



第一届  
全国强磁场  
学术讨论会

1984.10

浙江 绍兴

THE FIRST NATIONAL SYMPOSIUM  
ON HIGH MAGNETIC FIELDS  
SHAO XING , CHINA

## 前 言

强磁场和极低温、超高压、强辐射等一样，是一种极端物理实验条件，是近年来国际上正在迅速发展起来的、基础研究和新技术密切配合的、新的科学领域。它在能源技术、交流、工农业生产等国民经济各个领域和高能物理、受控热核反应、固体物理、材料科学、生物物理、化学和生物等学科都得到了广泛的应用，并在不断取得新的成果。

第一届全国强磁场学术讨论会于1984年10月10日至15日在浙江省绍兴市召开。本论文集收集会议论文和论文摘要31篇。内容包括：

1. 强磁场（主要是脉冲强磁场）的产生技术，磁体设计；
2. 磁场测量和物性测量方法；
3. 强磁场下的物性研究；
4. 强磁场在生产技术和经济建设中的应用。

近年来，随着我国科技事业的发展和国民经济建设事业的需要，不少单位已经建立10T左右的超导磁场和高达40T的脉冲强磁场；正在研制高达20T的混合型强磁场装置；在磁性材料、半导体材料、超导材料研究等领域取得初步成果；磁选、磁成形、磁疗等方面的应用正在不断扩大。

本论文集的出版得到了中国科学院物理研究所、北京大学、中国科学技术大学、中国科学院等离子体物理研究所、南京大学、湖南新化电子磁件厂等单位的赞助、深表谢意。

编 者

# 第一届全国强磁场学术讨论会

**主办单位** 中国物理学会

**承办单位** 中国科学院物理研究所  
北京大学  
中国科学院合肥等离子体物理研究所  
中国科学技术大学  
南京大学

**赞助单位** 中国科学院物理研究所  
北京大学  
中国科学院合肥等离子体物理研究所  
中国科学技术大学  
南京大学

# 第一届全国强磁场学术讨论会组织机构

## 组织委员会

- 主席** 尹道乐  
**委员** (以姓氏笔划为序)  
李传义  
杨伏明  
胡香泉  
胡洪铨  
张裕恒  
高秉均  
曹华伦  
**秘书** 杨伏明(兼)  
赵汐潮

## 出版委员会

- 主席** 尹道乐  
**委员** 杨伏明  
李传义  
张裕恒

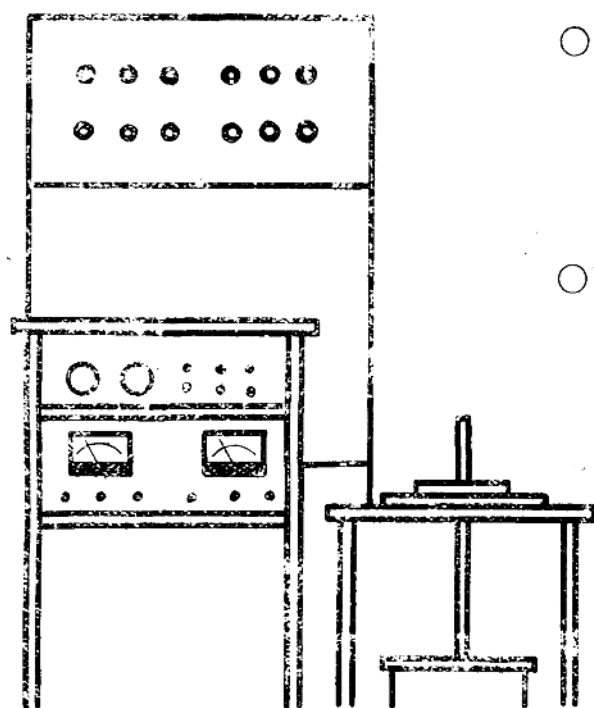
采用科学院物理所强磁场实验室科研成果

## 脉冲强磁场自动测试仪

提供 40T, 20T, 10T, 5T

各种规格脉冲强磁场

准 确      安 全      可 靠



○可用于磁学, 超导,  
低温, 电学, 光  
学等脉冲强磁场  
测量。

○可根据用户要求设计  
和提供强磁场装  
置各类部件, 磁  
体, 电源, 计算  
机控制系统, 自  
动记录系统。

湖南——新化  
新化电子磁件厂

地址: 湖南新化  
电报挂号: 0208  
电话: 551

HEXY系列

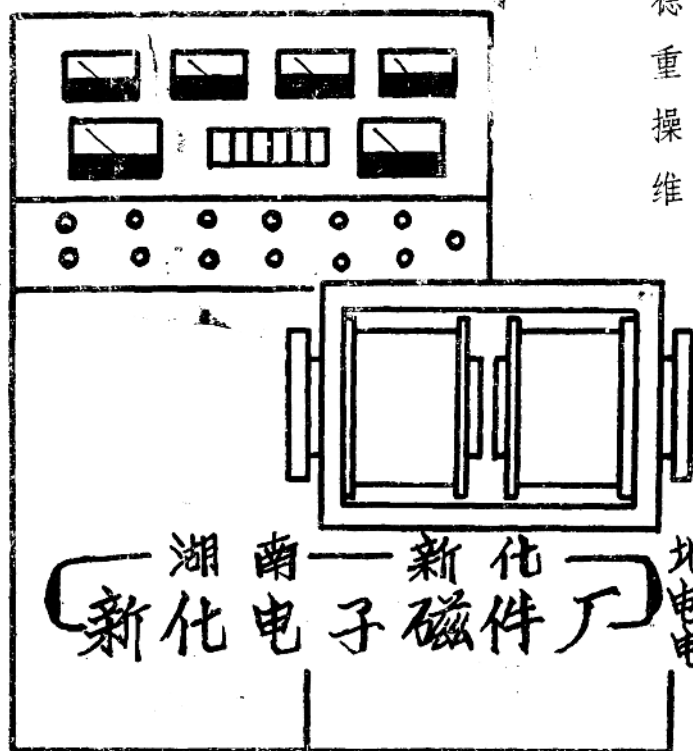
## 永磁材料快速测定仪

适用于工厂、企业快速测定铁氧体永磁

及稀土永磁的主要磁性能:  $B_r$ ,  $H_c$

$(BH)_{max}$

直接读出  
数字显示  
稳定可靠  
重复性好  
操作简单  
维修方便



地址: 湖南  
电报挂号: 0208  
电话: 551

# 目 次

## 前 言

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 第一届全国强磁场学术讨论会主办、承办、赞助单位 | (i)   |
| 第一届全国强磁场学术讨论会组织机构       | (ii)  |
| 采用科学院物理所强磁场实验室科研成果      |       |
| ——脉冲强磁场自动测试仪            | (iii) |
| HEXY系列永磁材料快速测定仪         | (iv)  |
| 第一届全国强磁场学术讨论会论文集内容      |       |

## 强磁场的产生

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 脉冲强磁场的设计理论和实验 (邀请报告)              | 张裕恒 (1)                 |
| 脉冲强磁场磁体的设计                        | 张志鹏 (15)                |
| 41 T 脉冲强磁场的应力分析                   | 施嘉标 潘引年 王伟 (23)         |
| 41 T 磁体磁场形态及其电动力的计算               | 施嘉标 潘引年 王伟 (27)         |
| 谐振式恒流充电电源                         |                         |
| ……赵汝文 张敏生 李银安 吴永生 吴成 叶茂福 赵汐潮 杨伏明  | (30)                    |
| 磁成形技术及其应用                         | 叶茂福 吴成 李银安 张宝珍 (33)     |
| 实验室用铌钛超导强磁体的研究                    | 陈宗智 单贤琦 吴秀兰 潘千里 周毅 (36) |
| 实验室用 $Nb_3Sn$ 小孔径超导磁体的研制          | 李世恕 李山林 (44)            |
| 20 T 稳定强磁场实验装置                    | 强磁场研究室 (46)             |
| 具有平顶的脉冲强磁场成形网路设计                  | 李银安 吴成                  |
| ……叶茂福 张敏生 江德仪 陆龙龙 张宝珍 赵汝文 赵汐潮 杨伏明 | (51)                    |

## 测量技术

|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| 脉冲强磁场测量系统的基本方程及其跟踪讯号峰值的条件 | 曾广达 叶妙元 (52)     |
| 强磁场下的法拉第效应                | 高瑞芬 朱泽智 雷鸣 (64)  |
| 小线圈常数的测量和校准               | 饶怡媛 鲁志荣 (66)     |
| 脉冲场下干扰信号的两种排除方法           | 蔡学榆 陈壬生 李传义 (70) |
| 用低温核磁共振法测定超导磁体的磁场强度       |                  |
| ……张钟华 王登安 龚树仁 于百江 朱凯      | (73)             |
| 低温核磁共振磁强计的建立              | 李世恕 王桂蓉 李山林 (77) |

## 强磁场磁性

|                 |          |
|-----------------|----------|
| 强磁场与物性研究 (邀请报告) | 杨伏明 (80) |
|-----------------|----------|

|                                    |                 |       |
|------------------------------------|-----------------|-------|
| $R_2Fe_{14}B$ 四方相各向异性的初步探讨         | 胡伯平 陆珉华 赵汐潮 张寿恭 | (80)  |
| $Nd-Fe-B$ 和 $Y-Fe-B$ 化合物的磁各向异性     |                 |       |
| .....杨伏明 赵汐潮 赵汝文 于志弘 张寿恭 周希坚 孙天铎   |                 | (82)  |
| 用不同工艺条件制备的高矫顽力2:17型稀土钴永磁合金反磁化过程的研究 |                 |       |
| .....赵汐潮 杨伏明 罗宏 于志弘                |                 | (86)  |
| 各向异性 $Mn-Al-C$ 永磁合金的磁性             | 史振华 周运宽 杨伏明 赵汐潮 | (89)  |
| 低温强磁场下的磁性研究                        | 刘尊孝 兰健 李国忠      | (94)  |
| 取代 GGG 单晶的磁化率                      | 李靖元 樊世勇 刘品清     | (99)  |
| $Nd_2B(Fe_{1-x}Co_x)_{14}$ 相的磁性    | 孙天铎 周希坚 杨伏明 赵汐潮 | (101) |
| 多次导数 $\frac{d^2M}{dH^2}$ 测量的一个可能方法 | 胡洪铨             | (104) |

## 强磁场输运性质

|                                              |                |       |
|----------------------------------------------|----------------|-------|
| 强磁场超导材料 (邀请报告)                               | 李传义 尹道乐        | (105) |
| 超导体临界电流的脉冲场测量                                | 蔡学榆 李传义 尹道乐    | (111) |
| $Nd_3Ge$ 临界场 $H_{c2}$ 的测量                    | 高瑞芬 朱泽智 徐宁     | (115) |
| $GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ 异质结界面中二维电子系统磁声子效应的共振结构 |                |       |
| .....吴永生 周钧铭 黄绮 杨伏明 赵汐潮                      |                | (117) |
| 强磁场中二维电子系统的SdH振荡及量子化 Hall 效应                 | 郑厚植 程文超        |       |
| .....朱泳堂 王杏华 李月霞 杨富华 毕可奎 李承芳 江丕桓             |                | (119) |
| 非晶态 $Y_{0.06}-Ni_{0.94}$ 合金膜的霍尔效应            | 王亦忠 冯敏英 龚伟 王震西 | (123) |



# 脉冲强磁场的设计理论和实验

(邀请报告)

张裕恒

(中国科学技术大学物理系)

## 提 要

本文评述了各种高强和超强脉冲磁场发生器。介绍我们提出的脉冲强磁场系统和电路系统最佳设计的理论和方法,并讨论了“磁通浓缩器”无浓缩磁通作用,因而用它产生高强磁场存在原理性的错误。

## 一、引 言

强磁场在工业、农业、医疗以及基础研究的各个领域愈来愈得到广泛地应用,特别是随场值的提高其应用范围也随之扩大。产生磁场的方法概括说有三种:常规大功率水冷有阻磁体,超导磁体(包括混合磁体)以及瞬态的脉冲磁体。在低于10T的场值下,常规磁体和超导磁体由于其稳态的特点能具有一定的优越性,但常规磁体消耗能量太大,而超导磁体虽然耗能少,但要附加一套低温设备,因而成本都较高,假如以成本而论,在高于10T的情况下,常规、超导和脉冲场成本之比大约是100:10:1。况且稳恒场的常规、超导磁体都达不到20T,目前做到最高场值的由超导、正常导体绕制的混合磁体也只达到30T。因此大于30T的磁场发生器只有脉冲场能达到。

本文介绍并评述了各种高强和超强场的脉冲磁体。介绍我们提出的脉冲强磁场系统和电路系统最佳设计的理论和方法,指出合理的设计可大大的减少能源,并指出热效应不是影响脉冲场的主要原因。本文还从理论上讨论了“磁通浓缩器”无浓缩磁通作用,因而希望用之获得高强磁场存在原理性错误。

## 二、脉冲磁体的类型

自从1924年Kapitza [1] 建立第一个脉冲磁体以来,目前脉冲磁场发生器有如下种类:绕组线圈、Bitter线圈、单匝线圈、磁通浓缩器、电磁驱动磁通压缩器(角向和轴向)和爆炸驱动磁通压缩器。

通常我们称10T以下为强磁场;在10T到100T之间为高强场;大于100T为超强场。脉冲宽度大于10ms称长脉冲,小于1ms称短脉冲。一般绕组线圈可获得大于10ms,大于40T的场值;Bitter线圈在100 $\mu$ s量级已做到70T;可获得100T以上的单匝线圈、电磁驱动器和爆炸发生器都是 $\mu$ s或小于 $\mu$ s范围。

### 1. 绕组线圈

它是由长方矩截面的铜线绕制成的空心螺旋管,一般运行在液氮温度下,高水平的参数为内径20mm,脉冲宽度17.5ms、磁场值达51.7T [2]。通常认为绕组线圈受到巨大的电磁力

磁运行过程中发热的限制。当脉冲宽度大时，必然要求绕组的圈数增多，电感增大，这将导致场值的降低。见表1<sup>[3]</sup>

表1

| 内径(mm) | 匝 数  | 上升时间(ms) | 脉冲宽度(ms) | 最大场(T) |
|--------|------|----------|----------|--------|
| 14     | 3600 | 120      | 300      | 17.0   |
| 14     | 1650 | 47       | 120      | 26.5   |
| 14     | 1160 | 35       | 80       | 31.0   |
| 14     | 800  | 22       | 48       | 34.5   |
| 14     | 800  | 21       | 46       | 36.0   |
| 14     | 600  | 16       | 36       | 40.0   |
| 14     | 400  | 8        | 19       | 46.5   |
| 14     | 300  | 6        | 15       | 51.0   |

电容组：23mF，2.5kV 72kJ

## 2. Bitter线圈

为了承受高场下巨大的电磁力，Bitter 提出一种螺旋形的线圈，见图1。通常人们

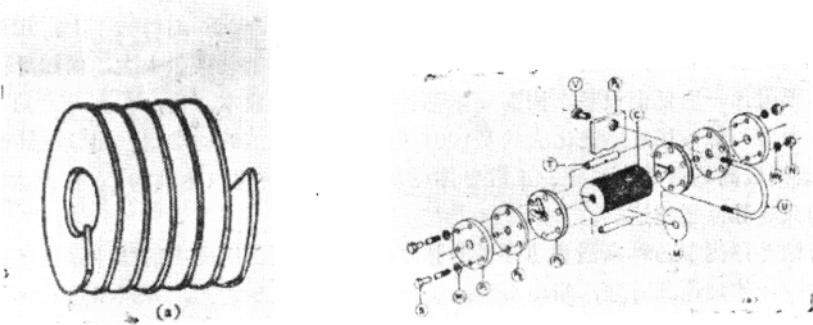


图1 Bitter线圈

(a) 示意图 (b) 装配图 B螺栓；w<sub>1</sub>垫圈；p<sub>1</sub>不锈钢后板；p<sub>2</sub>绝缘板；p<sub>3</sub>电极板；T绝缘导管；V  
螺环；p<sub>4</sub>汇流板；C. Bitter 线圈；M. 单片；U. U形螺栓；W<sub>1</sub>弹簧垫圈；N. 螺母

表2

| 结构         |            |            | 绕组           |     | 脉冲           |             | 能量                |     |
|------------|------------|------------|--------------|-----|--------------|-------------|-------------------|-----|
| 内径<br>(mm) | 外径<br>(mm) | 长度<br>(cm) | 每圈厚度<br>(mm) | 总圈数 | 上升时间<br>(μs) | Hmax<br>(T) | 电容器组<br>(kJ) (kV) |     |
| 38         | 76         | 60         | 3.2          | 16  | 400          | 24          | 75                | 4   |
| 19         | 76         | 60         | 3.2          | 15  | 240          | 55          | 75                | 4   |
| 6.3        | 2.5        | 20         | 0.75         | 19  | 80           | 70          | 9                 | 3   |
| 20         | 41         | 70         | 1.27         | 48  | 210          | 20          | 12                | 5.3 |
| 15         | 36         | 77         | 1.0          | 64  | 160          | 22          | 9                 | 3   |
| 32         | 100        | 50         | 1.25         | 23  | 50           | 28          | —                 | 11  |

称这种结构的线圈为Bitter线圈，这种结构有较好的整体性，固可承受较大的电磁力。表2给出其结构和运行参数<sup>[3]</sup>。常用的材料是铍铜。

### 3 单匝线圈

为了获得百万高斯以上的磁场，必须解决两个问题：一是能在线圈中通入大电流，一是能承受巨大的电磁力。然而向线圈中供给电流不是只靠增加能源就能完成的，线圈的电感阻止电流的进入（见第三部分），显然线圈的电感愈小愈好，因此人们设计了单匝线圈，见图2，对于单匝线圈可以将壁做得很厚以克服运行过程中的电磁力。图2给出的单匝线圈电极十分宽大，这样电极的电阻很小，则在其上损耗小，以致能量尽可能多的供给线圈，下表给出此种脉冲发生器的结构、能量和运行参数<sup>[3]</sup>。实验上Shearer<sup>[4]</sup>得到了350T的最高磁场值，场再继续升高，发生器承受不了巨大的电磁力而断裂<sup>[4]</sup>。

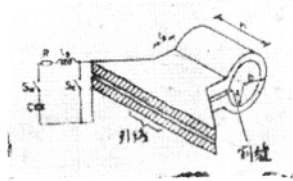


图2 电容器组供能的单匝线圈

| 结 构        |            | 脉 冲                |             | 能 量            |      |
|------------|------------|--------------------|-------------|----------------|------|
| 内径<br>(mm) | 长度<br>(mm) | 上升时间<br>( $\mu$ s) | Hmax<br>(T) | (电容器组)<br>(kJ) | (kV) |
| 110        | 7700       | 5.2                | 2.5         | 1100           | 40   |
| 100        | 1500       | 9.5                | 18.0        | 2670           | 40   |
| 70         | 140        | 1.7                | 23.0        | 115            | 2×40 |
| 6          | 10         | 7                  | 120.0       | 24             | 4    |
| 5          | 10         | 3.5                | 150.0       | 200            | 15   |
| 5          | 10         | 1.8                | 250.0       | 60             | 15   |
| 3.4        | 5.5        | 3.8                | 140.0       | 220            | 125  |
| 3          | 10         | 3.3                | 350.0       | 820            | 70   |

### 4. 磁通浓缩器

单匝线圈可获得百万高斯的超强场，但脉冲时间短，只有几微秒；用绕组线圈可以得到长脉冲，例如几十毫秒，但因其内层经受不住巨大的电磁力而使磁场值只能在50T以下，为了获得长脉冲的强场，Kim等<sup>[5-8]</sup>提出了一个所谓磁通浓缩器作为高强长脉冲磁场发生器。图3给出其原理图。它是把一个有径向割缝的中空圆柱导体（文献上称为浓缩体）插入一个多匝绕组线圈中，后者被看作是初级，前者被看作是次级。当初级中通过脉冲电流时，沿着次级的内外边缘及割缝边缘就产生一个闭合电流，该电流使“浓缩体”区域中无磁通，这部分磁通被“挤”向中空区而产生强场<sup>[5]</sup>。

显然这种结构的发生器存在两个损耗：一是初级和次级之间的耦合，二是存在二次热损耗，然而如果可以浓缩的话，它还是有利的。Srivastava<sup>[8]</sup>设法提高它的耦合效应，从而获得约40T、120 $\mu$ s的脉冲场。但是我们注意到不管是文献<sup>[8]</sup>，还是文献<sup>[5]</sup>—<sup>[7]</sup>，所有的浓缩器获得的场值都远低于预想值。

### 5. 电磁驱动磁通压缩器

(1)  $\theta$ 压缩（角向压缩）

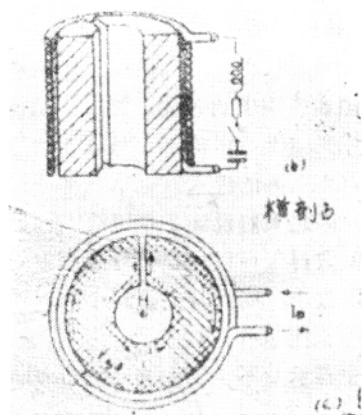
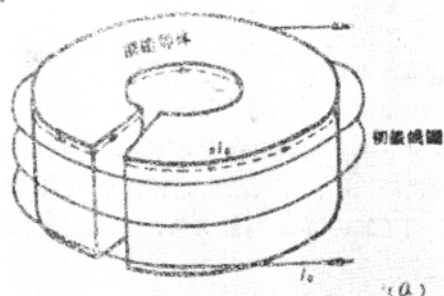


图3 磁通浓缩器

(a) 示意图 (b) 纵剖面, (c) 横剖面

图4是角向电磁驱动磁通压缩器的原理图。它是由两个同轴环柱组成,外面的环柱是单匝线圈,内闭合环柱是用壁厚为0.5—1mm Al的圆筒。当单匝线圈通电时,在线圈空间产生磁场,由于内筒是Al,所以除了在Al筒中感应起环形电流外,外线圈产生的磁场仍然可以进入Al筒内,筒中的电流和磁场的作用产生向内的径向压缩力,以致Al筒变细,这个迅速向内收缩的过程将筒内的磁通压缩到小面积上,从而获得高场。

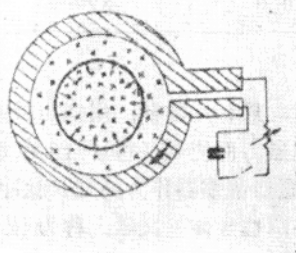


图4 角向电磁驱动磁通压缩器

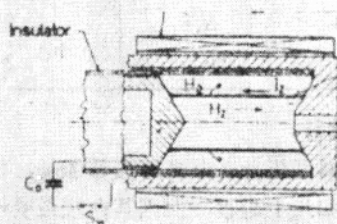


图5 轴向电磁驱动磁通压缩器

## (2) z压缩 (轴向压缩)

图5是其原理图。初级线圈先产生一个磁场 $H_z$ ,当接通电容器开关 $S_w$ ,电流 $I_z$ 在内部的铜筒中流动时, $I_z$ 在筒外产生角向磁场 $H_\theta$ , $I_z$ 和 $H_\theta$ 产生的电磁力使铜筒内向收缩,产生一个压缩磁通,获得超强磁场。

表5[3]给出能源、初始条件和压缩后的结果。

## 6. 爆炸驱动磁通压缩器

初级线圈在衬套内产生一个磁场,然后用定向爆炸使衬套径向收缩浓缩磁通产生超高场,

表5

|                    | 单位      | $\theta$ 压缩 | $z$ 压缩 |
|--------------------|---------|-------------|--------|
| 能 源                |         |             |        |
| 电容器组的能量 $W_{CB}$   | kJ      | 136         | 570    |
| 电容器组的电压 $V_0$      | kV      | 20          | 4.8    |
| 最大电流 $I_{max}$     | mA      | 0.64        | 4.9    |
| 放电时间 ( $1/4T_0$ )  | $\mu s$ | 25          | 40     |
| 初始条件               |         |             |        |
| 内筒材料               |         | Al          | Cu     |
| 内筒半径 $R_i$         | mm      | 39.5        | 30     |
| 内筒壁厚 $d_0$         | mm      | 0.8         | 2      |
| 内筒长度 $l_0$         | mm      | 20          | 150    |
| 初场 $H_0$           | T       | $\sim 2.5$  | 3.5    |
| 结 果                |         |             |        |
| 最大压缩速度             | mm/s    | 1.7         | 1.3    |
| 在 $r_i/R_i$ 时的压缩速度 | mm/s    | 1.5         | 0.7    |
| 总的压缩时间             | $\mu s$ | 33          | 63     |
| 最大的测量场 $H_m$       | T       | 110         | 280    |
| 相应于最大场的内半径 $r_m$   | mm      | 3           | 3.3    |

爆炸法是获得千万高斯以上磁场的唯一手段。

图6 (a) 这个装置的一种, 图6 (b) 拍照出了爆炸压缩的过程。表6给出世界上主要研究组的结果。

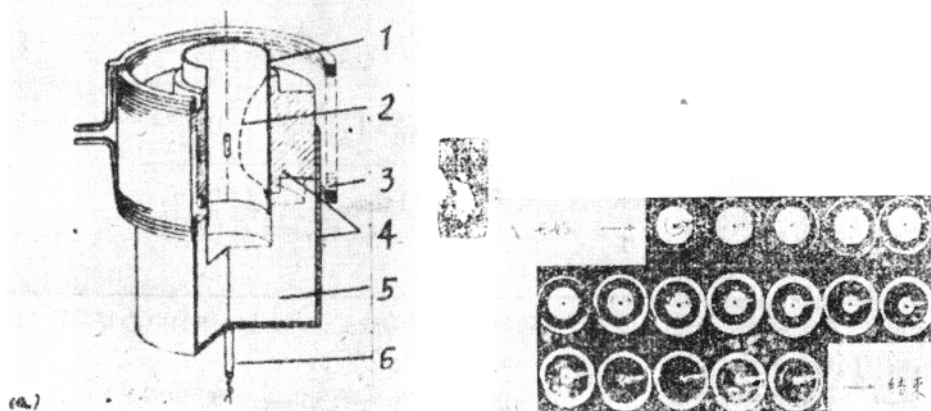


图6 爆炸驱动磁通压器 (a) 装置, (b) 压缩过程

1. 套筒 2. 爆炸后的筒 3. 线圈 4. 炸药 5. 支撑 6. 雷管

表6

| 地点,时间           | 衬 套        |            |                   | 初 场                                         |     | 最后性能                    |                          |
|-----------------|------------|------------|-------------------|---------------------------------------------|-----|-------------------------|--------------------------|
|                 | 外径<br>(mm) | 内径<br>(mm) | 材料                | 电容器组 $H_0$<br>$W_{CB}(\text{kJ})(\text{T})$ |     | $H_{\text{max}}$<br>(T) | $r_{\text{min}}$<br>(mm) |
| Los Alamos 1966 | 38.1       | 34.9       | 黄Cu               | 30                                          | 9   | 1400                    | ~2.5                     |
| 1966            | 54         | 52.4       | 不锈钢               | 300                                         | 3   | 500—600                 | ~1.3                     |
| Moscow 1966     | —          | —          | 不锈钢(+20 $\mu$ Cu) | —                                           | —   | 2500                    | ~2.0                     |
| 1966            | —          | 150        | Cu                | —                                           | ~6  | 500                     | ~1.5                     |
| Foulness 1967   | 53         | 5          | Cu                | —                                           | 8   | 350—500                 | —                        |
| Limeil 1967     | 42.5       | 41         | 不锈钢               | 200                                         | 5   | 500—700                 | ~2.5                     |
| Frascati 1967   | 39.5       | 38.5       | 不锈钢               | 200                                         | 6.5 | 500—600                 | ~2.5                     |

### 三、脉冲强磁场系统和电路系统最佳设计的理论

上面我们介绍的各种类型磁场发生器都离不开绕组线圈或它的变形。只要线圈中能流过电流 $i_0$ , 磁场值就能够从理论上得出。1936年Bitter<sup>(9)</sup>就给出了不同结构形状的产生场的理论公式, 见表7。

图7 对不同结构形状的磁体所产生场的Bitter公式

| 线圈形状 | 电流密度 $i_0$                                                        | 磁 场 ( $\alpha = \frac{a_2}{a_1}, \beta = \frac{b}{a_1}$ )                                                                            | 备 注                                                                                  |
|------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 方截面  | 常 数                                                               | $B_0 = \frac{4\pi b \lambda i_0}{10} \ln \frac{a_2 + (a_2^2 + b^2)^{1/2}}{a_1 + (a_1^2 + b^2)^{1/2}}$                                | 绕组线圈                                                                                 |
| 方截面  | $\frac{i_0}{a}$                                                   | $B_0 = \frac{4\pi i_0 \lambda}{10} \ln \left( \frac{\alpha \beta + (1 + \beta^2)^{1/2}}{\beta + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}} \right)$ | Bitter线圈                                                                             |
| 锥形截面 | 常 数                                                               | $B_0 = \frac{4\pi i_0}{10} \frac{\lambda k}{(1 + k^2)^{1/2}} (\alpha_2 - \alpha_1)$                                                  | $b = ka$                                                                             |
| 锥形截面 | $\frac{i_0}{a}$                                                   | $B_0 = \frac{4\pi i_0 \lambda}{10} \left( \frac{k}{k^2 + 1} \right)^{1/2} \ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$                             | $b = ka$                                                                             |
| 方截面  | 最佳的径向分布<br>$i_0 = f(a) = \frac{1}{20\mu\rho a (a^2 + b^2)^{1/2}}$ |                                                                                                                                      | $B_0 = \frac{4\pi b \lambda}{10} \int_{a_1}^{a_2} \frac{f(a) da}{(a^2 + b^2)^{1/2}}$ |

$a_1$ 是磁体内半径,  $a_2$ 是磁体外半径,  $2b$ 是磁体的长度,  $B_0$ 是磁体的中心场强,  $\lambda$ 是填充因子,  $i_0$ 是流过磁体材料的电流密度。

然而, 任何线圈都是有电感的, 脉冲电流的大小将受到电感限制。

#### 1. 绕组线圈

图7是脉冲磁体工作电路示意图。如果  $R_1 = R$ , 电路总电感  $L_1 =$  线圈电感  $L$ , 在

$R < 2\sqrt{L/C}$ 的条件下,

$$I = \frac{V}{L\omega_s} e^{-at} \sin \omega_s t \quad (1)$$

$$a = \frac{R}{2L}, \quad \omega_s = (\omega^2 - a^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$V$ 是电容器的工作电压。

$$\text{令 } \frac{\partial I}{\partial t} = 0$$

$$\text{得 } t_m = \frac{1}{\omega_s} \tan^{-1} \frac{\omega_s}{a} \quad (2)$$

$t_m$ 则是达到电流最高峰值的时间, 所以

$$I_{\max} = \frac{V}{L\omega_s} \exp\left(\frac{a}{\omega_s} \tan^{-1} \frac{\omega_s}{a}\right) \sin \tan^{-1} \frac{\omega_s}{a} \quad (3)$$

从(3)式看到 $L$ 大就会达不到所希望的电流, 因此减小 $L$ 看来是有利的。这个结论在不要放电时间的情况下是正确的。但如果要求满足某个时间常数 $T$ , 也就是 $T$ 作为一个磁体所必须达到的参数的话,  $L$ 应有适当的值。因为

$$T = \frac{2\pi}{\omega_s} = 2\pi \left( \frac{1}{LC} + \frac{R^2}{4L^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

如果 $L$ 小, 则必须增加 $C$ , 从公式(1)或(3)我们看到 $C$ 的增加, 电流只按 $\sqrt{c}$ 增加, 显然这是不利的。如何选取适合的 $L$ , 过去没有理论上的依据, 只凭经验判断。因为设计磁体 $l$ 是根据表7中的公式, 例如对于矩形截面绕组线圈

$$B_0 = a_1 i_0 \lambda F(a, \beta) \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\text{式中 } F(a, \beta) = \frac{4\pi}{10} \beta \ln \frac{a + (a^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}} \quad (6)$$

$\lambda = \frac{\text{导体的有效体积}}{\text{磁体结构的总体积}}$

$$= \frac{lS}{2\pi(a_2^2 - a_1^2)b} \quad (7)$$

$l$ 是线长度,  $S$ 是线截面积, (7)式只要求 $lS$ 是定值即可, 而 $S$ 选多大为佳也是没有理论根据的。

我们<sup>[10]</sup>注意到, 如果给定线圈的匝数 $N$ , 则

$$l = N\pi(a_1 + a_2) \quad (8)$$

而磁体结构确定后, 只要给出匝数, 则线圈的电感 $L$ 就是确定值。

$$L = \mathcal{L}_c N^2 \quad (9)$$

$$\mathcal{L}_c = \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \right) 4\pi a_0 \left( 1 + \frac{b^2}{8a_0^2} + \frac{c^2}{96a_0^2} \right) \ln \frac{a_0}{d_0} - y_1 + \begin{cases} \frac{c^2}{16a_0^2} y_2 & c > 2b \\ \frac{b^2}{4a_0^2} y_2 & c < 2b \end{cases}$$

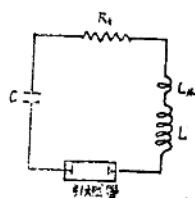


图7 脉冲磁体工作电路示意图  
 $R_t$ 为总电阻,  $L_t = L_{\text{外}} + L$

式中  $a_0 = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$ ,  $c = a_2 - a_1$ ,  $d_0 = (4b^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}$ ,  $y_1, y_2, y_3$  是修正分数, 可以查表得到。

由(4)式和(9)式看到电路参数和结构参数是有密切联系的。而(4)式中的电阻  $R$  为

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

此外, 在磁体结构和电路确定之后,  $I_{max}$ , 还满足

$$I_{max} = i_0 S \quad (11)$$

给定  $i_0$ , 材料中所受的应力密度  $\sigma$  如取自由匝公式则有

$$\sigma = a_1 i_0 B_0 \quad (12)$$

如果给定设计指标  $B_0$ ,  $2a$ ,  $\frac{1}{2}T$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$  和  $V$ , 则由方程(3) — (12) 组成一个完备方程组, 可解出  $i_0$ ,  $F(\alpha, \beta)$ ,  $a_2, b, L, C, N, l, S, R$  和  $I_{max}$  等11个未知数的解析式<sup>[10]</sup>。在解上述10个方程组时还用了要求绕组最小体积方程, 故总共是11个方程11个未知数, 方程解是唯一的。有时为了要求磁体有一定均匀度而把  $b$  也做为一个设计参数。

## 2. Bitter线圈

Bitter线圈中流过的电流密度与线圈的半径成反比, 它的设计理论和上述略有不同, 首先场的公式是用表7中Bitter线圈的公式, 电感也应取相应的Bitter线圈的电感公式, 如  $L = \mathcal{L}_B N^2$ , 其次, 它的线宽  $t$  就是  $a_2 - a_1$ , 上述的截面  $S$  在这里应换成  $d(a_2 - a_1)$ 。在计算它的电阻时, 线的长度  $l$  无意义, 因此不存在  $l$  的方程, 当然也不能用(10)式求电阻。此外  $\lambda$  也和上述不同, Bitter线圈  $\lambda$  是

$$\lambda = \frac{\pi(a_2^2 - a_1^2)aN}{\pi(a_2^2 - a_1^2)2b} = \frac{dN}{2b}$$

$$d = \frac{2\lambda b}{N} \quad (13)$$

为了计算Bitter线圈的电阻, 我们考虑一个单匝, 在环上半径为  $r$  处取面元  $2\pi r dr$ , 设面元的电阻为  $dR_1$ , 则每匝线的电阻  $R_1$  将由

$$dR_1 = \rho \frac{2\pi r}{d dr}$$

即

$$d\sigma_{电} = \frac{d}{2\pi\rho} \frac{dr}{r}$$

求出。

$$\sigma_{电} = \int_{a_1}^{a_2} \frac{d}{2\pi\rho} \frac{dr}{r} = \frac{d}{2\pi\rho} (\ln a_2 - \ln a_1)$$

$$R_1 = \frac{2\pi\rho}{d(\ln a_2 - \ln a_1)} \quad (14)$$

则由方程(3) — (6)、 $L = \mathcal{L}_B N^2$ 、方程(11) — (14) 和体积最小解求10个未知数  $i_0$ ,  $F(\alpha, \beta)$ ,  $a_1, b, L, C, N, d, R_1, I_{max}$  即得到Bitter线圈一整套完整的设计。



### 3. 单匝线圈

由于单匝线圈  $N = 1$ ,  $\lambda = 1$ , 所以Bitter线圈10个未知数10个方程就变成了9个未知数10个方程, 那么其中一个未知数必然不是唯一的。但是单匝数线圈一般只是为了获得高场值, 而对时间常数  $\frac{1}{2}T$  不作要求,  $T$  是任意的, 因此方程 (4) 可以去掉, 从而得到唯一解。

### 4. 最佳设计

从上面理论分析可以看到强力密度  $\sigma$  作为参量必定有电容  $C$  与  $\sigma$  的关系

$$C = f(\sigma) \quad (14)$$

从定性上看, 给定  $\sigma$ , 由 (12) 式看到  $i_0$  就定了,  $\sigma$  大,  $i_0$  大。再由 (5) 式和 (6) 式知道,  $i_0$ ,  $F(a, \beta)$  小, 则  $a_2$  小, 为了达到给定的  $L$ , (9) 式给出必须增加  $N$ , 这样将要求线材的截面积小, 以致总的  $R$  增加, 其结果是焦耳损耗大。但是由于  $a_2$  小, 则在  $a_2 \sim a_1$  范围内的磁能损失小, 而如果  $\sigma$  小, 则  $a_2$  大,  $S$  大, 焦耳损耗小, 这样将伴随着在  $a_2 \sim a_1$  上的磁能损失大。因此, 在线圈本体中的磁能损失和焦耳损耗有一个竞争, 其结果必然导致存在一个适合的  $\sigma$  以使  $C$  最小。从上述分析看到 (15) 式一定存在一个极值。由

$$\frac{dC}{d\sigma} = 0 \quad (16)$$

可以得到相应于  $C$  极小值的  $\sigma_m$ 。不过由于 (16) 式很难给出解析解, 所以我们用数值求解

表8 绕组线圈最佳设计的理论值

|                       |                                              |       |       |       |       |       |
|-----------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 设计指标                  | $B_0(\text{kG})$                             | 60    | 60    | 60    | 60    | 60    |
|                       | $t_m \times 10^{-2}(\text{sec})$             | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    |
|                       | $a_1 \times 10^{-2}(\text{m})$               | 6.45  | 6.45  | 6.45  | 6.45  | 6.45  |
| 已知参数                  | $\lambda$                                    | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.4   |
|                       | $V(\text{kV})$                               | 5     | 5     | 5     | 5     | 5     |
|                       | $\sigma \times 10^8(\text{N/m}^2)$           | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 4.0   |
|                       | $\rho \times 10^{-8}(\Omega \cdot \text{m})$ | 1.64  | 1.64  | 1.64  | 1.64  | 1.64  |
| 磁体结构和<br>电源参数的<br>计算值 | $F(a, \beta)$                                | 0.903 | 0.60  | 0.45  | 0.36  | 0.225 |
|                       | $a_2 \times 10^{-2}(\text{m})$               | 14.2  | 11.2  | 9.66  | 9.03  | 8.06  |
|                       | $b \times 10^{-2}(\text{m})$                 | 8     | 8     | 8     | 8     | 8     |
|                       | $l \times 10^2(\text{m})$                    | 2.3   | 2.36  | 2.405 | 2.19  | 1.77  |
|                       | $S \times 10^{-6}(\text{m}^2)$               | 13.8  | 7.2   | 4.35  | 3.67  | 2.66  |
|                       | $N$                                          | 354   | 422.5 | 475   | 448   | 386   |
|                       | $R \times 10^{-1}(\Omega)$                   | 2.68  | 5.4   | 9.1   | 9.8   | 10.9  |
|                       | $L \times 10^{-8}(\text{H})$                 | 15.13 | 17.2  | 18.0  | 16.55 | 11.63 |
|                       | $i_0 \times 10^8(\text{A/m}^2)$              | 2.58  | 3.88  | 5.165 | 6.46  | 10.33 |
|                       | $I_{m.s.} \times 10^3(\text{A})$             | 3.56  | 2.785 | 2.24  | 2.37  | 2.75  |
|                       | $C \times 10^{-8}(\text{F})$                 | 10.71 | 9.41  | 8.575 | 9.72  | 13.92 |