

高能所 S 波段 45MW 脉冲速调管研制*

董东 周祖圣 张亮 李岗英 田双敏

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 北京正负电子对撞机国家实验室(BEPC)二期工程使用的高功率脉冲速调管运行功率要求在 40MW 以上,为此高能物理研究所在引进国外速调管的同时开展了高能所创新项目 45MW 脉冲速调管设计、制造工作.这种新型速调管为 5 谐振腔、单一陶瓷输出窗结构,增益为 50dB,效率为 40%,工作电压为 310kV.2005 年 12 月成功地完成了 45MW 速调管样管的测试,测试结果显示主要技术指标达到了设计要求.

关键词 速调管 微波 高频 加速器

1 引言

中国科学院高能物理研究所正在进行北京正负电子对撞机(BEPC)的二期改造工程^[1],其正负电子直线加速器的束流能量由原来的 1.55GeV 提高到 1.89GeV,作为直线加速器微波功率源的高功率速调管要求运行在 40MW 以上,为此高能物理研究所选择了 45MW 速调管来满足功率需要,由于国内还没有这个功率水平的速调管,高能所在引进外国速调管的同时,开展了 S 波段 45MW 速调管的研发工作.经过一年的努力,2005 年高能所完成了 45MW 速调管样管的制造与测试工作,该样管在 300kV 的工作电压下,输出功率达到了 45MW,效率达到 42%,增益达到 49dB,测试结果显示其主要的技术指标达到了设计要求.

2 45MW 速调管的设计

新型速调管的工作频率为 2856MHz,共有 5 个高频谐振腔、相应的漂移管以及单窗输出结构.其缩减等离子波长约为 1.23m.归一化电子注半径 0.55,归一化漂移管半径 0.73.主要技术指标见表 1.

计算分析高频电流在 5 个谐振腔中的增长情况如图 1 所示,理论分析预期该速调管在工作电压 310kV 时,微波功率输出可以达到 45MW,理论计算与实际

测试结果的比较见图 5.

表 1 45MW 速调管主要设计指标以及样管的测试数据

	单位	实验管 设计指标	实验管实 际测量值
工作频率	MHz	2856	2856
脉冲电压	kV	320	300
脉冲电流	A	400	366
导流系数	μP	2.0	2.1
重复频率	Hz	12.5	12.5
脉冲功率	MW	45	45
脉冲宽度	μS	2	2
效率	%	40	42
增益	dB	50	49

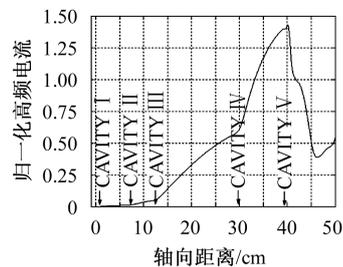


图 1 45MW 速调管内部高频电流分析

考虑到速调管转换效率为 40%,为此设计了一种脉冲功率为 120MW 的电子枪来提供高能电子注^[3, 4].电子枪脉冲工作电压为 320kV,电流 400A,导流系数为 2.0,为获得较好的稳定性,通过优化结构设计将其最大电场梯度降低到了 19.5kV/cm,因此可以在相同

2006 - 01 - 25 收稿

* 国家自然科学基金(10475094)和中国科学院高能物理研究所知识创新项目资助

的排气条件下,提高枪区的耐高压性能.电子枪结构设计分析结果见图2、图3.

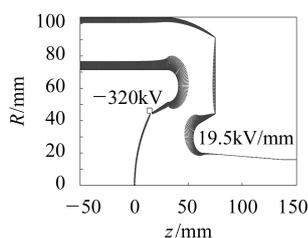


图2 120MW束流功率电子枪电场梯度分析

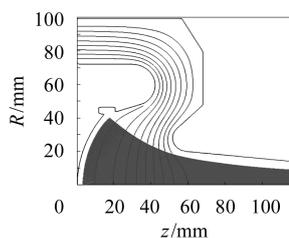


图3 120MW束流功率电子枪束流光学分析

几种相近的速调管电子枪主要参数比较见表2,

表2 高能所几种速调管电子枪的参数比较

	单位	80MW电子枪	80MW电子枪/A	150MW电子枪	120MW电子枪
束流功率	MW	80	80	150	120
工作电压	kV	270	280	350	320
阴极直径	mm	80	80	90	85
最大电场梯度	kV/cm	28.4	24.8	22.5	19.5
典型使用		30MW速调管	30MW改进型速调管 ^[2]	65MW速调管	45MW速调管
阴极类型	国产	国产氧化物	国产氧化物	国产钨钨阴极	
	进口	进口钨钨阴极	进口钨钨阴极		进口钨钨阴极

3 速调管的测试

45MW速调管完成制造后在高能所的150MW测试台上进行了老炼与测试,测试中使用了80MW的大功率水负载作为微波吸收负载,热电偶高功率计测量平均功率,50dB波导定向耦合器测量波形与脉冲宽度,再根据占空比得到速调管的脉冲输出功率.测试台装置见图4.

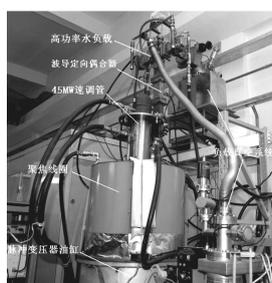


图4 高能所45MW速调管测试台

45MW速调管在测试台进行了10天的老炼与测试,导流系数为 $2.0\mu\mu$,在300kV工作电压下,微波输出功率达到了45MW,效率达到42%,增益达到49dB.测量数据见表1.测试数据分析见图5,测量波形见图6.测试结果显示45MW速调管主要技术指标达到了设计要求.

从中可以看到120MW束流功率电子枪的电场梯度是非常低的,这对提高电子枪的耐压是十分重要的.

由于BEP-2工程对速调管的稳定性以及寿命要求极高,为此45MW速调管电子枪的阴极采用了直径为85mm的钨钨阴极,这种阴极工作温度为 1050°C ,具有出气率低、蒸发率低、工作稳定性好、寿命长,可多次暴露大气等优点.

微波输出窗是速调管的关键部件,采用了纯度为99.7%、 $\tan\delta$ 为 3.0×10^{-4} 陶瓷窗片,已有数据显示该单一陶瓷窗片可承受200MW脉冲功率的检验,在50MW以下可以可靠地长期连续运行,因此高能所45MW设计采用了单一输出窗结构,满足了使用要求.

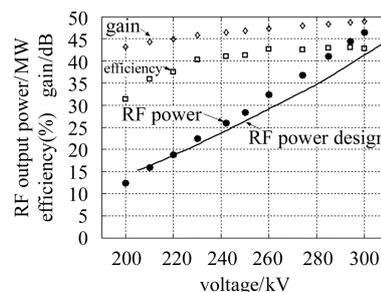


图5 45MW速调管测试结果

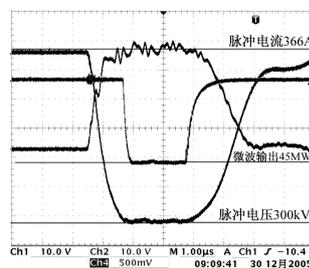


图6 45MW速调管的波形

4 讨论

高能所45MW速调管设计采用了结构紧凑的五谐振腔高频作用段,其理论分析结果显示该结构工作在350kV电压时,微波输出功率可以达到60MW以上^[5],输出结构若采用双窗结构,可以获得更高功率输出.而采用单一陶瓷输出窗结构时,由于目前非钻石

级的陶瓷窗微波谐振环检测功率可到 200MW, 一般长期稳定连续运行在 50MW 下, 因此高能所的新速调管定位在五谐振腔、单一陶瓷输出窗结构、相对制造成本较低的 45MW 速调管。

高能所北京正负电子对撞机及其同步光实验室对长期连续运行的稳定性和束流的品质都有很高的要求, 因此要求速调管的长期连续稳定运行。而我们此前所遇到的速调管不稳定性主要来自枪区的打火, 为此设计了低电场梯度的 120MW 束流功率电子枪, 其最大电场梯度为 19.5kV/cm, 相比之下美国的 5045 型速调管电子枪的电场梯度为 22.5kV/cm, 国产 30MW 速调管的电场梯度为 28.4kV/cm。一般而言, 较低的电场梯度可以在相同的速调管排气条件下获得更好的稳定性。实际上该实验样管仅经过两天的简单的烘烤排气, 在速调管的老炼过程中用了两天时间达到了 220kV, 六天时间达到 300kV, 微波输出功率达到 45MW, 也体现出了低电场梯度的优点。可预期速调

管的烘烤条件的改善还可进一步提高速调管的稳定性。

由于高能所 45MW 速调管设计采用了五谐振腔高频作用段, 结构短而紧凑, 高频作用段长度仅为 40cm, 缩减等离子波长(λ_q)约为 123cm, 因此以等离子波长计算其长度为 $0.33\lambda_q$, 相比之下, 30MW 速调管为 $0.37\lambda_q$, 美国 SLAC5045 型速调管为 $0.43\lambda_q$ ^[6]。速调管本身结构的紧凑可以有效减轻速调管系统的质量。

5 结束语

为满足新北京正负电子对撞机的运行需要, 高能所研制了高性能的 45MW 速调管, 样管测试结果显示其主要的技术指标达到了设计要求, 为顺利完成高能所的创新项目奠定了基础。

感谢高能所工厂高质量地完成速调管的加工制造工作, 感谢高能所加速器中心真空组同志的密切合作。

参考文献(References)

- 1 The Beijing Electron Positron Collider Upgrade Project (BEPCII) First Design-Linac Part. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. IHEP-BEPC II-SB-03-2
- 2 HONG B, DONG D et al. BEPC Klystron Improvements. APAC 98. Tsukuba, Japan, 23—27 Mar 1998
- 3 ZHOU Z S, DONG D. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(3): 277—280 (in Chinese)
- 4 ZHOU Z S, DONG D. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(7): 1075—1078 (in Chinese)
- 5 (周祖圣, 董东. 强激光与粒子束, 2005, **17**(7): 1075—1078)
- 5 DONG D. Novel Conception of Beam Temperature in Accelerator and Applications, Beam Dynamics Conference, 2005, China
- 6 Konrad G T. High Power RF Klystrons for Linear Accelerators. 1984 Linear Accelerator Conference. Seeheim/Darmstadt, West Germany 1984

IHEP S-band 45MW Pulse Power Klystron Development^{*}

DONG Dong ZHOU Zu-Sheng ZHANG Liang LI Gang-Ying TIAN Shuang-Min

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract S-band 45MW pulse power klystron has been developed in the Institute of High Energy Physics (IHEP) for the Beijing Electron Positron Collider (BEPC) upgrade projects (BEPC-II). This new klystron has 5 cavities in its RF-beam interaction and single RF output window, and the RF output power is 45MW at 310kV, the gain is 50dB, the efficiency 40%. The manufacturing, training and testing of a prototype klystron has been finished in IHEP and RF power 45MW at 300kV has been reached. The testing results show that all the parameters of the 45MW klystron reach the design goal.

Key words klystron, microwave, RF, accelerator

Received 25 January 2006

^{*} Supported by National Natural Science Foundation of China (10475094) and Knowledge Innovation Project of IHEP, CAS