

MgB₂ 线带材工艺及性能研究进展

刘浩然^{1,2}, 杨芳², 王庆阳², 熊晓梅², 冯建情², 李成山², 周廉^{1,2}

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: MgB₂ 线带材的加工经历了近 15 年的研究与发展, 生产出的线带材可以在制冷机、较低磁场下使用, 另外生产 MgB₂ 线带材的原材料相对低廉, 应用前景十分广泛。本文从 MgB₂ 传统线带材加工和后续工艺方法的优化出发, 概述了 MgB₂ 线带材研究的进展, 详细介绍了内部镁扩散法, 即用中心镁棒代替传统镁粉, 使用铜镍材料为包套, 钽或铌为阻隔层并与镁之间填充硼粉, 热处理后得到致密的 MgB₂ 相。论述了未来 MgB₂ 线带材加工的研究重点。

关键词: MgB₂; 线带材; 超导电性

中图分类号: TM26

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)03-1020-05

2001 年 MgB₂ 超导电性的发现激起了全世界专家学者的极大关注, 它的结构非常简单, 属于六方晶系, 虽然其临界温度 (39 K) 只有性能较好的高温超导材料 (160 K) 的 1/4 左右, 但其本身出色的超导性能及巨大的应用潜力让它相比于高温超导体也毫不逊色, 可以应用于核磁共振成像、磁悬浮列车、超导磁体储能装置等方面, 而且可以在无液氮的制冷机条件下使用^[1]。人们做了大量的研究来提高 MgB₂ 的超导电性, 研究的内容主要集中在掺杂、先驱粉末的优化和加工工艺的改善上面。掺杂^[2]能够引入磁通钉扎中心, 进而改善其临界电流密度、临界磁场等超导性能, 掺杂的种类也由单质的金属到二元三元化合物以及多元的有机物掺杂, 但大部分的掺杂会导致临界温度的降低, 而且部分掺杂会使 MgB₂ 降低甚至失去超导电性^[3]。先驱粉末的选择也经历了多方面的改进, 目前使用 99.8% 粒度为 43 μm 的镁粉和 99.7% 粒度为 50 μm 的高纯度的晶态硼粉反应能够有效减小晶粒尺寸^[4,5], 进而提高磁通钉扎, 但粉末制备条件也会更加苛刻, 如高能球磨^[6], 即在氩气环境中, 将高纯度的镁粉和硼粉与碳化钨球置于同一瓶中, 用 5 GJ/kg 的能量以 250 r/min 的速率转动, 大量的 MgB₂ 相便在碾磨的过程中产生, 球磨后 MgB₂ 晶粒的尺寸约为 5 nm。目前, 我国关于 MgB₂ 制备的研究主要集中在带材的加工上, 本文主要对 MgB₂ 线带材加工工艺的研究进展加以论述。

粉末套管法工艺(PIT)在铜基复合材料超导电性被发现后得到广泛的使用, 当 MgB₂ 超导电性被发现

后这一技术得到极大的发展, 应用于生产 MgB₂ 线材和带材。传统 PIT 技术分为原位法(in situ)和先位法(ex situ), 原位法是将先驱粉末加入钽管内热处理冷却后反应完成, 先位法在线材加工之前 MgB₂ 就已经反应完成。之后还拓展出了分步法(MgB₄+Mg), 即先制备 MgB₄, 并用 MgB₄ 代替 B 粉作为先驱粉末与镁粉进行原位法工艺加工处理, 以及混合法、熔融法(Mg+B+MgB₂)等方法^[7]。

近些年来, 越来越多的研究机构开始使用内部镁扩散法(IMD)生产 MgB₂ 线带材, 这种方法生产的线材现在国际上称为第 2 代线材。该方法由 G. Giunchi^[8]首次提出, 使用铜管作为包套材料, 内部以钽管作为阻隔层, 在同轴的位置放置镁棒并在周围填充硼粉, 如图 1^[9]所示。热处理时熔融的镁渗透到硼粉中发生反应, 在中间产生一个空心, 而硼粉的位置则生成了致密的 MgB₂ 层, 这明显减少了原位法镁粉渗透到硼粉反应后留下的大量空洞, 该方法得到的线材具有优异的临界电流密度值, 因而在未来具有极大的应用潜力。

1 传统 PIT 工艺的研究现状

近年来, 虽然各研究机构都在寻找并尝试新的 MgB₂ 线带材加工工艺, 但传统的原位法与先位法 PIT 工艺依旧是各研究所各高校制造 MgB₂ 线带材的重要方法。其主要步骤如图 2 所示^[10], 这种方法对先驱粉纯度要求比较高, 退火温度要小于 MgB₂ 分解温度 (850~959 °C), 一般控制在 600~800 °C^[10]。对包套

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51772250); 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) (2014AA032701); 陕西省自然科学基金项目 (2014JQ6198, 2014JM2-5060)

作者简介: 刘浩然, 男, 1989 年生, 博士生, 西北工业大学, 陕西 西安 710072, 电话: 029-86231079, E-mail: forwardhaoran@163.com

材料的要求也比较高,因为常用的包套材料 Cu 与 Ag 易于与 Mg 发生反应与扩散,一般使用 Fe 与低碳钢做为包套材料,之后发展了以 Cu-Ni 为包套材料,以 Nb 为阻隔层的结构。

1.1 先位法 (ex situ) PIT 工艺研究概况

先位法 PIT 技术是将 MgB₂ 粉末装入金属管内,通过拉拔轧制制备线带材,先位法的临界电流密度等性能相比于原位法要差,但该方法十分适用于生产长导线和几何形状较为复杂的多型芯线材^[11],而且也比较容易对粉末纯度和粒度进行控制。

2005 年意大利的 INFM 公司采用 Ex situ 技术生产出了长度超过 1600 m 的 14 芯长线,填充因子达到 10%,线材横截面如图 3 所示^[12]。之后哥伦布超导实验室生产出了长 1780 m 的单芯线材。但因为 MgB₂

粉末晶粒连接不紧密,工程临界电流密度普遍较低,临界磁场也比较低,离实际应用还有很大的距离。因此,关于 MgB₂ 先驱粉末的改进也从未停止,主要通过高能球磨、化学掺杂、热处理等方法加以改进,法国格勒诺布尔高场实验室通过在 MgB₂ 粉中掺杂 SiC 使其临界电流在高磁场(8.8~12 T)下得到提高^[12]。掺杂 C 也会让 MgB₂ 在高场下 J_c 得到提高,低场下临界电流维持不变^[13]。Ex situ PIT 技术的先驱粉末晶粒间的结合非常弱,这直接影响到超导相的填充因子和晶粒间的连接, MgB₂ 表面的氧化物杂质也是阻塞晶粒间电流传输的重要因素。S. Mizutani^[14] 等通过自蔓延烧结,大大减少了 MgO 的数量,增加了 MgB₂ 晶粒间的接触面积,所制得的先位法超导线材连通性从传统的 8.3% 提高到了 35%,临界电流密度也得到了极大的提高。S. Mizutani^[15] 等通过高能球磨 30 h 后在 900 °C 进行自蔓延烧结,其连通性达到了 43%,晶粒边界的电子耦合强度及填充因子得到了有效的提高。先位法加工的 MgB₂ 在空气中暴露一段时间后其临界电流密度降到了 50%, M. Kulich^[16] 等使用冷高压致密化技术 (CHPT),对先位法 MgB₂ 进行高压处理,加强其密度,发现对它的连通性、反应速率及电阻等产生了较为积极的影响。

近年来,关于先位法 MgB₂ 线带材的研究主要集中在改善其连通性能上,在这方面也做出了数次突破,但先位法生产出的线材临界电流密度还是相对较低, MgB₂ 粉末也有待改进。

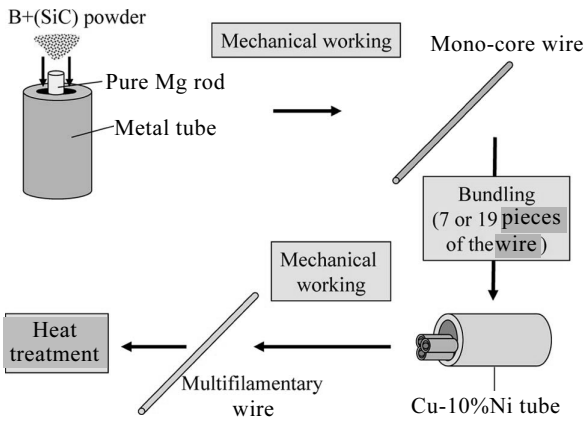


图 1 IMD 法制备 MgB₂ 线材流程图

Fig.1 Process flow of MgB₂ wire prepared by IMD method^[9]

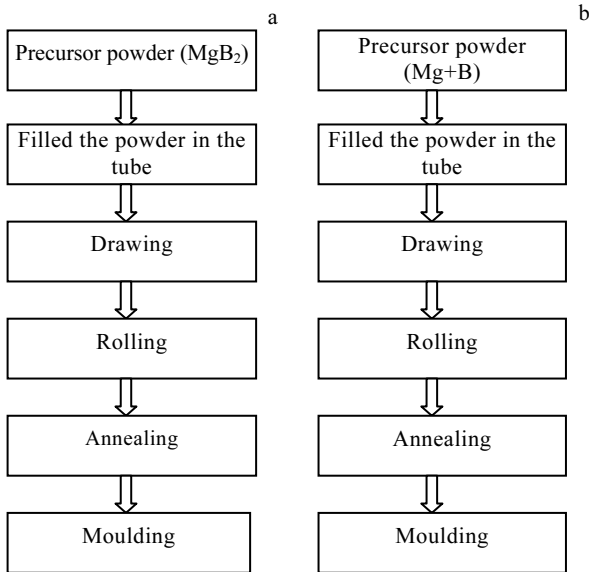


图 2 PIT 法工艺流程

Fig.2 Process flow of PIT method^[10]: (a) in-situ process and (b) preceding process



图 3 INFM 公司生产出的 1600 m 长线材

Fig.3 1600 m wire manufactured by INFM^[12]

1.2 原位法 (in situ) PIT 工艺研究概况

原位法 PIT 技术是按照 MgB_2 的化学计量比添加镁粉和硼粉装管后拉拔轧制, 然后进行热处理, 最后生成 MgB_2 相。相比于先位法, 原位法得到的线材 MgB_2 晶粒连通性很好, 因此其临界电流密度相对较大, 但 Mg 粉十分活泼, 易与包套材料 Cu、Al 等发生反应。因此, 需要在粉末和包套之间加一层阻隔层, 一般选用 Nb、Ta、Fe 等金属。

M. Takahashi^[17]等使用高温球磨, 让镁粉和硼粉在 500 °C 下预热 10 h, 采用原位法使用该粉末制出的 MgB_2 带材在 4.2 K、10 T 下得到 $9.46 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 的高临界电流密度, 高出了 10%SiC (摩尔分数, 下同) 掺杂所得到的临界电流密度值, 而临界温度只有微弱的降低。M. Kodama^[1]等通过使用原位法制出的单芯 MgB_2 超导线材, 其面积收缩比率达到了 99.93%, 达到了当时收缩比的最大值, 然后通过研究该超导体的电子连通性及磁通钉扎强度, 发现 MgB_2 主要的磁通钉扎中心是晶粒边界, 而磁通强度与残余电阻密切相关, 电子的连通性和填充因子与临界电流密度密切相关, 因此面积收缩比率的增加得到相对较大的临界电流密度, 测得了 $(6.0 \sim 8.4) \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (20 K、0 T) 的临界电流密度值。

目前, 原位法制造 MgB_2 线带材在性能和工艺上都得到了较快的发展, 性能上达到甚至超过了目前已投入使用的 Nb_3Sn 线带材, 而且还有很大的提高潜力, 未来的应用将十分广泛。但镁反应后会留下许多空洞, 加工性能还需继续提高。

2 基于传统加工工艺的改进及研究现状

近年来, 传统 PIT 加工方法在性能上遇到了瓶颈, 2 种方法都有各自的优缺点, 如何利用其优点改进其缺点成为摆在人们面前的一大难题, 于是大量基于传统加工工艺的改进也随之出现, 其中性能较好的方法便是混合法、分步法 ($\text{MgB}_4 + \text{Mg}$) 和中心镁扩散法 (IMD)。

2.1 混合法工艺研究概况

混合法最早是由 T. Nakane^[18]首次提出, 传统的先位法工艺十分适用于线带材的加工, 但临界电流密度和临界磁场的性能离实际应用还有很大的距离, 而原位法得到的超导相结晶性较差, 但临界电流密度却很高。该方法通过原位法制作 MgB_2 超导带材, 得到性能较好的带材, 从中取出超导相并碾碎, 作为先位法制作超导线材的先驱粉末, 加工完成后临界电流密度和临界磁场相比于先位法线带材得到了很大的提高, 同时孔洞变少, 加工性能相比于原位法也同时得

到改善。S. M. Shahabuddin^[19]等使用该方法, 改变先位法 MgB_2 比重, 发现随着 Ex situ MgB_2 比例的增加, 磁通钉扎力也随之增大, 但晶粒的连通性能也逐渐下降, 最后得出当 25% (质量分数) Ex situ MgB_2 时有最大 J_c 值为 $5.2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ (20 K、0 T)。如此便获得了原位和先位 2 种工艺的优点。

还有一些相近的方法, 比如波兰的 D. Gajda^[20]等利用 MgB_2 收缩率低的特点, 用先位法的 MgB_2 代替传统的 Nb 为阻隔层, 进行原位法加工, 使包套与 MgB_2 的连接变好, 并且因为超导相的增加, 临界电流密度也获得了提高。

2.2 分步法工艺研究概况

分步法是针对原位法反应生成大量孔洞, 从而使其平均密度变低而改进的方法。该方法使用 Mg 和 B 按原子比为 1:4 反应生成 MgB_4 , 使用 MgB_4 代替 B 作为先驱粉末和 Mg 混合进行原位法加工, 由于 Mg 粉使用的减少, Mg 反应留下的孔洞也不像传统原位法那样多, MgB_2 超导相型芯的质量得到了有效的提高。D. Nardelli^[21]等利用分步法, 以 MgB_4 作为先驱粉末, 在 20 K、2 T 的条件下, 得到了临界电流密度为 $0.78 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 的超导线材, 临界温度也提高到了 38.5 K, 并且指出在较低磁场下, 临界电流密度将很容易达到 10^6 A/cm^2 。

2.3 中心镁扩散法研究概况

中心镁扩散法 (IMD 或 AIMI) 非常适合做多芯线带材^[8], 即使在低于镁的熔点温度 (650 °C) 下, 镁也能很快的扩散到硼粉中, 因为 Mg 和 B 反应是放热反应, 会使镁芯周围温度升高, 而低温热处理能够抑制晶粒的生长, 从而改善临界电流密度等性质^[22], 致密的 MgB_2 层使其加工性能也得到很大的提高^[23], 更适合大规模生产。

K. Togano^[24]使用该方法生产出的 7 芯 MgB_2 超导线材, 其临界电流密度在 4.2 K、9 T 的条件下达到了 10^5 A/cm^2 , 超出了原位法临界电流密度值。K. Togano^[25]利用 IMD 技术, 以 Cu-Ni 合金为包套, Ta 为阻隔层, 中心加以镁棒并在周围填充 B+SiC 粉在 640~645 °C 下热处理制备的 19 芯 MgB_2 超导线材, 其临界电流密度在 4.2 K、10 T 与 20 K、1 T 下分别为 $9.9 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 与 $3.3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, J. Hur^[26]等在硼粉中掺杂 5% 的 SiC, 以 Fe 为包套材料加工的 7 芯超导线材, 其 J_c 在 4.2 K、8 T 的条件下达到 $1.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, 稍高于相同情况下的单芯线材 ($J_c = 1.0 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$), 其各项性能达到甚至超过了传统 PIT 工艺制备的样品。H. Kumakura^[9]同样使用该方法制作的单芯、7 芯与 19 芯线材, 并作出修改, 在 B 粉中掺杂 10% 的 SiC,

使 MgB₂ 层的维氏硬度达到 13 000 MPa, 高出原位法 PIT 工艺的 2.6 倍^[27], 即 MgB₂ 层的密度得到了很大的提高, 其制造的 19 芯线材在 20 K、3 T 的条件下临界电流密度达到了 1.3×10^5 A/cm², 已经达到了应用范围。S. J. Ye^[28]通过 IMD 技术, 首次尝试加工了 37 芯 MgB₂ 超导线材, 使用 99%、粒度为 43 μm B 粉, 掺杂 10% 的 SiC 在 4.2 K、10 T 下得到 $J_c = 7.6 \times 10^4$ A/cm², 在相同的条件下超出了单芯和 7 芯的超导线; 无掺杂时, 在 20 K、3 T 下 J_c 达到 1.6×10^5 A/cm², 若使用高质量 B 粉样品性能将会再次提高。

G. Z. Li^[29]在 B 粉中掺杂 3% 的 C 使其临界电流密度(J_c)在 4.2 K、5 T 的条件下达到了 4.3×10^5 A/cm², 是同等粉末、热处理等条件下 PIT 线材 J_c 的 2 倍多。S. J. Ye^[30,31]等在 B 粉中掺杂六苯并苯(C₂₆H₁₆), 在 4.2 K、10 T 下获得了 $J_c = 1.2 \times 10^5$ A/cm² 的高临界电流密度, 随后第 1 次使用预处理的 SMI(C₈H₁₀ 处理, C 包覆的纳米级)B 粉使用到 IMD 技术中, 获得了高度致密化较小晶粒尺寸的 MgB₂ 层, 其临界电流密度在 4.2 K、10 T 与 20 K、5 T 下分别为 1.2×10^5 A/cm² 以及 7.6×10^5 A/cm², J_c 又得到了进一步的提升。

IMD 技术使用纯镁棒作为镁的来源, 但镁棒的扩散距离太短, 往往反应结束了仍有许多未反应的硼粉。针对这一问题, 日本国家材料科学院的 S. J. Ye^[32] 等将 IMD 和 PIT 技术混合起来, 在硼粉中加入少量镁粉, 相应减小镁棒直径, 维持镁与硼的原子百分比, J_c 值略有下降, 但相比于之前的 IMD 工艺, MgB₂ 层的厚度明显增大, 而与传统的 PIT 技术相比, 超导相

密度及临界电流密度都得到了极大提高, 如图 4 所示, 他针对硼粉中添加镁粉的比例进行了研究, 发现随着镁粉含量的增加, J_c 是先增大后减小, 当镁粉含量超过 6% 时, J_c 才开始降低, 而 J_c 最大值在 4.2 K、10 T 时达到 5×10^4 A/cm², 减少了未反应的 B 粉, 提高了临界电流密度^[33]。斯洛伐克科学院的 M. Kulich^[34] 等对扩散法进行了修改(MIMD), 即用镁管代替镁芯, 管内填充 B 粉, 在保证临界电流密度的同时也极大的提高了晶粒的连接性及 MgB₂ 芯丝密度。

随着世界水平的提高, 越来越多先进的工艺方法应用到 MgB₂ 带材的生产之中, 适合 MgB₂ 工艺的改进也如雨后春笋般进入人们视野, 每种方法都有各自的优点以及局限性, 如何将各方法整合起来, 实现性能上的突破, 达到大规模生产的目的依旧是摆在世界专家学者眼前的重要问题。

3 结 语

本文总结了 MgB₂ 线带材制备的工艺方法, 分析并对比了各工艺方法的优势和不足, 着重介绍了内部镁扩散法对 MgB₂ 线带材总体性能的影响。大量研究表明, MgB₂ 是一种性价比很高的超导材料, 因而倍受各界关注, 其超导电性自发现起发展至今, 制备方法经历了一系列的改革, 从最初的粉末套管法到目前较为火热的中心镁扩散法, 配合掺杂优化、热处理技术和粉末的改进, 其各项性能正在得到稳步提高, 逐渐由中低端设备的应用转向预期在高端设备使用的方向发展, 但还有大量的问题需要改进, 比如 IMD 法, 解决镁反应完成后在中间留下的孔洞将会对线带材整体性能的提高有着深远的意义。

我国对 MgB₂ 线带材工艺的研究起步较晚, 但在各研究所高校的努力及国家项目的支持下, 关于 MgB₂ 线带材的制备已经初具规模, 关于 MgB₂ 的论文、专利及性能上的突破也由越来越多的中国专家学者发表和提出, 但与美国、日本以及欧洲一些国家相比还有很大的差距, 要实现大规模的生产还要有很长的路要走。

参考文献 References

- [1] Kodama M, Ichiki Y, Tanaka K *et al.* *Supercond Sci Technol*[J], 2014, 27: 055 003
- [2] Liu Yongchang(刘永长), Ma Zongqing(马宗青). *The Mechanism of Phase Formation and Doping of MgB₂ Superconductor*(MgB₂ 超导体的成相与掺杂机理)[M]. Beijing: Science Press, 2009: 68
- [3] Fu Yao(付尧), Zhang Song(张松), Wu Yanping(吴燕平) *et*

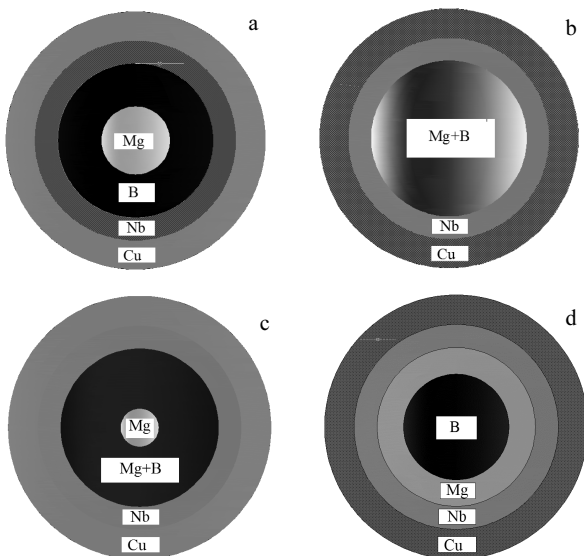


图4 IMD、PIT、IMD+PIT 截面图

Fig.4 Cross-section images of MgB₂ by IMD(a), PIT(b), IMD+PIT (c) and MIMD (d) method^[32]

- al. Material Review*(材料导报)[J], 2013, 27(11): 19
- [4] Chen S K, Yates K A, MacManus-Driscoll J L. *Supercond Sci Technol*[J], 2005, 18: 1473
- [5] Shan Di(单迪), Wang Qingyang(王庆阳), Liu Guoqing(刘国庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(6): 1278
- [6] Fuchs G, Häbler W, Nenkov K *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 122 002
- [7] Bovone G, Matera D, Bernini C *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2015, 28: 065 006
- [8] Giunchi G, Ceresara S, Ripamonti G *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2003, 16: 285
- [9] Kumakura H, Hur J, Togano K *et al. IEEE T Appl Supercon*[J], 2011, 21: 2643
- [10] Wang Xingdong(王醒东). *Electrical Engineering Material* (电工材料)[J], 2014(2): 33
- [11] Zhou Lian(周廉), Gan Zizhao(甘子钊). *The Research of High Temperature Superconductor Material and Applied Progress in China*(中国高温超导材料及应用发展战略研究)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 62
- [12] Braccini V, Nardelli D, Penco R *et al. Physica C*[J], 2007, 456: 209
- [13] Kuroda T, Fujii H, Ye S *et al. Physics Procedia*[J], 2014, 58: 170
- [14] Mizutani S, Yamamoto A, Shimoyama J *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2014, 27: 044 012
- [15] Mizutani S, Yamamoto A, Shimoyama J *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2014, 27: 114 001
- [16] Kulich M, Flükiger R L, Senatore C *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 105 019
- [17] Takahashi M, Kumakura H. *Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 075 007
- [18] Nakane T, Kitaguchi H, Kumakura. *Appl Phys Lett*[J], 2006, 88: 022 513
- [19] Shahabuddin S M, Shahabuddin M, Jafar M *et al. Solid State Commun*[J], 2015, 218: 31
- [20] Gajda D, Morawski A, Zaleski A *et al. J Alloy Compd*[J], 2015, 647: 303
- [21] Nardelli D, Matera D, Vignolo M *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 075 010
- [22] Hur J M, Togano K, Matsumoto *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2008, 21: 032 001
- [23] Kováč P, Hušek I, Melišek T *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2014, 27: 065 003
- [24] Togano K, Hur J M, Kumakura H. *Supercond Sci Technol*[J], 2009, 22: 015 003
- [25] Togano K, Hur J, Matsumoto A *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2010, 23: 085 002
- [26] Hur J, Togano K, Matsumoto A *et al. IEEE T Appl Supercon*[J], 2009, 19: 2735
- [27] Nishijima G, Ye S J, Matsumoto *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2012, 25: 054 012
- [28] Ye S J, Matsumoto A, Togano K *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 105 027
- [29] Li G Z, Sumption M D, Zwyer J B *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 095 007
- [30] Ye S J, Song M, Matsumoto A *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2013, 26: 125 003
- [31] Ye S J, Takigawa H, Matsumoto A *et al. IEEE T Appl Supercon*[J], 2015, 25: 6 200 807
- [32] Ye S J, Matsumoto A, Togano K *et al. Supercond Sci Technol* [J], 2014, 27: 055 017
- [33] Ye S J, Song M, Matsumoto A *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2012, 25: 125 014
- [34] Kulich M, Kovac P, Hain M *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2016, 29: 035 004

Research Progress of the Processing and Properties of MgB₂ Wires and Tapes

Liu Haoran^{1,2}, Yang Fang², Wang Qingyang², Xiong Xiaomei², Feng Jianqing², Li Chengshan², Zhou Lian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: MgB₂ wires and tapes have been well developed during the past 15 years. They can be used in liquid hydrogen and low magnetic field, which have broad applicability in the future due to their cheap raw material. In this paper we review the traditional processing of MgB₂ wires and tapes. The method of internal magnesium diffusion is introduced in which a pure magnesium rod is placed at the center of copper sheath and niobium or tantalum barrier layer, and the space between magnesium rod and barrier layer is filled with boron powder. We can get the high density MgB₂ layer after heat treatment. Finally, we discuss the key point of fabricating MgB₂ tapes and wires in the future.

Key words: MgB₂; wires and tapes; superconductivity

Corresponding author: Liu Haoran, Candidate for Ph. D., State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-86231079, E-mail: forwardhaoran@163.com