文章编号： 1007-4627(2014) 01-0037-06

C-ADS 超导轮辐腔 Spoke021 的电磁设计与优化

杨玉章[1, 2]，何 源[1]，张生虎[1]，张 聪[1]，岳伟明[1]，蒋天才[1, 2]，贺守波[1, 2]，
王若旭[1]，徐孟鑫[1, 2]，黄玉璐[1, 2]，皇世春[1, 2]，张升学[1]

(1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 为满足 C-ADS 项目建设对超导轮辐腔 Spoke021 的需求，对 Spoke021 进行了详细的电磁参数优化。对 Spoke021 的参数化模型进行参数扫描，针对腔体的关键电磁特征量寻找可能存在的极值，详细分析、解释了优化过程中各个参数发生变化的物理意义。在 Spoke021 各参数达到最终优化值时，表征腔体性能的两个关键比值分别为：$E_{\rm p}/E_{\rm acc}=3.14$，$B_{\rm p}/E_{\rm acc}=4.77$ mT/(MV/m)。考虑到次级电子倍增 (Multipacting，MP) 对 Spoke021 运行中所能达到的性能指标有很重要影响，对腔体的MP进行了建模分析。结果表明，当 Spoke021 工作在 $E_{\rm acc}=10$ MV/m 情况下，没有发生 MP，优化得到的参数可以满足 Spoke021 工程设计的需要；最后计算了腔体的 TTF 曲线，表明该腔体具有较宽的速度接受度。

关键词： 超导轮辐腔; CST-MWS；次级电子倍增；C-ADS

中图分类号： TN015　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.11804/NuclPhysRev.31.01.037

1 引言

超导轮辐腔由于具有结构紧凑、机械强度高和场形稳定等特点，成为大功率 CW 质子直线加速器中能段的主要候选腔型之一，成为国内外各大实验室研究的热点[1]。美国费米实验室设计的一只 $\beta=0.21$ 的双间隙超导轮辐腔在2 K温度下测试的最大加速梯度已达22 MV/m，并计划将这种腔型应用到正在筹建的 Project X 中[2]。法国 IPN Orsay 实验室设计的一只 $\beta=0.35$ 的双间隙超导轮辐腔在 4 K 温度下测试的最大加速梯度已达 12.2 MV/m[3]。国内相关研究机构如北京大学重离子研究所、中国科学院高能物理研究所等单位都开展了对超导轮辐腔的研究[4−5]。中国科学院近代物理研究所于 2010 年底参与了中国科学院启动的 C-ADS 战略性先导专项[6]中对超导轮辐腔的研究。为满足 C-ADS 项目建设对 $\beta=0.21$ 超导轮辐腔 (Spoke021，如图 1 所示) 的需求[7]，本文对其进行详细的电磁设计和优化研究。该超导轮辐腔基本参数为：频率 325 MHz；腔体几何 $\beta=0.21$；束流孔径为 50 mm；最小加速梯度 8 MV/m。首先将腔体几何形状参数化，然后采用对每一个几何参数逐一优化的方法对 Spoke021 进行电磁设计与优化。

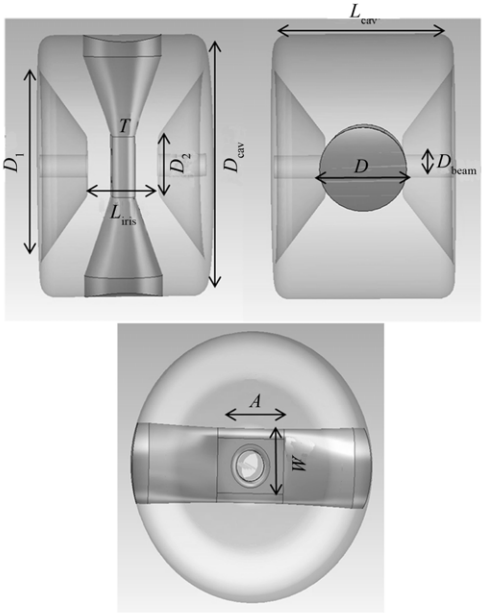

图 1　Spoke021 几何图

收稿日期： 2013-04-02；　**修改日期：** 2013-04-28

基金项目： 中国科学院战略性先导科技专项(XDA03020802)

作者简介： 杨玉章(1986–)，男，河北石家庄人，硕士研究生，从事超导腔设计；E-mail: yangyuzhang@impcas.ac.cn。

http://www.npr.ac.cn

2 腔体的设计及优化

电磁设计与优化的目标是降低腔体表面最大场(电场和磁场)与加速梯度的比值，并减小在腔体工作区域发生次级电子倍增(Multipacting, MP)的概率。因为腔体电磁性能的优化与腔体结构设计紧密相关，所以采用优化腔体几何形状的方式优化腔体电磁性能[8−9]。腔体电磁设计与优化采用CST(Computer Simulation Technology)软件中Microwave Studio(MWS)模块[10]，网格总数为328万。由CST对Spoke021本征基模的仿真可知，Spoke021腔内导体束流孔区域为高电场区，内导体基部为高磁场区。因此为降低表面峰值电场与加速梯度的比值，束流孔区域采用跑道型[7]；为降低表面峰值磁场与加速梯度的比值，使表面磁场分布均匀，内导体的基部采用圆形，端盖采用重入式结构。本文主要通过优化束流孔处跑道形直线段长度A、宽度W、厚度T以及内导体基部的半径d，重入式端盖外半径d_1，腔体的总长度$L_{\rm cav}$等参数来得到最佳的腔体几何形状。

2.1 内导体Spoke形状优化

内导体Spoke棒中心区域在等效电路中属于电容区，对腔体电场参数影响比较大，所以内导体中心区域的优化主要考虑$E_{\rm p}/E_{\rm acc}$，但为全面分析改变此处几何尺寸对腔体电磁性能的影响，将$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$作为一个重要的参考量。当束流孔径处采用跑道型时[11]，对Spoke棒束流孔径区域进行优化，并且束流孔径处宽度为W、厚度为T以及长度为A。分别改变几何参量W，T和A时，可得到相应的物理参数变化，如图2，3，4所示。由图2物理参量随W的变化趋势所示，改变W的取值可以同时改变$E_{\rm p}/E_{\rm acc}$和$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$的取值，并且改变W的取值对$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$的影响显著。由图2可知W在95 mm附近$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$取最小值。这是因为束流孔中心区域与内导体Spoke基部采用平滑过渡的连接，增加W的数值也会增加平滑连接部分的体积从而减小腔体磁场储能空间从而增大$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$。但是增加W对电场储能空间改变不大，所以选取W为95 mm。

当改变束流孔径处长度A时，可改变腔体的磁场储能空间，使腔体的物理参数发生改变。图3为腔体的物理参数随A的变化关系，从图中可看出$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$随A的变化有一个极小值，而$E_{\rm p}/E_{\rm acc}$随A的取值变化不大，这是因为束流孔区域为高电场区，改变A的长度并不能显著的改变腔体电场的分布。故选取Spoke中间段长度为100 mm得到最小的$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$。

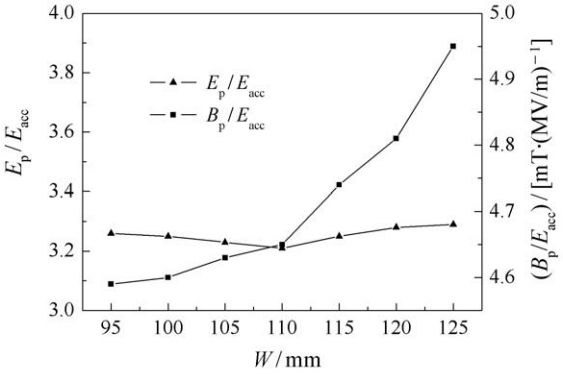

图 2 束流孔处宽度W对于腔体高频性能的影响

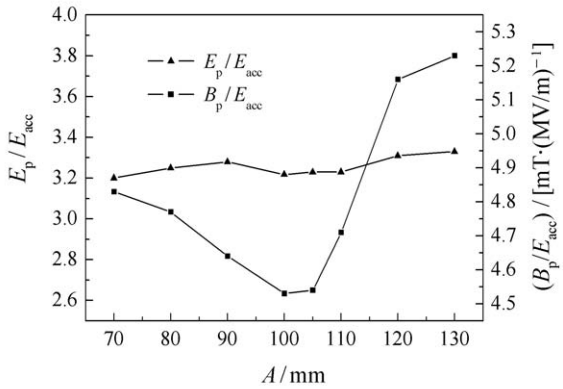

图 3 束流孔处长度A对于腔体高频性能的影响

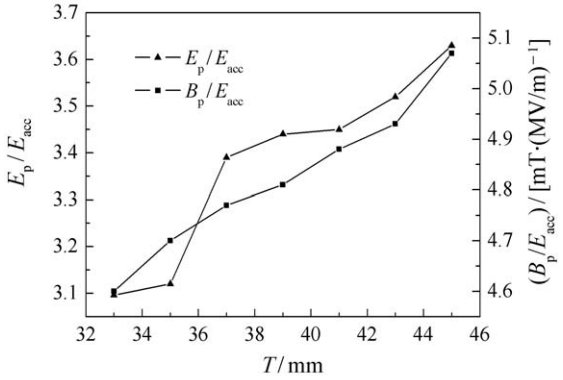

图 4 束流孔处厚度T对于腔体高频性能的影响

改变束流孔处厚度T的取值，一方面可以减小电场区的储能空间；另一方面随着T的增加，也使腔体基部和束流孔平滑连接部分体积变大，从而压缩了腔体强磁场区的储能空间。计算结果如图4所示，$E_{\rm p}/E_{\rm acc}$，$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$随束流孔处厚度T取值的增加而

http://www.npr.ac.cn

单调增加，所以应该选取较小的 T 值，但若继续减小 T，由式 (1) 可知腔体的加速间隙 g 会增加，从而腔体的渡越时间因子 (TTF) 的取值变小，腔体的加速效率降低，所以选取 $T=33$ mm。

内导体与腔体外壳的连接处为高磁场区，是优化的重点区域。为了降低该处磁场强度，应减小该处的表面电流密度。当采用圆柱形芯棒基部时，表面磁场分布更均匀，从而有利于减小 $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$。图 5 显示了对其半径进行优化的结果。由图 5 可知，逐渐增大内导体基部半径d，增加了导体表面积从而减小了该处的表面电流密度，进而降低了 $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$，并且也减小了腔体的磁场储能，所以降低了腔体的 R/Q。综上考虑，减小 $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$ 的同时为得到较大的 R/Q，将 d 选取为 70 mm。

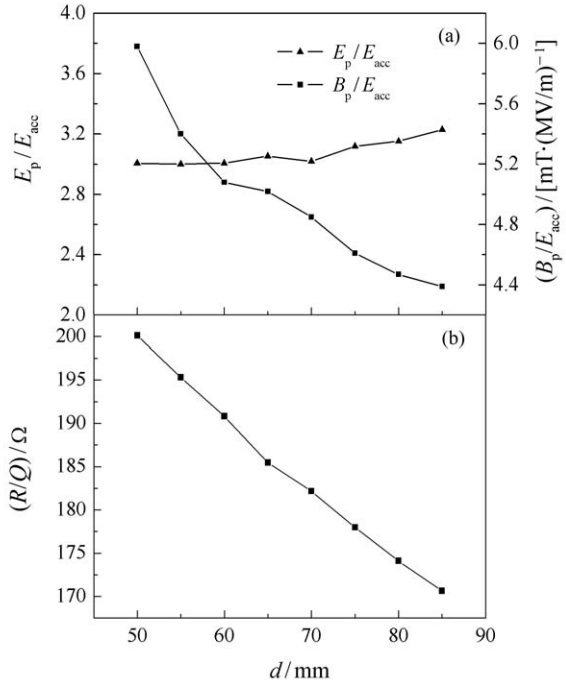

图 5　内导体基部半径 d 对于腔体高频性能的影响

2.2　腔体端盖的优化

Spoke 腔重入式端盖外端半径对提高腔体的高频性能有很重要的影响[11]，这是因为采用重入式尾端可以增加腔体的磁场储能空间，降低截面的磁通量密度，从而有利于降低 $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$，但是对电场储能的影响却不明显。优化 d_1 这个几何参量，得到相应物理量的具体变化如图 6 所示。

由图 6 所示，端盖外半径 d_1 的改变对于 $E_{\rm p}/E_{\rm acc}$ 影响不大，$B_{\rm p}/E_{\rm acc}$ 随端盖外半径 d_1 的增加而单调增加说明在几何优化可以考虑的取值范围内，d_1 越小越好，这是因为 d_1 越小，腔体磁场储能空间越大，从而降低截面的磁通量密度，但减小 d_1 同时会增加制造难度，所以在优化时选取 d_1 为 120 mm。

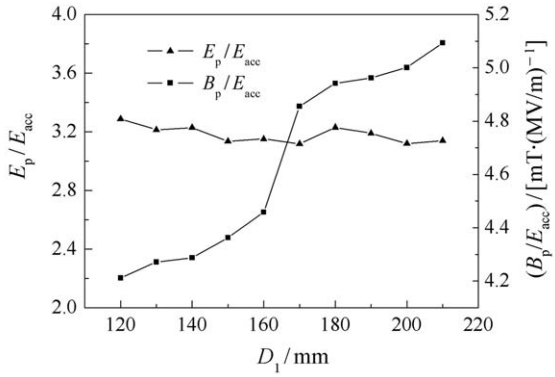

图 6　端盖外半径 d_1 对于腔体高频性能的影响

2.3　腔体长度的优化

腔体的总长度主要影响腔体的磁场储能空间，腔体总长度与 Spoke021 的物理参数的变化关系如图 7 所示。由图 7 可见 $E_{\rm p}/E_{\rm acc}$，R/Q 随腔体长度的增加而单调增加，而 $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$ 随腔体长度的增加而单调减小，这是因为腔体越长提供的磁场储能空间越大，这样会降低 $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$，同样也会使电场更加集中的分布在束流孔附近，所以加速粒子的效率更高，得到更高

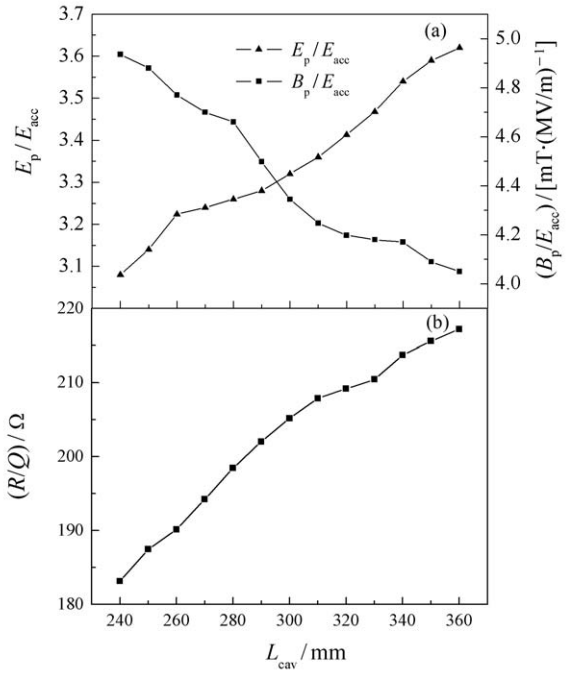

图 7　腔体长度对于腔体高频性能的影响

http://www.npr.ac.cn

的 R/Q。增加腔体的总长不仅会增加腔体的建造费用，而且会对束流的纵向动力学产生影响。考虑到加速器物理的要求和成本，所以将腔体的总长选在 250 mm 处。

3 MP 分析

MP 对超导腔的电磁性能有着重要的影响，下面对其进行详细分析。MP 容易发生在表面电场极小值的区域，例如内导体 Spoke 基部、端盖与腔桶连接处。对这两个位置进行倒角可以改变这两个位置的电磁场分布，从而抑制 MP 的发生。在这两个位置，本文按照 C-ADS 工程的需求将 Spoke021 的工作加速梯度设定在 10 MV/m。采用 CST Particle Studio 软件 TRK 求解器来模拟 Spoke021 腔内壁表面的 MP。设置初始发射电子源，电子的发射能量设为 2 eV，在所选粒子源表面均匀分布。对发生 MP 概率较高的内导体 Spoke 基部、端盖与腔桶连接处进行了模拟分析。结果如图 8 所示。

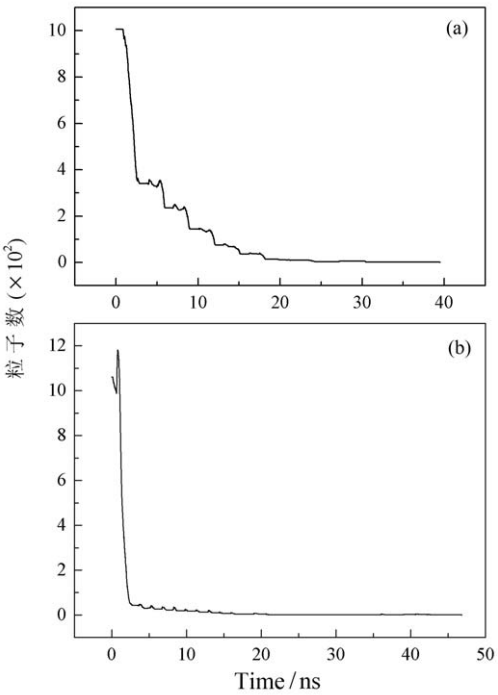

图 8 加速梯度为 10 MV/m 下 MP 模拟

(a) 加速梯度为 10 MV/m 下端盖与腔桶连接处 MP 模拟，

(b) 加速梯度为 10 MV/m 下内导体 spoke 基部 MP 模拟。

图 8 可知，在 10 MV/m 加速梯度下内导体 Spoke 基部、端盖与腔桶连接处粒子数随时间衰减，均未发生 MP 效应，表明经过优化后的腔型可以在 10 MV/m 的加速梯度下工作。

4 优化结果及分析

通过以上优化得到腔体的几何尺寸如表 1 所列。

表 1 Spoke021 的主要几何尺寸

名称	长度/mm	名称	长度/mm
L_{cav}	250	D	140
D_{beam}	50	D_{cav}	501.6
D_1	240	D_2	100
L_{iris}	129	A	100
W	95		

此参数下对应的腔体的电磁参数如表 2 所列。

表 2 Spoke021 的主要高频参数

名称	数值	名称	数值
Frequency/MHz	325	β	0.21
$E_{\mathrm{p}}/E_{\mathrm{acc}}$*	3.14	$(B_{\mathrm{p}}/E_{\mathrm{acc}})/[\mathrm{mT}/(\mathrm{MV/m})]$*	4.77
$V_{\mathrm{acc}}/\mathrm{MV}$*	0.78	$(R/Q)/\Omega$	187.4

* 文中定义的加速梯度所对应的有效加速长度为 $L = 2/3\ \beta\lambda$，V_{acc} 是在腔体储能为 1 J 时的计算结果。

通过计算，得到腔体的 TTF 曲线和沿束流方向电场分布如图 9 所示。

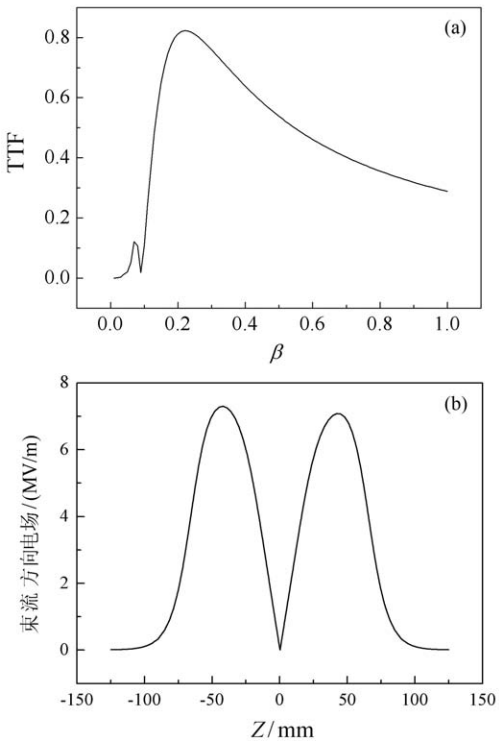

图 9 计算结果

(a) TTF 曲线, (b) 束流方向电场分布。

http://www.npr.ac.cn

从图 9 可以看出 Spoke021 的最优参数 $\beta = 0.22$，在 $0.16 < \beta < 0.34$ 区间内 TTF 的取值均在 0.7 以上，它在较宽的粒子速度范围内有较高的加速效率，满足了 C-ADS 项目质子直线加速器在 $10 \sim 40$ MeV 能量段的加速需求。

5　总结

本文通过参数化优化设计的方法得到的 Spoke021 设计，加速梯度可以达到 8 MV/m 以上，其关键参量 $E_{\mathrm{p}}/E_{\mathrm{acc}}$ 和 $B_{\mathrm{p}}/E_{\mathrm{acc}}$ 均比目前 C-ADS 使用的腔体要好，但是腔体阻抗略小于工程中 Spoke021 的设计。对腔体在 10 MV/m 电场下的 MP 分析，模拟结果表明，使用该参数集的腔体在 10 MV/m 的加速梯度下没有 MP，是一种可行的、稳定的设计。

参考文献：

[1] SHEPARD K W, OSTROMOV P N, DELAYEN J R. Phys Rev ST Accel Beams, 2003, **6**: 080101.

[2] GONIN I. Single Spoke Cavity For Low-energy Part Of CW Linac Of Project X[C]//Proc of the 2010 International Particle Accelerator Conference.Japan: Kyoto, WEPEC057, 2010.

[3] OLRY G, BIARROTTE J L, Proceedings of SRF'03, Germany, 2003: 476–481.

[4] YAO Zhong Yuan, LU Xiangyang, ZHAO Kui. Chin Phys C (HEP & NP), 2009, **33**(4): 292.

[5] LI Han, SHA Peng, Chin Phys C(HEP & NP), 2012, **36**(8): 761.

[6] ZHAN Wenlong, XU Hushan. Bulletin of CAS, 2012, **27**(3): 375.

[7] YAN Fang, LI Zhihui, MENG Cai, *et al.* 52nd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity[C]//High Brightness Hadron Beams.China: Institute of High Energy Physics, CAS, 2012.

[8] RISTORI L, APOLLINARI G, BORISSOV E, *et al.* Design, Fabrication and Testing of Single Spoke Resonators at Fermilab[C]//Proceedings of SRF2009. Berlin: Germany, 2009: 550.

[9] KELLY M. Status of Superconducting Spoke Cavity Development[C]//Proceedings of the 13th International Workshop on RF Superconductivity. China: Peking University, 2007.

[10] A specialist tool for the 3D EM simulation of high frequency Components[EB/OL]. [2012-10-12]. http://www.cst.com/ Content/Products/MWS/Overview.aspx.

[11] ZAPLATIN E. Mulit-spoke Cavity end Region Analysis[C]//Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity. USA: Cornell University, 2005.

http://www.npr.ac.cn

Electromagnetic Design and Optimization of Superconducting Spoke021 Cavity for C-ADS

YANG Yuzhang[1, 2], HE Yuan[1], ZHANG Shenghu[1], ZHANG Cong[1], YUE Weiming[1], JIANG Tiancai[1, 2], HE Shoubo[1, 2], WANG Ruoxu[1], XU Mengxin[1, 2], HUANG Yulu[1, 2], HUANG Shichun[1, 2], ZHANG Shengxue[1]

(*1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The electromagnetic optimizations of a superconducting Spoke021 cavity is studied in detail for C-ADS project, in this paper. The cavity model has been parameterized, in order to find the possible maxima or minima of the key electro-magnetic parameters, the parameter sweep is performed. The cavity model has been parameterized. For finding the key electromagnetic feature, the geometric parameter sweep is performed. The physical interpretation for the variation of these electromagnetic parameters has been elaborated. The electromagnetic simulation gives the optimum parameters $E_{\rm p}/E_{\rm acc}$ of 3.14 and $B_{\rm p}/E_{\rm acc}$ of 4.77 mT/(MV/m). In addition, the Multipacting(MP) has a great effect on the electromagnetic properties of superconducting Spoke021 cavity. So the MP simulations have been done for this cavity, which shows that there is no MP phenomenon at 10 MV/m accelerator gradient. Therefore, the optimized cavity parameters can satisfy the requirements of the C-ADS project. Finally, the TTF(Transit Time Factor) curve of this cavity is calculated and it shows that this cavity has wide velocity acceptance.

Key words: superconducting spoke cavity; CST-MWS; multipacting; C-ADS

Received date: 2 Apr. 2013; **Revised date:** 28 Apr. 2013

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA03020802)

1) E-mail: yangyuzhang@impcas.ac.cn.

http://www.npr.ac.cn