

# 铁基超导体材料和物理研究

闻海虎

(南京大学物理学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 自2008年初在铁砷/铁硒( $\text{FeAs}/\text{FeSe}$ )基材料中发现高温超导电性以来, 已经有至少7种结构类型的材料被合成出来了。其中在“1111”体系中, 电阻和磁化测量得到的超导转变温度可达56 K, 而且有迹象表明超导转变温度有可能会继续升高。在铁基超导体的正常态, 有很多非常规电子特性, 如反铁磁性和四方-正交结构相变等也被观察到。铁基超导体是典型的多带超导体, 具有较长的相干长度、近三维的电子特性、很高的上临界磁场及不可逆磁场和很强的磁通钉扎能力等物理性质, 因此它们在强磁场方面有很好的应用前景。简单综述了铁基超导材料的结构类型, 针对几种主要结构类型的性质进行了描述, 对电子配对的机理问题作了比较详尽的阐述, 结合临界电流和临界磁场行为, 展望了铁基超导体的应用前景。

**关键词:** 铁基超导体; 材料结构类型; 电子配对机制; 应用展望

**中图分类号:** TM26      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2015)01-0073-06

## Iron-Based Superconducting Materials and Pairing Mechanism

WEN Haihu

(School of Physics, Nanjing University, Shanghai 210093, China)

**Abstract:** Since the discovery of high temperature superconductivity in the iron pnictide/ chalcogenide materials, at least seven related structural types have been fabricated. In the 1111 system, the highest superconducting transition temperature ( $T_c$ ) measured by resistivity and magnetization can reach 56 K. There are some hints that the  $T_c$  can be increased to higher values. The iron-based superconductors have multiband feature. Many unconventional electronic properties in the normal state of iron-based superconductors have been discovered. The iron based superconductors have relatively longer coherence length, more three dimensional electronic property, higher upper critical field and irreversibility field, very strong flux pinning, therefore they have the great potential for applications for producing high magnetic field. In this short overview, we will give a brief survey about the development of materials and physics of iron-based superconductors. We give detailed descriptions on the properties for several kinds of materials with the major structures. In addition, we will give an introduction about the present understanding of the pairing mechanism. Finally we will try to give a perspective on the potential applications of the iron-based superconductors.

**Key words:** iron-based superconductors; overview on structural types; pairing mechanism; application perspectives

### 1 前言

铁基超导体研究的突破发生在2008年2月底, 日本东京工业大学的科学家 Hosono 教授研究小组发现, 在母体材料  $\text{LaFeAsO}$  中掺杂 F 元素可以实现 26 K 的超导电性<sup>[1]</sup>。这个发现掀开了高温超导研究的新篇章。中

国科学家因为有长期的基础研究积累, 敏锐地意识到这个新型超导体体系的重要性, 迅速跟进, 开展了一系列重要的研究工作, 并发现了一大批新型超导结构类型, 创造并保持了  $T_c = 56$  K 的最高超导转变温度的世界记录, 同时在超导机理方面也获得了重要进展。本文简要综述了铁基超导体材料和物理研究的发展。

### 2 铁基超导体结构类型

铁砷基母体材料  $\text{LnOFeAs}$  ( $\text{Ln} = \text{La}, \text{Pr}, \text{Ce}, \text{Nd}, \text{Sm}$  等) 的研究历史可以追溯到1974年美国杜邦公司 Jeitschko 等人开展的寻找新材料的系列工作。随后德国的一个研究小组合成了系列的、具有同样结构(即  $\text{ZrCuSiAs}$  结构)的此

收稿日期: 2014-08-18

基金项目: 国家自然科学基金委(11034011/A0402)、科技部973计划项目(2011CBA00102, 2012CB821403)、高校985计划项目资助

通讯作者: 闻海虎, 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, Email: hhwen@nju.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.01.07

类新材料。这些新材料被取名为四元磷氧化物  $LnOMPn$  ( $Ln = La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd$ ;  $M = Mn, Fe, Co, Ni$ ;  $Pn = P, As$ )。这个体系空间群为  $P4/nmm$ , 具有四方相层状结构, 在  $c$  方向上以  $-(LnO)_2 - (MP)_2 - (LnO)_2 -$  形式交替堆砌。对于母体材料而言, 层和层之间电荷是平衡的, 比如  $(LnO)^{+1}$  和  $(MP)^{-1}$  的电荷是平衡的。由于四元磷氧化物  $LnOMPn$  (1111 结构) 中的一些材料在低温下是超导体, 因此这个体系构建了铜氧化物之外的另一个层状超导体家族。图 1 给出了  $LaFeAsO$  (1111) 和  $BaFe_2As_2$  (122) 的结构图。

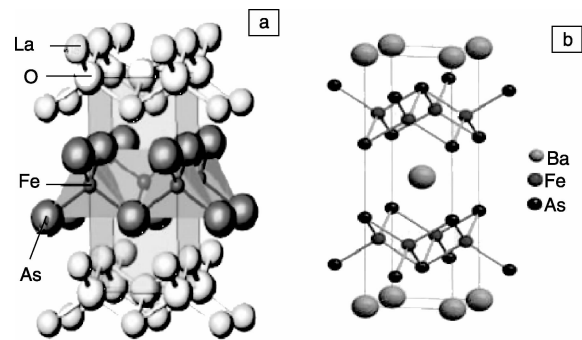


图 1  $LaFeAsO$  材料结构示意图 (a)<sup>[1]</sup>, 在每个位置进行化学替换均可以产生超导电性;  $BaFe_2As_2$  材料结构示意图 (b)<sup>[7]</sup>, 在  $Ba$  位置掺入  $K$ , 或者在  $Fe$  位置掺入其他过渡金属离子, 如  $Co, Ni, Ir, Ru, Rh, Pt$  等也会出现超导电性。通常的磁性原子  $Co, Ni$  等在这里不表现出磁性

Fig. 1 The structure of the  $LaFeAsO$  phase (a)<sup>[1]</sup>, superconductivity can be induced by doping to each site of the formula. The structure of  $BaFe_2As_2$  phase (b)<sup>[7]</sup>. Superconductivity can be induced by doping either to the  $Ba$  site by  $K$ , or doping to the  $Fe$  site by  $Co, Ni, Ir, Ru, Rh, Pt$ . Usually  $Co$  and  $Ni$  are magnetic elements, but in these materials, they show no magnetism

在 Hosono 教授研究小组发现  $LaFeAsO_{1-x}F_x$  ( $x = 0.05 \sim 0.12$ ) 具有 26 K 的超导转变温度后, 新一轮寻找高温超导材料的浪潮再次到来。在短短的一年中, 科学家们已经发现了 7 种以上典型结构, 分别被称为“11” ( $FeSe$ ), “111” ( $LiFeAs, NaFeAs$ ), “122” ( $(Ba, Sr, Ca)Fe_2As_2$ ), “1111” ( $REFeAsO, RE = \text{稀土元素}$ ), “32522” ( $Sr_3Sc_2O_5Fe_2As_2$ ), “42622” ( $Sr_4V_2O_6Fe_2As_2$ ) 和 “43822” ( $Ca_4Mg_3O_8Fe_2As_2$ ) 等。在全球超导研究者针对铁基超导体的研发竞争中, 中国科学家由于多年的基础研究积累, 认识到该系统的重要性, 迅速反应, 开展了一系列重要的科研工作, 发现并合成了一些重要的超导体系, 第一次利用化学掺杂, 在常压下测量到 40 K 以上的超导电性<sup>[2-3]</sup>, 并迅速提升到 55 K<sup>[4]</sup>。通过化学掺杂, 首次获得了空穴型掺杂的超导体<sup>[5]</sup>。图 2 给出了截至 2012 年底之前发现的铁基超导体几个主要的结构类型和相应的超导转变温度。

3 铁基超导体系基本特征

3.1  $LnFeAsO$  (1111) 体系

$LnFeAsO$  体系是铁基超导体最早研究的体系。Hosono 教授研究小组在 2006 年已开始关注  $LaFePO$  材料, 发现有 3~4 K 的超导电性。很快他们报道了在  $F$  掺杂的  $LaFeAsO$  材料中发现了 26 K 的超导体<sup>[1]</sup>; 在未掺杂的  $LaFeAsO$  材料中, 他们发现在 150 K 左右电阻和磁化上面均有一个反常, 后来发现这个反常是对应反铁磁相变和四方-正交结构相变的, 后者温度稍高。通过化学掺杂或压力, 可以压制反铁磁和结构相变, 然后获得超导电性。对于  $F$  掺杂的  $LnFeAsO$  体系, 很难获得全掺杂的区域。中科院物理所小组在 2008 年 5 月, 利用助熔剂技术, 很快生长出了 50~100  $\mu m$  级的单晶, 并结合微加工

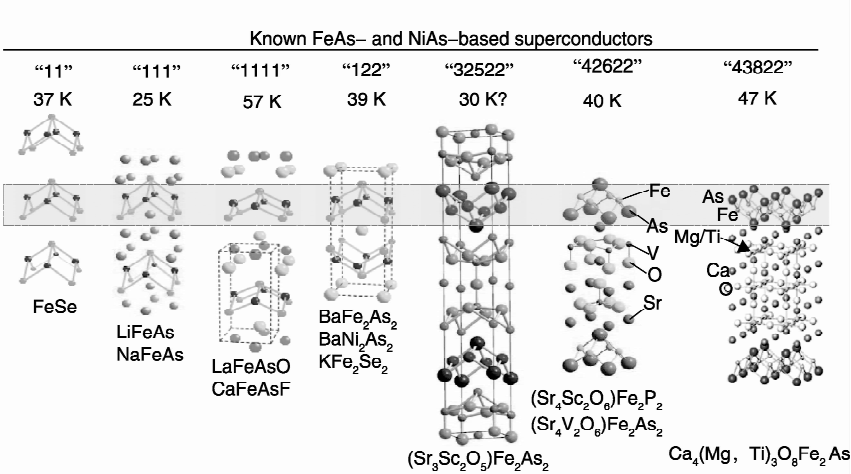


图 2 铁基超导体几个主要结构类型和相应的已有报道的最高超导转变温度

Fig. 2 The seven kinds of major structures of the iron-based superconductors discovered by the end of 2012 and the highest  $T_c$  values of the related systems.

技术制备了微小电极，第一次在铁基超导体上测量了本征的电输运特性<sup>[6]</sup>，发现了很小的各向异性度  $\gamma = (m_{ab}/m_c)^{1/2} \approx 5$ 。到目前为止，如何生长“1111”体系较大尺寸的单晶仍然具有挑战性，一般很难获得0.5 mm以上的单晶。人们尝试了在 As 位置替换 P、在 Fe 位置替换其他过渡金属、在 O 位置替换 H 等方式，获得了较宽的掺杂范围，得到了较宽的电荷掺杂相图。

### 3.2 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (122) 体系

德国一研究小组在 2008 年 6 月报道了新结构材料 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>，并且在几天之后报道了空穴掺杂的铁基超导体 Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>，超导转变温度可达 38 K<sup>[7]</sup>。该体系可以拓展到 SrFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 和 CaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>，也有反铁磁性和四方-正交相变，超导转变温度大约在 170 K ~ 200 K，通过化学掺杂：Ba 位置替代 K、或者 Fe 位置替换其他过渡金属，如 Co、Ni、Ru、Rh、Pd、Pt、Ir 等，均可获得超导电性。另外，很有意思的是，这个体系可以获得极高空穴掺杂的超导体，如 Ba 被完全替换成 K，变成 KFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 也会获得超导电性，其转变温度为 3.6 K。在该体系中，费米面和超导能隙如何演变是目前研究人员关心的核心问题。图 3 为该体系的电子态相图。

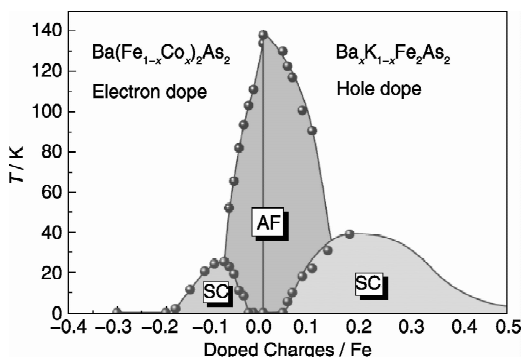


图 3 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 体系电子态相图。左边是电子型掺杂，右边是空穴型掺杂。在空穴极度掺杂的 KFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 中仍然具有超导电性

Fig. 3 The electronic phase diagram of the BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> system. The left hand corresponds to the electron doping, the right hand side gives the hole doping. Superconductivity maintains even in the extremely hole doping limit, as in KFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>

### 3.3 LiFeAs/NaFeAs 体系

LiFeAs 体系是 2008 年夏天被发现<sup>[8-9]</sup>，后来扩展到 NaFeAs 体系。NaFeAs 体系的母体就具有超导电性，超导转变温度在 15 K 左右，同时在 45 K 左右时具有反铁磁转变，而四方-正交相变的温度在约 60 K。通过向 Fe 位置掺入 Co，在掺杂量为 2% 左右时，反铁磁则被压制到零温，同时超导温度达到 22 K 左右。该体系中，Li 或 Na 自然分成两层，因此在解理时会自然分开，形成没有

电极化的表面，便于开展扫描隧道<sup>[10]</sup>和角分辨光电子谱研究。该体系通过压力调节超导转变温度，并且同时利用核磁共振测量反映反铁磁涨落的自旋晶格弛豫  $1/T_1T$ ，发现它与超导转变温度密切相关<sup>[11]</sup>，进一步说明超导与反铁磁涨落有密切关系。

### 3.4 FeTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> 体系

最初的 FeSe 超导体是台湾国立中央研究院和东华大学吴茂昆研究小组发现的。他们发现 Fe 稍微过量的四方结构材料 Fe<sub>1+x</sub>Se 会表现出 8 K 左右的超导电性<sup>[12]</sup>。美国一研究小组也发现 FeTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> 中具有超导电性，并且有一个完整的电子态相图<sup>[13]</sup>。四方结构的 FeTe 具有反铁磁性，其自旋方向与其他“1111”和“122”体系的自旋方向相差 45°，因此反铁磁波矢在 FeTe 和“1111”，“122”这两类系统中相差 45°，大小也有差别。通过进一步研究，人们发现这个体系中的电子关联比其他系统都要强，电子重整化达到 5 ~ 10 倍。在该体系中，最高超导转变温度大致发生在 FeTe<sub>0.6</sub>Se<sub>0.4</sub>，温度大致为 15 ~ 20 K。非常有趣的是，此体系的上临界磁场很高，在零温下可达 60 T (特斯拉)。最近有把它制成薄膜<sup>[14]</sup>，发现在 30 T (特斯拉) 磁场下，4.2 K 下的临界电流密度可达  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>。

### 3.5 K<sub>x</sub>Fe<sub>2-y</sub>Se<sub>2</sub> 体系

2010 年底，有报道在 KFe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> 体系中具有 32 K 超导电性<sup>[15]</sup>。几乎同时，另外一个研究小组独立报道了在 (Tl, K)Fe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> 体系中有 32 K 超导电性，而且指出 Fe 缺位的可能性<sup>[16]</sup>。很快该体系引起了业界极大的兴趣。如果按照 KFe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> 分子式计算，每个 Fe 位置会掺杂有 0.5 个电子，而此时其费米面就只能有电子型费米面。这样与下文提到的，也是目前被普遍接受的，依赖于电子-空穴费米面间电子散射配对的 S ± 配对模式相违背。很快作者团队从磁场穿透的性质上判断，该体系一定会有相分离出现<sup>[17]</sup>。中子衍射实验发现，该类材料中有一个母体，分子式为 K<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>Se<sub>5</sub>，即每 5 个 Fe 原子有一个空位，在邻近的 4 个 Fe 原子中心是一个空位，4 个 Fe 原子构成一个复合磁矩为 13.2 μ<sub>B</sub>，这些 Fe 空位形成  $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$  的结构。这个 K<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>Se<sub>5</sub> 相是一个绝缘体，能隙大致为 300 meV。因此该体系中的超导相是另外一个相，所占体积约为 20%。目前关于超导的母体相，或真正超导相到底是什么仍然不清楚。有研究认为超导母体可能是 K<sub>2</sub>Fe<sub>3</sub>Se<sub>4</sub><sup>[18]</sup>，或者 K<sub>2</sub>Fe<sub>7</sub>Se<sub>8</sub>，通过少量的 K 和 Fe 的添加就会出现超导电性，也有人认为超导相是 K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> (x = 0.3, 0.5, 1 等)。到目前为止尚没有直接和令人信服实验证据说明超导相没有钾和铁的缺位，因此关于这个问题还需要进一步的实验证据。

### 3.6 FeSe 单层薄膜

在铁基超导材料研究方面,有一个重要的发展方向是关于 FeSe 单层薄膜的。清华大学一研究小组利用现代分子束外延技术,生长出单层平整的 FeSe 薄膜,他们发现在经过处理的 SrTiO<sub>3</sub> 基片上面,制备的单层薄膜具有 2 个类似超导能隙特征,大的能隙大约为 22 mV<sup>[19]</sup>。按照在 FeSe 超导体中超导能隙和超导温度的比值,他们推测对于 22 mV 能隙的超导转变温度可达 80 K。他们与北京大学另一研究小组合作测量发现,该薄膜的起始超导转变温度约为 50 K,零电阻出现在 30 K 左右<sup>[20]</sup>。中科院物理所和复旦大学一研究小组在单层薄膜上面开展的角分辨光电子谱实验也发现了该能隙特征(如果能够被认定为超导能隙)可以持续到 65 K<sup>[21]</sup>,或 70 K 左右消失<sup>[22]</sup>。但到目前为止,人们仍然努力在 FeSe 单层薄膜上探测到液氮温区(77 K)以上温度的电阻消失和迈斯纳效应。

## 4 铁基高温超导电子配对机理

任何超导态都是由电子对的凝聚所形成的,因此要理解铁基高温超导就必须研究电子配对的机理。在传统的 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理论中,假设费米面附近的两个动量和自旋方向相反的电子,在出现合适的库伦屏蔽以后,借助于交换一个虚声子的过程,形成电子对,而这些电子对凝聚形成超导态。这个图像的前提是电子之间的库伦相互作用被有效屏蔽掉,并且巡游电子之间的同位占据能量  $U$  很小,可以作为微扰项处理。总之,BCS 理论建立的基本假设是电子之间的库伦关联很弱。但是这个条件在高温超导材料中似乎不再成立,至少需要很大的修正。

铁基超导体是目前凝聚态物理研究的核心问题之一。在铁基超导体中对超导起到关键作用的是 FeAs 所构成的平面。简单的能带计算表明铁 3d 轨道的 6 个电子参与导电,形成多能带和多费米面的情况,见图 4 所示。鉴于早期在 LaFeAsO 中开展的中子衍射实验结果<sup>[23]</sup>,母体的反铁磁波矢刚好连接空穴和电子口袋,因此, Mazin<sup>[24-25]</sup> 和 Kuroki<sup>[26]</sup> 等人想到电子是通过交换反铁磁涨落,在空穴和电子口袋间跃迁而产生配对。通过这种对散射过程,可以借助于 BCS 理论推导一些基本步骤,得出:

$$\Delta(k) = - \sum_{k'} V_{k,k'} \frac{\Delta(k')}{2E(k')} \tanh\left(\frac{1}{2}\beta E(k')\right) \quad (1)$$

这里的  $\Delta(k)$  和  $\Delta(k')$  分别是参与配对散射的电子在散射前后波矢  $k, k'$  处的能隙大小,  $V_{k,k'}$  是电子对散射过程中的散射矩阵元。对于电子-电子相互作用导致的配对,  $V_{k,k'}$  自然是正值。因此  $\Delta(k)$  和  $\Delta(k')$  必然符号相反,也就是说

电子在配对散射前后动量位置的能隙符号相反。这在铜氧化合物中发现的 d-波对称性就是一个典型的例子。

对于铁基超导体,超导配对能隙对称性仍然不清楚。图 4 中给出了铁基超导体典型的费米面形状和假设的电子配对跃迁过程。基于前述的同样理由,在跃迁前后的动量点的能隙符号必须相反,因此 Mazin 和 Kuroki 等人提出来了  $S \pm$  配对方式,即在空穴和电子费米面上面的能隙都是接近各向同性的,但是符号相反。早期的角分辨光电子能谱实验<sup>[27]</sup>发现能隙在电子和空穴费米面上面确实比较各向同性。在这样一个格局下,原来在铜氧化物超导体中的相位敏感试验很难在现实空间实现,因为每个费米面上的费米速度几乎是各向同性的。最近作者团队通过引入无磁性杂质,在杂质点及其周围观察到具有“指纹特征”的杂质态,给出了支持  $S \pm$  配对的强烈实验证据<sup>[28]</sup>。

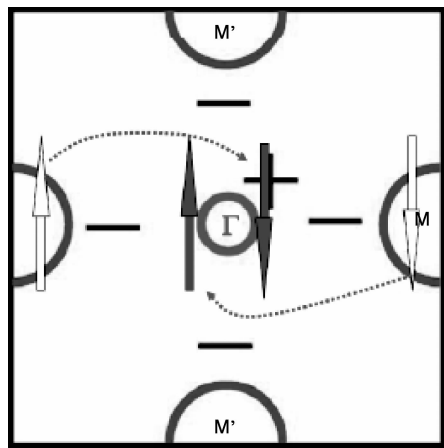


图 4 铁基超导体典型的费米面面和假设的电子对散射过程。这里布里渊区中间  $\Gamma$  点附近的小口袋是空穴口袋,而四周  $M$  和  $M'$  点的口袋是电子口袋。箭头标识的是一定自旋方向的电子,空心箭头表示跃迁前,实心箭头标识跃迁后的电子状态

Fig. 4 The proposed pair scattering process in the iron based superconductors. The small pocket in the Brillouin zone center, near the  $\Gamma$  point corresponds to the hole pocket, while those in the edge near  $M$  and  $M'$  points are electron pockets. The open and filled arrows represent the electrons with fixed spin direction, before and after the scattering process

对于铁基超导体电子配对的机理,还有另外的物理图像,即基于局域自旋交换的配对方式。此类图像建立的背景是假设铁基超导体与铜氧化物超导体一样,具有很强的电子关联特性<sup>[29]</sup>。因此,电子可以通过局域的反铁磁作用而配对,从维像的角度可以写出能隙函数为  $\Delta_s \propto \cos k_x + \cos k_y$ , 或  $\Delta_s \propto \cos k_x \cos k_y$ , 甚至是 d-波形式。结合角分辨光电子谱的数据,即在中心的  $\Gamma$  费米面上是各向同性的,因此仅可能是  $S \pm$  两种配对函数中的一种。

另外，也有提议铁基超导体中的电子配对是由于剧烈的轨道涨落（主要是  $d_{xz}$  和  $d_{yz}$ ）而出现的，能隙是  $S^{\pm}$  形式<sup>[30]</sup>。铁基超导体的电子配对机理研究正在深入中，到达彻底的理解还需时日。对铁基超导材料和物理进展感兴趣的读者可以参考最近的一些综述文献<sup>[31-37]</sup>。

## 5 铁基超导体的混合态特性和应用展望

铁基超导体表现出非常高的临界磁场-温度比，即  $dH_{c2}/dT$ ，可以达到  $-10$  T/K。直接的测量已经揭示“1111”体系的低温上临界磁场可接近 100 T（特斯拉），“122”体系和“11”体系统在低温上临界磁场都可以达到 50 T（特斯拉）以上。几种高温超导体体系的上临界磁场的数据显示在图 5 中，可见  $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$  超导体的上临界磁场在低温端非常高，超出其他很多超导体体系<sup>[38]</sup>。因

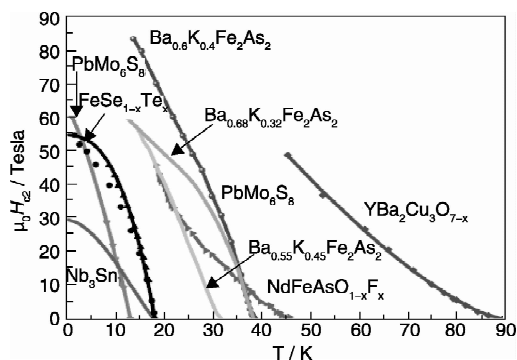


图 5 铁基超导体体系与其他超导体体系上临界磁场的比较<sup>[38]</sup>

Fig. 5 The comparison of the upper critical field  $H_{c2}$  of the iron-based superconductors and other superconductors<sup>[38]</sup>

此完全可以预期铁基超导体在强磁场磁体方面有非常好的应用预期。近期的研究表明，在  $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$  超导薄膜中，尽管超导转变温度只有约 18 K，但是在 4.2 K 和 30 T（特斯拉）下，承载的超导电流密度<sup>[14]</sup>可以达到  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>。这是一个非常高的指标，已经初步满足一些应用的需求，而且制备技术是比较成熟的 Pulsed-Laser-Deposition (PLD) 技术。利用粉末套管和轧制技术，中科院电工研究所在  $Sr_{1-x}K_xFe_2As_2$  材料方面制备出的导线，在 4.2 K 临界电流可以达到 100 000 A/cm<sup>2</sup>，处于国际领先水平<sup>[39]</sup>。图 5 给出了铁基超导体和其他一些超导体上临界磁场随温度的变化。可以看出，铁基超导体具有很高的上临界磁场，尤其是  $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$  超导体，在液氮温度可以达到 100 T（特斯拉）的量级，因此铁基超导体在强磁场应用中会很有潜力。以上工作得到了国家自然科学基金委、科技部 973 计划项目、高校 985 计划的支持，在此一并感谢。如有不妥及不全之处，敬请谅解。

## 参考文献 References

[1] Kamihara Y, Watanabe T, Hirano M, *et al.* Iron-Based Layered

Superconductor  $La[O_{1-x}F_x]FeAs$  ( $x = 0.05 \sim 0.12$ ) with  $T_c = 26$  K[J]. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 3 296–3 297.

- [2] Chen X H, Wu T, Wu G, *et al.* Superconductivity at 43 K in  $SmFeAsO_{1-x}F_x$ [J]. *Nature*, 2008(453): 761.
- [3] Chen G F, Li Z, Wu D, *et al.* Superconductivity at 41 K and Its Competition with Spin-Density-Wave Instability in Layered  $CeO_{1-x}F_xFeAs$ [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 247 002.
- [4] Ren Z A, Lu W, Yang J, *et al.* Superconductivity at 55K in Iron-Based F-Doped Layered Quaternary Compound  $Sm[O_{1-x}F_x]FeAs$ [J]. *Chin Phys Lett*, 2008, 25: 2 215.
- [5] Wen H H, Mu G, Fang L, *et al.* Superconductivity at 25K in Hole-Doped  $(La_{1-x}Sr_x)OFeAs$ [J]. *Europhys Lett*, 2008, 82: 17 009.
- [6] Jia Y, Cheng P, Fang L, *et al.* Critical Fields and Anisotropy of the  $NdFeAsO_{0.82}F_{0.18}$  Single Crystals [J]. *APL*, 2008 93: 032 503.
- [7] Rotter M, Tegel M, Johrendt D. Superconductivity at 38 K in the Iron Arsenide  $(Ba_{1-x}K_x)Fe_2As_2$  [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 107 006.
- [8] Tapp J H, Tang Zhongjia, Lv B, *et al.*  $LiFeAs$ : An Intrinsic  $FeAs$ -based Superconductor with  $T_c = 18K$ [J]. *Physical Review B*, 2008, 78: 060 505.
- [9] Wang X C, Liu Q Q, Lv Y X, *et al.* The Superconductivity at 18 K in  $LiFeAs$  System [J]. *Solid State Commun*, 2008, 148: 538–540.
- [10] Wang Z Y, Yang H, Fang D L, *et al.* Close Relationship between Superconductivity and the Bosonic Mode in  $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$  and  $Na(Fe_{0.975}Co_{0.025})As$ [J]. *Nature Physics*, 2013, 9: 42–48.
- [11] Ji G F, Zhang J S, Ma L, *et al.* Simultaneous Optimization of Spin Fluctuations and Superconductivity Under Pressure in an Iron-Based Superconductor[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 111: 107 004.
- [12] Hsu FC, Luo J Y, Yeh K W, *et al.* Superconductivity in the PbO-type Structure  $\alpha-FeSe$ [J]. *PNAS*, 2008, 105: 14 262.
- [13] Fang M H, Pham H M, Qian B, *et al.* Superconductivity Close to Magnetic Instability in  $Fe(Se_{1-x}Te_x)_{0.82}$  [J]. *Phys Rev B*, 2008, 78: 224 503.
- [14] Si W, Han S J, Shi X, *et al.* High Current Superconductivity in  $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ -Coated Conductors at 30 Tesla [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1 347.
- [15] Guo J G, Jin S, Wang G, *et al.* Superconductivity in the Iron Selenide  $K_xFe_2Se_2$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) [J]. *Phys Rev B*, 2010, 82: 180 520 (R).
- [16] Fang M H, Wang H D, Dong C H, *et al.* Fe-based High Temperature Superconductivity with  $T_c = 31K$  Bordering an Insulating Antiferromagnet in  $(Tl, K)Fe_xSe_2$  Crystals [J]. *Europhys Lett*, 2011, 94: 27 009.
- [17] Shen B, Zeng B, Chen G F, *et al.* Intrinsic Percolative Superconductivity in  $K_xFe_{2-y}Se_2$  Single Crystals [J]. *Europhys Lett*, 2011, 96: 37 010.
- [18] Zhao J, Cao H, Bourret-Courchesne E, *et al.* Neutron-Diffraction Measurements of an Antiferromagnetic Semiconducting Phase in the Vicinity of the High-Temperature Superconducting State of

- $K_x\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$  [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 207 003.
- [19] Wang Q Y, Li Z, Zhan W H, *et al.* Interface-Induced High-Temperature Superconductivity in Single Unit-Cell FeSe Films on  $\text{SrTiO}_3$  [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 037 402.
- [20] Zhang W H, Sun Y, Zhang J S, *et al.* Direct Observation of High Temperature Superconductivity in One-Unit-Cell FeSe films [J]. *Chin Phys Lett*, 2014, 31: 017 401.
- [21] He S L, He J F, Zhang W H, *et al.* Phase Diagram and High Temperature Superconductivity at 65 K in Tuning Carrier Concentration of Single-Layer FeSe Films [J]. *Nature Materials*, 2013, 12: 605–610.
- [22] Tan S Y, Zhang Y, Xia M, *et al.* Interface-Induced Superconductivity and Strain-Dependent Spin Density Waves in FeSe/ $\text{SrTiO}_3$  Thin Films [J]. *Nature Materials*, 2013, 12: 634.
- [23] De La Cruz C, Huang Q, Lynn J W, *et al.* Magnetic Order Close to Superconductivity in the Iron-Based Layered  $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$  Systems [J]. *Nature*, 2008, 453: 899.
- [24] Mazin I I, Singh D J, Johannes M D, *et al.* Unconventional Superconductivity with a Sign Reversal in the Order Parameter of  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 057 003;
- [25] Mazin I I. Superconductivity Gets an Iron Boost [J]. *Nature*, 2010, 464: 183.
- [26] Kuroki K, Onari S, Arita R, *et al.* Unconventional Pairing Originating from the Disconnected Fermi Surfaces of Superconducting  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 087 004.
- [27] Ding H, Richard P, Nakayama K, *et al.* Observation of Fermi-Surface Dependent Nodeless Superconducting Gaps in  $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  [J]. *EPL*, 2008, 83: 47 001.
- [28] Yang H, Wang Z, Fang D, *et al.* In-Gap Quasiparticle Excitations Induced by Non-Magnetic Cu Impurities in  $\text{Na}(\text{Fe}_{0.96}\text{Co}_{0.03}\text{Cu}_{0.01})\text{As}$  Revealed by Scanning Tunnelling Spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2 749.
- [29] Hu J P, Ding H. Local Antiferromagnetic Exchange and Collaborative Fermi Surface as Key Ingredients of High Temperature Superconductors [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 381.
- [30] Onari S, Kontani H. Violation of Anderson's Theorem for the Sign-Reversing-Wave State of Iron-Pnictide Superconductors [J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 177 001.
- [31] Wen H H. Developments and Perspectives of Iron-Based High-Temperature Superconductors [J]. *Adv Mat*, 2008, 20: 3 764.
- [32] Chu C W. High-Temperature Superconductivity: Alive and kicking [J]. *Nature Physics*, 2009, 5: 787.
- [33] Ren Z A, Zhao Z X. Research and Prospects of Iron-Based Superconductors [J]. *Adv Mat*, 2009, 21: 4 584.
- [34] Wen H H, Li S L. Materials and Novel Superconductivity in Iron Pnictide Superconductors [J]. *Annu Rev Cond Mat Phys*, 2011, 2: 121.
- [35] Stewart G R. Superconductivity in Iron Compounds [J]. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 1 589.
- [36] Chen Peng(程鹏), Fang Lei(方磊), Wen Haihu(闻海虎). 铁基超导材料的探索和研究进展 [J]. *Materials China*(中国材料进展), 2009, 28(4): 1–9.
- [37] Hirschfeld P J, Korshunov M M, Mazin I I. Gap Symmetry and Structure of Fe-based Superconductors [J]. *Rep Prog Phys*, 2011, 74: 124 508.
- [38] Tarantini C, Gurevich A, Jaroszynski J, *et al.* Significant Enhancement of Upper Critical Fields by Doping and Strain in Iron-Based Superconductors [J]. *Phys Rev B*, 2011, 84: 184 522.
- [39] Zhang X P, Yao C, Lin H, *et al.* Realization of Practical Level Current Densities in  $\text{Sr}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$  Tape Conductors for High-Field Applications [J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 202 601.

(编辑: 王 方)