

有些陶瓷为什么会成为超导体

WHY SOME CERAMICS ARE SUPERCONDUCTORS

罗伯特·J·卡瓦

编者按 在高温超导材料研究中,有关的理论问题至今尚未解决。本文就陶瓷材料产生超导性的机理提出了一种看法,对超导理论研究当有所启迪。特译出,供参考。

本文作者罗伯特·J·卡瓦 (Robert J. Cava) 是美国电话电报公司贝尔实验室的材料专家、高温超导研究领导人。

—

10多年前,伯纳德·雷维尤 (Bernard Raveau) 及其在法国卡昂大学的同事开始人工合成一系列由镧、钡、铜和氧组成的化合物,其中某些陶瓷材料当冷却到 40K 的温度时,就能看到出现超导现象,即对电流没有电阻。一些物理学家、化学家和材料科学家断定,这就是超导材料。也有人认为,如此高(临界)转变温度的超导体能生产吗?因此,陶瓷材料若干年来很少引人注目。后来,IBM 公司苏黎士研究实验室的物理学家 K·A·缪勒 (K. Alex Müller) 和 J·G·贝德诺兹 (J. Gerold Bednorz) 在 1986 年认识到,这些陶瓷是发展新型高温超导材料,使超导性研究和超导技术获得新生的关键所在。

由于受到有可能找到极高温超导体的希望的鼓舞,许多物理学家从 1987 年开始狂热地制造出各种以铜和氧为基的奇特化合物。但是,能否形成氧化铜超导体这一点还很难预料。虽然固体化学的理论可以指导人们去选择能形成新的化合物的元素,但这些材料非常复杂,没有一种理论能可靠地预测这些新材料的结构和性能。寻找超导体的手段只是利用化学原理、直觉知识和侥幸发现恰当的元素组合来提高转变温度。

1987 年 2 月,美国亚拉巴马大学的武莫金

(Maw-Kuen Wu) 和休斯敦大学的朱经武及其同事用钇代替镧,制成一种转变温度为 90K 的超导体。此后不久,笔者和 R·布鲁斯 (R. Bruce)、范多弗 (van Dover)、伯特伦·巴特洛格 (Bertran Batlogg) 在美国电话电报公司贝尔实验室首次确认这种超导体是现在所说的 1—2—3 化合物,因其中钇、钡、铜原子的比例是 1:2:3。这种 1—2—3 材料是第一个转变温度超过 77K 的超导体,因此易于用液氮冷却而且便宜。而最好的一般金属超导体,例如铌锡合金就需要用昂贵得多的液氮作冷却剂。

过去 4 年中,由于世界上数以千计的研究工作者的努力,制造出了十几种转变温度在 40K 以上的超导体,少数几种转变温度达 77K 以上。几乎所有的超导体都是研究人员为验证某种思想而偶然地发现的。迄今,由铌、钡、钙、铜和氧组成的化合物的转变温度最高已达 125K。

虽然目前还不知道超导性的极限,甚至也没有弄清楚陶瓷超导体转变温度高的主要机制,但我们能够鉴定出增加或抑制超导性的分子特性。最重要的是,所有高温超导体的结晶点阵都有夹在其他元素层之间的铜和氧原子面。当高温超导体冷却到转变温度以下时,铜氧原子面就提供了理想的电子通道。在结晶点阵中,还可以选择和排列其他的元素,以增高或降低超导转变温度。

二

贝德诺兹和缪勒等人新发现的这些材料在某些方面的表现和普通的金属超导体相似。当在室温下将电压加在材料上时,电子就通过材料开始运动。由于电子离开组成化合物的原子进行散射,所以会损耗能量(这就是产生电阻的过程)。当材料冷却到低温时,电阻和能量的损失也减少。当温度降低到刚好在转变温度以下时,电阻突然降至零。电子受相变影响,再也不能通过原子散射。

贝德诺兹和缪勒发现的化合物是少数良好导体陶瓷中的一种。而餐盘、洗脸池和其他日用陶瓷则都是绝缘体。金属镧、钡和铜单独都很容易和氧起反应形成氧化镧、氧化钡和氧化铜。这三种物质都是绝缘体,他们在室温下没有导电性。但当镧、钡、铜和氧以适当的比例结合时,就产生一种在室温下也能导电并在 28K 时有超导性的陶瓷。

陶瓷是绝缘体还是导体取决于化合物内电子的行为如何。例如,氧化钡是绝缘体,因为电子被束缚在钡和氧原子核周围,这是因为钡和氧的电荷和能量的需要。钡原子核有 56 个净正电荷,所以中性状态的原子就有 56 个带负电荷的电子围绕原子核。氧原子核有 8 个净正电荷,因此在原子状态下有 8 个电子围绕着原子核。为了形成化合物(例如氧化钡),电子本身就分布在钡和氧原子之间,以达到尽可能低的能态。

电子分布在围绕原子核的轨道上,这些轨道像一些同心层,内层的电子紧紧地被原子核束缚在周围,而最外层的电子就比较容易迁移,从而对化学和电现象起较大作用。

氧像粘结剂,把陶瓷化合物结合在一起。氧原子的外层有 6 个电子,但它可“抓住”8 个电子。一个填满电子的外层比部分填满电子的外层具有稳定得多的结构,如果氧原子外层再增加 2 个电子,它就可以达到低得多的能态。因此氧原子“喜欢”再有 2 个负电荷,换句话说,它具有 2- (化合)价。钡原子外层有 2 个电子,但它在失去 2 个电子时能达到很低的能态。所以钡是 2+价。为了在 BaO 中保持电子的最低能态结构,每个钡原子核就贡献 2 个电子给每个氧原子。由于要使填满了电子的轨道增加或去掉一个电子都需要很大的能量,所以电子就被牢牢地束缚住而不能用来传导电流。

电子的这种交换也形成了保持陶瓷材料结合在一起的基础。带正电的钡原子(2+价)吸引着带负

电的氧原子(2-价)。这就是众所周知的离子结合。

在所有陶瓷中,金属原子外层的电子实际上处于比氧原子外层电子高得多的能态。因此,为达到低能态的稳定结构,金属原子一般从外层释放出一个或多个电子。这些电子被陶瓷中的氧原子所捕获。由于电子仍然被束缚在金属和氧原子周围,所以这种陶瓷是一种绝缘体。

三

许多铜氧化物陶瓷是良好导体,是因为材料中有一些电子在原子之间自由运动。在这种陶瓷中,由于铜和氧之间独特的相互作用,电子没有被束缚在原子核周围。在 Cu_2O 这类材料中,铜容易贡献给氧一个电子,因此 2 个铜原子(每个有 1+价)和氧原子(2+价)形成离子结合。由于这些电子也被束缚在原子周围,所以这种陶瓷(Cu_2O)仍然是绝缘体。

但 CuO 这类氧化物就不同。CuO 中的铜不像给出第一个电子时那样轻易地再给出第二个电子,因为丧失第二个电子会在外层产生一个空位。而氧则为了完善其外层轨道要争夺第 2 个电子,结果氧“获胜”,因为一个填满电子的氧轨道比一个填满电子的外层铜轨道具有更稳定一些的结构。但是当铜和氧与其他元素混合在一个结晶点阵内时,敏感的能量平衡可能改变,致使铜和氧共享电子来完善其外层轨道。这种电子的共享使氧和铜之间形成一种共价结合。由于电子在铜和氧之间自由运动,所以含有铜、氧和其他元素的材料可以成为良好导体。

铜在和氧进行化学结合时可以贡献出 1 个、2 个或 3 个电子。三种化合价中最稳定的化合价状态是 2+价,所以 1+价状态(如 Cu_2O)称为“还原”的铜,而 3+价状态(例如 NaCuO_2)称为“氧化”的铜,

在陶瓷超导体中铜似乎起一种分数(化合)价(fractional valence)作用。铜的化合价取决于超导体中氧和其他原子的影响。当铜为 2+价时,电子被束缚在铜-氧键中。在某些情况下,当添加氧化原子(例如在化合物中有镧和钡)时,可能从某些铜原子中脱出 2 个以上的电子,力图变成成为 3+价,在另一些情况下,还原的原子可能向某些铜原子中增加电子,从而使 2+价向 1+价变化。在这两种情况下,电子都不再被束缚,从而可以参与电传导。

虽然这种化合价计数对弄清陶瓷超导体很重

要,但它过于简单化。在超导陶瓷中,为满足其能量的需要。氧和铜原子共享着电子。这些共享的电子从铜原子向氧原子运动,形成一个电子的“海洋”,或更具体说是形成一个导带。如果铜原子的化合价被还原到少于 2+ 价,即如果他们贡献出的电子平均少于 2 个,那就只有少量电子在导带内运动。如果铜原子的化合价被氧化到大于 2+ 价,即其贡献的电子平均大于 2 个,那么导带就充满了电子。保留正电荷的地方称为空穴。分数化合价的概念之所以有道理,仅仅是因为电子实际上是从导带中消失或加入导带之中。

铜不是能在有氧的情况下获得分数化合价的唯一金属。铋和铅的电子轨道和铜一样,具有类似氧的能量要求。在适当的环境下,这两种金属将和氧形成共价键。并可以让电子自由地在导带中运动。研究人员已发现氧化铅和氧化铋在较高的温度下具有超导性。这些化合物是不是由于与上述相同的原因才具有超导性的,仍然有很大的争议。

四

由贝德诺兹和缪勒发现的以镧、铜、氧化物 (La_2CuO_4) 为基的超导体系列的结晶结构如图 3 (见封二彩图) 所示。陶瓷超导体的结构通常可用配位多面体这种固体化学基本概念来描述。配位多面体是一种围绕一个金属原子及最近的与其直接结合的氧原子的几何图形。多面体展现了在紧密结合环境下一个离子最“喜欢”的氧原子数。最“喜欢”的氧原子“邻居”的数量是可以变化的。例如,从 1+ 价铜的 2 个氧“邻居”变为 1+ 价铋的 15 个氧“邻居”。和一个离子配位的实际氧原子数取决于离子尺寸的大小和氧化物中其他金属原子的特殊要求。

在 La_2CuO_4 氧化物中,铜原子和 6 个氧原子配位。这些氧原子位于细长八面体的角上。由于铜的外层能量处于 2+ 价状态,八面体两个对角上的氧原子总比在其他 4 个角上的氧原子离铜原子更远。这种结构上的畸变称为扬·特勒 (John Teller) 效应,是它最先使贝德诺兹和缪勒集中注意氧化铜有可能是些超导体。扬·特勒效应指出,电子和结晶点阵中的铜原子及氧原子的位置有着强烈的相互影响,这是一种被认为对超导性非常重要的相互影响。

在 La_2CuO_4 中,铜氧八面体在最接近铜的四个角上的氧原子处相互连接。铜原子和最邻近它的所有氧处于一个平面上。这种铜-氧平面是所有已知

的氧化铜超导体的电子中心,它是晶体结构的微观区,可产生超导电荷载体。

值得注意的是 La_2CuO_4 的结晶结构,因为镧和铜的配位多面体的结合方式,使三维空间能以高度的二维方式填满,结果铜氧平面填充在不活泼的镧和氧的双层间隙之中。

由于在邻近的铜原子的外层电子之间的相互影响,镧铜氧化物本身并不是超导体。由于每个铜贡献 2 个电子给氧,因而铜的外层剩下 9 个电子。9 个电子中每一个都具有一个磁矩,即相当于一个有南北极的极小磁棒。当这 9 个电子中的 8 个电子变成 4 对时,由于磁的相互作用产生的能量减少到最低:当它们排成相反方向时,磁矩就相抵消。当邻近的铜原子中剩下的没有配成对的电子相互作用并排成一线时,它们的磁矩就朝向相反方向。这种匹配称为反铁磁现象,它把电子束缚在结晶点阵内,排除了产生超导性的可能性,甚至完全不能导电。

只有当反铁磁现象完全消失时,才会出现超导性。因此,许多研究者认为,磁性和高温超导性密切相关,也有少数人认为,这种密切关系是不幸的,称超导性和磁性为高温超导的“双重品格”。

但是, La_2CuO_4 的结晶结构可以改进,以消除反铁磁现象而产生超导性。贝德诺兹和缪勒用钡原子取代一些镧原子,从而创造出了著名的高温超导体。这种超导体的分子式为 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 。

如果对每个取代镧原子的钡原子,一个铜原子被氧化从 2+ 价变为 3+ 价,在 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 中就保持电荷中性。由铜贡献出的多余电子就不会受束缚而进入导带中。当铜原子达到某一临界化合价 (2.2+ 价左右) 时,反铁磁现象就会消失并出现超导性。

在 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ 中,铜和 6 个氧原子配位,形成细长多面体的顶角。由于配位数几乎随原子尺寸而增加,比铜原子大的镧原子可和 9 个氧原子相配位。钡原子的大小和镧原子相似,也可配 9 个氧原子。因此,在晶体点阵内,钡原子可以占据和镧原子一样的位置,而实际上,它们在整个结晶点阵中是任意分布的。原子在固定的结晶位置分布称为固溶体。而液体溶液是由不规则地杂乱分布的离子组成的。固溶体的概念对氧化铜超导性的发生至关重要。通常,除非离子的尺寸比较接近和形成的化学键类型相同,否则不会形成固溶体。因此,钡、锶或钙可以在 La_2CuO_4 中通过置换镧而形成固溶体。当锶在 La_2CuO_4 晶体中取代 1/9 的镧原子时,就得到 $\text{La}_{1.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$, 其中铜的化合价是

2.2+。这种化合物的超导转变温度为 40K。在以 La_2CuO_4 为基的固溶体中其转变温度是最高的。

五

和有超导性的 La_2CuO_4 固溶体不同, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (即 1-2-3 化合物) 超导体具有完全有序的, 由钇、钡和铜离子面组成的结晶点阵 (见封二彩图 4)。在这种结晶点阵中的各个位置, 没有金属原子的混合。小的 3+价钇离子总是和 8 个氧原子结合, 大的 2+价钡离子则和 10 个氧原子结合, 在钡和钇之间, 铜原子和氧配位成锥体。铜-氧四面体的底面跨越钇原子面彼此相对。这种铜-氧面的形成对超导性是很必要的, 在两个相邻的钡层之间, 铜原子和 4 个氧原子配位形成一个菱形面。菱形的顶角又连接成一系列的菱形。铜氧结合的这种特性使一维链和二维锥体面一起填满三维空间。

在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 中, 铜的平均化合价为 2.33+ (氧所需的 14 个电子中有 7 个是由 1 个钇原子和 2 个钡原子提供的, 其余 7 个电子则是由 3 个铜原子贡献的)。研究人员已证明, 在链和锥体底面上的铜原子都被氧化到大致相同的化合价。

在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 化合物中, 7 个氧原子对于超导性起特别关键的作用。当氧含量从 7 减到 6 时, 就形成 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ 绝缘体。由于只是从一个晶格位置去掉氧, 铜-氧菱形面便成为棒形, 铜-氧棒形是铜在 1+价状态的一种稳定的配位几何图形。减少氧含量并不直接影响铜-氧菱形面。但是正如电荷计数所显示的, 和菱形面联系着的铜原子现在是处于 2+价状态。在这种结构中, 由于反铁磁现象的影响, 电子被束缚而不能自由运动。

当 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ 中的氧含量增加时, 氧直接加入棒形结合环境中, 1+价的铜被氧化成 2+价。氧并不是无规则地依附于铜-氧棒, 而是力求形成尽可能多的铜-氧菱形结构。

当氧含量达到某一水平 (平均对每 3 个铜原子有 6.5 个可用的氧原子) 时, 氧就从铜-氧四面体中的铜原子拉出足够的电子, 以产生超导性能。所得到的化合物 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ 具有 60K 的转变温度。这种化合物具有特殊的结晶结构, 其中一系列的菱形和棒形链组成有序排列。当氧含量进一步增加时, 菱形链继续增长。当完全获得链结构时, 超导转变温度就猛增到 90K。

六

在 YBa_2CuO_7 和 $\text{La}_{1.8}\text{Ba}_{0.2}\text{CuO}_4$ 两种化合物中, 铜原子被氧化成大于 2+价。结果带正电荷的空穴进入导带。因此, 这种材料称为 p 型超导体。电荷载体为电子的超导体则称为 n 型超导体。直到 1988 年, 所有已知的超导体都是 p 型超导体。因此有许多人认为, 可能永远也没有 n 型氧化铜超导体。

1988 年, 日本东京大学的科学家首次发现的, 也是迄今发现的唯一的 n 型陶瓷超导体是以铈铜氧化物为基的陶瓷 Nd_2CuO_4 。 Nd_2CuO_4 的结构类似 La_2CuO_4 。但铈有 9 个氧作“邻居”, 而较小的铈离子一般是和 8 个氧原子配位。在 Nd_2CuO_4 化合物中, 氧原子围绕铈原子形成矩形棱镜 (见封二彩图 3 右下图)。结果铜原子在矩形平面的几何图形中和 4 个氧原子配位。

在以 NdCuO_4 为基的超导体中, 当一些铈原子用铈和钍原子置换时, 可形成固溶体。铈和钍都是 4+价, 且它们的尺寸适于置换一些 3+价的铈。因此, 它们可形成 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 和 $\text{Nd}_{2-x}\text{Th}_x\text{CuO}_4$ 固溶体。当 $x=0.17$ 时, 这些材料的最高转变温度为 25K 左右。由于这些材料具有微妙的还没有弄清楚的与电荷载体的性质有关的化学特性, 因此仍然是现在积极研究的课题。

1988 年, 美国阿肯色大学的艾伦·M·赫尔曼 (Allen M. Hermann) 及其同伴发现了一些迄今具有最高转变温度的超导体。这些超导体由铊、钡、钙、铜和氧组成。由于铊的氧化物有毒性, 没有小心控制的实验室条件不可能进行处理, 因此其商业应用的前景尚不清楚。尽管如此, 这些化合物的结晶结构已弄清楚, 高温转变所需的关键因素是铜和氧原子面。

在这些材料中, 铊在一个大的八面体中和氧配位。铊-氧八面体形成一种建立在铜-氧八面体或四面体的某一平面基础上的原子面。铊超导体的通式可写成 $\text{Tl}_m\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{m+2n+2}$ 。下标 m 表示铊-氧八面体的层数。目前只知具有一层或两层的化合物。铜的层数 (n) 可以从 1 变到 4。在该系列中的所有化合物都是高温超导体。转变温度最高的是 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_3\text{O}_{10}$, 其转变温度为 125K。

七

虽然近来新发现的氧化铜超导体具有比以往知道的超导体更复杂的结构, 但本质上都是铜和氧的

电话性面的组合，这些原子面夹在其他原子层之间起隔离层的作用，最重要的是充当正电荷和负电荷的储存器。各层的电子状态决定了铜-氧面上的电荷数和化合物的转变温度。

15 年以前，佐治亚杜邦公司的阿瑟·W·斯莱

特 (Arthur W. Sleight) 及其同伴制造了一种由钡、铅、铋和氧组成的陶瓷，虽然转变温度仅 12K，但它是激励贝德诺兹和缪勒积极探索陶瓷超导体的一种化合物。1988 年，我和同伴们在美国电话电报公司贝尔实验发现以钡、铋和氧为基的一种

氧化铜超导体的基本成分及其变化

母体结构	置换(元素或氧化物)	转变温度范围 K	注
$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$	Ca 或 Sr 置换 Ba	20~40	由 La、Ba、Cu 和 O 组成的陶瓷是最先发现的氧化铜超导体
$\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}\text{F}_y$	Pr, Sm 或 Eu 置换 Nd Th 置换 Ce	10~25	该系列是唯一有 n 型陶瓷超导体的系列
$\text{La}_{1.8-x}\text{Sm}_x\text{Sr}_2\text{CuO}_4$	Eu, Gd, Tb 或 Dy 置换 Sm	20	
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Tm Yb 或 Lu 置换 Y Cu_4O_3 或 Cu_7O_{15} 置换 Cu_3O_7	80~93	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 是第一个发现的转变温度超过 77K 的超导体
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$	CaCu_2O_8 或 $\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 置换 CuO_6	0~110	
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$	CaCu_2O_8 或 $\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 置换 CuO_6	80~125	这是在已知的超导体中转变温度最高的超导体
$\text{TiBa}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$	CaCu_2O_7 , $\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ 或 $\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$ 置换 (Cu_2O_5)	0~122	
$\text{Pb}_2\text{Sr}_{2+x}\text{Pr}_{1-x}\text{Cu}_3\text{O}_8$	Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er 或 Tm 置换 Pr	70~85	
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Sm}_{2-2x}\text{Ce}_{2x}\text{Cu}_2\text{O}_{10}$	Eu 或 Gd 置换 Sm	20~25	
$\text{Ba}_{1.33}\text{Nd}_{.67}\text{Sm}_{.33}\text{Ce}_{.67}\text{Cu}_3\text{O}_9$	Sm, Eu 或 Gd 置换 Nd Nd, Eu 或 Gd 置换 Sm	40	
$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CaCuO}_6$	尚不清楚	60	

化合物在 30K 意外地出现超导性。这些材料和氧化铜有很多共同点。也许，这些材料或其他现在还不清楚的材料将为高温超导性提供新的途径，时间将证明这一点。

路多、张伟译自《科学美国人》(Scientific American) 1990 年第 8 期。

(责任编辑 刘先曙)

有些陶瓷为什么会成为超导体?

封二彩图说明

图 1 由铋、钡、钙、铜和氧组成的超导体 ($\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$) 是迄今为止转变温度最高的超导体，在 125K 时出现超导性。和其他陶瓷超导体一样，铋的化合物含有铜-氧原子面。这种原子面能让电子通过材料导电。

图 2 铜和氧之间的化学键几乎是所有高温超导体的电子中心。铜原子可以四种不同的方式和氧结合。这四种方式可以用配位多面体表示：即用围绕铜原子及最近的与其直接结合的氧原子的几何图形表示。

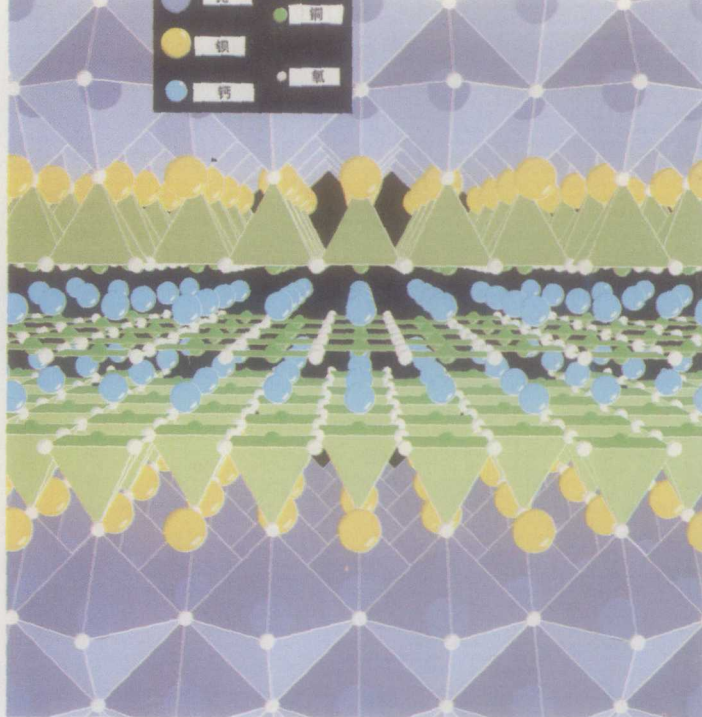
图 3 La_2CuO_4 铜氧化物的结晶结构是许多超导体的基础 (左上图)。如果用钙、锶或钡原子取代其中的一些镧原子，就会形成超导体。图中示出了氧和铜的配位多面体 (左下图)。以 La_2CuO_4 为基的超导体是 P 型导体，因为它们提供被称为空穴的正电荷载体。如果用铈或钪原子取代铈

铜氧化物 (Nd_2CuO_4) 中的一些铈原子，就产生 n 型超导体 (右上图)，因为以 Na_2CuO_4 为基的超导体提供被称为电子的负电荷载体。一个铈原子和 8 个氧原子配位 (右下图)。

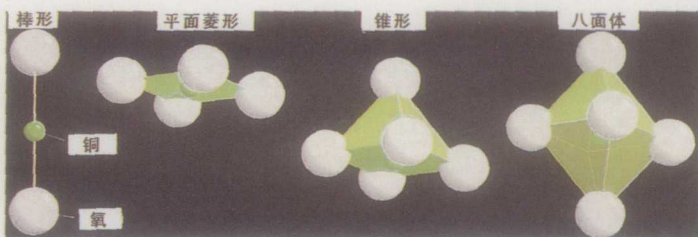
图 4 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-2-3}$ 化合物只是化学家们称之为 Y-123 系列中的一员。这个系列的三个成员 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 、 $\text{YBa}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15}$ 和 $\text{YBa}_5\text{Cu}_9\text{O}_{18}$ 是转变温度超过 77K 的超导体。化合物 $\text{YBaCu}_2\text{O}_{15}$ (图中没有表示出来) 和 $\text{Y}_2\text{Ba}_3\text{Cu}_5\text{O}_{12}$ 还不知是否存在。预料 YBaCu_2O_5 的结构类似 YBaCuFeO_5 。但 YBaCuFeO_5 不是超导体。

图 5 由铅、锶、镧、钙、铜和氧组成的高温超导体 $\text{Pb}_2\text{Sr}_2\text{Dy}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_3\text{O}_8$ 通常形成矩形晶体，晶体厚大约 10 微米。

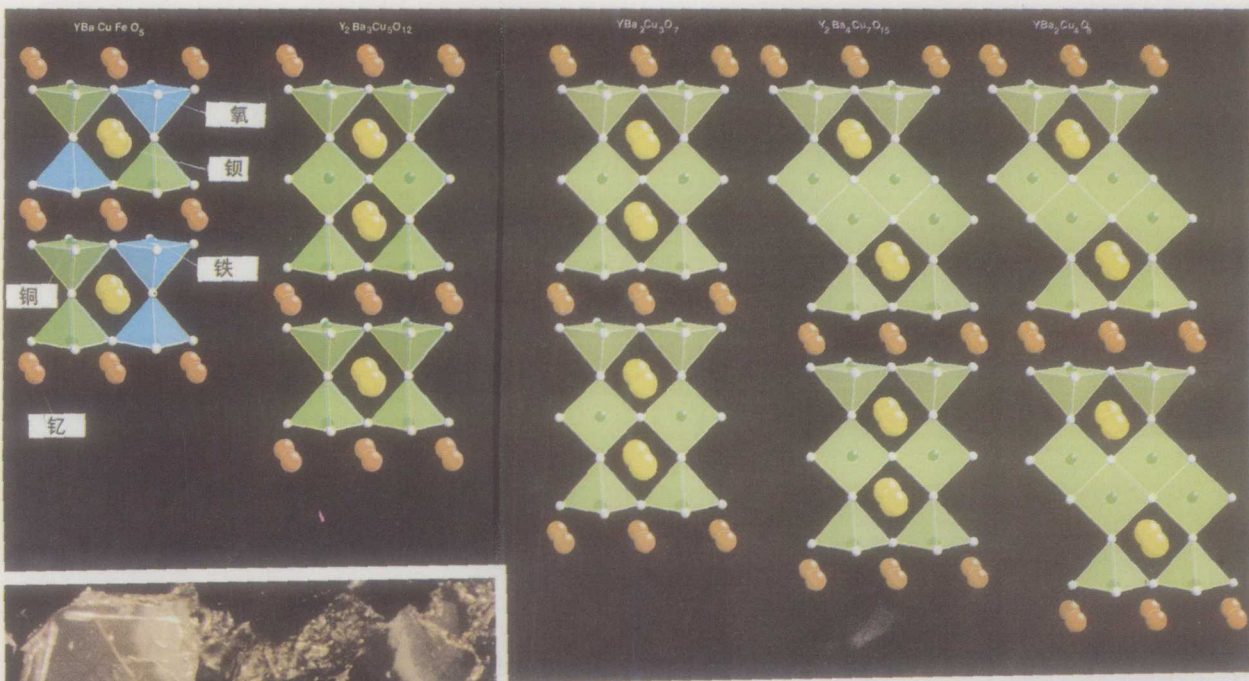
有些陶瓷为什么会成为超导体



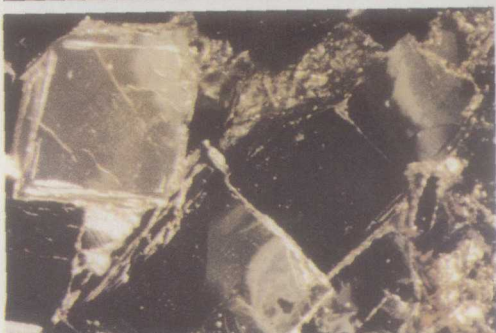
1. $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 高温超导体的原子点阵模型



2. 高温超导陶瓷中铜和氧原子的 4 种结合方式



4. 钇、钡、铜、氧系超导体的原子点阵模型



5. $Pb_2Sr_2Dy_{1-x}Ca_xCu_3O_8$ 高温超导体的矩形晶体

3. La_2CuO_4 和 Nd_2CuO_4 超导体的原子点阵模型

