



周济,清华大学材料学院教授,教育部长江学者特聘教授,国家杰出青年基金获得者,新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室副主任。

超材料研究拓展材料科学视野

——访清华大学教授周济

本刊记者 田恬

在2010年,《Science》杂志审视了进入新千年以来的那些改变科学面貌的进步,评选出了本世纪首个10年内的10项重大科学成就。其中大部分成就集中在生命科学领域,然而让材料学领域科学家眼前一亮的,则是“超材料”在这10项成就中占有了一席之地。在评选中,专家指出,“超材料研究通过合成具有非常规和光学性质可调的材料,物理学家和工程师开拓了引导和操纵光线、制造可挑战分辨率极限透镜的新方法。人们甚至已经开始研制令物体无法被看见的‘隐形斗篷’。”

现在,越来越多的中国科研人员加入了“超材料”的研究行列,《科技导报》采访了致力于在中国推动超材料研究的周济教授,为我们揭秘神奇的“超材料”。

《科技导报》:究竟什么是超材料呢,您是如何接触到超材料相关研究并将之引入国内的?

周济:超材料指的是通过人工设计基本功能基元实现超常性质的人工

材料。也就是说,超材料是这样一类材料,他们有奇特的物理性质,而这些来自于其中的人工结构,而非构成它们的原材料。

首先说明一下,虽然说我们这个研究小组是在国内较早开展超材料研究的小组之一,说这个方向是我们引进的是不符合事实的,国内早起开展超材料研究的课题组有若干个。从我们这个组的情况看,从常规材料走向超材料有一定的必然性。我本人多年从事材料研究,在相当长的时间一直困扰于自然材料中复杂的结构及其相互影响对材料性能的制约,使得材料设计变得十分复杂而缺乏准确性。20世纪90年代起,我们就思考能否通过人工设计的功能单元重构材料来简化、纯化材料设计,以突破自然材料在设计和性能提高方面的困境。我们在国内较早开展光子晶体研究,这种材料通过光波长尺度的周期结构获得奇异的光学性质,以及晶格层次的人工设计,但同时也在思考如何能实现“人工原子”和“人工分子”。后来,人们提出了metamaterials的概念,我们感觉到

与我们的思路不谋而合。但当时国外学术界对metamaterials的理解还有点狭隘。因为早期开展这一工作的科学家主要是来自电子学、物理学、光学等领域,他们的着眼点是metamaterial所带来的超常性能,他们沉浸于这种新性能所带来的兴奋,而较少去关注这种设计思想可能对材料科学带来的冲击。他们中很多人认为metamaterial指的就是左手材料,并不包括光子晶体等材料。

我们是较早进入这个领域的材料科学工作者,跟他们的视角有所不同,我们看到的是metamaterial这一新概念在材料设计的方法论意义,并大胆的将其译为“超材料”,这一概念具有更宽的内涵,目前国际上已经接受了我们这种理解,一个标志就是维基百科上对超材料定义的一次次更新,其范畴不断扩展,目前的定义基本上就是我们当初提出的定义。我们当时之所以将metamaterial译成“超材料”,一是参考了国外一些学者对这一名词含义的详细阐述,另外也为了凸显我们所认识到的这一概念的方法论价值。这

个译法显得“很大”，也遇到了一些争议，但最终这个名词还是被接受了。当时国内也有一些相关的研究，如国际电磁科学院院长孔金瓯教授在浙江大学有一个课题组，专门开展 metamaterial 的研究，只是他们没有将其称为“超材料”，而称其为“异向介质”。所以说，超材料并非我们引进国内的，我们早期的贡献主要体现在通过对“超材料”这一概念的阐述并挖掘出它在材料科学方法论方面的意义和价值。

《科技导报》：超材料有什么特性，与一般的复合材料相比有什么不同之处？

周济：我们一直认为，超材料的重要意义不在于其特性而在于其方法，利用这一方法可以重构材料，获得很多我们预期的新性质，包括自然材料具有的和不具有的性质。世界是物质构成的，物质因有不同性质而丰富多彩。我们能够通过人工方法，重构决定物质性质的基本单元结构获得我们所期待的性质，我们就能够成为“造物主”，这就是超材料的神奇之处。

从这一点上看，超材料与复合材料的关系和区别就可以凸显出来了。他们的区别在于材料设计的方法论。超材料着眼于材料基本功能基元的人工设计与构筑，复合材料着眼于通过多组分材料在不同层次上混合、协同、耦合等获得新的性能。当然，超材料与复合材料可能会有一些交叠，一些超材料从组成上看可以认为是复合材料，但不是相互包含或覆盖的关系(图1)。

《科技导报》：超材料的这些独特之处带来了哪些神奇的特性？

正因为超材料在设计方面有非常广阔的自由度，因此能够发展出许许多多非常奇异的、超越自然界材料的新特性。最典型的例子是负折射。负折射材料在20世纪60年代被俄罗斯科学家瓦斯拉格提出时，大家把它当成一种科学幻想，但到了20世纪90年代，英国科学家潘德瑞提出了用“人工原子”构成的超材料可能实现，到2000年美国科学家史密斯等实验验证，这类材料从梦想走到现实。这一现象完全颠覆了经典电磁学所描述的世界，衍生出很多意想不到的新现象，光的折射可以为负，倏逝波可以被放大，波的传播方向和能量方向可以相反。这样一些离经叛道的推论曾经备受学界的质疑，但最后都一一被证实了。其实负折射只是超材料所提供的新功能的冰山一角，随着进一步的研究，可能会构造出更多、更神奇的物理现象。

目前对电磁超材料、特别是针对电磁调控性质的研究比较多，除具有负折射的左手材料外，较受关注的还有能实现完美隐身的隐身斗篷，简单的材料包括各种单负(负介电常数、负磁导率)材料、超高介电常数和磁导率、零折射率材料、零介电常数和磁导率材料，复杂的则可能通过宏观体系构造出各种量子现象。

《科技导报》：超材料具有的这些特性，使得它在哪些方面有特殊应用呢？隐身斗篷和隐身战机等都是利用它的

什么特性？除了军工领域，在民用领域超材料有什么样的应用？

周济：这些特性的用途非常广泛，很难用几句话进行概述。隐身斗篷和隐身战斗机都是很好的应用例子，理论上讲可以通过超材料实现没有任何阴影的隐身，这是其他任何材料也无法达到的。

再举两个在信息技术方面的例子，一个是利用负折射材料可以获得没有衍射极限的透镜，一旦有了这种透镜，则可能对任何微细图形进行多次复制，这对微电子技术将产生重要影响；另一个例子是我们提出的一个非常简单的小发明，无绕线电感。

我们都知道电感器必须有一个线圈结构，现在电子元件越做越小，线圈这种复杂的结构就成了元件小型化的难点，我们在2007年提出了利用负介电常数介质构造无绕线电感，只用一个电容结构就能实现电感功能，使电路大大简化，集成度大大提高，解决了无源元件集成的大问题。

类似的例子还很多，像我们现在正在做的一个事情，利用超材料中的模态耦合构造无光学非线性过程参与的全光调制，可能会获得高响应速度、低阈值的全光开关，这个器件可能推动全光信息技术的广泛应用。

《科技导报》：目前看来超材料是一个多学科充分交叉的学科，它的研究具体需要哪些学科的相互促进研究？

周济：超材料的确涉及了很多学科。过去一些年发展比较快的电磁超材料涉及了物理学、电子学、光学、材料及化学等领域。随着超材料功能的拓展，一些新的超材料还涉及到了力学、数学、生物学等基础领域。从应用层面上看可能会涉及一些工程科学和技术领域。

我想特别强调超材料与材料科学的关系。超材料早期的发展跟材料科学的关系并没有像电子学和物理学那样密切，物理学家或电子科学家提出材料的设计思想，而材料科学所发挥的作用和化学相似，是一种工具，即如何实

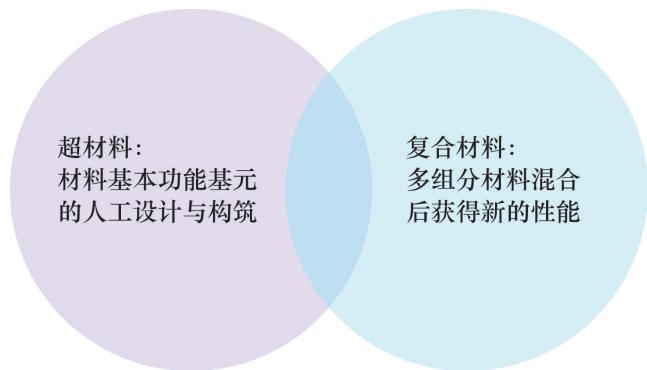


图1 超材料与复合材料相互交叠

现人工结构的加工,涉及的问题是诸如纳米加工一类的工艺问题。但超材料发展到今天,情况应该有所变化。超材料研究最终目标是发展具有优异性能的材料,这正是材料科学家的梦想。只不过是材料研究的主流并不在这个路线上。我们注意到,一些顶级杂志(如《Science》)上发表的关于超材料的文章都归类到“材料科学”这个栏目之下,国内外一些科技计划中也都将超材料纳入到材料科学的范畴。这一转变意味着一个趋势,就是需要更多的懂材料的人将超材料引入到材料研究。超材料在研究方法和科学体系上看与常规材料科学的确有很大的不同,这种跨界研究目前还不多,这也是我们正在推进的一个方向。

《科技导报》:目前相关领域的国内研究发展到了何种阶段?是否已经达到了国际领先水平?

周济:从基础研究看,中国的超材料研究有一些较有影响的工作。已故的孔金瓯教授当年是超材料领域最早的开拓者之一,近年来浙江大学、东南大学、南京大学、香港科技大学、复旦大学、同济大学、西北工业大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学及清华大学的一些研究组都有一些在国际上有影响的工作。在产业化方面,深圳光启研究院做得非常出色,成为国际上在超材料领域最大的知识产权拥有者。

从总体研究水平上看,我认为还不能说国内的研究水平在国际上领先,因为真正原创的思想和成果在国际上还不是最多的。在产业化方面,从规模和专利拥有上看,光启的确是走在世界前列。国外的超材料应用很大比重在军

工上,具体情况尚不清楚。

《科技导报》:中国领先其他国家首先发布了国家标准《电磁超材料术语》,其意义和影响有哪些?

周济:对术语进行规范十分重要,特别是对于超材料这样一个新的、广受关注的新领域。就连超材料的基本定义和范畴大家都有不同认识,就很难进一步开展研究、开发、立项等。就metamaterial这个概念自身来说,到底是从结构上定义还是从功能上定义,国际上也有不同标准。过去人们一直认为只有通过人工结构才能实现诸如负折射这样的性质,后来我们在自然材料中发现了非正定介电常数和全角负折射,国外也有人跟进,仍把他们看成是metamaterials。更有人望文生义,甚至把石墨烯等天然材料都归类到超材料的范围,非常不严谨。因此,我们国家率先制定了这个标准,对规范社会对超材料的认识、对国际上这个学科的发展、以及提升我们国家在中国新学科的地位都很有意义。

当然,名词的标准还只是一个开始,我想更重要的是今后超材料产品的标准化,这对于今后相关高新技术产业的发展会有更重要的意义。

《科技导报》:在“十三五”规划中,超材料具有哪些发展战略?

周济:很多重大的科技和产业计划中都涉及了超材料,包括“十三五”将要重点推进的100个重大计划,包括《中国制造2025》,以及国家重点研发计划等都有反映。这说明中国对这一新的方向是非常重视。

《科技导报》:请您预测下超材料研

究的未来发展方向?

周济:我想超材料研究未来的发展方向包括两个方面,一是奇异功能在众多领域的应用,产生为数众多的新器件和新技术,其中很多技术都是颠覆性技术,将对很多产业产生革命性的影响。

第二个方向是我更关注的方向,那就是超材料对材料科学和技术发展的深远影响。从材料科学的角度看,“超材料”的意义远远超越了几类新型人工材料,它提供了一种全新的材料获取方法,即针对需求进行逆向设计,通过构造“人工材料基因”来构建材料的功能。当代技术进步和经济发展越来越依赖材料性能的提高。而常规材料的性能主要取决于材料的自然结构,包括原子结构、电子结构、分子结构、化学键结构、晶体结构、晶粒-晶粒晶界结构等。随着材料科学和技术的进步,对这些结构操控能力逐渐增强,材料的性能不断提高,越来越趋近于材料的自然极限。因此,探索突破常规功能材料自然极限的新途径已成为材料科学发展中迫在眉睫的问题。而超材料的出现,则可能为解决这一问题打开大门,进而打破制约自然材料功能的极限,发展出自然材料所无法获得的新型功能材料,人类将可望成为材料的“造物主”。

如果把目光放远点,我们可以看到在人类漫长的文明进程中,材料一直是重要的里程碑。人类因学会使用天然材料,实现了由猿到人飞跃,进入了旧石器时代;因学会加工材料而进入了新石器时代;因发明材料合成的方法而进入青铜器时代。今天,人类正在进入超材料时代,能自己创造材料,就能创造一个崭新的世界。

(责任编辑 陈广仁)