz B, Guloy A M, Chu P C W 2009 *Europhys. Lett.* **85** 27005
- [115] Zhang S J, Wang X C, Sammynaiken R, Tse J S, Yang L X, Li Z, Liu Q Q, Desgreniers S, Yao Y, Liu H Z, Jin C Q 2009 *Phys. Rev. B* **80** 014506
- [116] Zhang S J, Wang X C, Liu Q Q, Lü Y X, Yu X H, Lin Z J, Zhao Y S, Wang L, Ding Y, Mao H K, Jin C Q 2009 *Europhys. Lett.* **88** 47008
- [117] Liu Q Q, Yu X H, Wang X C, Deng Z, Lü Y X, Zhu J L, Zhang S J, Liu H Z, Yang W G, Wang L, Mao H W, Shen G Y, Lu Z Y, Ren Y, Chen Z Q, Lin Z J, Zhao Y S, Jin C Q 2011 *J. Am. Chem. Soc.* **133** 7892
- [118] Ni N, Allred J M, Chan B C, Cava R J 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108** 1019
- [119] Lohnert C, Sturzer T, Tegel M, Frankovsky R, Friederichs G, Johrendt D 2011 *Angew. Chem. Int. Edit.* **50** 9195
- [120] Sturzer T, Derondeau G, Johrendt D 2012 *Phys. Rev. B* **86** 060516
- [121] Cho K, Tanatar M A, Kim H, Straszheim W E, Ni N, Cava R J, Prozorov R 2012 *Phys. Rev. B* **85** 020504
- [122] Nohara M, Kakiya S, Kudo K, Oshiro Y, Araki S, Kobayashi T C, Oku K, Nishibori E, Sawa H 2012 *Solid State Commun.* **152** 635
- [123] Kakiya S, Kudo K, Nishikubo Y, Oku K, Nishibori E, Sawa H, Yamamoto T, Nozaka T, Nohara M 2011 *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** 093704
- [124] Xiang Z J, Luo X G, Ying J J, Wang X F, Yan Y J, Wang A F, Cheng P, Ye G J, Chen X H 2012 *Phys. Rev. B* **85** 224527
- [125] Katayama N, Kudo K, Onari S, Mizukami T, Sugawara K, Sugiyama Y, Kitahama Y, Iba K, Fujimura K, Nishimoto N, Nohara M, Sawa H 2013 *J. Phys. Soc. Jpn.* **82** 123702
- [126] Kawasaki S, Mabuchi T, Maeda S, Adachi T, Mizukami T, Kudo K, Nohara M, Zheng G Q 2015 *Phys. Rev. B* **92** 180508
- [127] Zhou Y, Jiang S, Wu Q, Sidorov V A, Guo J, Yi W, Zhang S, Wang Z, Wang H, Cai S, Yang K, Jiang S, Li A, Ni N, Zhang G, Sun L, Zhao Z 2016 arXiv: 1603.05740 [cond-mat.supr-con]
- [128] Sizoo G J, Onnes H K 1925 *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* **180** 13

SPECIAL TOPIC — Recent advances in the structures and properties of materials under high-pressure

Superconductivities of pressurized iron pnictide superconductors*

Yi Wei¹⁾ Wu Qi¹⁾ Sun Li-Ling^{1)2)†}1) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 13 December 2016; revised manuscript received 10 January 2017)

Abstract

As one of the independent control parameters, pressure plays an important role in finding new phenomena, testing related theories and guiding the explorations for new superconductors. In this review article, we will briefly review the progress achieved from high pressure studies on some main types of the iron pnictide superconductors, including 1111-type, 122-type, 111-type, 10-3-8 type and 112-type. A few typical results from high pressure studies are introduced in more detail, including the positive pressure effect on the superconducting transition temperature T_C of 1111-type iron pnictide superconductors, which indicates a way to enhance the T_C by using a smaller cation to replace La ion; the maximum T_C of iron pnictide superconductors estimated by high-pressure studies on a series of 1111-type iron-based superconductors etc. More importantly, high pressure studies on the parent compounds of iron pnictide superconductors clearly demonstrate that pressure can suppress the transition temperatures of magnetic order and crystal structure, and then drive a superconducting transition. Furthermore, many examples are given in this review to reveal how the magnetic order competes with superconductivity under pressure, which provides new constraints for the establishment of the theory on superconductivity. These high pressure results are expected to be helpful for the studies of high- T_C superconductors and for the exploring of new superconductors.

Keywords: high pressure, superconductivity, iron pnictide superconductors**PACS:** 74.25.-q, 74.70.Xa, 74.62.Fj**DOI:** [10.7498/aps.66.037402](https://doi.org/10.7498/aps.66.037402)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91321207, 11427805), the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB07020300), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0300300).

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