

强磁场技术的新进展

罗 阳

(冶金工业部钢铁研究总院)

强磁场是核聚变和高能物理研究的前提,因此超强磁场的设计和有关的超导材料已成为磁学领域一个重要的问题。超强磁场的建立往往成为衡量一个国家工业、技术实力的标准之一。因此,各主要工业国竞相建立超强磁场,这场竞争一直在持续进行。本文介绍强磁场技术最近获得的突破性进展。

众所周知,产生 10T 以上稳态强磁场通常有两种方法:一是用高功率水冷电阻式磁体(WM),这类磁体的最高纪录是法国 Grenoble 的场强达 23.4T 的磁体;另一种方法是用超导磁体(SM),其最高纪录是日本国立金属研究所 1977 年建立的 17.5T 强磁场,笔者于 1984 年参观过安装在日本筑波的此装置。目前产生

25T 以上磁场的方法是用混合磁体系统,即磁体由内层高功率水冷磁体和外层超导磁体联合构成。这种设计是由 Wood 与 Montgomery 于 1967 年提出的,被认为是获得强磁场的较经济的方法。现在美国、日本、英国、荷兰、苏联等国已先后建立了混合式强磁体(详见表 1)^[1],笔者访问日本时参观过这类磁体之最——日本仙台东北大学的总场强为 31.1 T 的混合式磁体(1986 年建成)。其超导磁体的场强为 12T,工作电压 20V,工作电流 1500A。场强 19T 的内层水冷磁体,其功率为 7.4MW,冷却水流量约 360m³/h,由三层楼高的两座冷却塔供水。由此可以看出这类磁体的能耗和水耗是相当大的。此外,超导磁体和水冷强磁体的建立本身

表 1 世界各国建立的混合式强磁场^[1]

国 别	超导磁体 (SM)					水冷磁体 (WM)					总场强 T	
	外径 mm	线圈外径 mm	线圈内径 mm	腔体直径 mm	场强 T	线圈外径 mm	线圈内径 mm	腔体直径 mm	功率 MW	场强 T		
日本 东北大学	HM-3	711	435	290	220	8.0	185	38	32	3.1	13.0	20.5
	HM-2	1300	922	420	360	8.0	320	60	52	6.3	16.0	23.2
	HM-1b						300	60	52	7.0	17.0	28.1
	HM-1a	1450	1094	430	360	12.0	300	38	32	7.4	19.0	31.1
美 国 MIT					7.0	333	60	54	7.3	17.0	24.0	
			710	400	7.5	330	41	33	8.7	22.9	30.1	
荷 兰 Nijmegen Univ.	1360	889	406	356	8.5	333	38	32	5.2	17.0	25.4	
		883	420		11.0						28.5	
苏 联 Kurchatov		700	376		6.9	225	48	28	5.6	18.0	25.0	
英 国 Oxford			284	240	6.5	200	53	50	1.6	9.5	20.0*	
法国,联邦德国 Grenoble		1087	500		11.0			50	10.0	20.0	28.0	

* 牛津的混合式强磁场原设计为 16T,但现在已达到 20T。

就是一项耗资巨大的高技术工程，一般发展中国家是难以实现的。我国拟建造相当于日本HM-3的混合式强磁场。

日本金泽大学的别所一夫教授独辟蹊径，提出了崭新的形成高磁通密度的原理^[2,3]。该原理基于下列事实：置金属圆盘的外沿于电磁铁两极头的气隙内，如图1所示。圆盘静止不动时，磁力线穿过金属导体，其分布基本是对称的（见图1中虚线），一旦圆盘转动，导体中将感生涡流，这就破坏了磁通分布的对称性，此时磁通

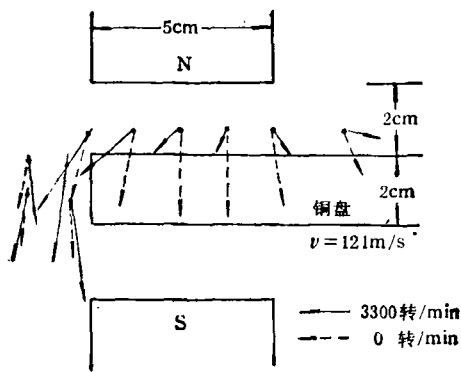


图1 置于极头间铜盘的转动对磁通走向的影响(实际测量)

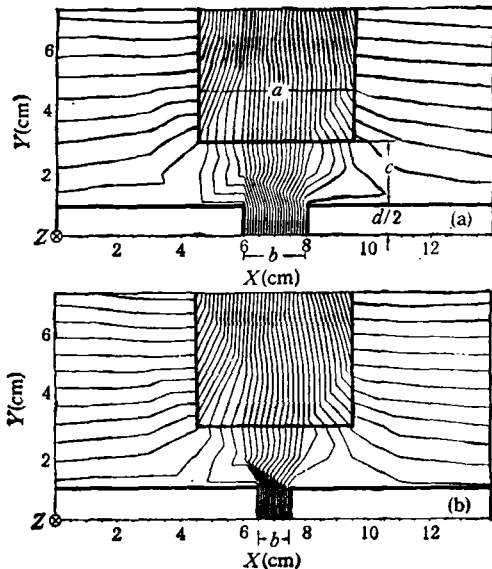


图2 一对高速转盘对磁极间磁通的压缩效果
(a) $b = 2\text{cm}$ ($a/b = 2.5$); (b) $b = 1\text{cm}$ ($a/b = 5.0$) (d 为铜盘厚度, $a = 5\text{cm}$, $c = 2\text{cm}$, $d/2 = 1\text{cm}$)

被压向导体外侧。铜盘转速为3000转/min时，磁力线的走向如图1中的连续线段所示。磁通分布作为二维问题处理，则一对高速转盘对磁通的压缩效果可通过计算得出（如图2所示）。高速转盘导体对磁通的压缩原理示意地绘于图3。圆盘静止时，磁极间的磁通 ϕ_1 穿过导体，并不发生任何扭曲。一旦圆盘转动，则穿越导体的磁力线在运动的导体中感生涡流 i_e 。本身又感生环状磁通 ϕ_e 。涡流感生的磁通 ϕ_e 恰与磁极间磁通 ϕ_1 反向，结果迫使磁极间的磁通弯曲，并移出导体，即如图3中的 ϕ_2 所示。实验表明，通过导体的磁通与导体在磁极间磁场内的运动速度 v 成反比。总之，高速转动的金属盘迫使磁通从导体外面通过。也就是说，高速转动的金属盘明显地屏蔽磁极间的磁场。若按图4所示安装A与B，C与D两两相对的四个盘形导体，使盘高速旋转，则电磁铁两极间的磁通被压缩到四个盘中间的狭小空隙内，磁通密度因之骤增，从而得到极高的场强。磁通压缩比 α 可表示为

$$\alpha = \frac{B_2}{B_1} = k \left(\frac{a}{b} \right)^2 \approx 10-15,$$

式中 B_1 为极间磁通密度， B_2 为空隙处磁通密度， k (< 1) 为漏散因子， a 为极头尺寸， b

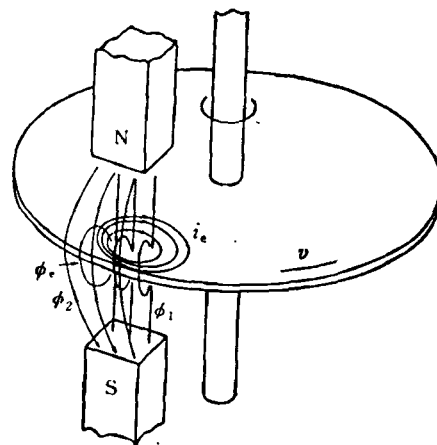


图3 转动圆盘上感生的涡流和涡流的屏蔽作用 (ϕ_1 —转盘静止时的磁极间磁通; ϕ_2 —盘转动时磁极间的磁通; i_e —穿越导体的磁力线在运动的导体中感生的涡流; ϕ_e — i_e 感生的磁通)

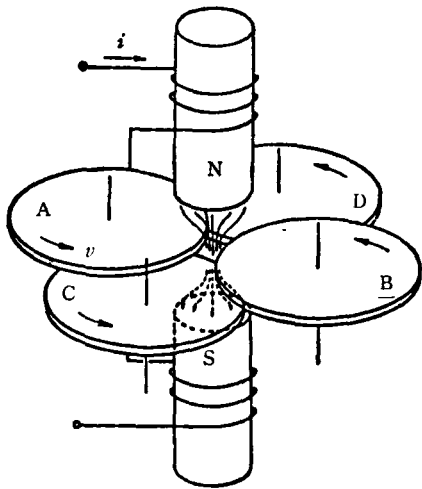


图4 高速转盘型强磁场发生器原理结构图

为盘间空隙尺寸。

笔者于国际磁学会议 (Intermag'87, 日本东京, 1987年4月) 后蒙日本别所教授盛情邀请, 专程访问了金泽大学, 参观了按上述原理于1986年建成的强磁场装置, 其主要技术参数如下: 磁极断面尺寸 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$, 磁通密度 2.5T , 电源 $\text{DC}400\text{V}-700\text{A}$, 转盘四个, 直径 920mm , 转速 $3200\text{转}/\text{min}$, 周边最大线速度 $150\text{m}/\text{s}$, 强场空间 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$, 场强 $\geq 20\text{T}$ 。

目前, 别所教授正在计划筹建一个实用的超强磁场发生器, 其场强将达到创世界记录的 60T 。不难看出, 此种装置的造价及能耗相对来说小得多, 是一种很有前途的强磁场发生器。

此外, 别所教授还提出了另一种涡流型交变强磁场发生器^[4], 其原理是由交变电流在导体上激励涡流, 从而在有限空间内造成交变强磁场。导体是铜制的圆筒, 中心有圆盘, 其纵剖面呈H型。圆盘中心开一小孔, 从孔心到外筒壁沿半径开一细缝, 筒壁外绕有线圈。在线圈环状电流的感应下, 筒壁和圆盘应感生反向的环状涡流, 但因导体开有细缝, 涡流只能绕中心孔形成回路, 于是使涡流沿中心孔聚集, 并在中心孔处感生出极强的交变磁场。适当选择筒壁高度与厚度, 则在中心孔周围的电流与电压值分别为平均值的12和17倍。

我们在别所教授的实验室中见到了多层结构的涡流型交变强磁场发生器 (图5), 该发生

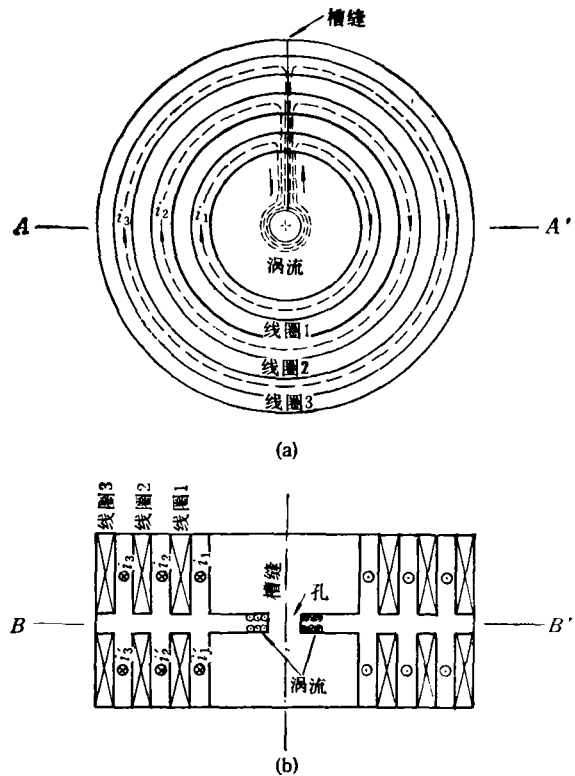


图5 多层结构的涡流型交变强磁场发生器

(a) 沿 BB' 横断面; (b) 沿 AA' 剖面

器中的三组励磁线圈造成涡流围绕中心孔的更大集中。电源是 60Hz 的交流电。当电压为 1500V , 功率为 156kVA 时, 中心交变磁场的峰值可达 12T 。笔者与别所教授就多层结构中各励磁线圈采用具有一定相位差的半波电流供电, 从而在中心造成恒定强磁场的可能性交换了意见。看来这是另一种有前途的获得强磁场的有效途径, 当然中心孔区域的过热是有待解决的难题。

- [1] Y. Muto et al., *Sci. Rep. of Research Institutes Tohoku University*, A33-2 (Dec. 1986), 221—237.
- [2] K. Bessho, S. Yamada, *Proc. of International Symposium on High Field Magnetism*, North-Holland Publishing Company, (Sep. 1982), 323—326.
- [3] K. Bessho et al., *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-19-5 (1983), 2067—2069.
- [4] K. Bessho et al., *Digests of Intermag'87, Tokyo, Japan* (1987, 4), FE-03.