

HI-13 串列加速器头部电场改进计算

李 涛 关退令

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

精确计算了 HI-13 串列加速器头部电极及其附近区域的电场分布, 得到了加速器头部及其附近区域静电场分布的精密数据及其极限头部电压; 完成了头部电极附近均压环改进计算, 并提出了进一步提高加速器极限头部电压的几项建议。

关键词 静电场 极限头部电压 均压环

HI-13 串列加速器从美国引进, 其头部电极为开放式鼠笼电极, 运行时, 头部电压保证值为 13.0 MV。

加速器安装时未做高压发生器(无加速管)升压实验, 建成后, 也未对其极限头部电压做过详细可靠的计算。由于未掌握此台加速器主体(指钢筒内区域), 特别是头部电极及其附近区域静电场分布的精密数据, 给加速器运行、改进和设计带来了诸多不便。随着加速器工作的开展, 迫切需要进一步改进头部电场, 本工作即是为此改进的具体计算。

1 头部区域电场计算

本工作涉及的电场计算是关于单介质二维静电场的数值计算, 采用华北电力学院^[1]研制开发的基于有限元法的二维静电场分析软件包 SEF2D, 它是一种较为理想的静电场计算软件。

HI-13 串列加速器具有轴对称结构, 钢筒外壳接地, 内充 $7.213 \times 10^5 \text{ Pa}$ (7.12 atm) 的 SF_6 绝缘气体^[2]。加速器主体结构示于图 1, 主体半长 10668 mm (420"), 钢筒最大半径 2743 mm (108"), 均压环外径 940 mm (37"); 头部电极结构示于图 2, 头部电极棒横截面半径 15 mm (0.6"), 均压环截面半径 19 mm (0.75")。

基于加速器的对称性, 我们选取头部电极一半及高能加速区为计算区域。采用粗细算相结合的方法。

首先进行粗算, 头部电极中央横截面和加速器末端面取为第二类齐次边界, 其余属于第一类齐次边界。取头部电压 $V_T = 100.0 \text{ V}$ 。计算表明, 除头部电极表面电场外, 每个加速区-死区表面电场分布曲线具有类似的形状, 都存在一个电场峰值和谷值, 峰值出现于死区-加速区相接处, 谷值出现于加速区-死区相接处。显然, 对此台加速器构成威胁的最大峰值场强出现

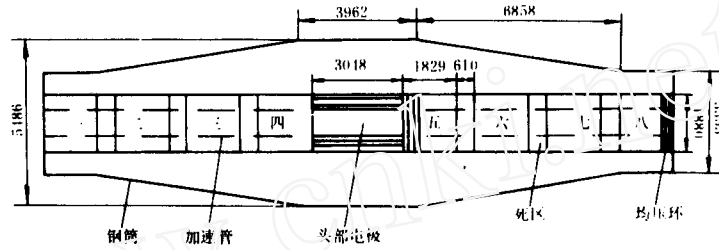


图 1 HI-13 串列加速器主体结构简图

Fig.1 The schematic figure of the main body of HI-13 tandem

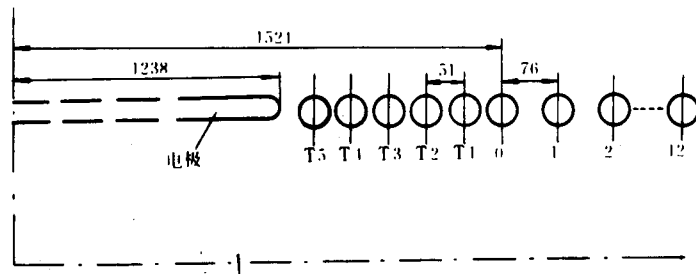


图 2 头部电极结构简图

Fig.2 Schematic figure of terminal

于头部电极与第四段、第五段加速管相接处。

我们利用第一步粗算结果对头部电极和第五段加速管进行第二步粗算。计算表明,头部电极表面电场基本均匀,头部等位环(T5—T1)的表面电场由于局部曲率突变而发生畸变,数值大致相同;0#均压环由于局部曲率和电位两个突变,电场畸变非常大;1#—24#均压环亦由于上述原因而产生电场畸变,数值渐次减小,11#、12#均压环表面电场约为0#均压环表面电场的50%。

在上面的粗算过程中,我们将均压环间区域用均匀插值法插入电位值而当作第一类边界处理,由于加速器主体轴向和径向长度均远大于均压环横截面几何尺寸和间距,上述近似处理是可以接受的,考虑到两个无限长平行带电圆柱体间等位线垂直于两圆柱截面连心线,我们认为用第二类边界处理两均压环间区域更符合实际情况。

根据粗算结果选取细算区域(指头部电极一半和第五段加速管的一半),取头部电压 $V_T = 100.0 \text{ V}$,计算给出最大峰值场强出现在0#均压环上, $E_m = 2.209 \text{ V/cm}(5.611 \text{ V/inch})$ 。图3(a)给出了头部电极(部分)及附近18根均压环的表面电场分布曲线。

由于HI-13串列加速器钢筒内充 $7.213 \times 10^5 \text{ Pa}(7.12 \text{ atm})$ 的 SF_6 绝缘气体,而 SF_6 在直流正电性下的耐电强度计算公式为^[3]:

$$E_{dt} = 70(10p)^{0.76}$$

式中: p 为气体压强(MPa); E_a 为耐电强度(kV/cm)。得出此台加速器耐电强度为 314 kV/cm。

当加速器头部电压为 13 MV 时,最大峰值场强出现于 0# 均压环,为 287.2 kV/cm,未超过其耐电强度。若以 $E = 314$ kV/cm 为极限情况推算,此台加速器极限头部电压可达 14.2 MV。加速器运行头部电压保证值为 13.0 MV,约为极限头部电压的 91.5% (可按 90% 估计)。

2 头部电极附近均压环改进计算

随着核物理实验研究工作的深入开展,迫切需提高加速器的头部极限电压,提高加速粒子的能量,从而拓宽实验能区,以开展更多的物理工作;同时,加速器运行也对头部电压稳定性提出更高的要求,必须尽快改善加速器主体静电场分布。在不对加速器本体结构作大改动的情况下,将头部电极附近处于高场强区的均压环由圆截面改为椭圆截面,减小高场强处的局部曲率,从而减小最大峰值场强的方法不失为一种简便易行的好方法。

下面对不同的均压环改进方案,即改造不同数目的均压环,且取不同的椭圆截面,粗细算加速器主体的静电场分布。计算区域和均压环间近似处理同前,保留头部等位环(T5—T1)为圆截面,只改造与之相邻的加速区的均压环,取头部电压 $V_T = 100.0$ V。

首先,我们进行大量粗算,这可分为两类:一类是固定均压环椭圆截面形状而改变欲改造均压环的数目。计算表明,均压环改造数目的合适选择是改造 0#—5#、0#—6#、0#—7# 均压环;另一类反之,即固定均压环改造数目,改变其椭圆截面形状,计算给出均压环椭圆截面($2a \times 2b$)分别为 $38 \text{ mm} \times 30.5 \text{ mm}$ ($1.5'' \times 1.2''$)、 $46 \text{ mm} \times 30.5 \text{ mm}$ ($1.8'' \times 1.2''$)和 $51 \text{ mm} \times 30.5 \text{ mm}$ ($2.0'' \times 1.2''$)时结果较佳。

然后进行细算,各种情况下的最大峰值场强列于表 1。

表 1 均压环改进计算结果

Table 1 The results of modification of equipotential rings

均压环截面($2a \times 2b$) /mm × mm	改造 0#—5# 环	改造 0#—6# 环	改造 0#—7# 环
38×30.5 ($1.5'' \times 1.2''$)	4.894	5.044	/
46×30.5 ($1.8'' \times 1.2''$)	4.864	5.004	5.022
51×30.5 ($2.0'' \times 1.2''$)	4.781	4.907	4.920

表中峰值场强单位 V/inch(0.3937 V/cm)

分析表 1 所列各种均压环改进方案的计算结果,可确定均压环改进方案:将与头部等位环相邻之 0#—5# 均压环共 6 根由圆截面改为形状($2a \times 2b$)为 $51 \text{ mm} \times 30.5 \text{ mm}$ ($2.0'' \times 1.2''$)的椭圆截面。计算给出最大峰值场强出现在 T4 等位环上,值为 $E_m = 1.882$ V/cm(4.781 V/inch)。图 3(b)给出了头部电极(部分)及附近 18 根均压环的表面电场分布曲线。

当加速器头部电压为 13 MV 时,最大峰值场强出现于 T4 等位环上,为 244.7 kV/cm。若以 $E = 314$ kV/cm 为极限情况推算,均压环改进后,加速器极限头部电压将达 16.6MV。按前述比率估计,加速器运行时其头部电压保证值将为 14.9 MV。

3 结果分析

3.1 头部电极与高能端相接处打火原因

理论上,头部电极与第四段、第五段加速管相接处情况相同,实际上头部电极与第五段加速管相接处打火痕迹甚多,而与第四段加速管相接处打火痕迹很少。我们对此情况提出如下解释:在正常运行时,此台加速器的头部电压并未达到极限情况,头部电极对接地钢筒的频繁打火不应发生,由于高能端装有输电梯,运行时振动较大,输电系统磨损产生的粉尘多等原因,造成此处易发生打火。

3.2 均压环采用椭圆截面比为0.6时,可改善静电场分布

在作均压环改进计算时,我们对大量粗算结果进行分析、归纳,总结出—条经验:当均压环椭圆截面 $b/a \approx 0.6$ 时,对加速器主体静电场分布改善较大。这与文献[4]的结论基本相符。

3.3 均压环间距减小,不会引起击穿打火

头部电极附近均压环改进后,0#—5#均压环间距由 38 mm(1.5")减少到 25.4 mm(1.0"),会不会在其间发生击穿打火呢?计算表明均压环改进后环间场强较改进前稍有提高,但由于均压环间的相互屏蔽作用,均压环改进前后其环间场强均很小,约几十 kV/cm,远小于其耐电强度 314 kV/cm,所以不会打火。

3.4 改进头部电极结构,可提高极限电压

要进一步提高加速器极限头部电压,必须改变加速器头部电极的结构。可考虑的方案有两种:(1)采取加中间电极的方法,对头部电极附近区域的径向电场分布实行强制性均匀,达到改善静电场分布的目的,但中间电极结构复杂,安装困难,并且带来一些不利影响,其它实验室已有过教训,不便采用;(2)将头部电极轴向加长且径向外延,使其半径沿轴向平滑过渡到均压环半径,加强头部电极对附近均压环的屏蔽作用,从而减小最大峰值场强。我们认为方法(2)是可行的,但由于工程较大,投资较多,尚未进行该方案计算。

3.5 要改进加速管的抗高压性能

加速器极限头部电压提高后,可采取延长加速管等办法来改进加速管的抗高压性能。

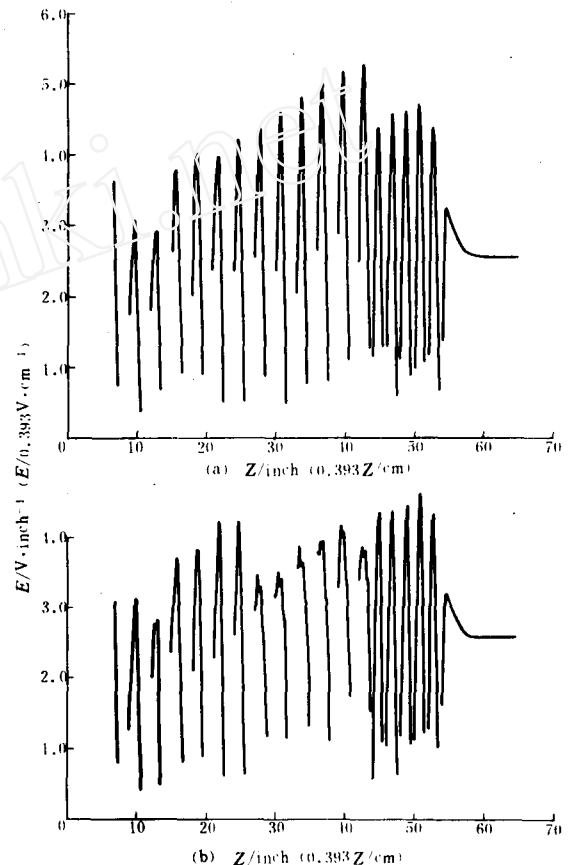


图3 头部电极(部分)及附近18根均压环的表面电场分布曲线

Fig.3 The distribution curve of surface electric field of terminal electrode (part) and eighteen equipotential rings

(a)改进前;(b)改进后。

参 考 文 献

- 1 袁建生, 崔翔, 费增尧, 等. 一个高性能的二维静电场分析软件包 SEF2D. 华北电力学院学报, 1990, (3): 1—9.
- 2 崔翔. 统一泛函变分原理与电磁场数值计算若干新方法(学位论文). 北京: 中国原子能科学研究院资料, 1988.
- 3 Mosch W, Hanschild W. 高压绝缘用 SF₆. 李建基译. 北京: 机械工业出版社, 1984. 49.
- 4 Eastham OA. Numerical Calculations of the Electric Fields Around the Hoop Structure of Van de Graaff Accelerators. Nucl Instrum Methods, 1973, 108: 593—597.

THE MODIFICATION OF THE TERMINAL ELECTROSTATIC FIELD OF HI-13 TANDEM ACCELERATOR

LI TAO GUAN XIALING

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(62), Beijing, 102413)

ABSTRACT

The calculation of electrostatic field of terminal and its neighbour region for HI-13 tandem accelerator is made. The limit terminal voltage without tubes is evaluated. Using elliptical cross section in stead of circular ones for the first six equipotential rings, the electrostatic field of this region are modified.

Key words Electrostatic field The limit voltage Equipotential ring