

## 脉冲电抗器结构应力测量\*

俞小华<sup>1,2</sup>,董健年<sup>1</sup>,王浩<sup>1</sup>,陈远晟<sup>1</sup>,杨希<sup>1</sup>  
(1. 南京理工大学能源与动力工程学院,江苏南京 210094;  
2. 中国人民解放军73198部队,江苏南京 210009)

**摘要:**为了对高压脉冲放电时电抗器结构受力及电流密度分布规律进行分析,使用电阻应变片对电抗器铜带进行应力测量。利用厚壁筒受压模型对应力测量系统的结果进行计算,设计内置气囊增压法来等效铜带上的应力对测量系统进行标定,并对标定实验数据进行验证。使用半桥补偿电路、屏蔽线及电桥盒共地的方法来减小脉冲电磁干扰及测量回路中寄生电阻和电容带来的电气干扰。实验结果表明:同一测量点处的环向应变峰值比轴向应变峰值大,边缘处的应变大于中心处的,需要在电抗器铜带边缘处加强外包约束。根据应力测量结果推断:铜带边缘处电流密度约为中心处电流密度的1.2倍。

**关键词:**脉冲电抗器;电阻传感器;轴向应变;环向应变;电流密度

**中图分类号:**TM835.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)03-124-06

## Measurement of stress in pulsed reactor structure

YU Xiaohua<sup>1,2</sup>, DONG Jiannian<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, CHEN Yuansheng<sup>1</sup>, YANG Xi<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
2. The PLA Unit 73198, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** In order to analyze the structure stress and the current density distribution on the pulsed reactor in the course of working, the test on the stress was designed. The hoop stress on both the edge and the center of copper belt was obtained by the resistance transducer. The stress result was validated by calculating the thick wall cylinder model with the inflation pressure. To calibrate the stress value, the copper belt coil with a ballonet inside was designed. The half-bridge circuit, electrical grounding of the bridge cases and shielding wires were designed and put in practice to reduce the pulsed electromagnetic interference. The disturbance generated by the parasitic resistance and the stray capacitance was reduced by electrical grounding of the bridge cases. The experiment results show that the hoop strain is larger than the axial strain, the strain on the edge is larger than the strain in the center. Reinforcement should be applied on the edge of the copper belt. And it can be speculated that the current density on the edge is about 1.2 times near the center.

**Key words:** pulsed reactor; resistance transducer; axial strain; hoop strain; current density

电磁发射技术作为一种新能源武器技术正在飞速发展,为了满足实战化要求,限制电磁发射武器发展的瓶颈——储能单元模块亟待进一步小型化、集成化。脉冲功率源装置作为电磁发射武器最常用的储能单元,是以较小功率将能量用较长时间输入到较大体积的储能装置中,然后在极短的时间(纳秒至毫秒级)内向负载释放,形成超高脉冲输出,具有高电压、大电流、高功率、强脉冲的特点。脉冲电抗器主要起到限流、调节脉宽及中间储能的作用,为抑制磁饱和,一般采用空芯结构,由铜带紧密绕制而成。在纳秒至毫秒级的时间内,脉冲电抗器上瞬间通过高达千安级的电流,

由于存在趋肤效应及邻近效应,电抗器铜带上电流密度分布不均,将使得局部电流密度过大,产生局部温升,而电抗器线圈的缠绕方式导致脉冲磁场强度高、电流分布不均明显,并且难以通过直接测量的方式对电抗器铜带上电流密度分布规律进行测量。电流分布不均带来电磁力局部集中的问题,为保证结构强度,常常采用环氧树脂灌封的方式对电抗器结构进行加固。采用粘贴型的电阻应力传感器能够对电抗器铜带结构所受应力进行测量,并根据应力测量结果推算出电流密度的分布。Lee等<sup>[1]</sup>通过解析计算及应力试验,对分布在法兰盘上的三对强电流组结构进行了受力分析及优

\* 收稿日期:2015-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405235);装备预先研究资助项目(51326020302)

作者简介:俞小华(1985—),女,江苏高邮人,博士研究生,E-mail:yuxiaohua1002@163.com;

董健年(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:njustdong801@163.com

化设计。彭涛等<sup>[2]</sup>使用有限元仿真对预应力、电磁力和热应力对磁体内部应力分布的影响进行分析,得出预应力和热应力对整个磁体的应力分布影响不大,电磁力导致的环向应力将使内层线圈发生分离,而后彭涛等<sup>[3]</sup>在脉冲磁体线圈层间埋设光纤传感器,对室温下产生 10 T 脉冲磁场和温度为 77 K 产生 41 T 脉冲磁场下的磁体变形和冷却效果进行了实验测量,冷却收缩使得光纤光栅的焊接接头光损过大,并由于光纤产生应力损坏,预先埋设的 22 个光纤传感器只有 4 个输出信号,且由于光纤传感器的温度耦合效应,当温度降至初始温度时,应变信号才归零。光纤光栅传感器通常由纤芯和外面的保护层组成<sup>[4]</sup>,封装过的光纤光栅传感器尺寸与电阻应变片相比尺寸较大,不利于布置于电抗器铜带上进行点测。

### 1 电抗器铜带应力特征理论分析

将电抗器线圈模型等效为厚壁筒模型,对该模型进行理想化假设:模型由均匀材料组成,各部分、各方向力学性质相同;即使发生变形,模型的材料特性依然具有连续性;当外力不超过一定限度时,模型具有弹性变形特性;认为线圈轴向截面上应力均匀分布。

由于脉冲电抗器力学模型中弹性变形的变形量与模型原件相比非常小,认为其为模型原件尺寸的高阶小量,在力学分析时忽略受力导致的模型变形。取厚壁筒模型体微元对电抗器应力特点进行分析,如图 1 所示。假设该微元处的内径为  $r$ ,单元径向长度为  $dr$ ,轴向厚度为  $dz$ ,则圆筒其他部分在单元体的侧面上将作用有环向应力  $\sigma_\theta$  和径向应力  $\sigma_r$ 。电抗器线圈通电时, $B$  为通电后电抗器线圈在微元处的磁感应强度, $j$  为该微元内的电流密度,微元受到的电磁力  $f_B$ 、环向力  $f_\theta$ 、内弧面径向力  $f_{ri}$ ,外弧面径向力  $f_{ro}$  表达式如下:

$$f_B = BIL = Bjrdzdzd\theta \quad (1)$$

$$f_\theta = 2 \times \sigma_\theta \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) drdz \approx \frac{d\theta}{2} \cdot \sigma_\theta drdzd\theta \quad (2)$$

$$f_{ri} = \sigma_r r d\theta drdz \quad (3)$$

$$f_{ro} = (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) d\theta dz \quad (4)$$

将式(1)~(4)代入径向受力平衡方程  $f_B + f_{ro} - f_\theta - f_{ri} = 0$  中,并略去高阶无穷小量,得到:

$$Bjr + r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (5)$$

假设微元在初始状态下位置为  $ABCD$ ,受电磁力产生形变后的位置为  $A_1B_1C_1D_1$ ,如图 2 所

示,则其径向应变与环向应变的表达式为:

$$\varepsilon_r = \frac{A_1D_1 - AD}{AD} = \frac{(u + du + dr - u) - dr}{dr} = \frac{du}{dr} \quad (6)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{D_1C_1 - DC}{DC} = \frac{(r + u)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} \quad (7)$$

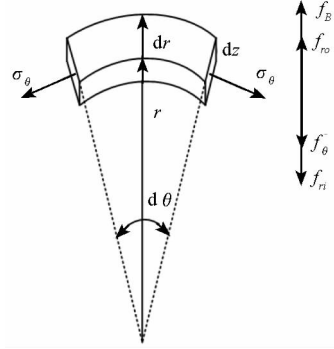


图 1 线圈单元受力图

Fig. 1 Force diagram of coil element stress

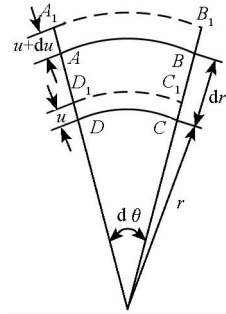


图 2 线圈单元变形图

Fig. 2 Diagram of coil element deformation

电抗器由紫铜绕制,紫铜为各向同性材料,在小变形条件下切应力不影响单元体的棱边长度变化,当单元体各个面上既有正应力又有切应力作用时,主应变和正应力的方向重合<sup>[5]</sup>。根据广义胡克定律,电抗器线圈在弹性应变范围内应力与位移的关系可表示为:

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2} \left( \frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2} \left( \frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right) \quad (9)$$

其中, $E$  为弹性模量, $\mu$  为泊松比。

电抗器不通流时,式(5)中  $Bjr = 0$ ,此时将式(8)、式(9)代入式(5)得:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0$$

应力边界条件为:  $(\sigma_r)_{r=ri} = -P_1$ ;  $(\sigma_r)_{r=ro} = -P_2$ 。

解方程得:

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{P_1 r_i^2 - P_2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot r + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{(P_1 - P_2) r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r} \tag{10}$$

得到径向位移和环向应变的计算式为:

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{P_1 r_i^2 - P_2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} r + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{(P_1 - P_2) r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r} \tag{11}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{P_1 r_i^2 - P_2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{(P_1 - P_2) r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} \tag{12}$$

### 2 应变测量的干扰补偿

应变片金属栅材料存在磁阻效应,在脉冲放电时,电抗器周围的磁场强度将会在几百微秒时间内达到特斯拉级,在脉冲强磁场条件下,即使电抗器铜带上没有应变,应变片上电阻值也会发生变化,这种干扰信号不可忽略。该干扰信号只与磁场的大小有关,与磁场的方向无关<sup>[6-7]</sup>。

为了抑制磁场干扰,采用相邻半桥补偿法进行测量,即在构件厚度可以忽略的前提下,将工作片和补偿片粘贴在构件正反两面同一位置处,认为二者在强脉冲磁场中产生同样的电阻变化量,根据惠斯通电桥电路输出特性,消除电磁干扰。由于环氧板具有电磁绝缘性,将工作片和补偿片粘贴在环氧板上,放置于亥姆霍兹线圈脉冲磁场中,对补偿片效果进行测量,实验结构如图 3 所示,测得曲线如图 4 所示。

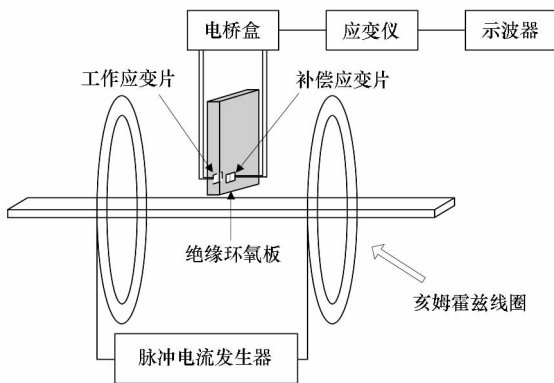


图 3 干扰补偿实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of disturbance compensation experiment

对比图 4 中的峰峰值可以看出,当存在外部强磁场时,无补偿片的 1/4 桥接法输出信号峰峰值约为 0.9 V,增加补偿片后半桥接法的输出信号峰峰值约为 0.4 V,说明补偿片对抑制脉冲磁场干扰效果比较明显,但由于长直导线电缆的电容性和磁场性、被测构件和测量仪器之间的电气

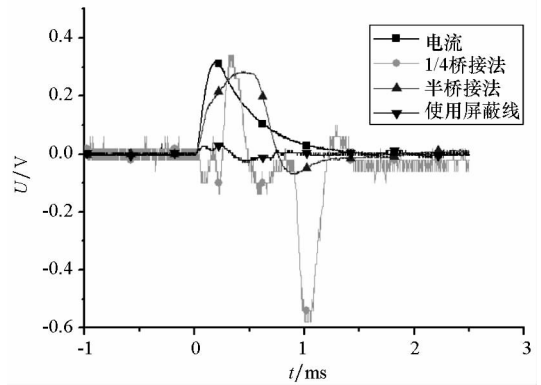


图 4 干扰补偿输出信号

Fig. 4 Disturbance compensation signal

泄露、地电势的不平衡等其他干扰因素,依然存在明显干扰。将应变仪电桥盒采用三线接法且共地,抑制测量电路导线间的共模干扰。采用屏蔽导线连接减小测量回路中寄生电阻和电容带来的电气干扰,这种寄生元素对于测量系统来说无法避免<sup>[8-9]</sup>。使用屏蔽导线后,消除了影响电桥平衡的导线感应电动势,并且增大了测量回路与电桥供电回路之间的阻抗,使得二者不能通过寄生阻抗导通。干扰信号不具有完全重复性,使用屏蔽线和半桥补偿法后输出信号峰峰值约为 0.02 V,比采用普通导线要小得多。通过一系列改进措施,脉冲磁场对应变测量系统的干扰得到了有效地抑制。

由金属材料制成的应变片,同时具有温度效应,它的阻值随着温度的变化而变化<sup>[10]</sup>。脉冲放电时,电流在电抗器铜带上产生热,当温度变化较大时,应变片产生的热漂移导致的视应变较大。脉冲电源的电流持续时间为 1 ms 左右,文献[11]中经过实验,得出平均单次脉冲热载荷在电抗器内部的温升仅为 2.85 °C,因此与磁应力相比,单次实验时热应力影响可忽略不计。由于单层铜带厚度很薄,忽略内外环面上温度梯度,利用电桥的加减特性进行磁场补偿的装置,同理可以进行温度效应的补偿。

### 3 电阻应变传感器的标定

测量脉冲磁场环境中电抗器铜带结构的应变,首先需要对该测量环境下应变传感器进行标定。结合第 1 节电抗器应力特征分析,设计标定装置:电抗器是空心线圈,为了模拟电抗器铜带上电磁力带来的应力,采用内置气囊增压法等等效该应力。将气囊置于电抗器空心位置,对气囊充气,使气囊对外壁产生压力。由于橡胶材质的气

囊较软,当使用压力泵对其充气时,气囊变形,容易在外部边界,尤其是边缘处产生不均匀压力,而应变传感器的标定要求圆筒内壁压力处处相等,因此在气囊外部增置内径与气囊完全相切的圆柱形聚氯乙烯(PolyVinyl Chloride, PVC)管作为内芯,并在PVC管侧面开缝以降低内芯的径向刚度,使其能够在受内部压力时均匀向外膨胀,产生均匀的环向应变。当压力泵对气囊充气时,气囊向外膨胀导致PVC管管径增加,进而使得铜带线圈受到均匀的内部膨胀压力,铜带发生变形,粘贴在铜带外壁上的电阻应变片产生应变,经过应变仪和示波器可以获取应变传感器的输出信号。充气压强与应力等价,将充气压强与示波器输出电压进行数据分析,对应变片进行标定<sup>[12-13]</sup>。标定实验所用带气囊的线圈装置如图5所示。

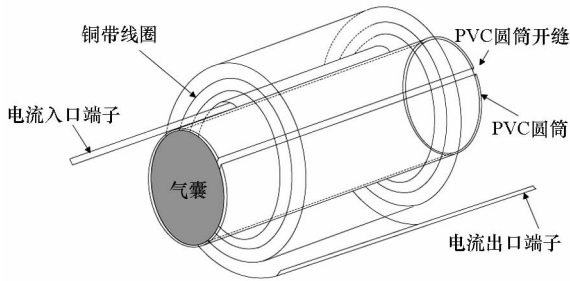


图5 标定实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of calibrating equipment

由于电抗器结构小、磁场强,在强电磁脉冲环境下对应力应变进行测量,要求测量电路必须和电抗器导体进行电气隔离,并具有一定的抗电磁干扰能力,因此采用半桥接法对磁场干扰进行补偿。选取BX120-3AA型带自温度补偿的金属箔式应变片进行试验。该应变片灵敏度高、量程大、尺寸小、频率响应好,可测0~500kHz的动态应变。使用YD-15型载波动态电阻应变仪将电阻应变信号输出为电压,该应变仪给电桥供电电压 $U_i = 3\text{ V}$ ,工作频率范围为0~1500Hz,脉冲电流激励磁场的主要频谱分量集中在0~1000Hz,因此采集到的应变信号是可信的。该应变仪内部使用的应变片灵敏度系数 $K_0 = 2.00$ ,如果使用其他灵敏度系数为 $K$ 的应变片,测量值需按式(13)修正,其中 $\varepsilon$ 为实际应变, $\varepsilon_c$ 为测量应变。

$$\varepsilon = \frac{K_0}{K} \cdot \varepsilon_c \quad (13)$$

测量中,对应变仪的输出进行了 $10^4$ 倍的放大。应变片测到的环向应变即为气囊增压在铜带上产生的环向应变。根据电阻应变片本构方程及电桥输入输出电压关系,得出气囊内压 $P_1$ 与电阻

应变片输出电压 $U_o$ 之间的关系为:

$$3 \times 10^{-5} U_o = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{P_1 r_i^2 - P_2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{(P_1 - P_2) r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (14)$$

为固定标定线圈的结构,对线圈施加 $P_2 = 80\text{ kPa}$ 外部预压强,线圈内半径 $r_i = 25\text{ mm}$ ,外半径 $r_o = 30\text{ mm}$ ,铜带弹性模量 $E = 110\text{ GPa}$ ,泊松比 $\mu = 0.33$ ,化简式(14)得内压 $P_1$ (单位kPa)与应变片输出电压 $U_o$ (单位V)的关系为:

$$P_1 = 726 U_o + 91.79 \quad (15)$$

从式(15)可以看出,线圈内压与应变输出呈线性正比关系。采用对气囊定压充气的方法对传感器进行实验标定,图6为实验测得充气压强与示波器输出电压曲线,根据测量数据进行线性拟合,图中虚线为线性拟合结果,线性度为4.7%,表达式为:

$$P = 212.76 U_o + 50.59 \quad (16)$$

式(15)与式(16)的差距是由于理论计算时采用了简化模型,且实验中存在无法避免的存在电气干扰造成。两个式子都给出的是线性正比关系,且在同一个数量级上。可以认为,实验装置是合理的,可以使用实验拟合函数对通流后的应变数据进行处理,对电抗器上的应力规律进行研究。

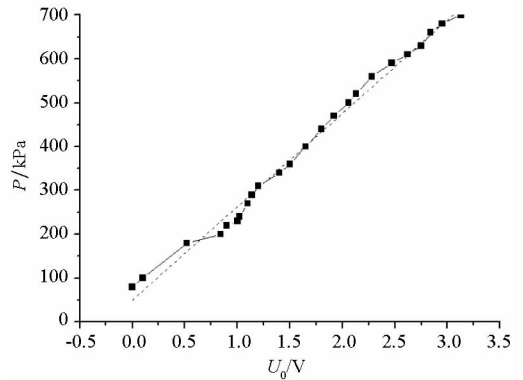


图6 应力曲线及线性拟合

Fig.6 Stress curve and linear fitting

### 4 电磁力测量数据及分析

将测量应变片粘贴于待测铜层外表面,补偿应变片粘贴于待测铜层内表面对应点处,采用背片式的补偿片接法<sup>[14-15]</sup>,在应变仪上对应变片弯曲产生的预应变进行系统调零。由于铜层很薄,可以认为测量片与补偿片处于同一位置,所受磁场干扰一致。铜带上粘贴聚亚酰乙胺薄膜,应变片粘贴在聚亚酰乙胺薄膜上,由于聚亚酰乙胺具有良好的绝缘性,能够在应变测量电路与脉冲放电电路之间形成良好的电气隔离。在铜带弹性形

变范围内时,应力结果可以外推。

选取铜带中心和边缘的点进行环向应变和轴向应变的测量,得出  $U_o-t$  曲线,根据式(16)进行数据处理得出  $P-t$  曲线,图 7 所示为放电电压为 1 kV 时,铜带边缘及中心测量点的环向应力、轴向应力。可以看出,环向应力大于轴向应力,边缘应力大于中心应力。由于测量系统机械结构的振荡频率比电流激励的频率要低,干扰信号与应变信号具有异步性,应变响应时间与电流峰值对比存在约 1 ms ~ 2 ms 的时延。干扰信号比应变信号小 1 个数量级,且脉宽很窄,容易区分出来。有用信号出现在 1 ms 之后。边缘处测量点的应力第一个峰值下降沿段,出现一个类似峰值叠加的信号。由于测量系统整个机械结构属于弹性系统,受力之后存在机械振荡,因此认为第一个正向应力峰值为电磁力在铜带上作用导致的应力,观察应力峰值随放电电压的变化,如图 8 所示。可以看出,在不同的放电电压下,铜带边缘环向应力最大、中心环向应力次之,且边缘环向应力的斜率最大。可以推断,当放电电压进一步增大或多次进行放电实验时,边缘处最易发生变形,这与文献[2]的仿真结果一致。根据法拉第的观点<sup>[16]</sup>,铜带上的环向磁应力  $\sigma_\theta \propto j^2$ ,可以得出脉冲放电

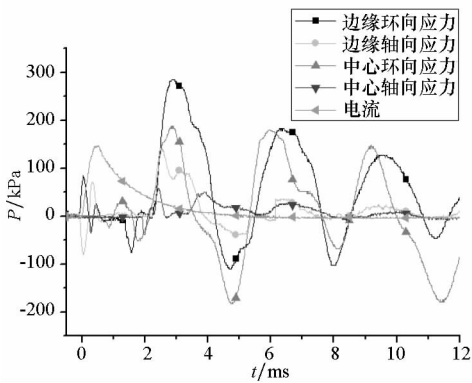


图 7 外层铜带应力曲线

Fig. 7 Stress on outer layer of copper belt

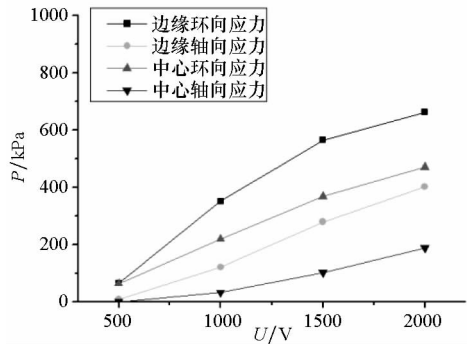


图 8 应力峰值曲线

Fig. 8 Peak stress curves

时,铜带边缘处电流密度约为铜带中心处电流密度的 1.2 倍。

### 5 结论

使用电阻应变片对电抗器铜带结构应力进行测量,并利用厚壁筒受压模型对测量系统进行理论计算,设计气囊增压装置进行标定,验证了测量系统的可用性。使用半桥补偿电路及屏蔽线减小干扰,根据实验结果,得出铜带在脉冲放电过程中由于电磁力载荷作用产生的应力特征及电流密度分布规律为:

- 1) 同一测量点处的环向应力峰值比轴向应力峰值大,同一方向的应力边缘处的大于中心处的,边缘处应力二次叠加效果明显;
- 2) 脉冲放电时,铜带边缘处电流密度约为铜带中心处电流密度的 1.2 倍。电抗器铜带边缘处最易发生环向膨胀变形,需要在电抗器铜带边缘加强约束加固。

### 参考文献 (References)

[1] Lee J H, Song J B, Kim K L, et al. Optimal arrangement of current leads to minimize electromagnetic force [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20 (3): 1741 - 1746.

[2] 彭涛, 辜承林. 脉冲强磁体中应力的有限元分析[J]. 核技术, 2004, 27(9): 700 - 704.  
PENG Tao, GU Chenglin. Finite element analysis for stress in high pulsed magnet [J]. Nuclear Techniques, 2004, 27(9): 700 - 704. (in Chinese)

[3] Peng T, Xiao H X, Herlach F, et al. Measurement of the deformation in pulsed magnets by means of optical fiber sensors [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 12 - 15.

[4] Dai Y B, Liu Y J, Leng J S, et al. A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(10): 1028 - 1033.

[5] Qiao X G, Li Y L, Hu M L, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature with different period  $\Lambda$  and superimposed optic fiber Bragg grating sensors [J]. Applied Laser, 1998, 18(6): 254 - 258.

[6] Milushev M, SüBer M, Wüchner F. Investigation of two different types of displacement transducers in the cryogenic environment [J]. Cryogenics, 2004, 44(3): 197 - 201.

[7] Freynik H S, Jr., Roach D R, Deis D W, et al. Nickel-chromium strain gages for cryogenic stress analysis of superconducting structures in high magnetic fields [C]// Proceedings of 7th Symposium on Fusion Research, 1977.

[8] 张庆华, 王太勇. 时频分析方法在往复机械振动特征提取中的应用 [J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(4): 16 - 17.

- ZHANG Qinghua, WANG Taiyong. Application of time-frequency analysis method in reciprocating mechanism vibration signal processing [ J ]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2002, 31(4): 16 - 17. (in Chinese)
- [9] 胡爱军,唐贵基,安连锁. 振动信号采集中剔除脉冲的新方法[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1): 126 - 127.  
HU Aijun, TANG Guiji, AN Liansuo. New method of removing pulsed noises in vibration data [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(1): 126 - 127. (in Chinese)
- [10] 郑秀媛,谢大吉. 应力应变电测技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.  
ZHENG Xiuyuan, XIE Dajun. Stress and strain electrical measuring technology [ M ]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [11] 刘佳,董健年,张小兵,等. 电磁发射用电抗器温度场影响因素研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(2): 100 - 105.  
LIU Jia, DONG Jiannian, ZHANG Xiaobing, et al. Research on factors influencing temperature of pulse inductor used in electromagnetic launch [ J ]. Journal of Ballistics, 2014, 26(2): 100 - 105. (in Chinese)
- [12] 蒙古海,张玉荣. 厚壁圆筒内超高压力的非破坏性测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(z1): 141 - 145.  
MENG Zhanhai, ZHANG Yurong. Nondestructive measurement of the extremely high pressure inside the cylinder with thick wall [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004, 18(z1): 141 - 145. (in Chinese)
- [13] 彭涛,李亮. 脉冲磁体中不锈钢筒对磁场的影响研究[J]. 核技术, 2011, 34(6): 477 - 480.  
PENG Tao, LI Liang. Influence of stainless steel cylinder on the magnetic field in pulsed magnet [ J ]. Nuclear Techniques, 2011, 34(6): 477 - 480. (in Chinese)
- [14] Sakai T, Kagayama T, Oomi G. Application of the strain gauge method to thermal expansion measurement under high pressure and high magnetic field [ J ]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1/2/3): 224 - 228.
- [15] 胡八一,刘仓理,刘宇,等. 强电磁干扰环境下的爆炸容器动态应变测试系统[J]. 测试技术学报, 2005, 19(1): 30 - 32.  
HU Bayi, LIU Cangli, LIU Yu, et al. Dynamic strain measuring system of explosive containment vessel under intense electromagnetic interference environment [ J ]. Journal of Test and Measurement Technology, 2005, 19(1): 30 - 32. (in Chinese)
- [16] Li L, Herlach F. Magnetic and thermal diffusion in pulsed high-field magnets [ J ]. Journal of Physics D Applied Physics, 1998, 31(11): 1320 - 1328.