

功能材料

非晶纳米晶软磁材料的制备与应用^{*}

钟满福, 温 鸣

(同济大学 化学系, 上海 200092)

摘要:综述了磁性非晶纳米晶材料作为一种功能材料在研究和应用方面的新进展。介绍了非晶纳米晶磁性材料的磁性特性、制备方法以及最新的发展和应用,并展望了这些领域的发展趋势。引用文献 26 篇。

关键词:非晶;纳米晶;软磁性

中图分类号:TQ12 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-5214(2004)S0-0059-05

Preparations and Applications of Nanocrystalline Soft Magnetic Materials

ZHONG Man-fu, WEN Ming

(Department of Chemistry, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Polycrystalline materials with nanosized grains and partially crystallized amorphous exhibit unique novel properties which are different from those of the conventional coarse-grained crystalline materials. This article reviews the present situation in this field: the magnetic properties, methods of preparation and application of these materials. Further development trend of this new class of materials is forecasted. 26 references are cited.

Key words: amorphous; nanocrystallization; soft magnetism

非晶态合金是一种有别于晶态合金的完全各向同性的材料。非晶态金属具有晶态金属难以达到的高强度、高硬度、高延展性、优异软磁性能、高耐腐蚀性及优异的电性能、抗辐照能力和较好的催化及储氢能力^[1~7]。

美国为非晶微晶合金的研究开发做了大量创造性工作,投入了大量人力、物力和资金。非晶态软磁合金带材生产集中于联信(Allied-Signal)公司及其附属厂家;而快淬 NdFeB 则主要集中于通用汽车公司(GM)及其合作厂家。非晶微晶合金应用研究一直以配电变压器为重点,近几年来在电子和电力电子应用方面获得了相当大的进展。除美国之外,日本和德国在非晶微晶合金应用开发方面拥有自己的特色,重点是电子和电力电子元件,例如高级音响磁头、高频电源(含开关电源)用变压器、扼流圈和磁放大器等。

与美、日、德相比,我国非晶纳米晶合金的产业规模与日本和德国相当,但远小于美国。在工艺技术和产品质量方面与上述国家差距很大。国内现有

制带设备尚无法批量生产厚度小于 20 μm 的超薄带。因此,严重制约了国内非晶纳米晶合金在各个领域的推广应用。但通过前 4 个五年科技攻关计划的实施,我国基本实现了非晶纳米晶合金带材及其制品的产业化。在十五期间,纳米晶带材及其制品的产业化开发又被列入重大科技攻关计划,国家给予重点支持,旨在推动纳米晶材料应用开发快速发展,满足电力电子和电子信息等高新技术领域日益增长的迫切需求。

1 非晶纳米晶软磁合金优异的磁学性能

由于晶粒尺寸小,晶粒界面密度大,因此非晶纳米晶材料具有许多优越性,其中有强度和硬度的提高、扩散性的增大、延展性和韧性的提高、密度的减小、弹性模量的变小、电阻率的增大、比热的增大、热膨胀系数的增大、热导率的降低和优异的软磁学特性等。

1988 年 Yoshizawa 等研究的 Fe-Cu-Nb-Si-B (也叫坡莫)合金具有高达 1.25 T 的 B_s (饱和磁化强度)以

^{*} 收稿日期:2004-06-10

作者简介:钟满福(1978-),男,江西兴国人,硕士研究生,师从温鸣副教授,从事非晶态合金方面研究,电话:021-65982654 转 806, E-mail:zhong-manfu@163.com。

及高达十万的初始磁导率(μ_i)和相当于钴基非晶的低铁损。最近,用快速凝固方法制备部分晶化铁基合金得到了深入的研究,这种 b. c. c. -Fe 纳米晶镶嵌在非晶体的新材料后表现出良好的磁学性能:低矫顽力、高渗透性、磁致伸缩几乎为零和低的铁损。

1.1 高饱和磁化强度

通过控制晶化过程,可以得到纳米微晶镶嵌在非晶体的非晶纳米晶复合材料。适当组成的非晶纳米晶材料表现出优良的机械和磁学性能^[8], Fe-Si-B 非晶纳米晶的矫顽力大约为 0.05 Oe(相同成分非晶态的矫顽力为 0.11 Oe,纳米晶的矫顽力为 4.96 Oe),渗透性为 4.42×10^{23} (a. u.) [非晶态合金的渗透性 6.02×10^3 (a. u.)], 纳米晶的渗透性为 10 (a. u.)[]], $B_s = 1.2 \sim 1.4$ T。为了获得更高的饱和磁化强度, Suzuki 等人发明了新型纳米晶系 Fe-M-B (M = Zr, Nb, Hf) 合金,其结构为 b. c. c. 相纳米晶(10~20 nm)与非晶相基体的混合组织,其 $B_s = 1.5 \sim 1.7$ T。进一步研究证实,复合添加过渡族金属(Zr, Nb, Hf, Ti, V, Ta, W 等)及副族金属(Cu, Au, Ag 等),可以大大改善 Fe-M-B 合金的软磁性能,但 B_s 值有所降低。因而通过合理调整成分可以得到不同的磁学性能,如 Fe₉₁Zr₇B₂ 合金具有高达 1.70 T 的 B_s 值。

1.2 低矫顽力

Fe-Si-B 非晶纳米晶的矫顽力大约为 0.05 Oe(相同成分非晶态为 0.11 Oe,纳米晶 4.96 Oe), Fe-Si-B-Nb-Cu 系纳米复合相, B_s 为 1.2~1.3 T, 1 kHz 下 μ_i 最高为 1.0×10^5 H/m, H_c (矫顽力)约为 0.5 A/m。Fe-Zr-Nb-B 系 B_s 为 1.4~1.6 T, μ_i 最高为 1.6×10^5 H/m, H_c 约 1.2 A/m,是当前软磁材料中最优良的软磁特性材料。

这些优良的磁特性是由于:(1)减少了纳米 b. c. c. 相的磁晶各向异性;(2)铁磁性残余非晶相介于 b. c. c. 相之间发生磁耦合;(3) b. c. c. 相和非晶相间的元素再分配达到低的磁致伸缩;(4)在 b. c. c. 相和非晶相界面上 Nb 和 Zr 的低扩散和偏析有控制 b. c. c. 相颗粒长大的效果等^[9,10]。

1.3 高渗透性、高磁导

Fe-M-B (M = Zr, Nb, Hf) 合金,其结构为 b. c. c. 相纳米晶(10~20 nm)与非晶相基体的混合组织,其动态磁导率大于 2.00×10^4 H/m; Fe-Si-B 非晶纳米晶的渗透性为 4.42×10^{23} (a. u.) [非晶态 6.02×10^3 (a. u.)], 纳米晶 10(a. u.)[]]; Fe_{88.7}Zr₇B₃Co_{1.3} 合金具有很高 B_s 值并有 1.00×10^5 H/m 的有效磁导率。

2 非晶纳米晶软磁合金的制备

纳米晶体的制备方法有很多,如超细金属粉末冷压法^[11],机械球磨法^[12,13]和新发明的非晶晶化法^[12]等。其中以超细金属粉末冷压法最为普遍,但

这种方法在工艺上存在许多不足之处,如工艺复杂、成本高、产量小且样品中存在微孔隙等。

2.1 惰性气体冷凝法(IGC)制备纳米粉体(固体)

这是目前用物理方法制备具有清洁界面的纳米粉体(固体)的主要方法之一。其主要过程是:在真空蒸发室内充入低压惰性气体(He 或 Ar),将蒸发源加热蒸发,产生原子雾,与惰性气体原子碰撞而失去能量,凝聚形成纳米尺寸的团簇,并在液氮冷棒上聚集起来,将聚集的粉状颗粒刮下,传送至真空压实装置,在数百兆帕至几千兆帕压力下制成直径为几毫米,厚度为 1~10 mm 的圆片。

纳米合金可通过同时蒸发两种或数种金属物质得到。纳米氧化物的制备可在蒸发过程中或制得团簇后于真空室内通以纯氧使之氧化得到。惰性气体冷凝法制得的纳米固体其界面成分因颗粒尺寸大小而异,一般约占整个体积 50% 左右,其原子排列与相应的晶态和非晶态均有所不同,介于非晶态到晶态之间。因此,其性质与化学成分和它相同的晶态和非晶态有明显的区别。

2.2 机械球磨法^[12,13]

机械合金化就是将欲合金化的元素粉末按一定配比机械混合,在高能球磨机等设备中长时间运转将回转机械能传递给粉末,同时粉末在球磨介质的反复冲撞下承受冲力、剪切、摩擦和压缩多种力的作用,经历反复的挤压、冷焊合及粉碎过程成为弥散分布的超细粒子,在固态下实现合金化。利用机械合金化制备纳米粉末是一个非常有效而简便的方法。粉末机械合金化形成纳米晶有两种途径。

2.2.1 粗晶材料经过机械合金化形成纳米晶

粗晶粉末经高强度机械球磨,产生大量塑性变形,并产生高密度位错。在初期,塑性变形后的粉末中的位错先是纷乱地纠缠在一起,形成“位错缠结”。随着球磨强度的增加,粉末变形量增大,缠结在一起的位错移动形成“位错胞”,高密度位错主要集中在胞的周围区域,形成胞壁。这时变形的粉末是由许多“位错胞”组成,胞与胞之间有微小的取相差。随着机械合金化强度进一步增加,粉末变形量增大,“位错胞”的数量增多,尺寸减小,跨越胞壁的平均取向差也逐渐增加。当粉末的变形量足够大时,由于构成胞壁的位错密度急剧增加而使胞与胞之间的取向差达到一定限度后,胞壁转变为晶界形成纳米晶。

2.2.2 非晶材料经过机械合金化形成纳米晶

非晶粉末在机械合金化过程中的晶体生长是一个形核与长大的过程。在一定条件下,晶体在非晶基体中形核。晶体的生长速率较低,且其生长受到机械合金化造成的严重塑性变形的限制。由于机械合金化使晶体在非晶基体中形核位置多且生长速率低,所以形成纳米晶。

2.2.3 影响因素

(1) 球磨时间; (2) 磨球的球径和转速; (3) 球料比、装球容积比; (4) 球磨气氛等。

2.3 非晶晶化法^[12,14~17]

最近,卢柯等提出非晶态合金晶化过程的微观机制,即有序原子集团切变沉积机制,发展了一种制备纳米晶体的新方法——非晶晶化法,即通过非晶态合金的晶化产生晶粒为纳米尺寸的超细多晶材料。这种方法具有工艺简单、成本低、晶粒易控制、且样品中不含微孔隙等优点,最近得到了广泛的发展和应用。

非晶态是一种热力学亚稳态,在一定条件下易转变为较稳定的晶态。这一转变的动力来自于非晶态和晶态之间的吉布斯自由能的差异。当对非晶态样品进行热处理、辐射和细微机械粉碎^[20]时,非晶态就转变为多晶。其尺寸和化学成分与退火条件有着密切的关系,非晶态转变为纳米尺度多晶粒子的过程通常称之为纳米晶化。

纳米晶化可分为恒温和非恒温退火两种,其中恒温退火工艺为:用较快的速度将非晶态样品升温至退火温度,在保护气氛中保温一定时间使非晶态样品完全晶化,冷却至室温便得到纳米晶。最基本的原则是通过选择合适的热处理条件(退火温度、时间、加热速率等)在动力学上对晶化进行控制,从而得到超细纳米晶体颗粒。其晶化过程有:

多形态纳米晶化,即单一化学成分非晶转变为单相纳米晶; 共晶纳米晶化,同时析出两相纳米晶相; 多步纳米晶化,某些成分先以共晶或多形态反应的形式形成纳米晶镶嵌在非晶合金里,余下的成分以共晶或多形态纳米晶化的形式纳米晶化。

非晶纳米晶复合材料主要采用非晶退火制备,通过控制晶化过程中各种条件,如时间、温度、升温速度和分步晶化,使合金中某一相或几相析出,其余大部分则仍为非晶态,从而可以得到纳米微晶镶嵌在非晶体的非晶纳米晶复合材料,适当组成的非晶纳米晶材料表现出优良的机械和磁学性能^[25,26]。

2.4 其他方法^[21~23]

2.4.1 深度范性形变法制备纳米晶体

这是由Islamgaliev等人于1994年初发展起来的独特的纳米材料制备工艺,材料在准静态压力的作用下发生严重范性形变,从而将材料的晶粒细化到亚微米或纳米级。例如: $\rho = 82 \mu\text{m}$ 的锆在6 GPa准静压力作用后,材料结构转化为10~30 nm的晶相与10%~15%的非晶相共存;再经850 °C热处理后,纳米结构开始形成,材料由粒径100 nm的等轴晶组成,而当温度升至900 °C后,晶粒尺寸迅速增大至

400 nm。

2.4.2 物理气相沉积法制备纳米薄膜

该法作为一种常规的薄膜制备手段被广泛应用于纳米薄膜的制备与研究中,包括蒸镀、电子束蒸镀、溅射等。这一方法主要通过两种途径获得纳米薄膜:

在非晶薄膜晶化的过程中控制纳米结构的形成,比如采用共溅射法制备Si/SiO₂薄膜,在700~900 °C氮气气氛下快速降温获得硅颗粒;在薄膜的成核生长过程中控制纳米结构的形成,薄膜沉积条件的控制和在溅射过程中采用高溅射气压、低溅射功率特别重要,这样易得到纳米结构的薄膜。

2.4.3 低能团簇束沉积法(LEBCD)制备

该纳米薄膜技术也是新近出现的,由Paillard等人于1994年初发展起来。首先将所要沉积的材料激发成原子状态,以氩气、氦气作为载体使之形成团簇,同时采用电子束使团簇离化,然后利用飞行时间质谱仪进行分离,从而控制一定质量、一定能量的团簇束沉积而形成薄膜。该法可有效地控制沉积在衬底上的原子数目。

2.4.4 压淬法制备纳米晶体

这一技术是中科院金属所姚斌等人于1994年初实现的,他们用该技术制备出了块状Pd-Si-Cu和Cu-Ti等纳米晶合金。压淬法就是利用在结晶过程中由压力控制晶体的成核速率、抑制晶体生长过程,通过对熔融合金保压急冷(压力下淬火,简称“压淬”)来直接制备块状纳米晶体,并通过调整压力来控制晶粒的尺寸。

目前,压淬法主要用于制备纳米晶合金。与其他纳米晶制备方法相比,它有以下优点:直接制得纳米晶,不需要先形成非晶或纳米晶粒;能制得大块致密的纳米晶;界面清洁且结合好;晶粒度分布较均匀。

2.4.5 脉冲电流非晶晶化法制备纳米晶体

这种方法是由东北大学滕功清等人于1993年发展起来的。他们用该法制备了纳米晶Fe-Si-B合金。这一方法是通过对非晶合金(非晶条带)采用高密度脉冲电流处理使之晶化。与其他晶化法相比,它无需采用高温退火处理,而是通过调整脉冲电流参数来控制晶体的成核和长大,以形成纳米晶,而且由脉冲电流所产生的试样温度远低于非晶合金的晶化温度。

3 非晶纳米晶软磁合金的应用和发展趋势

3.1 非晶纳米晶软磁合金的应用^[23~26]

目前非晶纳米晶软磁合金主要应用于大功率电

源变压器、开关电源中的变压器、扼流圈、平波电抗以及漏电开关铁芯等。

3.1.1 精密电流互感器

随着电力工业的迅速发展,高电压输电线路日趋增多,因而对电流互感器的需求量剧增,且随着电流互感器要求准确度达 0.2 级以上和仪表保安系数 $F_s \geq 5$,以往的硅钢已无能为力,只有高磁导率的坡莫合金和纳米晶合金才能满足要求。由于铁基非晶纳米晶合金价格只有坡莫合金的 40%~50%,显然铁基非晶纳米晶软磁合金是用作电流互感器铁芯的首选材料。上海钢铁研究所和相关协作单位每年要加工百吨以上铁基非晶纳米晶合金带材,研制成几十种规格的铁芯,应用在 3.5、110、220 和 500 kV 高压供电线路中,产生了良好的经济和社会效益。

3.1.2 大功率开关电源变压器

高频大功率开关电源变压器是铁基非晶纳米晶合金应用的独特领域,其工作频率为 20~50 kHz,输出功率在 10 kW 以上,效率在 90%以上。高频大功率开关电源变压器还要求体积小,温升低。因而其铁芯必须具备下列要求:(1)高饱和磁感强度,(2)高磁导率,(3)高频损耗低。铁基非晶纳米晶合金材料正好具备这些条件,深受用户重视。上海钢铁研究所研制的大功率通讯电源变压器铁芯在深圳某公司获得成功应用,并且还研制出大功率高频变压器铁芯、高频淬火设备电源变压器铁芯和大功率逆变焊机用电源变压器铁芯。北京钢铁研究总院已开发出系列逆变焊机用电源铁芯供用户使用,功率为 2~25 kW(20 kHz)。

3.1.3 开关电源

随着开关电源向小型化、低噪音、高速反应和高可靠性发展,开关电源的频率也在不断提高,开关电源中使用的磁性器件较多,常用的有主变压器(高频功率变压器)、电流互感器、饱和扼流圈、饱和电抗器、滤波器和尖峰信号抑制器等。选用非晶纳米晶合金材料制作这些磁性器件,既能解决损耗、体积和温升难题,又能降低成本,满足使用要求。除开关电源外,这类铁芯还可用于 AC/DC、逆变电源和脱扣电源的相关磁性器件。

3.1.4 电抗器、滤波器及抗电磁干扰器件

随着电子技术向高频、大功率和电子化方向发展,许多电子设备需要电抗器、滤波器和抗干扰器件来保证其工作质量。由于铁基非晶纳米晶合金所具有的磁性特点,使其制作的电感元件具有抗饱和和能力强、电感量大、品质因素高、温度稳定性好、体积小、高效节能等特点,因而用它制作的磁性器件已日益广泛地应用于卫星通讯设备、精密测控设备、工业

整流设备、各种开关电源、逆变电源和计算机设备等。上海钢铁研究所不仅开发出带材卷绕的 O 型、C 型和环形切口铁芯,而且还研制开发出铁基非晶纳米晶磁粉芯产品,这些磁性器件的有效磁导率 μ_i 从几十到几万,完全可以满足各种场合的需要。

3.1.5 铁基非晶纳米晶合金在高灵敏度场合下的应用

铁基非晶纳米晶合金材料具有高的初始磁导率且性能稳定,特别适合作高灵敏度场合的磁性器件,保证其反应迅速、准确、稳定。上海钢铁研究所首先将铁基非晶纳米晶合金材料成功应用于漏电保护开关和互感器,尤其是高精度漏电保护开关,每年有几十万只铁芯供用户使用。

3.2 非晶纳米晶软磁合金的发展趋势

3.2.1 复合薄膜磁性材料^[18,19]

通常当工作频率在 1 MHz 以上时,软磁合金薄带厚度应小于 5 μm ,非晶晶化法获得的纳米晶合金已难以满足这种需求。国外有学者利用复合材料方法制备磁性薄膜应用于超高频领域。(1)利用磁性膜(FM)和非磁性膜(NM)交替间隔的方法制备多层调制膜。FM 为非晶或纳米晶铁磁性薄膜;NM 为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 AlN 、 Si_3N_4 等陶瓷膜。无论是 FM 还是 NM 均采用镀膜技术,使其厚度为几十纳米。(2)将非晶或纳米晶的金属软磁颗粒弥散镶嵌在高电阻非磁性材料中构成两相组织的纳米颗粒薄膜,这种薄膜最大特点是电阻率高,在 100 MHz 以上的超高频段显示出优良的软磁特性。

3.2.2 非晶纳米晶软磁合金粉末材料^[19,20]

利用非晶纳米晶软磁合金材料的优异磁性能特点,借助于粉末冶金技术制成非晶纳米晶软磁合金粉末复合材料,如非晶纳米晶软磁合金粉末与橡胶等混合制成磁屏蔽材料、吸波材料;粉末冶金方法制成高磁导率($\mu \geq 6.00 \times 10^4 \text{ H/m}$)软磁铁芯材料以及电机铁芯用材料等,这一领域随着纳米技术的研究发展会有良好的应用前景。

随着纳米技术的不断发展,越来越多性能优异的非晶纳米晶软磁材料不断被开发出来。含稀土的铁基、钴基合金,如能有效控制晶粒的大小,就可以制得从软磁到硬磁的系列材料。

非晶纳米晶合金已在漏电保护开关、高频逆变焊电机的应用上形成一定规模,为适应市场需要,国家已把非晶微晶元件作为开发重点,并已解决了几大技术难题:热处理技术和设备、切割技术和设备、元件综合性能自动检测技术和设备等。发展前景令人鼓舞。

参考文献:

- [1] 陈文智. 大块非晶态材料的进展[J]. 金属功能材料, 1997, 4(1): 1 - 6.
- [2] 荣传兵, 徐民, 赵玉华, 等. 具有宽过冷液相区的 $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{8-x}(\text{Cr})_x\text{Nb}_4\text{Zr}_6\text{B}_{30}$ 非晶态合金的热稳定性与磁性[J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2235 - 2239.
- [3] Mchenry M E, Willard M A, Laughlin D E. Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets[J]. Prog Mater Sci, 1999, 44: 291 - 302.
- [4] Hasegawa R. Present status of amorphous soft magnetic alloys[J]. J Magn Magn Mater, 2000, 240: 215 - 216.
- [5] Martin Holmmark, Tkatch V I, Alex G Trishin, et al. Processing and properties of soft magnetic $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ amorphous alloy[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37: 2278 - 2280.
- [6] Tao Zhang, Khisa Z, Inoue. Ti-based amorphous alloys with a large supercooled liquid region[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 304 - 306: 771 - 774.
- [7] Tkatch V I, Grishin A M, Khartsev S I. Delayed nucleation in $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ metallic glass[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 337: 187 - 193.
- [8] 张传历, 李海滨, 韩寒. 用非晶晶化法制备纳米晶材料[J]. 钢铁研究学报, 1994, 6(4): 38 - 42.
- [9] 孙桂琴, 喻晓军. 非晶及纳米晶合金研究进展[J]. 金属功能材料, 1999, 6(4): 156 - 160.
- [10] Takadate K, Kojima A, Makino A. Effect of Nd substitution on the soft magnetic properties of a nanocrystalline $\text{Fe}_{84}\text{Nb}_7\text{B}_9$ alloy[J]. Scripta Mater, 2001, 44: 1401 - 1405.
- [11] 谢克难, 游贤贵. 纳米材料及其制备与应用[J]. 四川有色金属, 1994, 2: 8 - 16.
- [12] Froes F H, Senkov O N, Baburaj E F G. Synthesis of nanocrystalline materials—an overview[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 301: 44 - 53.
- [13] 李凡, 吴本尧. 机械合金化—新型的固态合金化方法[J]. 机械工程材料, 1999, 8: 22 - 25.
- [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): 1 - 21.
- [15] Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta Mater, 2000, 48: 279 - 306.
- [16] Yizhou Zhou, Qingsheng Zhang, Guanhu He, et al. Connection of bulk amorphous alloy $\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5\text{Cu}_{30}$ by high current density electropulsing[J]. Materials Letters, 2003, 57: 2208 - 2211.
- [17] Scott M G, LuBorsky F E. Amorphous metallic alloys[M]. London: Butterworth, 1988. 144.
- [18] Lu K, Banerjee S, Ramanujan R V. Advances in physical metallurgy[M]. New York: Gordon and Breach, 1995. 135.
- [19] 蒲健, 肖建中. 金属功能材料的几个最新发展动向[J]. 金属功能材料, 2001, 3(增刊): 11 - 15.
- [20] Zuetzel D, Rieger G, Wecker J, et al. Nanocrystalline soft magnetic composite cores with ideal orientation of the powder-flakes[J]. J Magn Mater, 1999, 196 - 197: 327 - 329.
- [21] 王一和, 杨膺善. 非晶态合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [22] 严东生. 纳米材料的制备[J]. 无机材料学报, 1995, 10(1): 1 - 6.
- [23] Jiles D C. Recent advances and future directions in magnetic materials[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 5907 - 5939.
- [24] 纪松, 钱坤明, 谭锁奎. 非晶纳米晶软磁合金的性能与应用现状[J]. 机电工程, 2001, 18(增刊): 17 - 21.
- [25] 王峭东, 张浴. 纳米晶软磁材料在电流互感器铁芯中的应用研究[J]. 金属材料研究, 1997, 23(4): 7 - 9.
- [26] 李耀天. 纳米晶软磁合金研究发展近况[J]. 金属功能材料, 1995, (6): 217 - 221.

(上接第 52 页)

(2) 通过对 3 种产品的 FTIR 图谱和 SEM 图分析表明, 本实验合成 PAM 的结构与其他两种 PAM 结构存在差异, 可能是其速溶的一个重要原因。

(3) 初步研究了 PAM 对两种废水的悬浮物和 COD 的处理条件。在对两种废水的悬浮物去除实验中, 本实验合成 PAM 对悬浮物的去除率分别达到 86.60% 和 97.48%, 处理效果接近或优于其他两种产品。但是, 3 种产品对两种废水中 COD 的去除率都不理想。在炼铁厂废水处理中, 本实验合成的 PAM 能代替法国 PAM 作为絮凝剂。其他影响 PAM 应用的因素有待进一步研究。

注: 本项研究工作得到武汉钢铁集团公司立项支持(2003030)。

参考文献:

- [1] Hoar J P, Schulman J H. Transparent water-in-oil dispersion: the oleophilic hydro-micelle[J]. Nature, 1943, 152: 102 - 103.
- [2] Schulman J H, Stoeckenius W, Prince L M. Mechanism and structure of micro emulsions by electron microscopy[J]. J Phys Chem, 1959, 63: 1677.
- [3] Candau F, Leong Y S, Puyet G, et al. Inverse microemulsion polymerization of acrylamide: characterization of the water-in-oil microemulsion and the final microlatexes[J]. J Colloid Interface Sci, 1984, 101: 167.
- [4] Candau F, Leong Y S. Kinetic study of the polymerization of acrylamide in inverse microemulsion[J]. J Polym Sci Polym Chem Ed, 1985, 23: 193.
- [5] 李文兵, 王光华, 李蕾. 聚丙烯酰胺的反相微乳液聚合研究[J]. 武汉化工学院学报, 2003, 3(25): 28 - 29.
- [6] 哈润华, 侯斯建, 王德松. 高单体浓度下反相微乳液聚合[J]. 高分子学报, 1995, (6): 745.
- [7] GB17514—1998. 水处理剂 聚丙烯酰胺[S].
- [8] 严瑞. 水溶性高分子[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [9] 鞍山焦耐院化分室. 中小型焦化厂分析检验方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [10] 周本省. 工业水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.