

文章编号: 1001-4888(2020)01-0127-08

金属压力囊与应变测量技术在异型超导磁体结构装配过程中的应用研究^{*}

吴北民^{1,2}, 辛灿杰¹, 关明智¹, 吴巍¹

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃兰州 730000;

2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 土木工程与力学学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 为了研究异型超导磁体结构预应力施加及其应变控制性测量等问题, 基于自主集成的气压—水压混合高压增压系统, 结合电阻应变片与非接触式 DIC(Digital Image Correlation)全场应变测量方法, 本文提出了一种超导磁体结构装配后预应力施加与应变测量控制技术。为了验证研制系统及其应变测量的可靠性和准确性, 模拟超导二极线圈结构, 自制了一套带有铝壳约束的铁质二极结构, 对其进行装配后的预应力施加与应变测量, 即: 在二极结构内部放置一种自主研制的类似千斤顶设备——用薄钢板制成的长方形金属压力囊(称 Bladder), 利用自制的高压增压系统将较高的水压打入压力囊中, 通过其有限的位移对二极结构内部人为地施加均布压应力, 最终到达为二极结构内部施加预应力的目的。在施加预应力过程中, 运用电阻应变片与基于高速 CCD(Charge Coupled Device)设备的非接触 DIC 技术, 对二极结构外部的约束结构——铝壳进行实时的应变测量。多组重复性实验结果表明: 高压增压系统可控水压范围为 5~120MPa, 步长为 4MPa, 可同步显示压力, 并且在此范围内能够维持设定的压力恒定不变, 误差控制在 ± 1.5 MPa 以内; 采用连续激光焊接技术自主研制的加宽型金属 Bladder 可在 30MPa 范围内循环使用 8 次以上; 对于带有铝壳约束的铁质二极结构, 其铝壳表面的应变与打压压强成线性关系, 电阻应变片与非接触的 CCD 应变测试技术均能给出高精度的测量结果, 且非接触的 CCD 应变测试技术可以给出打压过程中铝壳表面全场应变测试结果。相关设备、技术和结果将为中科院近代物理研究所自主研制的全 Nb₃Sn 超导离子源装配后预应力施加以及应变控制性测量提供方法和指导。

关键词: 异型超导磁体结构; 带有铝壳的铁质二极结构; 金属压力囊; 电阻应变片测量技术; 数字图像相关测量技术

中图分类号: O343

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-143

0 引言

目前, 中国科学院近代物理研究所承担的“十二五”规划重大科技基础设施——强流重离子加速器(HIAF, High Intensity heavyion Accelerator Facility)各系统的研发工作正在逐步有序展开, 其中, 加速器系统采用离子源——超导直线加速器——同步加速器和储存环组合的技术路线, 主要将包括: 强流超导离子源 SECRAL(45GHz)、超导离子直线加速器 iLinac、34Tm 增强器 Bring、13Tm 的高精度环

^{*} 收稿日期: 2018-06-13; 修回日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器设备研制项目(11427904); 中国博士后基金项目(2014M560820, 2015T81071)资助; 中国科学院青年创新促进会(2019404); 中国科学院“西部青年学者”A 类等项目资助

通讯作者: 关明智(1983—), 男, 博士, 副研究员。主要研究领域: 超导电磁结构力学。Email: mzg615@impcas.ac.cn

形谱仪 Sring 等以及相关配套设施^[1]。考虑到先进的技术工艺和建成后运行维护成本等问题,在 HIAF 中,拟使用大量不同类型的超导磁体结构,比如,为了提高 HIAF 加速极重离子的束流强度与品质,拟研制全 Nb_3Sn 超导高电荷态 ECR 离子源(11T);在主直线加速段采用了包括超导腔体+超导螺线管(7T)的全超导技术;在增强器 Bring 中拟采用中空缆式 NbTi/Cu 超导快脉冲二极磁体(4T/s),以进一步提高其磁刚度,从而提高加速效率;而在高能输运线 HFRS 上,拟建设多组四极和二极抗辐照 ReBCO 高温超导磁体和运行温度裕度较高的 MgB_2 超导磁体,以提高高能输运线上离子的输送效率和降低低温运行维护成本等。

为满足 HIAF 装置的高性能需求,第四代强流超导离子源 SECRA 已经率先开始进入研制阶段,该离子源研制的核心技术之一是基于 Nb_3Sn 超导技术的 11T 高性能磁体,该磁体系统主要由四组 Nb_3Sn 超导螺线管线圈、六个 Nb_3Sn 超导六极线圈、各子单元间的机械连接件、线圈预紧结构、线圈引线结构以及冷体与氦槽接口结构等机械结构与子系统单元组成^[2]。在极端运行环境下,由于六极线圈之间、六极线圈与螺管线圈之间、螺管线圈之间以及线圈与周边的铁磁环境存在复杂的电磁应力与热应力,为了避免 Nb_3Sn 磁体在稳态运行过程中导体的运动,保证磁体的可靠运行,在设计必要的三维结构机械约束的基础上,一方面,发展了环氧树脂与强化材料填实的磁体成型技术,使得导线互相粘连,以加强磁体的整体刚度;另一方面,在其螺线管磁体绕制过程中,在导线上施加一定的张紧力和金属绑扎层,使得 Nb_3Sn 导线更加紧密的排布,以防止导线励磁过程中的非正常运动等。但是,对于 Nb_3Sn 超导六极线圈结构,由于其属于异形结构,在线圈制备过程中绕制张力很难均匀施加,而非均匀分布的绕制张紧力可能会使励磁过程中导线发生松动或局部约束失效,从而极易引发 Nb_3Sn 超导六极结构过早地失超等^[3]。

超导线圈的预应力施加分析多集中在单一螺线管结构的研究中,利用螺线管天然的轴对称结构,通过在绕制的过程中对超导线和绑扎层施加外部预紧力^[4-6],特别地,近年来,随着高温超导双饼型非绝缘线圈技术的迅速发展,其绕制过程中的预应力施加问题也受到工界的关注。如通过测量 YBCO 高温超导双饼型非绝缘线圈在 4T 背景磁场下的不同绑扎层张力对结构内部应力应变的影响,Kim 等^[7]实验与数值证实了 YBCO 非绝缘磁体结构室温下绑扎层的预应力的优化设计与施加会直接影响其极端低温环境下的运行稳定性。Guan 等^[8]对美国 MIT 弗朗西斯比特磁体实验室正在研制的高磁场($\sim 30.5\text{T}$)下组合高温超导 YBCO 非绝缘双饼线圈结构外部绑扎层厚度及其预张力效应进行数值优化分析与实验研究,给出了多场环境对其电磁-力行为的影响,以及利用绑扎层预张力降低层间摩擦的具体有效措施等。而在异型超导线圈预应力施加研究方面,美国劳伦斯-伯克利国家实验室(LBNL)磁体研究组率先发展了 Bladder-Key 技术^[9],为超导磁体结构内部施加预应力,即利用水压机将水压打入横截面较窄的金属压力囊中(Bladder),通过其有限的位移对结构内部人为地施加均匀布压应力,并进行相关的应变测量,最终到达为超导磁体结构内部施加精确预应力的目的^[10,11]。但是,应用传统电阻应变片测试技术只能对结构中有限点进行测量,无法得到对超导磁体结构施加预应力过程中结构的全场应变等。

本文基于自主研制的气压-水压混合高压增压系统和加宽型金属 Bladder(宽度:109mm,长度:500mm),采用电阻应变片与非接触式 DIC 全场两种应变测量技术,对带有铝环约束的铁质二极结构(假线圈)进行装配后的预应力施加与应变测量分析(在本次实验中,仅关注 Bladder 的研制及其打压过程中结构的应变测试,最终预应力锁定是通过插入的不锈钢 Key 锁定并传递给超导线圈)。结果表明,在对超导磁体施加预应力过程中,传统的电阻应变片技术可以较准确地测量其结构关键点的应变变化,而非接触式全场应变测量系统可以测量结构关键区域的全场应变,二者相结合,有助于对结构在预应力施加过程中的应变控制性测量。利用 Bladder 打压为施加预应力的中间过程,最终预应力通过插入的不锈钢 Key 传递给超导线圈。相关测量方法与设备将为中科院近代物理研究所自主研制的全 Nb_3Sn 超导离子源装配后预应力施加以及应变控制性测量提供相应方法和指导。

1 实验仪器

1.1 气压—水压混合高压增压系统的集成

气压—水压混合高压增压系统是以高压空气(0.8MPa)作为初始工作介质,将液体(水)利用空压机的机械能转换成液压力能的装置(>100MPa),如图1所示为我们自主集成的一套气压—水压混合高压增压系统,主要包括空压机组、水压机组(包括油缸、液压马达等)、打压控制软件,以及相关的高压水路与控制阀等。为了保证对超导磁体施加预应力时其结构内部应力的均匀性和可控性,防止活塞运动到终端时以很大的速度撞击缸盖引起水压机的振动和损坏,在水压机装置设计中,将液压缸的行程末端设置有缓冲器件,可使得活塞在达到行程尾部时缓慢减速到零位附近,因此,可降低因运动活塞的惯性和液压力所造成的活塞与端部之间的撞击,当活塞运动至接近缸盖时,节流器将产生可控的反压力从而有效达到缓冲效果,实现压力精准控制(如图2)。



图1 气压—水压混合高压增压系统

Fig. 1 Pneumatic-hydraulic booster system

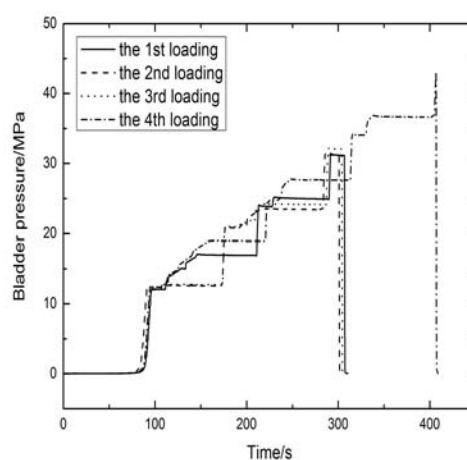


图2 不同打压次数下 Bladder 压力控制情况

Fig. 2 Pressure sustained by delivering pressures

1.2 金属 Bladder 的研制

千斤顶已在土木、建筑、水利等行业广泛使用,常用于工程或结构的扩建与补救,或用于新建工程作为预应力施加构件等。近年来,随着异型超导磁体结构施加均匀预应力技术的需求,Bladder 技术已经被逐步运用到超导磁体结构的预应力装配过程中,该技术是采用外加预应力法对装配后的超导磁体结构施加预应力的专用装置。用薄钢板制成的长方形压力囊(Bladder)如图3所示,其尺寸与结构的内径尺寸相一致。一般情况下,将 Bladder 插入二级结构中间,利用高压增压系统将较高的水压打入压力囊中(30~100MPa),通过外部约束结构(如图4中铝壳)对内部二级结构人为地施加均布压应力,待施加到指定的预应力时,塞入金属 Key,卸压 Bladder,保证锁定施加的预应力^[12]。因此,为了保证 Bladder 在加压-泄压循环过程中具有良好的工作性能,我们采用连续激光焊接技术,自制宽度为 109mm 的金属 Bladder,对于该金属 Bladder 结构,进出水口是其薄弱环节,因此,在金属 Bladder 的进出口部位需要控制激光焊接温度和焊料的供给量,以防止过度焊接,造成该部位在过高压力的机械损伤。我们对最终研制成功的金属 Bladder 进行抽样循环打压泄压实验,测试其工况下的疲劳特性,



图3 自主研制的 Bladder+Key

Fig. 3 A home-made Bladder+Key

从图 5 可以看出,研制的厚度为 0.25mm 的 Bladder 可在 30MPa 范围内循环 5 次左右,而厚度为 0.3mm 的 Bladder 可在 30MPa 范围内循环 8 次以上,当 Bladder 的厚度为 0.5mm 时,Bladder 可在 40MPa 范围内循环 5 次以上,由此可见,在保证良好的焊接工艺情况下,金属 Bladder 随着厚度的增加,其抗循环打压的疲劳性能得到较大的提高。但是,在 Bladder 打压后,塞入金属 Key 键锁定压力,再取出卸载后的 Bladder,由于经过打压一卸载后的 Bladder 会产生较大的变形,很难通过常规手段取出。实验发现,随着金属 Bladder 的厚度增加,打压后的变形量将随之增大,其可操作性将大大降低(如 0.5mm 厚金属 Bladder 打压后在结构中较难取出)。因此,综合装配等实际操作因素,在未来全 Nb_3Sn 超导离子源装配过程中,建议选择厚度为 0.3mm 的金属 Bladder(以下实验也均采用 0.3mm 的金属 Bladder)。此外,为了保证其能顺利取出,我们在实验前将 Bladder 结构浸渍到润滑石墨粉中,并且在抽取时,使用小型卷扬机,匀速地将其从整体结构中抽取出来。通过此种方法取出来的 Bladder 结构,破坏率可控制在 30% 以下,从而提高了 Bladder 结构的重复使用效率。



图 4 带有铝壳的铁质二极结构及其打压过程
Fig. 4 A iron dipole with shrink-fit aluminum shell and its Bladder

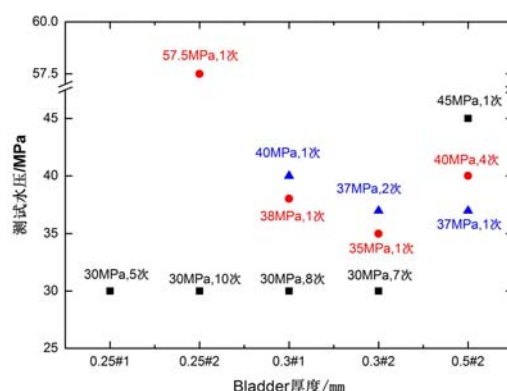


图 5 自制 Bladder 的厚度与循环打压次数的关系
Fig. 5 The relation between the thickness of Bladder and its anti-fatigue properties under circular hydraulic

1.3 应变测量控制系统

由于在异型超导磁体结构预应力施加过程中,经常会遇到磁体或低温构件结构复杂或出于安全考虑(如打压情况下应变测量)时,需要测量仪器应与待测的超导磁体结构保持一定的距离。而若将应变仪与测量构件之间采用数米或数十米长的拖缆进行连接,不仅费用很高、安装不便,而且长导线传输也会使应变测量的精度进一步降低。为了增加打压过程中的安全性,减小应变仪与接收终端之间导线产生的误差对测量结果的影响,在本实验中,采用了基于 IEEE802.15.4/ZIGBEE 通讯标准的无线应变仪来采集打压过程中的应变测量电信号(如图 6)。该无线应变仪可以支持多组多种桥路连接方式的应变测量,其测量范围为 $-25000 \sim 25000 \mu\epsilon$,分辨率为 $0.01 \mu\epsilon$ 。图 7 是各应变片布置位置的平面图。

为了克服电阻应变片只能对被测试样进行定点接触式测量的缺点,本实验将数字图像相关这一基于图像的非接触变形测量方法引入到预应力施加过程中,以测量结构的全场应变情况,作为一种基于数字图像处理 and 数值计算的先进全场变形光学测量技术,数字图像相关方法处理的是变形前后记录的两幅数字图像,通过一系列的优化算法,计算出被测区域的应变情况。实验装置如图 8、图 9 所示,将安放在三脚架上的 CCD 相机(型号为 ARAMIS-6.3 4M rev03,空间分辨率为 $2400\text{pixels} \times 1728\text{pixels}$)放置在铝质二极结构的正上方约 1m 处,并且使其光轴与结构垂直,准确聚焦时成像系统放大倍数为 0.134 mm/pixel 。用普通白光光源作为室验过程的照明,由于结构的表面呈白色,为给相关匹配提供特征,试样表面用黑漆喷涂,以形成随机分布的人工散斑模式。此外,在本实验中,非接触测量技术应用于室温下结构装配过程中的应变全场测量,对于超导磁体降温及励磁等极端环境下的应变测量,我们将运用分布式光纤布拉格光栅技术,对其结构的全场应力应变行为进行实验与分析,我们会在后续实验研究中陆续报道相关测量结果^[13]。

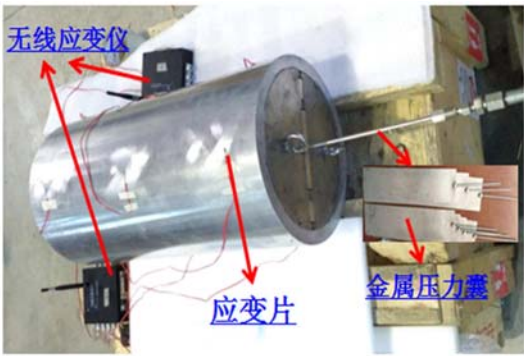


图 6 运用无线应变仪对打压过程中的应变实施检测
Fig. 6 Strain measurements based on wireless strain acquisition

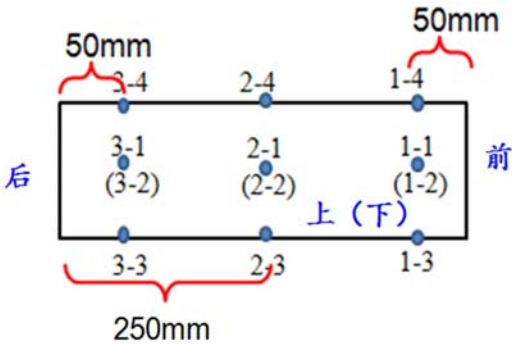


图 7 应变片布置位置平面图
Fig. 7 Schematic drawing of strain gauges



图 8 非接触式数字图像相关测量系统图
Fig. 8 Strain instrument based on noncontact digital image correlation method



图 9 非接触式数字图像相关测量现场
Fig. 9 Strain measurements based on DIC technology

2 实验测量结果与讨论

为了验证打压过程中研制的 Bladder 在特定工装下的稳定性,以及在应变检测的准确性和可靠性,我们设计了一套水压连续加载方案(如图 10),测试 Bladder 工作的稳定性。Bladder 无泄漏、压力可以稳定维持、应变仪读数稳定,在水压加载实验时,通过调节气压阀,实现小步长连续加载,水压可加载至 43MPa 左右,此后压力在无泄漏的状况下可以稳定在 40MPa 左右,应变仪读数在小范围波动($\pm 2\mu\epsilon$),可以保持稳定。在对 Bladder 打压过程中,无线应变仪和非接触式数字图像相关测量系统均实时地检测其应变变化情况。

图 11 给出了不同测试位置的平均应变测量结果及其误差分析。由图可以看出,在 30MPa 打压压力情况下,结构对称的量点测量结果大致相同,而上下表面的检测点的实验误差远小于左右两边的,这



图 10 水压连续加载方案
Fig. 10 Hydraulic loading proposal

是由于结构加工装配过程中过大的摩擦力造成的,鉴于装配、加工过程中结构的不确定性,在对 Bladder 打压过程中实行应变监控时,应尽量选择结构中心区域,以减少机械加工所引起的实验测量误差。从图 12 可以看出,随着测试水压的增大,铝壳上表面中心点 2-1 环向应变逐渐增大,且 5 次测量结果均比较接近(误差小于 3%),说明在打压过程中,通过应变检测来控制结构内部预应力施加是可行的、精确的。

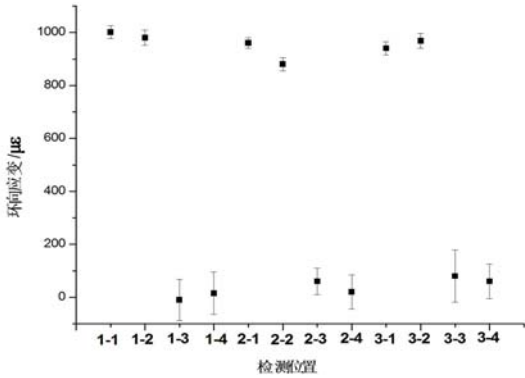


图 11 检测位置及其应变(测试水压 30MPa)

Fig. 11 Strain of shell during Bladder operation(30MPa)

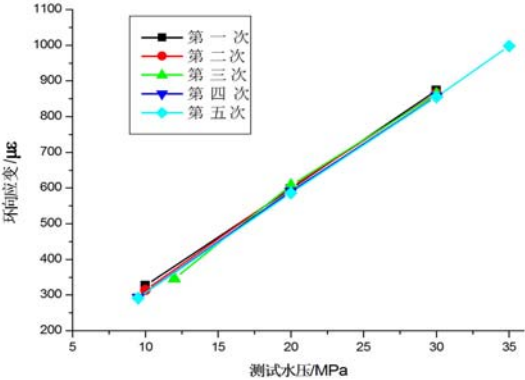


图 12 铝壳中心区域(点 2-1)测试应变与测试水压
Fig. 12 The relation between strain and pressures
for tested point 2-1

表 1 非接触式 DIC 技术测试铝壳表面关键点的应变数据

Tab. 1 Strain measurements based on DIC technology for some key tested points on aluminum shell

测试水压/MPa	点 1-1 的环向应变/ $\mu\epsilon$	点 2-1 的环向应变/ $\mu\epsilon$	点 3-1 的环向应变/ $\mu\epsilon$
0	0	0	0
10	354	374	365
20	619	654	624
30	936	967	940

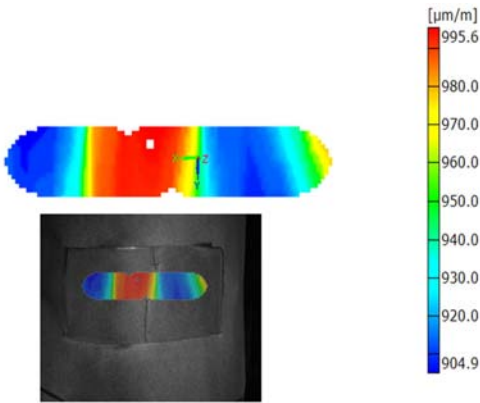


图 13 测试水压加至 30MPa 时的全场应变图
Fig. 13 Full-field strain measurements
during Bladder operation(30MPa)

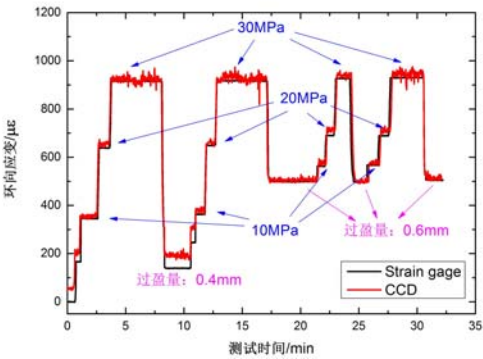


图 14 Bladder 打压过程中两种应变检测方法对比
Fig. 14 Two strain measurement methods
during Bladder operation

为了得到 Bladder 打压过程铝壳结构表面的全场应变,并验证电阻应变片测试方法,实验中,将 CCD 工业相机搭建到二极管结构的上方,实时检测 Bladder 打压过程铝壳结构表面的全场应变。实验中,利用高压增压系统逐步给二极管结构施加预应力,依次记录各点电阻应变片的应变值,每次加载完毕记录数据后,利用 CCD 工业相机拍下二极管结构铝壳表面已经变形的数字散斑图,实验数据记录见表 1。图 13 给出了 Bladder 打压过程铝壳结构表面的全场应变。由图可以看出,在打压过程中,铝壳上表面中

心区域应变最大,当远离中心区域时,应变逐渐减小,这与实际打压情况相符合。由于整体结构机械加工的不对称性,铝壳上表面全场应变分布图近似对称,这说明异型超导磁体与约束结构的配合度对于其预应力的均匀施加至关重要。此外,通过 CCD 拍摄的全场应变图还可以定量地判断结构装配的姿态等。由图 14 可知,数字图像相关测量技术与电阻应变片测量精度已经比较接近,并且结论一致:铝壳结构表面的应变随着 Bladder 的压力增大而增大,当 Bladder 卸压时,结构表面的应变随着相应地减小,而当 Bladder 处于保压状态时,结构表面的应变处于基本不变状态。结果表明:非接触的 CCD 应变测试技术可以精确地给出打压过程中铝壳表面全场应变的测试结果,而且可以帮助评价整体装配过程的合理性。

3 结论

本文针对异型超导磁体结构预应力施加及其应变控制性测量等工程需求,基于气压—水压混合高压增压系统,结合电阻应变与非接触式全场应变测量方法,提出了超导磁体结构装配后预应力施加与应变测量分析控制技术,并将其运用到带有铝壳约束的铁质二极结构装配后的预应力施加测量与分析中,得到以下主要结论:

(1) 自主集成气压—水压混合高压增压系统,控制水压范围的 10~120MPa,步长为 4MPa,并可同步显示压力,在此范围内能够维持设定的压力恒定不变,误差控制在 ± 1.5 MPa 以内;

(2) 采用连续激光焊接技术,自主研制了加宽型金属 Bladder,经循环打压测试,所研制的厚度为 0.25mm 的 Bladder 均可在 30MPa 范围内循环 5 次以上,而随着 Bladder 的厚度增加,其抗循环打压的性能得到较大的提高,当 Bladder 的厚度为 0.5mm 时,Bladder 可在 40 MPa 范围内循环 5 次以上;

(3) 电阻应变片与非接触的 CCD 应变测试技术均能在 Bladder 打压过程中给出高精度的测量结果,而非接触的 CCD 应变测试技术可以给出在打压过程中铝壳表面全场应变测试结果,且可以帮助评价整体结构装配的合理性等。

参考文献:

- [1] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B—Beam Interactio, 2013, 317:263—265.
- [2] Juchno M, Hafalia A, Lu W, et al. Mechanical design of a Nb₃Sn superconducting magnet system for a 45GHz ECR ion source[J]. IEEE Transcations Applied Superconductivity, 2018, 28(3):4602806.
- [3] Cheng D W, Caspi S, Dietderich D R, et al. Design and fabrication experience with Nb₃Sn block—Type coils for high field accelerator dipoles [J]. IEEE Transcations Applied Superconductivity, 2014, 23(3):4002504.
- [4] Kokavec J, Cesnak L. Mechanical stresses in cylindrical superconducting coil[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 10:1451—1459.
- [5] 潘衡,刘孝坤,吴红,等. 绕制预应力对 MICE 超导耦合磁体冷质量应力状态的影响[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(5):611—616 (PAN Heng, LIU Xiaokun, WU Hong, et al. Effect of conductor winding pre-stress on stresses in cold mass assembly of MICE coupling magnet[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(5):611—616 (in Chinese))
- [6] 喇世仁,张兴义,刘伟,等. 微米铜丝的低温力学性能测试[J]. 实验力学, 2016, 31(2):193—198 (LA Shiren, ZHANG Xingyi, LIU Wei, et al. Low temperature mechanical performance test for micro copper wire[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(2):193—198 (in Chinese))
- [7] Kim Y, Hahn S, Voccio J, et al. Strain in YBCO double-pancake coil with stainless steel under external magnetic field[J]. IEEE Transcations Applied Superconductivity, 2015, 25(3):4300504.
- [8] Guan M, Hahn S, Bascuñán J, et al. A parametric study on overband radial build for a REBCO 800-MHz insert of a 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet[J]. IEEE Transcations Applied Superconductivity, 2016, 26(4):430120.
- [9] Caspi S, Gourlay S, Hafalia R, et al. The use of pressurized bladders for stress control of superconducting magnets[J]. IEEE Transcations Applied Superconductivity, 2001, 11(1):2272—2275.
- [10] Hafalia R R, Bish P A, Caspi S, et al. A new support structure for high field magnets[J]. IEEE Transcations

- Applied Superconductivity, 2002, 12(1):47–50.
- [11] Ferracin P, Bartlett S, Caspi S, et al. Mechanical analysis of the Nb₃Sn dipole magnet HD1 [J]. IEEE Transactions Applied Superconductivity, 2005, 15(2):1119–1122.
- [12] 张恺, 王呈涛, 胡一南, 等. Bladder R&D and test[R]. 兰州:磁体技术讨论会, 2016 (ZHANG Kai, WANG Chengtao, HU Yinan, et al. Bladder R&D and test[R]. Lanzhou: Symposium on Magnet Technology, 2016 (in Chinese))
- [13] Qiang Hu, Xingzhe Wang, Mingzhi Guan, et al. Strain responses of superconducting magnets based on embedded polymer-FBG and cryogenic resistance strain gauge measurements [J]. IEEE Transactions Applied Superconductivity, 2019, 29(1):8400207.

Pressurized Bladders and strain measurements technology for allotype superconducting magnet structure during an assembly

WU Bei-min^{1,2}, XIN Can-jie¹, GUAN Ming-zhi¹, WU Wei¹

(1. Institute of Modern Physics of Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Western Disasters and Environment, Ministry of Education of China, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In order to study the pressure exertion and the strain measurement and control of allotype superconducting magnet structure, some key technologies based on pneumatic-hydraulic booster system and homemade pressurized Bladders are developed. The resistance strain gauges and a high speed/resolution CCD camera with noncontact digital image correlation method to measure the full-field strain are employed. To verify the reliability and accuracy of pneumatic-hydraulic booster and strain measurement system, the iron dipole with shrink-fit aluminum shell is used to simulate the allotype superconducting magnet structure's assembly. During its assembly and pressure exertion, strain on shrink-fit aluminum shell is detected synchronously by the strain gauges and the high-speed CCD camera, respectively. The results show that the pneumatic-hydraulic booster system can work well between 5MPa and 120MPa with the controllable step of 4MPa and the deviation of ± 1.5 MPa. The widening pressurized Bladders made by the continuous laser welding technology can be used for 8 times under 30MPa hydraulic conditions. There is a linear relationship existing on strain between shrink-fit aluminum shell and Bladder's pressure for the iron dipole with shrink-fit aluminum shell. Strain gauges and the high speed/resolution CCD camera with noncontact digital image correlation method can both work well during assembly and pressure exertion of the iron dipole with shrink-fit aluminum shell, and the full-field strain of aluminum shell can be obtained under proper experimental conditions including lights, speckle and focal length. The present results may provide some basis measurements on pressure exertion and strain measurements of full Nb₃Sn superconducting ion sourcesmagnet during its assembly at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences (IMP, CAS).

Keywords: allotype superconducting magnet structure; iron dipole with shrink-fit aluminum shell; pressurized Bladder; resistance strain gauges measurements; noncontact digital image correlation method