

文章编号: 1003-7837(2005)04-0030-07

非晶态金属材料研究现状与前景

胥 锴, 吴子平, 刘 萍

(江西理工大学材料与化学工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 非晶态金属是新型的金属材料, 它已成为金属材料领域的研究热点, 并在有些领域已得到广泛的应用。文章介绍了它的性质、制备方法、应用及其在我国的应用现状与前景。

关键词: 非晶态金属; 性质; 应用; 前景

中图分类号: TB383 **文献标识码:** A

非晶态金属是一种“年轻”的金属材料, 从它诞生以来, 就显示出了巨大的潜能。人们不断地发现它的各种奇异的、优良的特性, 非晶材料已被广泛应用^[1]。与此同时, 人们对该材料的磁性、电学性质、力学性质、化学性质以及非晶态之形成及结构进行了广泛的研究, 希望在这个亚稳的非晶态结构基础上研发出具有全新的结构和性能的新材料。

1 非晶态金属材料及性质

1.1 非晶态金属材料

物质的结构决定了其性质。物质材料按其结构分类, 可分为晶体和非晶体两大类。常见的金属材料从结构上看一般都属于晶体材料。近几十年来, 人们发现了金属存在的另一种结构形式——非晶态。如果把晶体结构的金属视为金属的“常现性态”的话, 那么, 非晶态金属就是金属的“特常现性态”。非晶态金属又可形象的称为金属玻璃(非晶合金原子的混乱排列类似于玻璃)。对于金属材料来说, 通常情况下, 当金属或合金从液体凝固成固体(例如钢水凝固成钢锭)时, 原子总是从液体的混乱排列转变成固体的整齐排列, 即成为晶体。因为只有这样, 其结构才最稳定。但是, 如果金属或合金的凝固速度非常快(例如以 10^6 °C/s 的冷却速率将铁-硼合金熔体凝

固), 原子来不及整齐排列便被冻结住了, 最终的原子排列方式类似于液体, 是混乱的, 这就是非晶合金。从理论上说, 任何物质只要它的液体冷却速率足够快, 原子来不及整齐排列就凝固, 那么原子在液态时混乱排列并迅速冻结, 就可以形成非晶^[2]。有人根据这一特点又将非晶合金称为“过冷液”。但是, 不同的物质形成非晶所需要的冷却速度大不相同。例如, 普通的玻璃熔体只要慢慢冷却下来, 得到的玻璃就是非晶态。而单一的金属则需要 10^8 °C/s 以上的冷却速度才能形成非晶态。目前, 受工艺水平的限制, 在实际生产中难以达到如此高的冷却速度, 也就是说, 普通的单一的金属难以在生产中制成非晶。故非晶态金属多为合金, 纯的非晶态金属很少。

非晶态金属结构是一种亚稳态结构。在一定的条件下(比如高温、强冲击作用)会向更稳定的状态——晶态转变而变成普通晶态金属。我们把这一转变过程称为“晶化”。

非晶态金属结构的无序性带来了结构的复杂性, 给相应的研究工作带来了很大的困难。加上它又是那么的“年轻”, 人们至今尚未能找到一个理想的物理或数学模型来描述或表征非晶态金属的结构。然而, 这并不妨碍人们对它的研究兴趣。最近的研究表明, 非晶态金属结构与“硬球无规密堆模型”相近, 属于长程无序, 短程有序的结构。这种短程有序表现

在两个方面^[3]: 某个原子最近邻的特定原子种类, 称为化学短程序(CSRO); 这些特定种类原子在空间的特定堆积, 称为拓扑短程序(TSRO). 正是这两种短程序的存在, 使得非晶态金属表现出许多优异的性能.

1.2 性 质

非晶态金属得以广泛研究和应用的原因是它具有结晶金属不具备的各种优良特性. 影响物质性能的根本因素除了其成分外, 就是原子的排列以及电子状态. 从结构上看, 非晶态金属的构造与结晶金属不同, 原子排列紊乱无序, 原子之间相互作用, 电子所处的状态都与结晶金属不同. 非晶态金属的这种特殊结构, 决定了其性能与结晶金属有很大差异. 除此之外, 还有一点应强调的是非晶态金属在成分上的特殊性. 非晶态金属大都是多元素合金, 从均匀的液体状态快速冷却、凝固, 使各元素能均匀分布, 形成一个固溶体. 添加各种不同的元素会使非晶态金属产生各种不同性质. 这种在成分上自由调节的特殊性给非晶态金属带来了很大影响. 结晶金属则不同, 多元素所形成的合金, 像平衡状态图所示的一样, 大部分都形成化合物, 或是分离成几个相, 多元素在一个相中均匀的混合, 形成固溶体的范围少. 所以, 结晶金属不具备非晶态金属的多种元素任意、均匀混合的特点, 结构和成分上的特殊性决定了非晶态金属有各种特殊性能^[4].

非晶态金属位错密度高, 宏观组织均一, 没有晶界等缺陷, 被认为是一种具有高韧性、高强度的材料. 实验证明, 非晶态金属的强度比结晶金属材料要高得多. 铁系非晶态金属的最高强度达 450 kg/mm^2 , 钴系和镍系也达 300 kg/mm^2 以上, 比人们所知的强度最高的钢丝线强度(直径为 0.18 mm 的钢丝线强度为 280 kg/mm^2)还高.

非晶态金属中虽然含有许多非铁磁性元素, 难以得到很强的磁化, 但其没有结晶金属的磁的各向异性, 也不存在阻碍磁畴壁移动的结晶缺陷及析出物, 因而它的磁滞损失非常小. 此外, 非晶态金属的电阻率是结晶金属的 $5 \sim 6$ 倍, 它的涡流损失也很小. 非晶态金属是极理想的软磁材料, 它具有低矫顽力、高导磁率及高频特性好等优良特性. 由于非晶态金属没有成分变化而引起相变现象, 磁性可以随成份连续变化, 所以可以做出各种特性的非晶态磁性金属.

从构造上看, 非晶态金属没有晶界、层错等缺陷, 没有偏析、析出及异相, 当添加适当元素形成亚稳态后, 会显示出惊人的抗腐蚀性, 在酸性、中性或碱性等各种溶液中长期浸泡而不被腐蚀. 如在 Fe 合金中添加 Cr 和 Mo, 其耐腐蚀性之强令人难以置信. 可以说, 这是非晶态金属的构造特殊性和成分特殊性而带来的结果.

非晶态金属除了高强韧性、超耐腐蚀性和软磁性外, 还具备许多其他特性, 如耐放射线损伤. 通常中子照射到结晶金属上后, 原子的点阵排列会遭到破坏, 出现很多缺陷使材料性能下降, 但是非晶态金属在放射线长期照射后既不脆化, 导电性也不下降. 将来人类可利用原子能以及氢的核聚变能解决能源问题. 由于原子炉以及核聚变炉中有大量的放射线, 因此, 要求耐照射损伤的材料, 非晶态金属的耐放射线损伤的特性将有助于解决这一问题.

非晶态金属的构造可以看成是无数个缺陷的组合体. 表面处于非常活泼的化学状态, 可以作为很有前途的催化剂材料. 另外, 很多非晶态金属具有超导电性, 可作为贮氢材料减轻材料粉化的问题等. 非晶态金属的历史还很短, 随着其研究的深入, 还会发现许多新的特性.

2 非晶态金属的制备^[5]

制备非晶态金属的方法很多, 大致可分为液相急冷法、气相沉积法、化学溶液反应法及固相反应法等几大类. 液相急冷法和气相沉积法是较常见的两种方法. 从材料制备的工艺和产品的质地来看, 液相急冷法是比较好的一种, 目前已成为制备各种非晶态金属的主要方法.

2.1 液相急冷法

此方法是将金属加热熔化, 然后采取各种方法让液态金属快速冷却凝固, 形成非晶态金属. 该方法在非晶态金属制作中用得最广泛、最频繁, 目前得到应用的非晶态金属几乎都是由此法制成的. 此方法的种类很多, 用不同的急冷法得到的非晶态金属的形态、性质有很大的不同.

目前, 非晶态金属的大型制造设备可连续生产宽达 20 cm 的非晶态金属薄带. 利用单轮法还可以制作复合非晶态薄带, 即利用两个坩埚将金属熔化, 然后同时喷到同一个快速旋转的轮子上, 就可以得到两种材料接合的复合非晶态金属薄带. 除此之外,

还可利用激光、电子束等离子体等手段在碳素钢等金属表面涂盖一层耐腐蚀的非晶态金属膜,或利用脉冲大电流将多晶薄膜快速熔化,快速凝固成非晶态金属膜^[6],或利用熔射法将 $10\ \mu\text{m}$ 左右的合金粉末通过等离子体熔化后喷到冷却板上,制取带状或粉末状非晶态金属. 这些方法都属于液相急冷法.

液相急冷法的特点是让液态金属中的热量在非常短的时间内散发掉,使晶核的形成及长大得到抑制,冷却时间 t_0 随温度、压力、成分、短程有序性等差异而不同,一般 t_0 在 $10^{-2} \sim 10^{-7}\text{s}$ 的范围内. 冷却速率是液相急冷法的关键因素之一,冷却速率越快,会使非晶态金属的形成范围加宽,非晶态金属的尺寸加大,非晶态的均一性好,从而使非晶态金属的热稳定性提高. 非晶态化均一性对材料性能的影响极大,如果试料中有微小的结晶成分存在,那么材料的许多性质显著下降. 如很多脆性的非晶态金属往往是因没有完整均一地非晶态化,或虽是均匀非晶态化,但在保存中又出现了结晶而造成的.

2.2 气相沉积法

气相沉积法是通过加热、溅射等各种手段使金属先变成原子、分子、离子或原子团状态,然后沉积到基板上,形成非晶态金属. 此法是从制作非晶态金属磁性薄膜而发展起来的. 目前,制造薄膜、超微粉、多层膜以及人造晶格膜经常运用气相沉积法. 此法大体上可以分为两大类:一类是物理气相沉积法,包括真空蒸镀法、溅射法、离子束法、ICB(Ion cluster beam)法等;另一类是化学气相沉积法,包括热 CVD 法、光 CVD 法和等离子体 CVD 法.

气相沉积法的非常重要的因素是飞往基板的粒子运动能量和基板周围的真空度. 真空蒸镀法虽有基板温度不升高、堆积速度快、装置结构简单及调节方便等优点,但是粒子运动能量低,仅有 $0.01 \sim 1\text{eV}$ 左右,必须将基板温度降到很低才行. 另外,形成的膜与基板结合强度低,所以在非晶态金属制作中用得不多. 溅射法虽然膜的形成机构复杂,难以控制,基板温度上升显著,但是离子能量约为 10eV ,很适合做非晶态金属膜,而且膜与基板接合牢,成分控制也比真空蒸镀膜好,是制取非晶态金属薄膜的主要方法. 用溅射法能使一些用液相急冷法不能非晶态化的合金非晶态化,如 Fe-Mo, Fe-La, Fe-Cu-Ag 等合金系. 溅射法的主要缺点是离子能量难以控制,基板温度上升快,真空度低及 Ar 等气体杂质易

混入试料中. 用此法获得的非晶态金属的性能与液相急冷法获得的非晶态金属的性能相差很大. 最近离子束法的研究很受重视. 此法真空度高,能避免 Ar 等气体杂质混入,离子束也容易控制,可以在很宽的成分范围内制取纯净度很高、性能很好的非晶态薄膜,不足处是膜形成速度太慢.

ICB 法是一种速度较快的非晶态金属薄膜形成方法. 将试料加热熔化使金属蒸发形成原子团,同时使原子团离子化,以离子团的形式加速飞向基板. 此法真空度高,不存在 Ar 等气体杂质混入问题,同时基板温度上升问题也能避免,但目前还没有发现此法形成的非晶态金属薄膜有什么很实用的特性. 另外,在设备和技术上还有不少问题尚待解决. CVD 法也可以用来制非晶态金属薄膜,但一般仅在高熔点金属及金属陶瓷合金中有所应用,如可以制备 SiC, SiB, SiN 等非晶态薄膜.

2.3 化学溶液反应法

化学溶液反应法包括电解镀膜法和无电解镀膜法. 电解镀膜法是早已为人们所知的非晶态金属薄膜制法,是通过加入电流使金属离子直接还原析出在电极上,其最大特点是简单,能大面积形成非晶态金属薄膜. 最近此法又开始重新引人注目,在材料的防腐等领域中得到了应用. 由于此法是在溶液中靠电极反应而生成膜,因此控制溶液的种类、温度及电解条件等都很重要. 无电解镀膜法是不加电流,而在溶液中加入一些还原剂,靠其化学反应在基板上析出形成薄膜. 例如,将 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NH_4CN , $\text{K}_4\text{H}_4\text{O}_6$ 混合,调成 pH 为 $9 \sim 10$ 的水溶液,经反应可生成 Co-P 非晶态金属膜,按类似条件也可以形成 Ni-P, Ni-Fe-P 及 Ni-B 等非晶态金属膜. 除这两种以外,最近又发现金属离子水溶液和氢化、硼化物的水溶液混合,在短时间内可产生大量非晶态金属超细粉. 这种现象在 Fe-B, Co-B, Fe-M-B, Ni-M-B ($\text{M} = \text{Cr}, \text{Mo}, \text{W}, \text{Mn}$) 等许多合金中都得到证实,此方法的原理与无电解镀膜类似. 用此法制成的非晶态金属为 20nm 左右的超细粉,而且形成非晶态金属的成分范围与液相急冷法有很大不同. 现在已开始对这些超细粉进行物性研究,并发现了一些良好的特性.

2.4 固相反应法

目前,这个领域的研究最活跃,作为非晶态金属制作的新方法受到极大的关注. 固相反应法大体上

可以分为四大类.第一类是利用电子线、放射线等的照射使金属非晶化,如 Zr_3Al , $NiTi$, Cu_4Ti_3 和 Ni_3M 等金属间化合物受照射后形成非晶态金属.第二类是将两种金属作成间隔为数 mm 的多层膜,然后在高真空中加热到数百度,靠加热反应形成非晶态金属.如在 $Au-La$, $Zr-Ni$, $Ni-Hf$, $Co-Zr$, $Co-Hf$ 和 $Rh-Si$ 等系中成功地获得了非晶态相.第三类是让 AB , AB_2 和 AB_3 型金属间化合物在常温或常温以上的高温中吸收氢气,在金属与氢气反应中形成非晶态金属.如 Laves 相 RM_2 (R =稀土金属; $M=Fe, Ni, Co, Mn$), Do_{19} 型 R_3M ($R=La, Pr, Nd, Sm$; $M=Ga, Al$) 以及 $C_{23}B_3$ 型的许多金属间化合物,在适当的条件下与氢气反应,都可以形成非晶态金属.此方法获得非晶态金属一般以粉末状为多,也有块状的.通过控制氢气的压力及反应温度可以改变非晶态金属的形态及特性.第四类是机械合金化法 (mechanical alloying, 简称 MA 法). 这种方法是将数种金属粉末混在一起,靠球磨碰撞等机械能量使金属粉末局部破坏、压挤,在微观上混合化、合金化和微粒化,通过局部加热和扩散反应,获得非晶态金属粉末.前三种方法形成非晶态相的合金成分都有局限于金属间化合物的倾向,而 MA 法则不存在此限制. MA 法能在液相急冷法不能获得的合金成分范围内获得非晶态相,这已在 $Fe-Zr$, $Cu-Nb-Sn$, $Ag-Cu$, $Ni-Ti$, $Ni-Zr$, $Cu-Zn$ 和 $Ag-Fe$ 等许多系中得到证实.此法所需的设备简单,操作方便,适应的合金范围宽,是一种大量生产非晶态金属粉末的有效方法.近几年来,与 MA 法有关的研究很活跃,但用此法制出的非晶态金属粉末很微细,表面易氧化,反应所需时间长,容器的磨损带来的杂质混入现象也难以避免.另外,非晶态化的均一性与液相急冷法相比是否相同还不清楚.关于粉末及压粉体性能达到或超过液相急冷法的粉末及压粉体的性能报道也很少,这些都是急待解决的问题.与 MA 法相似的还有机械压粉体法 (mechanical grinding, 简称 MG 法). MG 法与 MA 法不同之处是出发原料不同,它不是以两种以上的纯金属粉末,而是以几种金属的合金粉末为原料.

3 非晶态金属的性能及其应用^[7]

与晶态合金相比,非晶态合金在物理性能(力、热、电、磁)和化学性能等方面都发生了显著的变化.而几乎所有的这些特性都可以进一步挖掘和利用,

给我们带来科学的、经济的、社会的利益和价值.

3.1 非晶态金属的力学性能及应用

研究表明,非晶态合金与普通钢铁材料相比,有着突出的高强度、高韧性和高耐磨性.根据这些特点用非晶态材料和其它材料可以制备成优良的复合材料,也可以单独制成高强度耐磨器件.在日常生活中我们接触的非晶态材料已经很多,如用非晶态合金制做的高耐磨音频视频磁头在高档录音、录相机中的广泛使用;把块状非晶合金应用于高尔夫球击球拍头和微型齿轮中;采用非晶丝复合强化的高尔夫球杆、钓鱼杆已经面市;非晶合金材料广泛用于轻、重工业、军工和航空航天业,在材料表面、特殊部件和结构零件等方面也都得到广泛的应用.

3.2 非晶态金属的电学性能应用

一般非晶态金属的电阻率较同种的普通金属材料要高,在变压器铁芯材料中利用这一特点可降低铁损.人们发现,在某些特定的温度环境下,非晶的电阻率会急剧的下降(跃变效应),利用这一特点可设计特殊用途的功能开关.还可利用其低温超导现象开发非晶超导材料.目前,人们对非晶态合金电学性能及其应用方面的了解相对较少,尚有待进一步研发.

3.3 非晶态金属的磁学性能及应用

非晶态合金具有优异的磁学性能.在非晶的诸多特性中,人们目前对这一方面的研究相对要深入些.常常有人对图书馆或超市的书或物品中所暗藏的报警设施感到惊讶,其实,这不过是非晶态软磁材料在其中发挥着作用.与传统的金属磁性材料相比,由于非晶合金原子排列无序,没有晶体的各向异性,电阻率高,具有高的导磁率,是优良的软磁材料.根据铁基非晶态合金具有高饱和磁感应强度和低损耗的特点,现代工业多用它制造配电变压器,铁芯的空载损耗与硅钢铁芯的空载损耗相比降低 60%~80%,具有显著的节能效果.应用非晶态合金配电变压器所带来的巨大节能效益意味着可以通过节能减少新建电厂的数量,同时减少新建电厂对环境的污染,从这个意义上讲,非晶态材料被誉为“绿色材料”.非晶态合金铁芯还广泛地应用在各种高功率器件和传感器件上,用非晶态合金铁芯变压器制造的高频逆变焊机,大大提高了电源工作频率和效率,焊机的体积成倍减小.如今,电力电子器件正朝着高效、节能、小型化的方向发展,新的科技发展方向对

磁性材料也提出了新的要求. 于是, 一种体积小、重量轻的非晶态软磁材料以损耗低、导磁高的优异特性正逐步代替一部分传统的硅钢、坡莫合金和铁氧体材料, 成为目前研究最深入、应用领域最多、最引人注目的新型功能材料之一.

3.4 非晶态金属的化学性能及应用

非晶态合金还具有优异的化学性能. 研究表明, 非晶态合金对某些化学反应具有明显的催化作用, 可以用作化工催化剂. 某些非晶态合金通过化学反应可以吸收和释放出氢, 可以用作储氢材料. 由于没有晶粒和晶界, 非晶态合金比晶态合金更加耐腐蚀, 因此, 它可以成为化工、海洋等一些易腐蚀的环境中应用设备的首选材料.

3.5 非晶态金属材料与纳米晶金属材料

非晶态金属与纳米晶金属材料有着非常亲缘的关系. 通过一些特殊的方法控制非晶晶化的过程, 可以得到致密良好、纯净度很高并符合期望的纳米晶金属材料. 根据近期文献报道, 在诸多非晶晶化法中, 退火晶化法和微波诱导晶化法是比较成功也比较好的两种方法^[8]. 20 世纪 80 年代末, 日本的吉泽克仁等发现, 含有 Cu 和 Nb 的铁基的 FeBSi 非晶合金在晶化温度以上退火时, 会形成非常细小的晶粒组织, 晶粒尺寸仅有 10~20 nm, 这时材料的磁性能不仅不退化, 反而非常优良. 这种非晶合金经过特殊的退火晶化而形成的晶态材料称为纳米晶合金(以前也曾称为超微晶合金). 铁基纳米晶合金的磁性能几乎能够和非晶合金中最好的钴基非晶合金相比, 但是却不含有的昂贵的钴, 所以被广泛应用于高频变压器铁芯, 替代铁氧体和坡莫合金等.

4 我国非晶态金属材料的发展现状及前景

4.1 我国非晶金属的发展现状

我国尽管涉足非晶领域较晚, 但是发展较快. 从 1976 年开始非晶态合金的研究工作, 非晶态合金实验走过了从实验室材料工艺研究到百吨级中间实验的艰辛阶段再进而步入千吨级的生产规模, 初步形成了非晶态合金科研开发和应用体系. 如今, 中国的非晶态合金的科研开发和应用能力已经达到国际先进水平, 共取得 100 多项科研成果和 20 多项专利. 1996 年国家组建了非晶微晶合金工程技术研究中

心, 是国内最早开发非晶纳米晶合金的单位之一, 承担并完成了国家科委六五~九五科技攻关任务, 共取得多项国家科研成果和专利, 非晶带材自动卷取技术荣获 1988 年国家十大科技新闻之一. 中心现有 7 条非晶带材生产线, 可生产 200 mm 以下不同规格的铁基、铁镍基、钴基非晶带材和铁基纳米晶带材, 年生产能力 300 t 以上. 一条非晶纳米晶铁芯及元器件生产线, 年生产能力达 20 余万只. 已经投入试生产的千吨级非晶带材和配电变压器铁芯生产线, 年生产能力将达到 3000 t 非晶带材和 200 t 配电变压器铁芯.

尤其值得一提, 于 2000 年我国完成的千吨级非晶带材生产线成功喷出了 220 mm 的非晶带材(重量 200 余公斤, 其表面质量良好). 220 mm 宽非晶带材的喷制成功标志着我国非晶工艺、装备的技术水平前进了一大步(目前美国生产的非晶带材的最大宽度为 217 mm).

由于形成非晶态金属的条件限制(需快速冷却), 目前所生产的非晶合金基本都是带材, 这就大大地限制了非晶合金的应用范围. 现在人们正致力于“大块非晶”合金的研究和开发, 并在非晶形成机理方面取得了长足的进步^[9,10], 认识到形成非晶的临界条件不完全取决于冷却速率, 还取决于过冷液达到亚稳态的程度(可用过冷度 ΔT_c 表征), 过冷度的大小衡量了非晶的形成能力, 它与构成合金的组成有关. 根据这一观点, 只要合理的配制合金, 就可以用相对较低的冷却速率铸造出具有较强形成能力的大块非晶合金^[11,12]. 如今采用吸铸法已制备出直径达 30 mm 的 Zr 基非晶合金, 而对 Pd-Ni-Cu-P 报道的尺寸已达 72mm^[13].

目前, 我国的科技工作者在非晶形成规律的研究和工艺改进方面开展了大量的工作, 取得较大进展^[14]. 开发了一系列有自主知识产权的非晶材料制备的新技术和新工艺^[15,16], 并获得许多具有优异性能的非晶合金新体系. 建立了有自己特色的研究非晶性能的方法, 建立了在位 X 射线衍射研究多层膜中互扩散的新技术, 精确测量出一系列多层膜在固相反应中的互扩散系数, 发现多层膜中扩散规律及与固相反应的关系. 首次将高压技术结合到合金体系的非平衡相变热力学和动力学过程的研究中, 采用高压淬火方法制备 Pd-Ni-P, ZrNiAl 等大块非晶合金^[17]; 用微波诱导晶化法制备出晶化完全、物相丰富的极有特色的纳米合金^[18], 采用高压方法在块

体样品中获得 Ge 的非晶相,系统研究了高压下非晶合金制备及形成规律;进行了微重力条件下制备非晶合金及形成机理的研究;成功地利用低纯度组元获得了性能优良的大块非晶合金,并开展了大块非晶合金的特性研究^[19]。特别是采用非晶涂层坩埚(铜模),Ti 丝加热除氧净化等改进技术工艺,制备出不同形状的,直径数 cm 的大块非晶材料体系,在规模化生产大块非晶的研究开发方面跨出了一大步。

4.2 前 景

非晶态金属的研究及其应用前景十分乐观。随着社会的进步和生产的发展,非晶态金属涉及的领域将越来越广,与之相关的功能材料和特殊材料将不断涌现,对非晶态金属的需求量也越来越多,要求也将越来越高。

从实用角度来看,今后一段时间内,绝大多数纳米晶样品的制备仍将以非晶晶化法和机械合金化法为主,它们实际应用发展的关键之一是压制过程有待突破。从长远角度来看,高压高温固相淬火、脉冲电流和深过冷直接晶化法以及与之相关的复合块状纳米材料制备技术及其基础研究工作,是今后纳米材料制备技术的研究重点。

相信随着块状纳米材料制备技术的不断研究和发展,在不远的将来会有更多的纳米材料问世,并产生巨大的社会、经济效益。

参考文献:

- [1] 周效锋,戴雯,陶淑芬.非晶态金属材料发展及前景展望[J].云南师范大学学报,2002,6(3):251-253.
- [2] 张礼.近代物理学进展[M].北京:清华大学出版社,1997.145-147.
- [3] 王晓东,齐民.缓冷大块非晶的发展现状及其形成能力的考虑[J].材料科学与工程,2000,18(1):131-135.
- [4] 李星国,姚凯伦.新型非晶态金属的制备、应用及研究展望[J].物理,1992,21(7):399-403.
- [5] 张庭璇.非晶态金属的发展及应用开发[J].高压电器技术,1992,(2):28-33.
- [6] Clemens B M, Nix W D, Ramaswamy V. Surface-energy-driven intermixing and its effect on the measurement of interface stress[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(6):2816-2820.
- [7] 江静华,马爱斌,蒋建清,等.非晶态合金[J].江苏机械制造与自动化,2000,(4):44-46.
- [8] 周效锋,陶淑芬,刘佐权,等. Fe₇₃.5Cu₁Nb₃Si₁₃.5B₉ 非晶合金的微波纳米晶化速率和晶化度的对比研究[J].物理学报,2002,51(2):322-325.
- [9] Peker A, Johnson W L. A highly processable metallic glass: Zr-Ti-Cu-Ni alloys [J]. Applied Physics Letters, 1999,75(1):49-52.
- [10] Inoue A, Ohsaka K, Chung S K. Microstructure and soft properties of nanocrystalline Fe-Zr-B-Al, Fe-Zr-B-Si and Fe-Zr-B-Al-Si alloys with zero magnetostriction[J]. Mater Trans, 1996,70(6):127-135.
- [11] 赵德乾,汪卫华. Zr-Ti-Cu-Ni-Be-Fe 大块非晶合金晶化动力学效应[J].金属学报,2001,37(7):754-758.
- [12] Inoue A, Scruggs D, Johnson W L. High strength bulk amorphous alloys with low critical cooling rate[J]. Mater Trans JIM, 1995,36(5):213-217.
- [13] Nishiyama N, Inoue A, Rhim W K, et al. Glass Transition and viscous flow working of Pb-Cu-Ni-P amorphous alloys[J]. Mater Trans JIM, 1999,40(1):64-68.
- [14] 卢柯.非晶态合金向纳米晶体的相转变[J].金属学报,1994,30(1):B001-B021.
- [15] Wang W H, Wei Q, Bai H Y. Microstructure studies of Zr-Ti-Cu-Ni-Be amorphous alloys by electron diffraction intensity analysis[J]. Appl Phys, 1997,71(1):58-60.
- [16] 王文彪.新型 Zr-Ti-Cu-Ni-Be-C 大块非晶合金的形成[J].中国科学(A辑),1998,28(5):443-446.
- [17] Wang W H, Wen P, Zhao Y H, et al. Microstructure decomposition and crystallization in Zr-Ti-Cu-Ni-Be bulk metallic glass[J]. Journal of Applied Physics (B辑), 1998,21(2):182-189.
- [18] 周效锋,刘应开. Fe₇₃.5Cu₁Nb₃B₉Si₁₃.5 非晶合金的微波纳米晶化研究[J].物理学报,1999,48(11):2098-2103.
- [19] 季颖斐,汪卫华.水淬法制备 Zr₄₁Ti₁₄Ni₈Cu₁₂.5Be₂₂.5Fe₂ 大块非晶合金[J].科学通报,1999,44(16):1707-1710.

Current research status and prospect of amorphous alloys

XU Kai, WU Zi-ping, LIU Ping

(Faculty of Material and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Amorphous alloys are a new type of metal material. It has become a hot spot in the field of metal material researches and been applied widely. The paper introduces its characteristics, preparation methods, current application situation of our country and prospect.

Key words: amorphous alloys; characteristic; application; prospect