

SSRF 前端光子挡光器的结构设计和热应力分析

金建峰¹, 刘 学², 吴冠原², 王纳秀², 陈海波¹, 张培强¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 光子挡光器是同步辐射光束线前端区的重要部件, 其主要作用是阻挡高强度同步辐射. 利用有限元分析软件 ANSYS, 对上海同步辐射装置(SSRF)前端光子挡光器, 进行了精细的温度和热应力分析. 分析结果表明, 新设计的光子挡光器热应力水平有了显著的降低, 提高了光子挡光器承受热负载的能力, 满足 SSRF 前端部件的设计要求.

关键词: 同步辐射装置; 光子挡光器; 高热负载; 有限元分析; 结构设计

中图分类号: TL544 **文献标识码:** A

Structure design and thermal stress analysis of photo shutter on SSRF front end

JIN Jianfeng¹, LIU Xue², WU Guanyuan², WANG Naxiu², CHEN Haibo¹, ZHANG Peiqiang¹

(1. Department of Modern Mechanics, CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The photo shutter is one of the critical parts on the front end of synchrotron radiation beam line and is usually used for absorbing high power density of synchrotron radiation. The temperature and thermal stress distributions in the front end photo shutter of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) were simulated carefully by the finite element package ANSYS. Analysis results reveal that maximum thermal stress of the new photo shutter is remarkably reduced and enhances the photo shutter's endurance for high synchrotron radiation thermal load, thus fulfilling the design requirement of the SSRF front end.

Key words: synchrotron radiation facility; photo shutter; high thermal load; finite element analysis; structure design

0 引言

上海同步辐射装置(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)是一台高性能的中能第三

代同步辐射光源, 电子储存环设计能量 3.5 GeV, 储存环流强 300 mA, 自然发射度 $3.9 \text{ nm} \cdot \text{rad}$, 它是我国迄今为止最大的大科学装置和大科学平台^[1,2]. 光束线前端是一套集机械真空辐射防护、高

收稿日期: 2007-02-13; 修回日期: 2007-04-10

基金项目: 国家大科学工程(上海光源)资助.

作者简介: 金建峰, 男, 1979年生, 博士生. 研究方向: 计算力学和工程 CAE 分析. E-mail: jjf@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 陈海波, 博士/教授. E-mail: hbchen@ustc.edu.cn; Tel: 0551-3603724

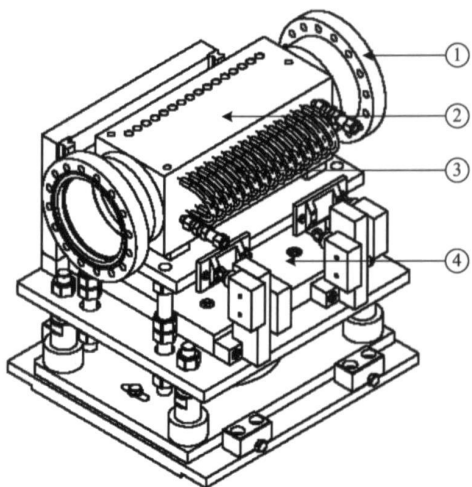
热负载承受和连锁控制为一体的综合系统,其主要作用是提供具有一定出口尺寸的同步辐射光,同时保护储存环的静态真空隔离和动态真空保护.其中光子挡光器(photo shutter)是前端区最重要的部件,它的主要作用是在试验站需要时阻挡多极扭摆器插入件发出的同步辐射,承受同步辐射的高热负载,保护下游部件以及其他光学元件不受同步辐射高热负载的破坏.

成像光束线是一条以多极扭摆器为插入件的光束线,其同步辐射总功率达到 9.5 kW,最大功率密度 $10.4 \text{ kW} \cdot \text{mrad}^{-2}$,对应的第二代同步辐射光源 Wiggler 插入件的热负载只有 291 W 和 $2.3 \text{ W} \cdot \text{mrad}^{-2[3]}$,两者的功率密度相差好几个数量级.第三代同步辐射高热负载,给前端部件的设计带来了许多困难.另外光子挡光器,在装置实际运行中,需要频繁地阻挡同步辐射的高热负载,设计时除了需要考虑结构的强度外,还需要考虑,在频繁阻挡同步辐射时带来的热机械疲劳问题,因此光子挡光器的设计准则,是前端热负载部件中要求最严格的.本文以 SSRF 成像光束线前端的光子挡光器为对象,利用大型通用软件 ANSYS,进行了精细的热应力有限元分析,根据分析得到的热应力分布特点,改变了吸收体的倾斜方式,与原始设计比较在同样的同步辐射热负载作用下,最大热应力水平有了显著降低.

1 光子挡光器的结构设计

光子挡光器用于阻挡插入件产生的同步辐射,要求能承受同步辐射的直接照射.结构设计采用水冷却整体型结构,运动波纹管位于挡光器上下游两端,通过气缸的驱动,使挡光器在与束流轨道垂直的方向做上下运动.该挡光器处于上位时,光束可以从下面的矩形通光孔通过;位于下位时,光束被吸收体倾斜面截止.具体结构如图 1 所示,主要包括连接法兰、真空腔体(包括内部的吸收体)、冷却铜管和下面的支撑升降机构.

真空腔体是光子挡光器设计的关键部位,其内部的吸收体,用来吸收所有同步辐射光,腔体用来做真空室.光子挡光器设计主要内容,就是真空腔体以及内部的吸收体的设计,具体包括吸收体的掠入射角度、掠入射方向、真空腔的开口尺寸、冷却铜管的直径等.SSRF 最初设计的真空腔体结构见图 2(a),吸收体为垂直掠入射结构.这种结构设计,在相同的纵向长度的条件下,减小了掠入射角,有利于降低吸



1. 连接法兰 2. 真空腔体(包括内部的吸收体)
3. 冷却铜管 4. 支撑升降机构

图 1 光子挡光器的结构图

Fig. 1 Structure of photo shutter

收体倾斜表面的辐射光功率密度.国际上很多同步辐射装置也都采用类似结构^[4-6].这种结构的缺点是水平方向的刚度较大,在同步辐射作用下,水平方向的热膨胀受很大的约束,结果会在掠入射面和光子吸收器两个侧面的夹角处,形成明显的应力集中,使得应力容易超过结构的设计准则.常用的方法是,通过采用减小倾斜角来降低热负载的功率密度.这样带来的问题,是增加光子挡光器的纵向长度,会与挡光器后面的部件冲突.另一种方法是在应力集中处开应力槽,降低应力集中,如 APS 设计的复杂狗骨头型的光子吸收器结构^[6].这种结构需要复杂的加工和焊接工艺,制造成本较大.针对 SSRF 同步辐射的特点,和通过对原始设计结构进行有限元分析,我们发现,结构的最大应力主要是由于热膨胀在结构凹角处引起的应力集中,原始热应力集中占的分量很小.如果采用图 2(b)所示水平倾斜面设计,结构在水平和垂直方向可以自由膨胀,可以有效地避免垂直斜面设计中的应力集中问题,降低热应力水平.

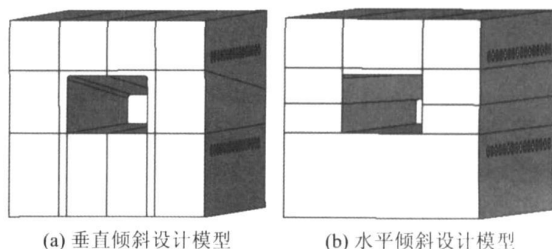


图 2 两种有限元实体模型

Fig. 2 Two solid models in finite element analysis

表 1 Glidcop AL15 材料属性

Tab. 1 Material parameters of Glidcop AL15

| 热传导系数 /(W · mm °C ⁻¹) | 热膨胀系数 /(μm · m °C ⁻¹) | Young 模量 /GPa | 泊松比 | 屈服强度 /MPa | 抗拉强度 /MPa |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------|---------------------------|---------------------------|
| 0.365 | 16.6 | 130 | 0.326 | 331~ 455(75% cold worked) | 413~ 483(75% cold worked) |

2 光子挡光器的热应力分析

2.1 有限元模型

光子挡光器的整体机械结构很复杂, 其中很多部件对光子挡光器的热应力分析结果影响很小. 在对光子挡光器建立有限元分析模型时, 采用了一些合理的简化, 主要简化有: 忽略支撑升降机构; 忽略了腔体外面冷却铜管; 忽略两头的连接法兰. 有限元网格划分采用二次六面体实体单元, 整个模型单元数大约 20 万, 节点数 80 万. 两种设计具体的有限元实体模型见图 2. 光子挡光器真空腔体采用 Glidcop AL15 材料, 其材料属性见表 1^[7].

目前国际上还没有统一的高热负载部件的设计准则. 美国 APS 的设计准则: 对 OFHC 铜, 同步辐射引起的极限温升小于 150 °C; 对 Glidcop 铜, 同步辐射作用的极限温升小于 300 °C^[8]. 文献[9]提出了一个材料失效准则: 结构的最大 Von Mises 应力小于 2 倍的材料抗拉强度. 从工程实际出发, SSRF 采用了比较保守的设计准则, 即最大 Von Mises 应力小于材料的屈服强度, 具体设计指标是 $S_{VM} \leq 280 \text{ MPa}$.

2.2 同步辐射功率分布计算和热负载加载

为了进行光子挡光器的热应力分析, 首先需要计算从多极扭摆器发出的同步辐射功率的空间分布. 多极扭摆器的辐射功率角分布表达式为^[10, 11]

$$\frac{d^2P}{d\theta d\phi} = \frac{d^2P}{d\theta d\phi} \Big|_0 f_k(\chi\theta, \chi\phi) =$$

$$10.64B_0^4 [T] E_c^4 [\text{GeV}] I [A] N G(K) f_k(\chi\theta, \chi\phi).$$

式中,

$$f_k(\chi\theta, \chi\phi) =$$

$$\frac{16K}{7\pi G(K)} \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{D^3} - \frac{4(\chi\theta - K \cos \xi)^2}{D^3} \right] \sin^2 \xi d\xi,$$

它是辐射功率密度随水平角度和垂直角度的分布函数;

$$\chi = \frac{E_c}{mc^2} = 1.957 E_c [\text{GeV}];$$

$$D = 1 + (\chi\phi)^2 + (\chi\theta - K \cos \xi);$$

$$G(K) = K \frac{K^6 + \frac{24}{7}K^4 + 4K + \frac{16}{7}}{(1 + K^2)^{7/2}}.$$

各个参数代表的物理量和具体数值见表 2. SSRF 采用日本 SPring-8 开发的 Spectra 软件计算插入件的辐射功率, 代入表 2 中的物理参数, 计算得到 SSRF 多极扭摆器的总功率为 9.5 kW, 最大功率密度 10.35 kW · mrad⁻², 具体功率密度分布情况如图 3 所示.

表 2 SSRF 存储环和多极扭摆器插入件参数

Tab. 2 Parameters of SSRF ring and multipole Wiggler (MPW)

| 存储环能量 E_c / GeV | 储存环流 I / A | 磁场强度 B_0 / T | 周期数 N | 反射因子 K |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------|---------|----------|
| 3.5 | 0.30 | 1.928 | 11 | 18 |

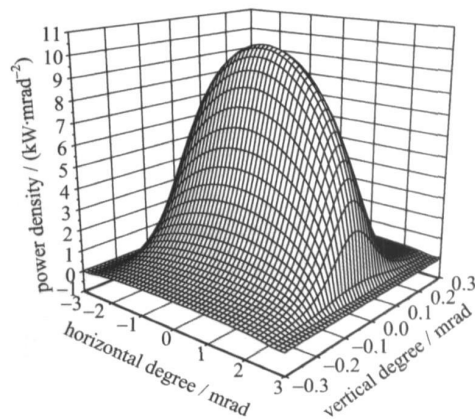


图 3 SSRF 成像光束线多极扭摆器功率密度分布

Fig. 3 Power distribution of MPW beamline

在有限元分析的加载过程中, 利用 ANSYS 的参数化设计语言, 从文件中读入功率密度分布数据, 建立以节点坐标 (X, Y) 为索引的 TABLE 表, 采用 ANSYS 的表格加载技术直接加载热负载, 避免了函数拟合引起的误差, 提高了热负载加载精度. 图 4 和图 5 是同步辐射功率加载到有限元模型上的实际情况. 有限元分析时冷却管道的对流换热系数取 0.015 W · mm⁻² K⁻¹. 可以看出, 采用垂直倾斜模型可承受的最大功率密度为 1.98 W · mm⁻², 采用水平

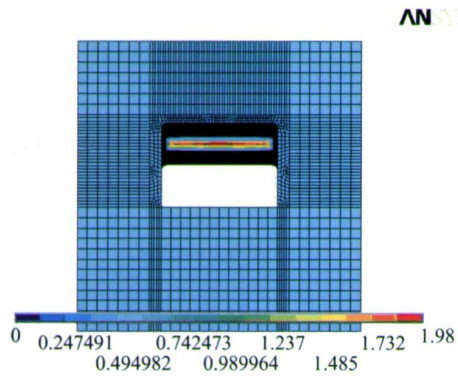


图 4 垂直倾斜模型网格和热负载分布
Fig. 4 Mesh and heat load distributions
in vertical incline model

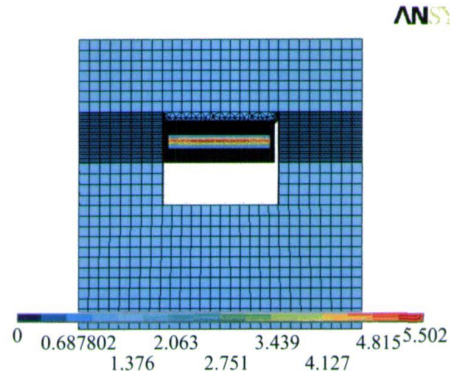
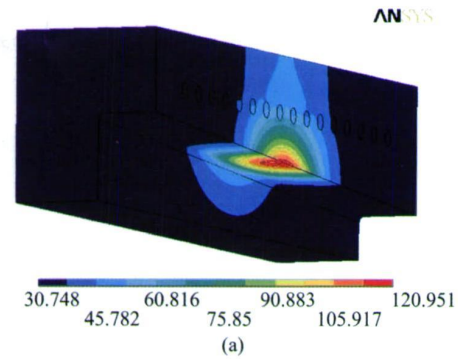
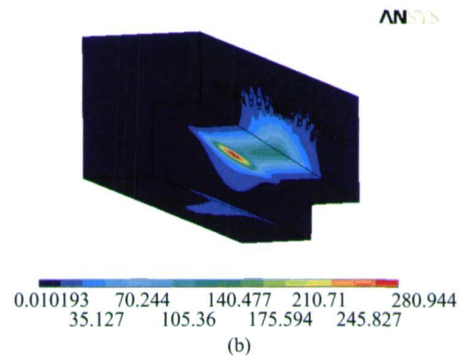


图 5 水平倾斜模型网格和热负载分布
Fig. 5 Mesh and heat load distributions
in horizontal incline model



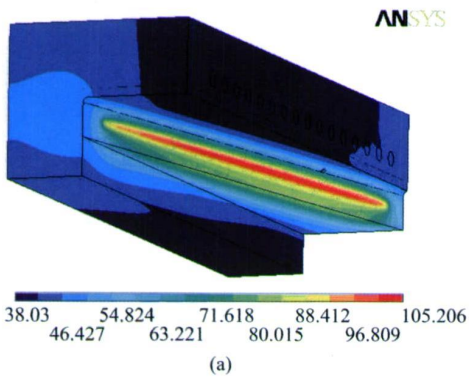
(a)



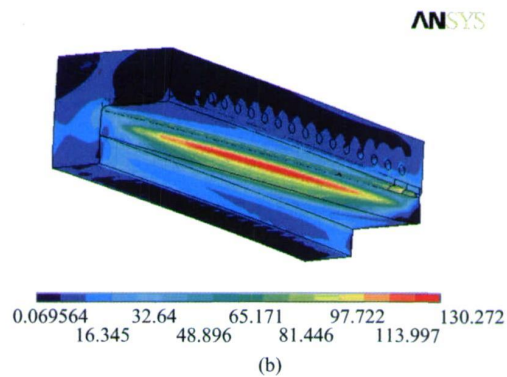
(b)

图 6 垂直倾斜模型温度分布和应力分布

Fig. 6 Temperature and stress distributions in vertical incline model



(a)



(b)

图 7 水平倾斜模型温度分布和应力分布

Fig. 7 Temperature and stress distributions in horizontal incline model

倾斜模型可承受的最大功率密度为 $5.50 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$.

2.3 有限元分析结果

垂直倾斜模型计算结果表明: 采用垂直倾斜挡光, 光子吸收器最高温度将达到 $121 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 6(a)), 最大应力达到 281 MPa (图 6(b)), 已经超过设计指标. 从图 6 可以看出, 最大应力的位置在倾斜面和侧

面的交线处, 与最大温度位置不重合. 这说明最大应力主要是因为挡光器水平方向无法自由膨胀产生的集中应力. 在相同的同步辐射作用下, 有限元分析水平倾斜模型, 光子吸收器的最高温度将达到 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 7(a)), 最大应力将达到 130 MPa (图 7(b)). 应力水平显著降低的主要原因是, 水平倾斜挡光吸收

体可以自由膨胀,其应力主要是受同步辐射作用下温度不均匀引起的热应力,最大温度和最大应力位置基本重合.采用水平倾斜设计的光子挡光器,应力水平从 280 MPa 下降到 130 MPa,在相同条件下,其热负载能力提高了一倍.

3 结论

本文介绍了一种新型的采用水平倾斜设计光子挡光器的结构设计,并对其在工作状态下的温度和热应力进行了有限元分析.有限元分析表明,采用水平倾斜设计的光子挡光器,在相同的同步辐射作用下,最大应力从 280 MPa 下降到 130 MPa,避免了原始设计中由于整体刚度太大引起的应力集中,提高了光子挡光器承受热负载的能力,新的方案符合 SSRF 前端部件的设计要求.

参考文献(References)

- [1] XU Hong jie. A new generation synchrotron radiation light source and its application[J]. Trends in Nuclear Physics, 1996, 13(4): 25-27.
徐洪杰. 新一代同步辐射光源及其应用[J]. 核物理动态, 1996, 13(4): 25-27.
- [2] 陈森玉. 预研中的上海同步辐射装置[J]. 中国科学院院刊, 2000, 15(1): 66-69.
- [3] PAN Guo qiang, XU Chao yin, ZHAO Wei chang, et al. The properties of synchrotron radiation source of Hefei storage ring[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1997, 27(1): 62-68.
潘国强, 徐朝银, 赵伟昌, 等. 合肥同步光源特性计算[J]. 中国科学技术大学学报, 1997, 27(1): 62-68.
- [4] Biasci J C, Plan B, Zhang L. Design and performance of ESRF high power undulator front end components [J]. J Synchrotron Rad, 2002, 9:44-46.
- [5] Takahashia S, Aoyagi H, Mochizuki T, et al. Design of the front end for the very long ir vacuum X-ray undulator at SPring 8 [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001, (1): 758-761.
- [6] Jaski Y, Trakhtenberg E, Collins J, et al. Thermomechanical analysis of high heat load components for the canted undulator front end[C]// 2nd International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI02). Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 2002.
- [7] SCM Metal Products. Glidcop grade Al-15 dispersion strengthened copper, technical data[R]. SCM Metal Products, 1988.
- [8] Sharma S, Rotela E, Barcikowski A. High heat load absorbers for the APS storage ring[C]// Proceedings of MEDSI2000. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 2000.
- [9] Zhang L, Biasci J C, Plan B. ESRF thermal absorbers: Temperature, stress and material criteria [C]// Proceedings of MEDSI02. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 2002.
- [10] JIANG Di kui, YIN Li xin. Synchrotron radiation power distribution from multipole wiggler magnet [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1997, 27(4): 440-444.
蒋迪奎, 殷立新. 多极扭摆磁铁同步辐射光的功率分布[J]. 中国科学技术大学学报, 1997, 27(4): 440-444.
- [11] Kim K J. Angular distribution of undulator power for an arbitrary deflection parameter K [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1986, 246: 67-70.