

涡流检测在制备 19 芯 Fe/Cu 包套 MgB₂ 超导线中的应用

禹争光,王栋樑,张现平,高召顺

(中国科学院电工研究所 应用超导实验室,北京 100080)

摘要:19 芯 Fe/Cu 包套 MgB₂ 超导线制备是以单芯 Fe/Cu 线组装后,再经过机械拉拔工序获得。利用电磁涡流技术可检测单芯 Fe/Cu 线内部的缺陷。通过电子扫描电镜(SEM)分析发现,相对于未检测到缺陷的单芯线,有缺陷的单芯线组装、拉拔后获得的 19 芯 Fe/Cu 超导线内部芯线排布均匀性差,部分芯线 Fe 层破损严重,将影响超导线质量。涡流检测方法有利于控制多芯超导线质量。

关键词:涡流检验;超导线;质量控制

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)03-0146-02

Application of Eddy Current Inspection Technology on Fabrication of 19-Filament Fe/Cu MgB₂ Superconductor Wire

YU Zheng-Guang, WANG Dong-Liang, ZHANG Xian-Ping, GAO Zhao-Shun

(Applied Superconductivity Laboratory, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: 19-filament MgB₂ superconductor wire had been successfully prepared via restacking with mono filament Cu/Fe wire and drawing process. Inner flaw of the single-core wire could be measured by eddy current testing system. The intersection SEM results showed that compared to the better one, the wire with inner flaw will be liable to result into poor quality of 19-filament MgB₂ superconductor wire, for example, worse distributed core, fragile Fe layer inside the wire, which will depress the superconducting properties much. So, the quality of 19-filament Fe/Cu MgB₂ superconductor wire can be better controlled aided by eddy current inspection technology.

Keywords: Eddy current testing; Superconductor wire; Quality control

二硼化镁(MgB₂)是 2001 年日本科学家 Akimitsu 发现温度在-234℃(39 K)时具有超导性能的材料^[1],是迄今发现的临界温度最高的二元金属间化合物超导体。它具有合成工艺简单、原料成本低廉和常态下电阻率低、各向异性小、相干长度大、无弱连接等特点,将广泛应用于医疗、电力、航空和军事领域^[2,3]。从超导芯保护、制造工艺成本、工作稳定性和交流损耗等角度考虑,多芯 Fe/Cu 包套是 MgB₂ 超导线工业化应用的较佳的发展方向^[4]。

多芯 Fe/Cu 包套超导线的制备工艺(图 1)是通过组装先期拉拔加工获得的单芯 Fe/Cu 包套线,然

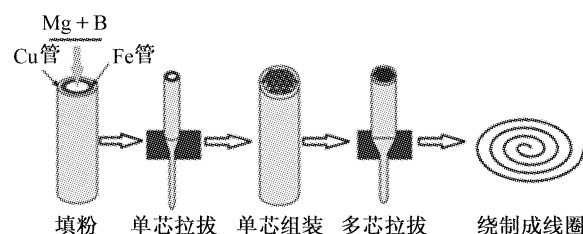


图 1 19 芯 Fe/Cu 包套的 MgB₂ 超导线制备工艺

后再次拉拔制得。在组装后拉拔变形过程中,如果组装前单芯线就出现缺陷,极易造成后期制备的多芯线内部损伤,导致超导线力学性能下降,超导芯也将与铜直接接触,热处理阶段与 Cu 化学反应后,导致超导线整体临界电流值下降。所以,在多芯组装前,必须检测单芯超导线损伤情况,避免多芯中 Fe

收稿日期: 2007-01-09

作者简介: 禹争光(1970—),男,博士,研究方向为超导材料实用化。

层破损,对防止整体超导性能下降有着重要意义。文章探讨采用电磁涡流方法检测单芯 Fe/Cu 包套超导线的缺陷情况,以及对后续制备的 19 芯 Fe/Cu 包套的 MgB₂ 超导线质量的影响关系。

1 检测原理

涡流检测是建立在电磁感应原理上的一种无损检测方法,通常由三部分组成,即检测线圈(探头)、检测电流的仪器和被检的金属工件。涡流检测实质是检测线圈阻抗的变化。

涡流渗透深度 δ 与检测频率 f 、材料电导率 σ 和相对磁导率 μ_r 关系可表示为:

$$\delta \propto \frac{1}{\sqrt{\sigma f \mu_r}}$$

对于 Cu/Fe/MgB₂ 多层结构,频率下降后,电磁涡流渗透深度可穿过表面 Cu 层检测到内部 Fe 层,由于 Fe 和 Cu 材料具有不同的电导率和磁导率,对多层材料扫描需要更为细致的检测方式^[5]。当有缺陷的包套线以一定的速度穿过检测线圈时,会引起涡流场的大幅度变化,从而产生很强的高信噪比的脉冲信号,据此判断缺陷存在。

2 实验及检测分析

2.1 检测装置

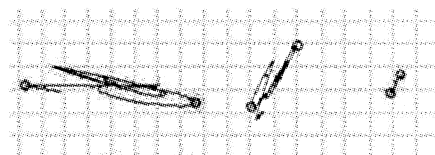
涡流检测系统由限制单芯线移动过程中上下左右波动的检测线定位装置、磁激励系统和探伤检测系统组成。定位系统目的在于控制穿过探头的线与探头在检测过程中保持均匀的间隙,有利于保证工件检测时的稳定性;磁激励系统通过磁饱和技术解决检测线中铁磁材料(即 Fe 层)对检测信号的影响;检测系统由涡流探伤仪、涡流探头(穿过式差动线圈)组成,实现对缺陷准确检测。

检测过程中单芯 Fe/Cu 包套线的尺寸变化、材质温度变化等对探伤的影响很小,需要确定的检测参数有探伤速度、填充系数、探伤频率、放大器增益、检波相位、滤波频带、报警电平等。由于 MgB₂/Fe/Cu 复合结构特性,所以在上述诸条件中,探伤频率和放大器增益较为重要。

2.2 检测频率及放大器增益的选定

检测频率的选定考虑以下两点:① 涡流的渗透深度^[6]。② 缺陷及其电导率磁导率参数反映的阻抗变化。现场选择检测频率的方法是利用阻抗平面图,检测设备采用相同的增益值,在多频率模式工作,同时提取某缺陷在不同信号频率下的阻抗图(图

2)。当信号频率为 7.5 kHz 时,虽然涡流渗透深度高,可获取更多深度信号,但同时噪声信号大,信噪比低,不利于对缺陷阈值信号的报警;测试频率为 133 kHz 时,由于集肤效应,不能获取内部缺陷信号,阻抗图的信号幅度小。相比而言,在 19 kHz 时对 Cu 层下 Fe 层缺陷有较佳的信号表征。从缺陷信号幅度和检测系统稳定性综合考虑来选定放大器增益。



(a) $f=7.5$ kHz (b) $f=19$ kHz (c) $f=133$ kHz

图 2 损伤区域在不同检测频率时的阻抗平面图

3 检测效果及评价

在机械拉拔过程中,相比于纯 Cu 材料,低碳钢塑性更差,拉拔变形中更易出现缺陷。另外,Fe 层在超导线中作用是保护超导芯,如果产生破裂,超导芯与 Cu 反应,对超导性能影响极大,而 Cu 层作用在于提供超导在低温工作的稳定性。所以 Fe 层缺陷更应严格控制。

根据对频率调试,测试中选择了 19 047 Hz 作为检测频率。根据缺陷信号强弱调整增益值到 30.5 dB。其它参数设置为高通关闭;低通关闭;滤波关闭;初始相位为 310°。

实验中,检测到其中单芯 Fe/Cu 包套线出现缺陷信号,时基信号和阻抗平面图见图 3 和 4。图 4 由图 3 虚线框内信号获得,可见:缺陷信号在阻抗平面图中呈 8 字形,幅度为 400,相位为 103.7°。

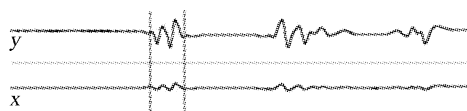


图 3 xy 方向涡流信号时基信号图

将一些含有缺陷的单芯线不加剔除,经过组装、拉拔后得到 19 芯多芯超导线。在某些断面切开,抛光后,采用电子扫描电镜(SEM)分析发现:相比采用无缺陷原料制备的多芯线(图 5b),部分芯线的 Fe 层完整

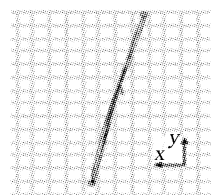


图 4 损伤区域阻抗平面图

机械工业上海无损检测培训中心 2008 年培训通知

机械工业上海无损检测培训中心长期承担机械行业无损检测人员资格培训工作,经中心培训的各级无损检测人员已超过两万人。2008 年中心继续采取滚动办学方法,举办各类无损检测方法的初级(I级)和中级(II级)培训班。具体办班日期为:

超声探伤

3月11日—3月29日 5月6日—5月24日
6月17日—7月5日 8月12日—8月30日
10月14日—10月31日 12月9日—12月27日

磁粉探伤

2月26日—3月8日 4月1日—4月12日
5月27日—6月7日 7月8日—7月19日
9月2日—9月13日 11月4日—11月15日

渗透探伤

4月14日—4月19日 6月10日—6月16日
7月21日—7月28日 9月16日—9月23日
11月17日—11月22日

射线探伤

4月15日—4月26日 7月29日—8月9日
11月25日—12月6日

涡流探伤

6月16日—6月20日 12月8日—12月13日

培训执行 GB 9445—2005《无损检测 人员资格鉴定与认证》标准(等同于 ISO 9712:1999)。该标准规定,一种给定的 NDT 方法应用于一个或多个

工业门类(焊接件、锻件、铸件或管件等),相应考核采取不同的试题和工件。培训方法的工业门类为:

UT:① 焊缝;② 锻件、板、棒、型材;③ 铸件;④ 管材、管道。

RT:① 焊缝;② 铸件。

MT:① 焊缝;② 锻件、板、棒、型材;③ 铸件。

PT:① 焊缝;② 锻件、板、棒、型材;③ 铸件。

请学员结合工作需要和行程安排,根据培训计划提前报名。请来电索取正式培训开班通知函和报名表(报名表上需加盖单位公章和医疗机构视力证明章)。报名时请说明参加的培训方法、工业门类和日期,每种方法需交三张一寸登记照。

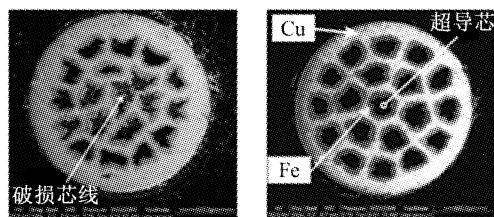
培训学员经理论、实践考试合格后,颁发中国机械工程学会无损检测学会的无损检测人员资格证书(新证)。培训中心还可按企业及用户需要,接受合作培训及现场委托培训,欢迎联系接洽。

培训费用:ET为1800元/期;UT,RT为1500元/期;MT,PT为1300元/期(含资料)。

考试费用:按工业门类300元/项;增加一门考试,增加100元/门。

联系人:丁杰,季敬元;电话:021-65556775—412;传真:021-55888795;E-mail:dingding_19@163.com;报到地点:机械工业上海无损检测培训中心,上海市邯郸路99号1楼(上海材料研究所内)。

(机械工业上海无损检测培训中心)



(a) 破损芯线 (b) 良好芯线

图5 19芯超导导线截面图

性较差,芯线形状变形大,芯线间排列不均匀,一些芯线还出现 Fe 层破损(图 5a),而无缺陷材料组装的多芯线破损几率小。故组装前,剔除有缺陷的单芯 Fe/Cu 线,可提高多芯线成品率和质量。

4 结论

结果表明,调整适当参数后,涡流检测可有效检测到单芯 Fe/Cu 包套 MgB_2 超导导线的内部缺陷,保证拉拔加工后 19 芯超导导线质量。该技术检测迅速、方便,且可在线检测,极大提高制备多芯超导芯线的速度和质量,对多芯超导导线质量控制有着重大价值。

为进一步量化缺陷,必须建立完整有限元模型,制备标准试样,直接分析各包套层和芯体内缺陷,辨析缺陷种类,提供更加完整的缺陷信息。

参考文献:

- [1] Nagamatsu J, Nakagawa N, Zenitani Y, et al. Superconductivity at 39K in magnesium diboride[J]. 2001, Nature, 410(6824): 63—64.
- [2] 闻海虎. 新型超导体二硼化镁(MgB_2)基础研究及其应用进展[J]. 物理, 2003, 32(5): 325—326.
- [3] 韩欢乐, 刘桂芳, 甘乐, 等. 二硼化镁——超导材料领域最耀眼的新星[J]. 材料导报, 2002, 16(10): 3—5.
- [4] Tanaka K, Kitaguchi H, Kumakura H, et al. Fabrication and transport properties of an MgB_2 solenoid coil[J]. Supercond Sci Technol, 2005, 18(5): 678—681.
- [5] 黄平捷, 侯迪波, 周泽魁. 多层导电结构缺陷电涡流扫描检测信号预处理技术研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(1): 222—227.
- [6] 游凤荷, 郭文婷. 涡流穿过式传感器实际渗透深度的数学模型[J]. 无损检测, 2003, 25(5): 225—228.