

Fe 基块体非晶合金制备工艺的研究概况

李剑斌¹, 李宏伟², 马林³, 陶聪¹, 李宁¹

(1. 陆军工程大学, 江苏南京 210007; 2. 空军勤务学院, 江苏徐州 221000;
3. 中国人民解放军72855部队, 山东青岛 266500)

摘要: Fe基块体非晶合金由于具有优良的性能且铁资源丰富, 成本较低, 因此得到了研究者的广泛关注。然而, Fe基块体较差的非晶形成能力阻碍了其走向工业化生产及商业化应用。本文归纳了目前Fe基块体非晶合金在制备工艺方面的研究进展, 详细阐述了各制备工艺的原理、优缺点以及当前制备Fe基块体非晶合金的情况, 期望为制备Fe基块体非晶合金提供一些参考。

关键词: Fe基块体非晶合金; 制备工艺; 研究进展

在众多非晶合金中, Fe基非晶合金由于在力学性能、磁学性能和耐蚀性能等方面具备显著的优势, 展现出广阔的应用前景和良好的商业价值, 因此得到了国内外学者的广泛关注, 成为现代材料学的研究热点。然而, 与Mg基、La基、Zr基、Pb基等非晶合金相比, Fe基非晶合金在成形方面较差, 非晶形成能力较低^[1-2], 通常需要高达 $10^5 \sim 10^6$ K/s^[3]冷却速率才可以形成非晶态合金, 因此, Fe基非晶合金出现较晚, 其尺寸一般有限, 大多情况下其厚度为不超过15 μ m的丝状或薄带状^[1], 这大大限制了Fe基非晶合金的应用领域。因此, 提高Fe基非晶合金的尺寸, 对于拓宽Fe基非晶合金的应用具有重要意义, 而提高尺寸的关键途径之一是制备工艺的研究。

从非晶合金的研究报道来看, 20世纪60年代人们就开始对大尺寸非晶合金进行探索, 形成了固态合金化法、固态转变法、直接快速凝固法和粉末冶金法等制备工艺。由于固态合金化法、固态转变法等方法制备大尺寸非晶合金时, 对合金的组分以及合金的非晶形成能力要求较高, 因此制备的非晶合金种类比较有限, 一般只能制备具有较高非晶形成能力的Zr基、Pb基等非晶合金。由于Fe元素非晶形成能力一般, 最先开始采用的制备方法是液相急冷法, 即合金熔化后急剧冷却形成的。因此, 制备时对冷却速率的要求很高, 需要较高的冷却速率, 这限制了Fe基非晶合金的尺寸。随着学者们在Fe基非晶合金形成能力方面的研究, 开发出一系列具有较强非晶形成能力的Fe基非晶合金, 这突破了传统的只依靠高冷却速率的制备工艺, 一些新的制备工艺不断被开发出来。这些新的制备工艺不需要高冷却速率, 通常在冷却速率为0.1~100 K/s的条件下便可以得到大尺寸Fe基块体非晶合金^[4]。目前, Fe基块体非晶合金的制备工艺主要有直接快速凝固法和粉末冶金法两大类^[5]。本文归纳了目前Fe基块体非晶合金的各种制备工艺, 并介绍了各制备工艺的研究情况, 希望能够为Fe基块体非晶合金的研究提供一些指导。

1 直接快速凝固法

直接快速凝固法是指合金熔体在一定的冷却速率下, 直接冷却形成块体非晶合金。具体方法主要有: 铜模铸造法、水淬法、喷铸-吸铸法、电弧熔炼吸铸法、定向凝固法和高压铸造法等。

作者简介:

李剑斌(1990-), 男, 博士, 主要从事铁基非晶合金方面的研究。E-mail: lijianbin0416@163.com

通讯作者:

李宁, 男, 讲师。E-mail: wodewendang007@126.com

中图分类号: TG139+.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)10-1087-07

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(51541112)。

收稿日期:

2019-06-20 收到初稿,

2019-07-22 收到修订稿。

1.1 铜模铸造法

铜模铸造法是目前制备块体非晶合金使用最多的方法。如图1所示,将母合金通过感应电源加热,使其在石英管内实现熔融状态,然后在氩气的保护下,将熔化的合金液注入要求的铜模中。由于铜模具有导热快的优点,能够将熔体快速冷却,利用这一特点,制备出块体非晶合金。为使熔体能够在较短的时间内快速冷却,铜模体积要保证足够的大。铜模铸造法的优点是操作简单,可以制备出各种形状的致密的块体非晶合金,缺点是采用铜模冷却时,其冷却速度有限,冷却速度约为 $10\sim 10^3$ K/s,因此对于制备的块体非晶合金的尺寸通常也不是很大^[6],难以实现大规模和工业化生产,一般多数用于实验室研究。Lu等人^[7]用铜模铸造法制备出直径为5 mm的棒状 $\text{Fe}_{61}\text{Y}_2\text{Zr}_8\text{Co}_6\text{Al}_1\text{Mo}_7\text{B}_{15}$ 块体非晶合金,研究发现该非晶合金的非晶形成能力较强,热稳定性良好,给铁基非晶合金的可加工性提供了可能。李海娃等人^[8]采用该方法在制备出了直径为5 mm的 $\text{Fe}_{48-x}\text{Ni}_x\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ ($x=1, 3$)和7 mm的 $\text{Fe}_{46}\text{Ni}_2\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 的块状非晶合金,并研究了该合金的组织结构及力学性能。杨长林等人^[9]采用该方法制备出直径为3 mm的 $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$ 非晶合金棒,同时研究发现铜模冷却有效降低了 Fe_3B 相的形成,提高了合金熔体的成核速度,抑制了晶粒长大。

1.2 水淬法

如图2所示,水淬法制备块体非晶合金,是将母合金放入石英管中,然后将管内抽成高真空并密封,母合金在高频或中频感应装置下被熔化,随后将盛有熔体的石英管快速淬入流动的水中以实现熔体的快速冷却,从而形成块体非晶合金。水淬法通常与熔剂包敷法结合使用。常用的包敷剂为 B_2O_3 ,它既可以吸附熔体内存在的杂质,又可以隔离合金熔体,避免熔体与冷却器壁直接接触而产生非均匀形核,从而尽可能地降低均质形核的速率,达到提高合金非晶形成能力的目的。水淬法的冷却速度一般可以达到 $10^2\sim 10^3$ K/s,制备过程也可以直接在密闭的保护气氛下进行,不用将合金液放入密封的石英管内。水淬法的优点是制备设备简单,制备工艺便于操作。但其缺点是合金在石英管内加热过程中石英管和合金可能发生反应,造成合金液的污染,污染物既可能会影响合金的冷却速度,又会造成非均匀形核的产生,从而不利于大块非晶合金的形成。因此,水淬法制备块体非晶合金对合金的种类有一定的要求,一般要求合金系具有较大的非晶形成能力,且该合金不会跟石英玻璃发生反应。如Mg-、Cu-、Y-非晶合金就不能用这种方法。由于水的比热比铜的高,导热性又比铜的低,因此,水淬法的冷却效率比铜模的冷却效率要差。姚可夫等人^[10]采

用水淬法,制备出具有大压缩塑性的尺寸达到1.6 mm的 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ 块体非晶合金,其具体措施是利用玻璃包覆无水 B_2O_3 作为净化剂对熔化的合金进行提纯、钝化。张继君^[11]采用水淬法,结合熔剂包敷技术,制备出尺寸达到1.7 mm的 Fe_{76}P_5 ($\text{B}_{0.5}\text{Si}_{0.3}\text{C}_{0.2}$)₁₉块体非晶态合金,研究发现该非晶合金具有优异的力学性能及磁性能。

1.3 喷铸-吸铸法

喷铸-吸铸法制备块体非晶合金主要是根据铜模导热性好和高压水流散热性好的特点,同时吸取了吸铸和压铸的优点。如图3所示,喷铸-吸铸法制备块体非晶合金时,要先将母合金置于坩埚内,坩埚底端有一个

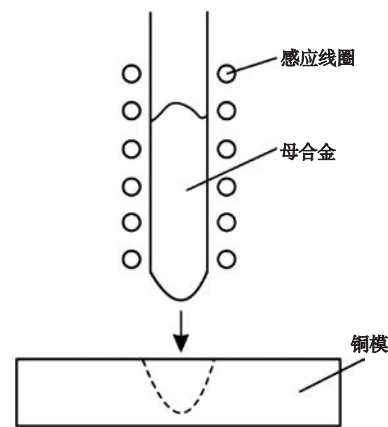


图1 铜模铸造法装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of copper mold casting method

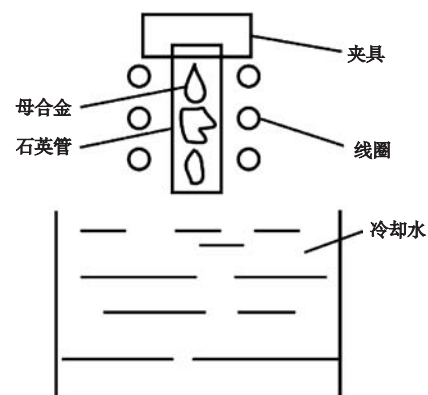


图2 水淬法工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of water quenching

小孔,便于母合金熔化后从坩埚内流出。熔化的合金流入置于坩埚下面的铜模内,铜模与真空系统相连,制备时整个装置保证处于真空系统中。坩埚中的母合金通过高频或中频感应装置被加热熔化,坩埚上端通入压力为 P_1 的惰性气体,铜模底端与真空相连形成负压 P_0 ,因此合金熔体在压力差 $\Delta P=P_1+P_0$ 的作用下,被注入铜模中,熔体在铜模中受到高压水流的影响被快速冷却形成块体非晶合金^[12]。喷铸-吸铸法制备块体非晶合金的优点是设备比较简单、制备过程比较方便,特别适合制备熔点较高且非晶形成能力较强的块体非晶合金,而且由于该方法兼顾了铜模导热性好和高压水流散热性好的优点,因此可以制备出尺寸较大的块体非晶合金。但是该方法制备非晶合金时,要保证合金在石英管内加热过程中石英管不与合金发生反应。J. Hosko等人^[13]采用喷铸-吸铸法制备出直径达到5 mm的棒状 $\text{Co}_{47}\text{Fe}_{20.9}\text{B}_{21.2}\text{Si}_{4.6}\text{Nb}_{6.3}$ 非晶合金和直径为4 mm的棒状 $[\text{Co}_{47}\text{Fe}_{20.9}\text{B}_{21.2}\text{Si}_{4.6}\text{Nb}_{6.3}]_{98}\text{Ga}_2$ 非晶合金,同时研究了该非晶合金的结构、热稳定性以及磁性能。

1.4 电弧熔炼吸铸法

电弧熔炼吸铸法是一种短流程制备块体非晶合金的方法,其主要装置包括熔化合金的铜盘和冷凝熔体的水冷铜模,铜盘置于铜模上端,铜模内保持负压状态。将铜盘中的母合金利用电弧熔化,熔化的合金液在吸铸负压的作用下被迅速注入到水冷铜模中,被快速冷却形成块体非晶合金,整个过程在封闭的氩气保护气氛中进行^[14]。该方法的优点是整个制备过程都没有外界污染,铜模冷却速率较高,制备效率较高。但合金容易在水冷铜模底部发生非均匀形核,难以制备出完整的非晶块体,而且电弧熔化合金的能力不高,难以制备出大尺寸块体非晶合金,一般适用于实验室研究。李宏祥等人^[15]采用该方法制备出直径为2 mm的 $\text{Fe}_{71.2-x}\text{C}_{7.0}\text{Si}_{3.3}\text{B}_{5.5}\text{P}_{8.7}\text{Cr}_{2.3}\text{Al}_{2.0}\text{Mo}_x$ ($x=0\sim 6.5$)柱体非晶合金,并研究了该非晶合金的耐腐蚀性。研究表明,由于该合金中含有Mo元素,阻碍了样品表面形成的钝化膜的溶解,因此其耐腐蚀性优于普通的SUS304不锈钢;黄钧声等人^[16]通过该方法制备出直径为2 mm的 $\text{Fe}_{61}\text{Co}_{10}\text{Zr}_5\text{W}_4\text{B}_{20}$ 、 $\text{Fe}_{63}\text{Co}_{10}\text{Zr}_5\text{W}_2\text{B}_{20}$ 和 $\text{Fe}_{63}\text{Co}_{10}\text{Zr}_5\text{W}_4\text{B}_{18}$ 三种块体非晶合金,并将制备的三种样品的组织结构及热稳定性进行了研究,同时分析了它们的非晶形成能力。陈庆军等人^[17]采用该方法制备出直径为4 mm的 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{Y}_2\text{C}_{15}\text{B}_6$ 块体非晶合金,并在高温环境下,对该合金进行了压缩变形试验,以研究高温形变对其非晶结构和热稳定性的影响。王善林等人^[18]采用该方法将工业原材料制备出直径达到7 mm的铁基大块非晶合金,研究发现析出该合金的硫化物粒子不能降低其非晶形成能力。

1.5 高压铸造法

如图4所示,高压铸造法制备块体非晶合金时,通过高频感应线圈将置于缸套内的母合金加热至熔融状态,合金熔化后,通过水压推动缸内活塞,将熔体快速推入到水冷铜模中,熔体被迅速冷却形成块状非晶合金,整个制备过程要保证有惰性气体的保护^[19]。该

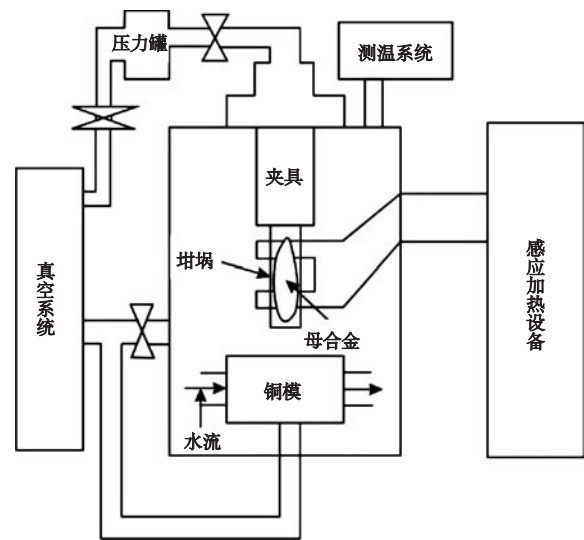


图3 喷铸-吸铸法设备简图

Fig. 3 Equipment diagram of spray casting-suction casting

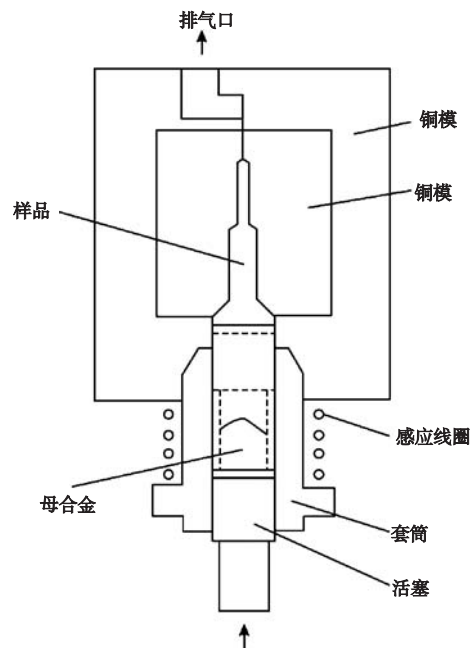


图4 高压铸造法装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high pressure casting method

方法的优点是熔体在冷却时受到一定压力的条件下,能够减少因凝固收缩引起的疏松等铸造缺陷,因此制备块体非晶合金的尺寸相对较大。耿岩等人^[20]通过改变Er元素的含量,采用该方法制备出一系列不同直径的 $(\text{Fe}_{72}\text{B}_{24}\text{Nb}_4)_{100-x}\text{Er}_x$ ($x=3.0、4.0、4.5、5.0、6.0、7.0$)块状非晶合金。研究表明改变Er的含量可以改变该非晶合金系的非晶形成能力,其中直径为5 mm的 $(\text{Fe}_{72}\text{B}_{24}\text{Nb}_4)_{95}\text{Er}_5$ 块状非晶具有良好的热稳定性和较强的抗晶化能力。陈勇等人^[21]采用该方法制备出截面为3 mm × 3 mm的 $\text{Fe}_{41}\text{Co}_7\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 合金棒,并将Co离子注入到制备的铁基块体非晶合金中,对该合金的耐摩擦磨损性能进行了表征。

2 粉末冶金法

粉末冶金法是根据制备需要,将非晶粉末填入一定形状的模具中,通过一定的烧结和压实工艺,制备出具有高致密度的块体非晶合金^[22]。其制备原理主要是利用非晶粉末在过冷液相区 ΔT_x 内具有超塑性和低粘度特性,粉末在一定压力和温度的作用下会发生均匀流变,从而形成高致密度的块体非晶合金。粉末冶金法与传统快速凝固法在制备工艺上有所不同,直接快速凝固法制备块体非晶合金一般对合金的非晶形成能力要求较高,而粉末冶金法可以打破这一限制,不必过于考虑合金的非晶形成能力。虽然直接快速凝固法将非晶合金的尺寸提升到一定高度,但距离实际应用还有一定的距离,粉末冶金法可以在尺寸、形状方面有所突破,制备出满足实际应用的块体非晶合金^[23]。具体方法主要有:热等静压成形法、挤压固结成形法、超高压固结成形法、爆炸成形法、粉体轧制法和放电等离子烧结法等^[24]。

2.1 热等静压成形法

热等静压成形法是将粉末置于真空密封的模具中,利用非晶粉末在过冷液相区 ΔT_x 内具有优异的超塑性,对粉末施加一定的压力后,粉末迅速弥合形成块体非晶合金^[25]。但是这项技术还存在一些不足,它对非晶粉末具有一定的要求,粉末需要具有较宽的 ΔT_x ,较大的初始晶化温度 T_x ,同时要求非晶粉末具有较高的纯度,以减少在制备过程中产生非均质形核,而且制备过程的工艺参数等诸多问题还需进一步研究。另外,热等静压成形技术制备块体非晶材料时,会使材料非晶特性受到一定的损害,因此合金的力学性能较差。Li等人^[26]采用此方法将具有较宽 ΔT_x 且部分重叠的 $\text{Zr}_{52.5}\text{Cu}_{17.9}\text{Ni}_{14.6}\text{Al}_{10}\text{Ti}_5$ 和 $(\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6)_{95.5}\text{Ga}_{4.5}$ 非晶合金粉末,制备出双非晶相的块体非晶合金。分析发现,该合金的相对致密度超过99%,而且含质量分数为

50%的铁基非晶合金,其软磁性能与100%铁基非晶合金相当。

2.2 挤压固结成形法

挤压固结成形法是将非晶粉体在低于合金晶化温度下,直接挤压成块体合金。利用此技术制备的块体非晶合金具有强度、硬度高的优点,而且对合金的非晶形成能力没有要求,但采用此方法制备的非晶合金普遍存在塑性低的特点,且抗拉强度不如快速凝固法制备的块体非晶合金。Sort J等人^[27]利用此方法成功制备出具有优异软磁性能,直径为9 mm、厚度为0.3 mm的 $\text{Fe}_{77}\text{Al}_{2.14}\text{Ga}_{0.86}\text{P}_{8.4}\text{C}_5\text{B}_4\text{Si}_{2.6}$ 柱体非晶合金。研究表明,该非晶合金具有优异的软磁性能,与非晶粉末相比,制备的非晶合金的显微硬度更高,这主要是因为非晶粉末在挤压过程中产生不可逆的化学短程序以及少量的晶态相。

2.3 超高压固结成形法

超高压固结成形法制备块体非晶合金的原理是非晶粉末在极高的压力下,其初始晶化温度 T_x 会升高,其过冷液相区 ΔT_x 会增宽,这样非晶粉末不易发生晶化,而且随着温度区间的增宽非晶粉末的粘滞流变性会变强,从而在超高压作用下非晶粉末被固结成致密的块体非晶合金。此方法解决了冷液相区 ΔT_x 较小的非晶粉末不易形成块体非晶合金的问题,可以将过冷液相区 ΔT_x 较小的非晶粉末制备成块体非晶合金。Drozd D等人^[28]在压力为7.7 GPa、温度为520 °C的条件下采用该方法制备出 $\text{Fe}_{91.9}\text{C}_{3.2}\text{B}_2\text{Si}_{1.7}\text{Mn}_{0.8}\text{P}_{0.2}\text{Cu}_{0.1}\text{S}_{0.1}$ 大块非晶合金,合金的维氏硬度HV高达1 400;当固结温度进一步升高后,该非晶合金的基体上产生出部分纳米晶晶体相,起到了第二相强化作用,使其HV提高至1 862。Lu W等人^[29]在压力为5.5 GPa的条件下,对 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 非晶粉末成形3 min,制备出密度达理论密度的97.8%,饱和磁感应强度为1.08 T的块体非晶与纳米晶合金。

2.4 爆炸成形法

爆炸成形法是将炸药爆炸时产生的瞬时爆轰能量加载于非晶粉末上,使粉末之间发生烧结而形成致密块体。由于爆炸的瞬时性,在瞬态载荷作用下,粉末颗粒产生快速的相对运动进而颗粒之间产生摩擦,使能量快速沉积在颗粒表面,导致粒子表面温度升高最终熔化,其熔化层厚度仅约0.5 μm,这相对于粉末颗粒的直径而言较小,而颗粒内部则仍保持着低温状态,这对于颗粒之间形成的“烧结”界面将起到冷却“淬火”作用^[30-32]。显然,该机制既可防止常规非晶合金制备方法因冷却速率过慢所造成的晶粒粗化,

确保亚稳态非晶合金的优异特性，同时又能对不同粉末组合进行合成，不必考虑组合粉末相之间的相互作用^[33]。爆炸成形技术具有烧结时间短、作用压力大（可达100 GPa）、热影响区域小、不易晶化等优点，但由于爆炸技术本身的影响，很难使粉体颗粒达到全致密，且成形可控性差，生产效率低。如图5所示^[33]，陆明等人^[34]利用此方法成功制备出密度达理论密度98.7%的，直径为8.8 mm的 $\text{Fe}_{61}\text{Cr}_2\text{Nb}_3\text{Si}_{12}\text{B}_{22}$ 棒状非晶合金，该合金试样在保持非晶态结构的同时还具有良好的力学性能。

2.5 放电等离子烧结法

放电等离子烧结法（SPS）的原理是将通-断的直流脉冲电流作用于施加一定压力的非晶粉末，粉末通过火花放电产生的等离子体被不断加热，经过放电活化、热塑变形和冷却后，制备出块体非晶合金^[35-36]。该方法的优点是能够在短时间内快速升温将粉末颗粒烧结，且能够快速冷却。通过该方法可以获得致密度高、强度高、塑性好和软磁性能优异的块体非晶材料，因此放电等离子烧结法将成为一种很有前景的块体非晶合金制备方法。Shen B L 等人^[37]利用该方法制备出直径为20 mm、厚度为5 mm的具有优异软磁性能的 $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{10}\text{Ga}_5\text{P}_{12}\text{C}_4\text{B}_4$ 大块非晶合金，该合金的密度达到理论密度的99.7%。张涛等人^[38]利用该方法制备出 $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{9.5}\text{Nd}_3\text{Dy}_{0.5}\text{B}_{20}$ 大块非晶合金，而且通过改变粉末颗粒的大小，对试样的性能进行了研究。陈非非等人^[39]利用SPS技术制备出尺寸为14 mm × 6 mm × 2 mm的 $\text{Fe}_{74}\text{Al}_4\text{Sn}_2$ (PSiBC)₂₀块体非晶合金磁粉芯，并测试了该试样的磁性能，发现该试样具有良好的抗直流偏流性能和较高的磁导率。较低的价格、较好的成形性和良好的软磁性能使该铁基块体非晶合金磁粉芯具有良好的应用前景。王兴华等人^[40]利用该技术在不同的烧结温度下将非晶合金粉末制备成尺寸为 $\Phi 20$ mm × 7 mm的 $\text{Fe}_{75}\text{Zr}_3\text{Si}_{13}\text{B}_9$ 块体非晶纳米晶合金，同时分析了该试样的组织结构、热稳定性、力学性能及软磁性能。研究发现，该试样的致密度良好，且随着烧结温度的升高，试样的力学性能及软磁性能不断提高。最后在烧结压力为500 MPa，烧结温度为863.15 K的条件下，制备出的块体非晶纳米晶合金各方面性能最优。

3 结束语

综合研究目前Fe基块体非晶合金的制备工艺，其

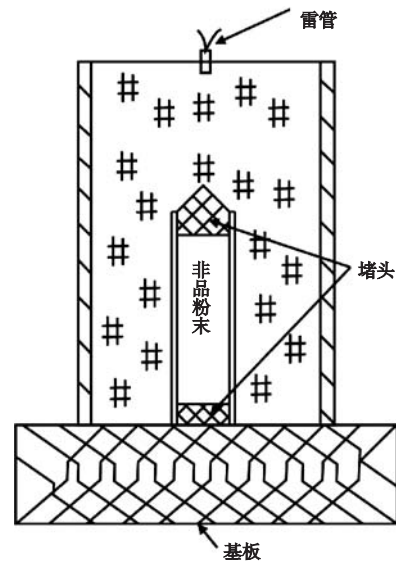


图5 爆炸成形装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the explosive forming device

各有优势，但也存在不同程度的局限性。铜模铸造法和水淬法是实验室研究中常用的方法，因为冷却速率有限，对合金的非晶形成能力要求较高，因此，制备的合金尺寸相对有限。喷铸-吸铸法、电弧熔炼吸铸法和高压铸造法制备Fe基非晶合金时，都使合金熔体在一定压力的条件下，因此可以制备出较大尺寸的块体非晶合金。与快速凝固法相比，目前采用粉末冶金法制备Fe基块体非晶合金则相对较少，其中，爆炸成形技术可以不必考虑合金的非晶形成能力以及合金之间的相互作用，但是受到爆炸技术的影响，存在一定的不可控因素，因此需要进一步的研究。放电等离子烧结技术相较于其他制备工艺，由于制备原理的特点，其优势较明显，将成为一种很有前景的制备工艺。

材料的发展与其制备工艺息息相关，而材料能否得到大规模商业化应用又很大程度上依赖于其工业化制备技术是否成熟和规范。因此，研究Fe基块体非晶合金制备工艺是突破其工业化生产以及大规模商业化应用的关键。Fe基块体非晶合金的制备工艺要求比较苛刻，如何在普通环境下制备出Fe基块体非晶合金是目前研究人员面临的一个重要课题。同时，在现有研究的基础上，开发出新的Fe基块体非晶合金制备工艺、设备，降低生产成本以及对原料纯度的要求，从而实现Fe基块体非晶合金工业化生产以及大规模商业化应用，是将来努力研究的一个方向。

参考文献:

- [1] YANG W, LIU H, FAN X, et al. Enhanced glass forming ability of Fe-based amorphous alloys with minor Cu addition [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, 419: 65–68.
- [2] 朱满, 陶鹏, 法阳, 等. $Fe_{52-x}Co_{14}Nb_4Mo_3Ni_3B_{22}Cr_x$ 多元块体非晶合金的热学和软磁性能 [J]. *铸造*, 2018, 67 (10): 918–921.
- [3] SURYANARAYANA C, INOUE A. Iron-based bulk metallic glasses [J]. *International Materials Reviews*, 2013, 58 (3): 131–166.
- [4] GAO Y L, SHEN J, SUN J F, et al. Crystallization behavior of ZrAlNiCu bulk metallic glass with wide supercooled liquid region [J]. *Materials Letters*, 2003, 57 (13–14): 1894–1898.
- [5] 张中武, 陈国良, 陈光. 机械合金化粉末冶金制备块体非晶材料 [J]. *金属热处理*, 2005, 30 (10): 22–27.
- [6] TAKAGI M, KAWAMURA Y, SAKA H, et al. Effect of preparation technique and atmosphere on the mechanical properties of bulk amorphous alloy compacts [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1991, 133 (21): 301–306.
- [7] LU Z P, LIU C T, PORTER W D. Role of yttrium in glass formation of Fe-based bulk metallic glasses [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83 (13): 2581–2583.
- [8] 李海娃, 任英磊, 于波, 等. 一种高强度铁基非晶合金 [J]. *铸造*, 2007, 56 (6): 578–580.
- [9] YANG C L, SHENG G, Chen G Y, et al. Preparation of a bulk $Fe_{83}B_{17}$ Soft magnetic alloy by undercooling and copper-mold casting methods [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 346: 44–47.
- [10] YAO K F, ZHANG C Q. Fe-based bulk metallic glass with high plasticity [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (6): 061901-061901-3.
- [11] 张继君. 制备方法及冷速对铁基非晶态合金性能的影响 [D]. 新疆: 新疆大学, 2015.
- [12] INOUE A, NAKAMURA T, SUHITE T, et al. Bulk La-Al-TM (TM=Transition-metal) amorphous-alloy with high-tensile strength produced by a high-pressure die-casting method [J]. *Mater. Trans.*, 1993, 34 (4): 351–358.
- [13] HOSKO J, JANOTOVA I, SVEC P, et al. Preparation of thin ribbon and bulk glassy alloys in CoFeBSiNb (Ga) using planar flow casting and suction casting methods [J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2012, 358 (S12-13): 1545–1549.
- [14] AMIYA K, NISHIYAMA N, INOUE A, et al. Mechanical strength and thermal stability of Ti-based amorphous alloys with large glass-forming ability [J]. *Materials Science & Engineering A*, 1994, 179-180 (94): 692–696.
- [15] 李宏祥, 许风光, 王善林, 等. Mo对铁基块体非晶合金 $Fe_{71.2-x}C_{7.0}Si_{3.3}B_{5.3}P_{8.7}Cr_{2.3}Al_{2.0}Mo_x$ 腐蚀性能的影响 [J]. *铸造*, 2010 (2): 145–148.
- [16] 黄钧声, 杨元政, 王池林, 等. Fe-Co-Zr-W-B块状非晶合金热稳定性的研究 [J]. *铸造*, 2006 (9): 898–900.
- [17] 陈庆军, 张少伟, 高霁雯. 高温形变对FeCoCrMoYCB块体非晶结构和热稳定性的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2016 (7): 6–11.
- [18] 王善林, 成京昌, 李承勋, 等. 大块铁基非晶中硫化物析出行为研究 [J]. *铸造*, 2013, 62 (6): 491–495.
- [19] INOUE A, NISHIYAMA N, KIM S G, et al. Fabrication and mechanical properties of Mg-Zn-La amorphous alloys containing nanoscale hcp-Mg Particles [J]. *Materials Transactions, JIM*, 1992, 33 (4): 360–365.
- [20] 耿岩, 苏亚坤, 张海峰, 等. Fe-B-Nb-Er块状非晶合金的形成能力及热稳定性研究 [J]. *材料与冶金学报*, 2013, 12 (4): 257–279.
- [21] 陈勇, 黄东亚, 于芳, 等. 钴离子注入对Fe基非晶合金摩擦磨损行为的影响 [J]. *金属热处理*, 2009, 34 (2): 10–13.
- [22] SILVA A, LOZANO J A, MACHADO R, et al. Study of soft magnetic iron cobalt based alloys processed by powder injection molding [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, 320 (14): 393–396.
- [23] TAGHVAEI A H, STOICA M, MAZALEYRAT F, et al. Microstructure and magnetic properties of soft magnetic composites based on silicon resin coated Co40Fe22Ta8B30 glassy powders [J]. *Intermetallics*, 2013, 43 (12): 1–7.
- [24] 唐翠勇, 肖志瑜, 陈进, 等. 粉末冶金制备大块非晶合金研究进展 [J]. *材料导报*, 2010, 24 (1): 93–97.
- [25] BUI Q H, PHAM X T. Modeling of microstructure effects on the mechanical behavior of ultrafine-grained nickels processed by hot isostatic pressing [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53 (10): 812–826.
- [26] LI F, ZHANG T, GUAN S, et al. A novel dual-amorphous-phased bulk metallic glass with soft magnetic properties [J]. *Materials Letters*, 2005, 59 (11): 1453–1457.
- [27] SORT J, ILE D C, ZHILYAEV A P, et al. Cold-consolidation of ball-milled Fe-based amorphous ribbons by high pressure torsion [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50 (9): 1221–1225.
- [28] DROZDZ D, LATUCH J, KULIK T. Bulk amorphous cast iron with small boron addition produced by powder compaction at high pressure [J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2005, 395: 59–65.
- [29] LU W, YAN B, TANG R J. Bulk metglas, finemet and nanoperm soft magnetic alloys prepared by ultra-high-pressure consolidation [J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2006, 425: 406–410.
- [30] WANG B, XIE F, WANG B, et al. Microstructure and properties of the Ti/Al₂O₃/NiCr composites fabricated by explosive compaction/cladding [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, 50: 324–331.
- [31] MAMALIS A G, VOTTEA I N, MANOLAKOS D E. On the modelling of the compaction mechanism of shock compacted powders [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 108 (2): 165–178.
- [32] FARINHA A R, MENDES R, BARANDA J, et al. Behavior of explosive compacted/consolidated of nanometric copper powders [J].

- Journal of Alloys and Compounds, 2009, 483 (1-2): 0-238.
- [33] 王金相, 张晓立, 赵铮, 等. 非晶颗粒增强铝基非晶复合材料的爆炸压实及其力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38 (s1): 48-51.
- [34] LI J, LU M, AI Y, et al. Synthesis of bulk amorphous alloy from Fe-base powders by explosive consolidation [J]. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 2018, 8 (9): 727.
- [35] KIM T S, LEE J K, KIM H J, et al. Consolidation of $\text{Cu}_{54}\text{Ni}_6\text{Zr}_{22}\text{Ti}_{18}$ bulk amorphous alloy powders [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402: 228-233.
- [36] JI W, FU Z Y, WANG W M, et al. Mechanical alloying synthesis and spark plasma sintering consolidation of CoCrFeNiAl high-entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 589: 61-66.
- [37] SHEN B L, INOUE A, KIMURA H, et al. Bulk glassy soft-magnetic cores produced by spark plasma sintering $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{10}\text{Ga}_5\text{P}_{12}\text{C}_4\text{B}_4$ glassy powder [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 375-377: 666-670.
- [38] 张涛, 张兴国, 张伟, 等. 放电等离子烧结铁磁性大块非晶的晶化处理及其磁性研究 [J]. 功能材料, 2007, 38 (2): 238-242.
- [39] 陈非非, 周少雄. 放电等离子烧结法制备 $\text{Fe}_{74}\text{Al}_4\text{Sn}_2$ (PSiBC) 20块体非晶合金磁粉芯 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35 (6): 44-48.
- [40] 王兴华, 王葛, 朱玉英, 等. 放电等离子烧结制备 $\text{Fe}_{75}\text{Zr}_3\text{Si}_{13}\text{B}_9$ 磁性材料 [J]. 中国有色金属学报 (英文版), 2014 (3): 712-717.

An Overview on Preparation Technologies of Fe-Based Bulk Amorphous Alloys

LI Jian-bin¹, LI Hong-wei², MA Lin³, TAO Cong¹, LI Ning¹

(1. Army Engineering University, Nanjing210007, Jiangsu, China; 2. Air Force Logistics University, Xuzhou221000, Jiangsu, China; 3. 72855 Troops of PLA, Qingdao 266500, Shandong, China)

Abstract:

Fe-based bulk amorphous alloys have attracted wide attention of researchers due to their excellent performance and cost advantages. However, poor forming ability and capability hinders their use in a number of engineering applications. This paper makes an overview on the preparation technologies of Fe-based bulk amorphous alloys, and the characteristics, principles, advantages and disadvantages of various preparation processes for Fe-based bulk amorphous alloys are included. It is expected to provide some guidance for the preparation of Fe-based bulk amorphous alloys.

Key words:

Fe-based bulk amorphous alloy; preparation process; research progress