

# 新型聚变堆用超导材料 $Nb_3Al$ 的研究现状

吴欢<sup>1</sup> 毕延芳<sup>1</sup> 吴维越<sup>1</sup> 宋云涛<sup>1</sup> 邓胜涛<sup>2</sup> 李建峰<sup>2</sup> ,  
刘向宏<sup>2</sup> 冯勇<sup>2</sup> 张平祥<sup>2</sup> 周廉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;

2. 西部超导材料科技有限公司, 西安 710018)

**摘要:** 未来聚变堆中等离子体能量密度的提高对超导磁体中导体在高场下的载流能力和抗应变能力提出了更高的要求。和已大规模应用的  $Nb_3Sn$  相比, A15 型金属间化合物  $Nb_3Al$  超导材料在高场下的本征临界电流密度更高, 且具有更优异的抗应变能力。经过近三十年的持续研究,  $Nb_3Al$  的性能得到大幅提高, 已成为新型聚变堆用极具潜力的超导材料, 目前其股线和导体的性能以及制造工艺仍有待进一步的提高和优化。文中将介绍这一新型聚变堆用超导材料的制备和应用研究现状, 以及它带给人们的挑战和机遇, 并展望了我国对  $Nb_3Al$  研究和开发的前景。

**关键词:** 聚变堆; 超导材料;  $Nb_3Al$ ; 制备; 应用

## Research on superconducting material $Nb_3Al$ for application in future thermonuclear reactors

Wu Huan<sup>1</sup> , Bi Yanfang<sup>1</sup> , Wu Weiyue<sup>1</sup> , Song Yuntao<sup>1</sup> , Deng Shengtao<sup>2</sup> , Li Jianfeng<sup>2</sup> ,  
Liu Xianghong<sup>2</sup> , Feng Yong<sup>2</sup> , Zhang Pingxiang<sup>2</sup> , Zhou Lian<sup>2</sup>

(1. Institute of Plasma Physics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China;

2. Western Superconducting Technologies Co. , Ltd. , Xi'an 710018 , China)

**Abstract:** Featuring outstanding intrinsic current - carrying capability in high magnetic field and resistance to strain , A15 - type intermetallic compound superconductor  $Nb_3Al$  has attracted much attention since 1970s. After nearly 30 years continuous efforts to explore its potential , its performance has been improved tremendously , making it promising to be used in future thermonuclear fusion reactors which make a rigorous demand for the superconducting materials. This paper reviewed the research on manufacture of  $Nb_3Al$  and its application in fusion engineering , and explained the challenges and opportunities facing the superconductivity community. The paper was ended with the prospect of research and development of  $Nb_3Al$  in China.

**Keywords:** Thermonuclear fusion reactors , Superconducting materials ,  $Nb_3Al$  , Manufacture , Application

## 1 引言

热核聚变反应堆中等离子体的能量密度正比于环向场磁场强度的四次方, 增大环向场的磁场强度是得到高能量密度的重要途径。目前 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, 国际热核聚变实验堆) 中设计的环向场超导磁体线圈所通电流为 68kA, 经受的最大磁场强度为 11.8T, 用  $Nb_3Sn$  超导材料以先绕制后反应的方式制造。继 ITER 之后的示范堆预计将达到约 2—4GW 的聚变功率, 环向场线圈的最大磁场强度约为 16T, 需要承载 100kA 的工作电流。这就

要求导体在更高的磁场下具有更大的运行电流密度; 同时导体还将承受高磁场和大电流带来的约 160ton/m 的电磁力, 这是 ITER 环向场线圈导体所承受的电磁力大小的两倍; 再加上, 如果采用先绕制后反应工艺制作磁体线圈, 在导体热处理温度和工作温度之间的温差下, 导体材料和导管或结构材料之间不同的热胀系数将导致导体材料的热应变, 因此超导材料在高场下的载流能力和抗应变能力面临严峻的挑战。

目前已大规模商业化应用的超导材料主要是历经了三十多年开发的 NbTi 和  $Nb_3Sn$ , 它们的性能随着超导技术的发展得到逐步的提高。其中延

收稿日期: 2011 - 03 - 29

作者简介: 吴欢(1975 -), 男, 助理研究员, 博士, 从事超导技术研究。

展性能良好的合金 NbTi 由于具有较低的上临界场主要用于 12T 以下的磁体中,而磁场强度高至 20T 的超导磁体则需采用脆性的 A15 型金属间化合物  $Nb_3Sn$ 。尽管随着材料设计的进步和材料加工工艺的发展  $Nb_3Sn$  性能仍在逐步提高,但其临界磁场、临界温度、临界电流密度有一定的极限,即使利用三元系合金和过冷却来改善其超导性能,进一步提高的空间仍然有限,为此人们正在积极开发其他性能更加优异的超导材料以满足未来聚变堆对超导磁体材料的需求。

$Nb_3Al$  和  $Nb_3Sn$  是同属 A15 型晶体结构的金属间化合物超导材料,其 18.9K 的临界温度比  $Nb_3Sn$  的 18K 略高,其 30T(4.2K) 的上临界场比  $Nb_3Sn$  高出约 6T,在约 20T 以上的磁场中其临界电流密度远高于  $Nb_3Sn$ <sup>[1]</sup>。更为重要的是,磁场下的抗应变研究表明,由于  $Nb_3Al$  晶格原子排列的有序度较差,其超导性能对晶格完整性不敏感,应变对  $Nb_3Al$  电流密度的影响远比  $Nb_3Sn$  小,例如,在 4.2K 和 12T 下,0.8% 的压缩应变将使  $Nb_3Sn$  的载流能力下降约 60%,而在同样的压缩应变下, $Nb_3Al$  的载流能力只下降约 30%<sup>[2]</sup>,因此  $Nb_3Al$  导体可以承受巨大的电磁力甚至可以采用  $Nb_3Sn$  无法适用的先反应后绕制的方法来制作磁体<sup>[3]</sup>,这样不仅提高了线圈的性能也可以降低线圈的制造成本。此外,已有实验表明,添加 Ge 形成的三元系  $Nb_3(Al,Ge)$  具有更高的  $T_c$  和  $B_{c2}$ ,其  $T_c$  可达 19.4K, $B_{c2}$  可以达到 39.5T(4.2K),在高场下,具有比  $Nb_3Al$  更高的临界电流密度<sup>[4]</sup>。这些独特的优点使得  $Nb_3Al$  作为未来核聚变堆磁体材料有着很好的应用前景,引起了极大的关注。

## 2 $Nb_3Al$ 超导体股的制备

在上世纪七十年代初期,人们就已经发现  $Nb_3Al$  具有很高的上临界磁场,开始尝试制造  $Nb_3Al$  线材。由于 Nb、Al、Cu 之间容易反应生成不期望得到的三元化合物,因此制造  $Nb_3Sn$  的青铜法或内锡法无法延用于  $Nb_3Al$ 。人们发现符合化学计量比的组分对于得到高  $T_c$  和高  $B_{c2}$  的  $Nb_3Al$  至关重要,而从 Nb-Al 二元相图可知这一组分只有在高于 1900℃ 时才能稳定存在,低温

下将导致贫 Al 相的出现,此外,在  $Nb_3Al$  中钉扎中心由晶粒间界提供,较高的热处理温度将导致晶粒过度长大,晶界减少,不利于临界电流密度的提高,这都给  $Nb_3Al$  的制造带来困难。尽管这样,在  $Nb_3Al$  优异性能的吸引下,上世纪八十年代中后期人们还是逐渐发展了制造  $Nb_3Al$  线的工艺,并持续提高了其性能。这些方法的目标是得到具有化学计量比的成分和微小晶粒的  $Nb_3Al$ ,其中具有化学计量比的成分是高  $T_c$  和高  $B_{c2}$  的保证,而微小晶粒之间的晶界提供的钉扎力则是高  $J_c$  的需要。

制造  $Nb_3Al$  股线的工艺可分为三类,一类是传统的固态扩散法(Solid-State-Diffusion),另一类是激光/电子束加热法(Laser/Electron-Beam-Heating),还有一类是淬火法。固态扩散法和制造  $Nb_3Sn$  超导线时所采用的扩散法类似但避免了 Nb、Al 和 Cu 的直接接触,通过机械加工使待反应的两种元素在空间上接近,即使得扩散偶细微化,然后在低温下通过长时间的热处理促使两种元素通过扩散反应生成目标化合物  $Nb_3Al$ 。在固态扩散法中,依据扩散偶形态的不同,可以分为棒材装管法(Rod-in-Tube)<sup>[5]</sup>、果冻卷法(Jelly-Roll)<sup>[6]</sup>、粉末装管法(Powder-in-Tube)<sup>[7]</sup>、包覆切片挤压法(Clad-Chip-Extrusion)<sup>[8]</sup>。由于固态扩散法采用较低的扩散反应温度,得到的线材中部分成分偏离化学计量比,导致较低的  $T_c$  和  $B_{c2}$ ,为此人们又发展了激光/电子束加热法,期望采用激光或电子束辐照来提高反应温度以得到更好的化学计量比,但是这样的到晶粒尺寸却不可避免地过度粗化,降低了线材在低场下的临界电流密度。为了得到既满足化学计量比的成分又具有细小晶粒的材料,退火法通过快速降温将高温下得到的 Nb-25at% Al 合金转变为亚稳态的体心立方过饱和固溶体 Nb(Al)<sub>ss</sub>,然后在低温下经过晶体结构的改变而非局域组分的改变使 Nb(Al)<sub>ss</sub> 转变为  $Nb_3Al$ 。依据淬火方式的不同,淬火法可分为液体淬火法(Liquid-Quench)和急热急冷转变法(Rapid-Heating-Quenching-and-Transformation, RHQT)<sup>[9]</sup>。其中液体淬火法使用移动的 Cu 基带来使液态的 Nb-25at% Al 合金淬火,因此无法得到多芯结构,限制了其大规模应用,而急热急冷转变法以

通过机械加工方式得到的具有多芯结构的线材作为 Nb-25at% Al 合金的先驱,采用欧姆加热的方法将其温度快速升到约 1900℃ 以得到 Nb-25at% Al 合金,然后用约 50℃ 的熔融 Ga 浴将其淬火从而将高温下得到的亚稳态的体心立方过饱和固溶体 Nb(Al)<sub>ss</sub> 保留至低温下,进而在约 800℃ 下退火将 Nb(Al)<sub>ss</sub> 转变为 Nb<sub>3</sub>Al。急热急冷转变法的特点是 Nb(Al)<sub>ss</sub> 在室温下具有良好的延展性,这使得在转变为 Nb<sub>3</sub>Al 前成缆和线圈绕制非常便利,而且由急热急冷转变法得到的 Nb<sub>3</sub>Al 具有较好的化学计量比成分和微小的晶粒,因此其  $T_c$ 、 $B_{c2}$  和  $J_c$  较固态扩散法得到的高,近来受到越来越多的重视。

### 3 Nb<sub>3</sub>Al 超导材料在聚变堆中的应用

Nb<sub>3</sub>Al 以其优异的本征高场性能和抗应变性能受到越来越多的重视,在 GHz 级高分辨率核磁共振谱仪磁体、粒子加速器磁体和聚变堆磁体中的应用正在深入开展中。在聚变堆磁体应用方面,从上个世纪 80 年代中期开始,采用固态反应法中的果冻卷法,日本原子能研究机构(Japan Atomic Energy Agency, JAEA) 以在聚变示范堆环向场磁体中应用为目标建立了大规模生产 Nb<sub>3</sub>Al 股线的方法,制造出单根长度 11km 的股线,在 4.2K 和 12T 下股线的非 Cu 临界电流密度达到 600Amm<sup>-2</sup>,并用此股线制造出 150m 长的 CICC 导体。更进一步,他们用此导体制造出世界上首个用于大型磁体的 Nb<sub>3</sub>Al 内插线圈,并将其置于 ITER 中心螺线管模型线圈中进行了测试,在 13T 的磁场下,线圈可以承载 46kA 的电流<sup>[10]</sup>。这一探索开启了 Nb<sub>3</sub>Al 应用的先河,建立了 Nb<sub>3</sub>Al 股线、导体和线圈的制造技术,确认了 Nb<sub>3</sub>Al 导体可以满足聚变堆超导磁体的需要。另外,从上个世纪 90 年代中期开始,日本国立材料科学研究所(National Institute for Materials Science, NIMS) 开展了急热急冷转变法制造 Nb<sub>3</sub>Al 股线的研究工作。他们与日本原子能研究机构合作,采用急热急冷转变法制造了 Nb<sub>3</sub>Al 股线,并探索了其在核磁共振谱仪磁体、加速器磁和聚变堆磁体中的应用。在聚变堆磁体用导体方面,他们用线径 0.8 mm 内部 Ag 稳定化的 Nb 基股线试制了小型

CICC 导体,一级子缆采用一根超导体线加两根 Cu 股线的方式,形成 3×4×3 的绞缆结构。经过测试,在 4.2K 的 LHe 浴和 14T 的外场下导体可以承载约 3.5kA 的电流<sup>[11]</sup>。

### 4 研究趋势

用固态扩散法制造 Nb<sub>3</sub>Al 股线的优点是成本较低,但是如何进一步细化扩散偶以提高股线中目标化合物 Nb<sub>3</sub>Al 的含量,同时保证有足够多的晶粒间界以提供磁通线的钉扎中心,是需要进一步深入研究的问题,此外,通过在 Al 中添加 Ge 形成三元系的 Nb<sub>3</sub>(Al, Ge) 是提高股线性能的有效方法,但是目前还没有用固态扩散法制造 Nb<sub>3</sub>(Al, Ge) 股线的报道,这方面的工作急需开展。而对于急热急冷转变法,在进行欧姆加热时,由于被加热股线的弯曲、振动和熔融 Ga 浴液面的随时变化,为了得到热处理均匀的股线,欧姆加热电流大小很难控制,热处理均匀的长股线的产率很低,生产成本很高。而且多芯结构的先驱线材要被加热至约 1900℃,这一温度远高过 Cu 的熔点 1083℃,因此急热急冷转变法中需采用难融的 Nb 或 Ta 作为基体材料,起稳定化作用的 Cu 只能通过其他方式附加到线材上:采用的方式之一是淬火后在线材上包覆 Cu 片后再进行槽轧,这样得到的覆 Cu 扁带中 Nb<sub>3</sub>Al 和 Cu 之间的电导率和热传递系数有限且其形状也无法满足聚变堆用 CICC 导体对圆形股线的需要;方式之二是内部稳定化,即在进行亚元组装时用 Nb 包裹的 Ag 棒或 Ta 包裹的 Cu 棒取代截面中心部分 Nb/Al 棒,这样却不利于股线失超时在内部产生的焦耳热被股线表面附近的 LHe 快速带走;方式之三则是淬火后通过离子镀/电镀在股线表面沉积一层 Cu,这样得到的热稳定效果最好,但是股线制造成本大幅度增加。此外,由急热急冷转变法得到的 Nb<sub>3</sub>Al 股线中在进行转变退火时会产生很多固态扩散法中不曾有的堆垛层错,这样的缺陷导致股线局部成分富 Al 而偏离化学计量比,限制了  $T_c$  和  $B_{c2}$  的提高。可以说,急热急冷转变法有很大的潜力,但是还有待进一步的改善,除了上面提到的问题外, Nb/Al 先驱线截面配置、退火前有助于提高晶界密度的机械变形制度和适

合减小堆垛层错密度的退火制度等也都还需进一步的优化,对此还需要进行大量的研究工作。

除了对于  $Nb_3Al$  超导体线的工作需要进一步深入之外,对于  $Nb_3Al$  超导体,随着股线制造工艺的不断改进和性能的逐步提高<sup>[12]</sup>,股线的性能将会接近其本征性能所能达到的水平,结合更合理的导体设计方式,聚变堆用  $Nb_3Al$  导体的性能的提高还有广阔的空间,尤其是  $Nb_3Al$  优异的抗应变性能将可能允许采用先反应后绕制的工艺制作线圈,这给磁体技术方面的研究带来很大的挑战和机遇。

## 5 结论

超导技术是二十一世纪世界各国普遍重视的高新技术。继  $NbTi$  和  $Nb_3Sn$  之后的新一代高场性能、抗应变性能优良的  $Nb_3Al$  超导材料在日本等国研究人员持续、深入的研究工作的推动下越来越受到世界各国的关注,其在聚变堆磁体、核磁共振谱仪磁体及加速器磁体中的实用化进程迅猛发展。对于  $Nb_3Al$  在聚变堆中的应用研究,除日本外,其他国家都给予了  $Nb_3Al$  极大的关注,但还没有见到开展相关工作的报道,技术的制高点亟待占领。目前我国的西部超导材料科技有限公司已经具备加工高性能 ITER 用  $NbTi$  和  $Nb_3Sn$  超导材料的能力,而中国科学院等离子体物理研究所具备聚变堆用大型  $NbTi$  超导磁体的设计和制造能力,但在极具潜力的  $Nb_3Al$  超导材料的制备及应用研究方面还没有突破。结合西部超导材料科技有限公司和中国科学院等离子体物理研究所所在材料制备和应用研究两方面的优势,拓展我国聚变堆磁体用超导材料的研究领域,推进  $Nb_3Al$  超导材料的国产化与实用化进程,以使我国在未来高性能聚变堆用超导材料和应用研究方面在世界上占有一席之地,并满足我国未来聚变科学与工程技术发展的需要,是当务之急。

## 参考文献

- [1] Tachikawa K, Takeuchi T. The History and Future of A15s in Japan [J]. IEEE Transactions on applied superconductivity, 2005, 15(2): 2443 - 2449.
- [2] Specking W, Kiesel H, Nakajima H, et al. First Results of Strain Effects on IC of  $Nb_3Al$  Cable in Conduit Fusion Superconductors [J]. IEEE Transactions on applied superconductivity, 1993, 3(1): 1342 - 1345.
- [3] Koizumi N, Nunoya Y, Matsui K, et al. Evaluation of strain applied to strands in a 13T - 46kA  $Nb_3Al$  cable - in - conduit conductor [J]. Superconductor Science and Technology, 2003, 16: 1092 - 1096.
- [4] Iijima Y, Kikuchi A, Inoue K. New  $Nb_3Al$  - based A15 multifilamentary wires with high  $J_c$  in high fields [J]. Cryogenics, 2000, 40: 345 - 348.
- [5] Inoue K, Iijima Y, Takeuchi T. Superconducting properties of  $Nb_3Al$  multifilamentary wire [J]. Appl. Phys. Lett., 1988, 52(20): 1724 - 1725.
- [6] Ceresara S, Ricci M V, Sacchetti N, et al.  $Nb_3Al$  Formation at Temperatures Lower than 1000°C [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1975, MAG - 11(2): 263 - 265.
- [7] Lohberg R, Eagar T W, Puffer I M, et al. Fabrication and  $J_c(H, T)$  measurements on  $Nb_3Al_{0.75}Ge_{0.25}$  ribbon [J]. Appl. Phys. Lett., 1973, 22(2): 69 - 71.
- [8] Saito S, Ikeda K, Ikeda S, et al.  $Nb_3Al$  superconducting wires fabricated by the clad - chip extrusion method [A]. In: Sekiguchi T, Shimamoto S. 11th International Conference on Magnet Technology (MT - 11) (C). London, UK: Elsevier Applied Science, 1990: 974 - 9.
- [9] Takeuchi T.  $Nb_3Al$  conductors for high - field applications [J]. Supercond. Sci. Technol., 2000, 13: R101 - R119.
- [10] Koizumi N, Takahashi Y, Nunoya Y, et al. Critical current test results of 13T - 46kA  $Nb_3Al$  cable - in - conduit conductor [J]. Cryogenics, 2002, 42: 675 - 690.
- [11] Takeuchi T, Kikuchi A, Banno N, et al. RHQT JR  $Nb_3Al$  conductors developed for nuclear fusion devices [J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 2443 - 2448.
- [12] Yamada R, Kikuchi A, Barzi E, et al. Comparison Between  $Nb_3Al$  and  $Nb_3Sn$  Strands and Cables for High Field Accelerator Magnets [J]. IEEE Transactions on applied superconductivity, 2010, 20(3): 1399 - 1403.