

脉冲磁体增强技术发展概述*

彭涛[†] 辜承林

(华中科技大学电气与电子工程学院 武汉 430074)

摘要 在脉冲强磁体设计中,磁应力是目前面临的^{最大困难},当磁场强度达到 100T 时,磁体绕组中的磁应力高达 4GPa,这是目前任何实用导体材料都无法承受的,因此,脉冲强磁体的发展在很大程度上取决于磁应力的解决情况.文章介绍了国外在解决脉冲强磁体巨大应力问题上采用的方法,主要叙述了新材料技术、绕组加固技术和改善电流分布技术,并对其优缺点及性能进行了分析.

关键词 脉冲磁体,增强技术,高强度,应力

DEVELOPMENT OF REINFORCEMENT TECHNOLOGY FOR PULSED MAGNETS

PENG Tao[†] GU Cheng-Lin

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The most serious problem in magnet design is the strong magnetic stress. In 100T magnets the stress is 4GPa, which exceeds the strength of the strongest conductor materials now available, so the development of pulsed magnet depends to a great extent on the solution of this problem. We describe various methods used abroad to solve this issue, including new materials development, coil reinforcement and improved current distribution technology. Finally, the merits, shortcomings and performance of the new methods are presented.

Key words pulsed magnet, reinforcement technology, high strength, stress

1 前言

早在 1924 年, P. Kapitza 就用铅酸蓄电池作为电源, 制造了一个内径为 1mm、强度接近 50T 的磁体, 当时他很乐观地表示, 制造出 200—300T 的超强磁场只不过是一个经费的问题, 而不存在什么技术问题. 后来, 他得到了足够的经费资助, 并开始他的超强磁场设计工作, 但在一番艰苦的实验之后, 他只制造出了一个 35T 的磁体, 而不是期望的 90T, 以致连他自己都开始不赞同自己先前的观点^[1]. 在现在看来, P. Kapitza 之所以失败, 其中一个主要原因就是碰到了强磁应力问题.

现在我们知道, 磁体中心磁场 B 与磁体绕组导体环应力 σ_{hm} 之间有如下关系:

$$B = G \sqrt{2\mu_0 \sigma_{\text{hm}}}, \quad (1)$$

G 是一个与磁体的几何尺寸和电流分布有关的参数. 从 (1) 式可知, 磁应力增长的速度是磁场增长速度的平方倍, 例如, 对于 50T 的磁场, 磁应力为 1GPa. 而当磁场达到 100T 时, 磁应力达到了 4GPa, 这是目前任何导体材料都无法承受的强度^[2]. 虽然

经过几十年的发展, 科学家们已经能够很容易地设计制造出 50T 脉冲强磁场, 但是在 50T 以上的磁场设计中, 强大的磁应力仍是科学家们面临的一个巨大挑战, 因此, 脉冲强磁场的设计问题变成了寻找高强度材料和改善磁体绕组结构、优化应力分布的问题.

2 使用高强度导体材料

在解决磁应力的道路上, 研究人员首先想到的是寻找高强度的材料, 这是最直接、最简单的方法.

在早期, 磁体绕组都是用纯铜导线绕制的, 铜的电阻率小, 可以减少发热量, 提高脉冲宽度, 而且铜的柔性好, 便于绕制小内径磁体. 但其最终抗拉强度 UTS (ultimate tensile strength) 只有 0.25GPa. 随着磁场强度的不断提高, 纯铜已经不能满足发展要求, 不过此时研究人员还未找到其他合适的导体材料.

在 20 世纪 90 年代, Cu - Nb 合金的使用开创了

* 2002 - 01 - 31 收到初稿, 2002 - 04 - 01 修回

[†] 通讯联系人, E-mail: peng_hust@sina.com

脉冲强磁场发展历程上的一个里程碑,给了研究人员极大的鼓舞^[3]。Cu-Nb合金抗拉强度比铜大得多,但电导率却下降得很少。直径为0.024mm的Cu-18.2%Nb合金丝,在室温时,UTS为2.2GPa,电导率大约为IACS(international annealed copper standard)的70%;在77K时,UTS可达2.85GPa,不过,对于截面积比较大的Cu-18.2%Nb合金丝,UTS会下降至1GPa左右。另外,改变合金中Nb的含量,可以方便地改变合金的电导率和抗拉强度,以满足不同磁体的设计要求。

在Cu-Nb合金之后,研究人员又发现了Cu-Ag合金,它除了电导率比Cu-Nb大外,还比Cu-Nb更容易加工。在室温时,Cu-16%Ag的抗拉强度为1GPa,电导率为80%IACS。在K.U.Leuven大学,用2.4×3.4mm的这种合金丝制造的磁体Mel61,产生69T的磁场而没有遭到破坏^[4]。

无论Cu-Nb合金还是Cu-Ag合金,都还存在着一定的开发潜力,预计将来用它们可以制造出抗拉强度超过1.5GPa,电导率超过60%IACS的导体材料。

除此之外,还有一种高强度合金材料Cu-Be合金,不过,因为Be是有毒金属,在磁体发生爆炸时会释放出来,因此磁体设计者在使用时都很谨慎^[5]。

3 采用绕组加固技术

采用高强度导体材料是提高磁场强度的一种有效的途径。但是,导体材料的抗拉强度总是有限的,而且它目前还不能达到磁场发展所要求的强度;另一方面,磁体设计中不能只考虑导体材料的强度。因为材料的强度越大,电导率就越小,采用这种材料就会影响磁体的其他性能,因此,单纯采用这种方法,无法提高磁场强度。不过,我们知道,很多非导体材料的抗拉强度比上述导体材料大得多,这样,用高强度非导体材料作衬里,加固导体绕组,由它分担一部分磁应力,就可以增强绕组强度。

在设计衬里时,我们所期望的最优方案是衬里材料和导体材料同时达到它们的破坏极限,这样才能充分利用两种材料的机械强度。要实现这一点,就得寻找弹性模量匹配的两种材料,而不是简单地将两种强度最大的材料结合在一起。

在早期脉冲磁体设计中,导体材料是Glidcop A15,内层绕组衬里材料是S2玻璃。S2玻璃是强度最大的材料之一,它的弹性模量小,在最大应力下延展率达4%,在与软铜和Glidcop结合时,性能很好,但在与延展率很小的高强度材料结合时,性能却不

理想。例如,用S2玻璃作为CuNb-A的加固材料,当应变在1%时,S2玻璃实际上只利用了它强度的20%^[6],远远没有达到它的负载能力极限。

Zylon纤维则是最近由TOYOBO有限公司开发出来的一种适合与高强度导体材料结合的新产品,它的弹性模量为280GPa,抗拉强度为5.8GPa,而延展率只有2.5%。如果用来加固Cu-Nb绕组,在应变为2.5%时,Cu-Nb已经达到它强度的95%,可见两种材料都充分发挥了它们的潜在机械强度。不过,Zylon纤维也有不足之处,因为Zylon纤维作为绕组衬里材料,填充系数高达80%,这样在向绕组进行真空浸渍环氧树脂等加固和绝缘材料时,浸渍有时会出现不均匀现象,影响绕组的绝缘性能和应力分布。

为了进一步提高绕组强度,研究人员找到了碳纤维,它的强度为5GPa,弹性模量为280GPa,延展率只有1.5%,用它加固绕组,可以极大地减少绕组的塑性变形,延长磁体使用寿命。不过碳纤维的电阻率为 $1.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,用作内层衬里材料,有时会引起绝缘问题^[7]。因而,碳纤维更多的是用作一种优良的外层加固材料。

上面所述的是绕组逐层加固技术,为了从整体上加固磁体抗张强度,研究人员又采用了圆柱筒外层加固技术。他们设计一个厚壁圆柱筒,内径比磁体绕组外径小1mm左右,然后在圆柱筒加热膨胀后套在磁体绕组上,等到冷却,圆柱筒就紧紧地整个磁体绕组压在一起。在产生脉冲的过程中,绕组将应力传递给圆柱筒,由它承受较大的应力。由于外筒壁可以做得比较厚,所以它承受的应力也比较大,加固效果也比较明显。当然,如果需要,也可以在绕组中应力最大的地方增加一个圆柱筒进行加固。

刚才说过,碳纤维是一种常采用的外层材料,另外几种则分别是马氏体钢和珠光球体钢,和碳纤维一样,它们也有良好的机械性能。

在寻找高强度绕组导线的过程中,Harwell Laboratory,University of Oxford和Catholic University of Leuven还共同开发了一种全新的金属导体丝。生产这种金属丝时,先将铜棒插进一个厚壁的不锈钢管中,然后经过拉拔和热处理,将两种金属压在一起并制成方形或圆形金属丝,这时金属丝分为内外两层,内层是铜,外层是不锈钢,铜的面积占金属丝总面积的65%—75%。最后在金属丝外敷上Kapton绝缘带^[8]。用这种金属丝制造的绕组,既有铜的良好导电率,又有钢的强度,性能很好。

最近,研究人员又开发出了一种复合绕组导线,

设计这种导线的出发点是用强化纤维填充金属导线束之间的空隙组成复合导线^[1],然后固定在绝缘封套中.通常,复合导线由铜和碳纤维经过编织机紧密地编织在一起,绝缘封套由玻璃纤维充当.和一般绕组导线相比,这种复合导线具有铜的导电率,又比等截面积的单匝导线柔性好,容易绕制内径很小的磁体.

需要说明的是,虽然很多磁体的绕组绕制和浸渍过程是由机器完成的,但还与个人的经验和熟练程度有关,在线圈中,即使一个很小的缺陷也会导致绕组致命的破坏.

4 改善电流分布

要充分利用磁体结构的机械强度,最理想的情况是绕组的每一处都分担它能承受的最大负载.如果整个绕组采用相同的材料,就只需要绕组中的应力在各层均匀分布,这一点可以通过调节绕组中的电流密度来实现.

从(1)式可以看出,对于相同的磁场强度 B ,参数 G 越大,环应力 σ_{lim} 就越小,因此,想办法增大参数 G 也是提高磁体强度的一个途径.前面提到, G 是一个和电流密度分布有关的参数,在绕组设计中,通常为了结构简单,绕组中的电流密度是均匀的,这时参数 G 最大值为 $\sqrt{2}^{[10]}$.如果设计时重点放在应力上,就可以考虑采用非均匀分布电流密度的措施来提高参数 G .

对于独立绕组,电流优化设计后,应力均匀分布,参数 G 就只和绕组几何形状有关:

$$G = \sqrt{\alpha}, \quad (2)$$

式中 α 是磁体外径与内径之比.由此可见,理论上参数 G 可以无限大,但实际上很难制造出 α 超过50的磁体,因为即使磁体内径只有2cm,它的外径已经达到了1m!

刚才说过,真正采用电流密度最优设计后,绕组的每一层都不同,结构就非常复杂,因此在实际中,只是采取近似的方法,将绕组分成几个部分,分别通以不同的电流,让不同部分间的应力相同而允许同一部分内的应力分布不均匀.

5 结论

在迈向100T及更强的脉冲强磁场的道路上,磁应力是目前研究的重点,解决好这个问题,很多问题就能迎刃而解.应该相信,随着材料科学的发展,脉冲强磁场的发展道路上也会出现新的机遇.

参考文献

- [1] Herlach F. Strong and Ultrastrong Magnetic Fields and Their Applications. Berlin Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1985
- [2] Herlach F. Physica B, 1998, 246—247: 152
- [3] Herlach F. Rep. Prog. Phys., 1999, 62: 862
- [4] Van bockstal L, Li L, Harrison N *et al.* IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32: 2514
- [5] Herlach F. Rep. Prog. Phys., 1999, 62: 876
- [6] Li L, Lesch B. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2000, 10: 542
- [7] Van bockstal L, Li L. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32: 2507
- [8] Jones H, Herlach F. IEEE Transaction on Magnetics, 1988, 24: 1055
- [9] Rosseel K, Herlach F. Physica B, 2001, 294—295: 679
- [10] Herlach F. Rep. Prog. Phys., 1999, 62: 870

· 信息服务 ·

招 聘 启 事

中国科学院化学研究所有机固体重点实验室组建理论与化学课题组,从事有机材料的光电性质,分子器件的理论设计,分子激发态与电荷转移,以及其他领域的基础理论研究.负责人帅志刚,在比利时工作12年,刚回国.课题组将与化学所的实验化学家广泛合作.

课题组拟招聘副研究员1名,博士后两名,硕士、博士研究生各两名.

招聘条件:凝聚态理论,固体理论,理论化学专业,有一定数值计算经验.

联系人:帅志刚 北京市海淀区中关村北一街2号,中国科学院化学研究所(邮编 100080)

Http://morris.umh.ac.be/Zhigang/cvshort.htm E-mail: zgshuai@infoc3.icas.ac.cn

电话: 010-62521934(办公室), 13021024258(手机)