

液氮冷却单色仪晶体的热应变分析

王纳秀 张映箕

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 本文报道了设计中的上海同步辐射装置扭摆器光源光束线站所用双晶单色仪的第一晶体液氮冷却的 ANSYS 有限元分析结果,晶面倾斜误差 RMS 值为 $2.33\mu\text{rad}$;尝试了用光学追迹的 SHADOW 软件计算晶体受光面变形对晶体摇摆曲线展宽的贡献,结果表明液氮冷却晶体的参数能够满足同步辐射光束线站对单色仪晶体的要求,晶体冷却设计方案是可行的,用 SHADOW 软件模拟计算晶体摇摆曲线的方法是预言晶体光学参数的行之有效的方法。

关键词 同步辐射,摇摆曲线,液氮冷却,有限元分析,光学追迹

中图分类号 O734, TB131

设计中的上海同步辐射装置,作为第三代光源,具有很高的亮度和通量,各条光束线的主要光学元件都将受到高功率密度的 X 光的照射,垂直方向的最大峰值功率密度高达每平方米几百瓦(距光源点 10 米处)。为了保证元件不受损伤并能够输出高品质的光,必须对元件进行充分的冷却。单色仪是光束线实现输出高通量和高单色化的高品质光的核心部件,对受光表面的面形要求十分严格。由于单色仪晶体的入射角比较大(一般在 $3^\circ\sim 30^\circ$ 之间),第一晶体接受的功率密度很大。对插入件光束线远大于 $1\text{W}/\text{mm}^2$,对弯铁光束线在 $0.1\sim 1\text{W}/\text{mm}^2$ 之间。按照目前国际通用的标准,前者用液氮冷却,后者用直接水冷却^[1]。本文针对上海同步辐射装置 Wiggler 光源所产生的热负载情况,对光束线上单色仪第一晶体的液氮冷却结构进行了有限元分析,并以晶体的摇摆曲线展宽幅度作为冷却效果的判定标准来优化和确定冷却设计方案。有限元分析采用 ANSYS 软件。晶体摇摆曲线的计算采用 SHADOW 软件。SHADOW 软件是国际上用于同步辐射光束线物理设计的光学追迹程序,其主要目的在于模拟光学元件在光路中的作用和元件加工误差对光路整体光学性能的影响程度,最后给出光束线通量和光斑尺寸等物理参数。摇摆曲线是晶体的本征特性,其宽度决定单色仪的能量分辨性能。晶体发生形变时摇摆曲线的宽度增大,能量分辨率变差。晶体的摇摆曲线在实验上通常用双晶失谐的方法测量,本文尝试着用 SHADOW 软件模拟计算发生热变形的晶体的摇摆曲线,得出了面形误差对摇摆曲线展宽的贡献。

1 基本原理

1.1 ANSYS 热应变分析原理

ANSYS 软件是目前国际上通用的有限元分析软件,在压力容器、热、电磁场、结构和流体等领域得到广泛的应用;国际上同步辐射领域在利用 ANSYS 软件指导高热负载元件冷却设计方面也取得较好的结果。热应变分析技术属于 ANSYS 多场耦合技术,其方法是在静力场结构分析的基础上加入固体的温度分布产生的热胀冷缩所引起的结构变形分析。热应力理论

第一作者:王纳秀,男,1970 年出生,1992 年毕业于兰州大学现代物理系核技术专业,高级工程师

收稿日期:2001-05-08,修回日期:2001-10-29

计算公式为

$$\sigma_{\max} = \alpha \cdot T \cdot E \quad (1)$$

其中, T 为温差, α 为材料的线性膨胀系数, E 为材料的杨氏模量。ANSYS 热应力分析技术在开始之前要对被分析模型进行一次热分析以求得所需工况下的温度分布;再把热分析的结果作为负载输入到结构分析中,进行变形计算。两次分析过程所用的单元类型虽然不同,但是单元类型的次数和模型的网格划分必须一致,即节点数目和位置必须相同。

考虑到元件的疲劳效应和使用寿命,热应变有限元分析过程要求同时满足以下严格的热物性条件:

(1) 材料允许承受的最高温度不大于材料熔点(K)的一半或真空烘烤温度,同步辐射真空烘烤温度约为 200 。

(2) 材料允许承受的最高应力:在受拉状态下,最大等效应力不大于屈服应力的一半;在受压状态下,最大基本应力小于屈服应力。等效应力计算公式为

$$\text{等效应力} = \left(\left(\sigma_1 - \sigma_2 \right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3 \right)^2 + \left(\sigma_3 - \sigma_1 \right)^2 \right) / 2 \quad (2)$$

其中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为基本应力。

(3) 为保证冷却剂在纯液相环境运行,与液氮接触的元件壁的温度比液氮的沸点低 5 以上。

(4) 光束线物理设计所提出的元件表面变形参数的限制条件,即热变形引起的表面倾斜误差 RMS 值不大于 3 μ rad。

1.2 用 SHADOW 程序计算晶体摇摆曲线的原理和过程

用 SHADOW 软件计算晶体摇摆曲线的基本原理是把 ANSYS 热应变分析得出的受热表面的变形数据转化成光学元件的面形误差数据^[2],引入 SHADOW 追迹过程,点对点地追迹出射光的出射方向和强度,得到光线的角分布曲线,再从中得到摇摆曲线的半高宽。对无变形晶体将得到晶体的本征摇摆曲线,对有表面变形的晶体将得到展宽后的摇摆曲线。

用 ANSYS 软件所作的有限元计算得到的面形数据格式是 ASCII 文本文件,其中每行记录一个几何位置的坐标和位移,如(x, y, U);SHADOW 程序运算的中间过程数据文件则是二进制机器码。所以首先将 ANSYS 计算的表面变形数据转化成 SHADOW 卫星程序 PRESURFACE 所需的两维文本表格格式,即行为横坐标,列为纵坐标,中间为对应几何位置的位移数据;再用 PRESURFACE 把数据转化成 SHADOW 程序可直接调用的数据格式。

光源是 SHADOW 程序光学追迹的起点,其类型不同所代表的物理模型(即光的起始分布)也不同。首先,在追迹过程中选用发散角均匀分布和单一能量的点光源,光源水平和垂直发散角要大于晶体摇摆曲线的宽度。否则,在最后结果中得不到一条完整的摇摆曲线,难以读出晶体摇摆曲线的半高宽。

然后,将晶体作为唯一的光学元件引入 SHADOW 追迹过程。晶体放在光束线单色仪第一晶体的位置上,晶体受光表面的初始面形为平面,追迹过程中打开衍射和晶体选项开关,并在晶体面形误差选项中引入 PRESURFACE 程序所生成的晶体表面面形误差数据,并完成光学追迹。

最后,利用 SHADOW 卫星程序 PLOTXY 处理最后的成像文件,作光线的强度与发散角分布曲线,并从中读出晶体摇摆曲线的半高宽。

2 分析过程与结果

受热晶体的冷却效果明显地与晶体的结构形式有关。对于液氮冷却系统,由于液氮的换热系数较小,因此要求有足够大的换热面积。例如,对 1kW 的吸收功率,换热面积不能小于 5300mm^2 ^[3]。冷却结构的确定是一个计算机辅助设计(CAE)不断设计和优化的过程。下面介绍的结构和结果是满足前文所述技术要求的设计方案。

2.1 晶体冷却结构

单色仪第一晶体是一块内部有方形贯穿槽的立方体晶体,冷却结构见图 1。晶体外型尺寸为 $60\text{mm} \times 40\text{mm} \times 10\text{mm}$,上表面($60\text{mm} \times 40\text{mm}$)为 Si(111) 指数面;晶体冷却结构是 20 个截面为矩形($1\text{mm} \times 8.4\text{mm}$)的平行冷却槽,槽的上下面到晶体上下表面的距离均为 0.8mm ;槽两端分别配一个集液箱,所有槽都开口到集液箱,它是液氮从冷却槽一端流入,另一端流出的途径。

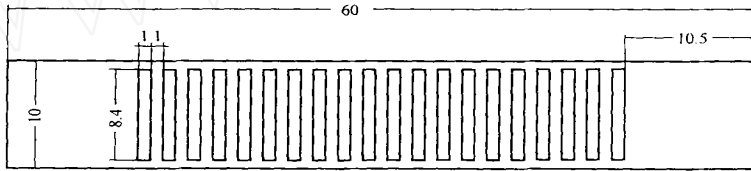


图 1 冷却结构垂直剖面图

Fig. 1 Vertical profile chart of cooling structure of crystal

2.2 热源

热源是同步光被晶体吸收之后所沉积的能量。在实际的热分析过程中忽略 X 射线散射所造成的沉积能量的损失和吸收能量的深度分布,把热源近似成为表面热源(热流密度)。上海同步辐射装置首批拟建光束线站采用的 Wiggler 光源主要参数是最大磁场为 1.3T,最小磁隙为 16mm,周期长度为 10mm,周期数为 24,其辐射的被单色仪第一晶体吸收的总功率为 1.52kW。第一晶体表面可接受 X 射线辐照的最大面积约为 2000mm^2 ,其表面实际光斑尺寸和吸收功率密度分布如图 2,面积约为 1000mm^2 ,最大峰值功率密度为 $4.5\text{W}/\text{mm}^2$ 。在实际计算过程中为简化模型,把热负载的对称中心加载在晶体表面的几何中心,并假定单色器晶体开槽方向与入射 X 射线方向平行。

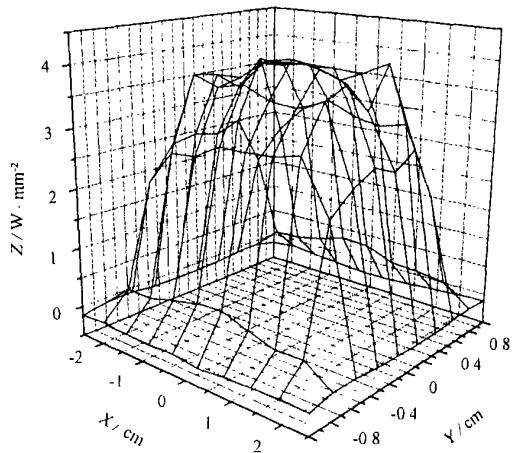


图 2 晶体表面的吸收功率密度 (W/mm^2) 分布

Fig. 2 Distribution of absorbed power density of the surface of crystal

2.3 冷却边界条件

固液界面间的换热采用单相液体充分发展的强迫对流换热模式。为使液氮有较大的温升范围,保证液氮吸热后所达到的温度低于其沸点,避免液氮汽化现象的发生,采用过冷 (70K)

液氮作为冷却剂;冷却槽内固液界面的换热能力用对流换热系数表征($10.7\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);其它热边界条件作绝热近似处理。

2.4 热分析过程和计算结果

采用 ANSYS 软件提供的实体建模技术建造图 1 所示的被冷却的硅晶体模型;用平面网格技术对晶体端面进行二维网格划分,再用拉伸网格技术对晶体进行三维网格划分,并删除二维网格;采用实体负载技术施加表面负载,将图 2 所示表面热流密度数据用表格技术施加在晶体上表面来表征晶体的热负荷,把对流换热系数施加在晶体槽内表面来表征冷却能力;采用 ANSYS 稳态热分析求解技术获得晶体的温度分布。图 3(a)是第一晶体受光面的温度分布,其表面的最高温度与冷却剂表面温度之间的差值为 27K ;图 3(b)是第一晶体垂直剖面上的温度分布,晶体槽内壁最高温度为 95K 。为保证液氮纯液相运行,要增大液氮饱和气压使其沸点大于 100K 。

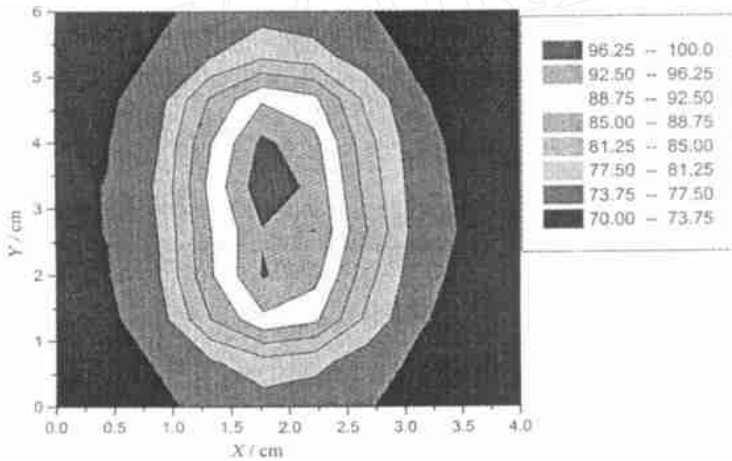


图 3(a) 晶体受光面的温度 (K) 分布

Fig. 3(a) Temperature distribution of the top surface of crystal

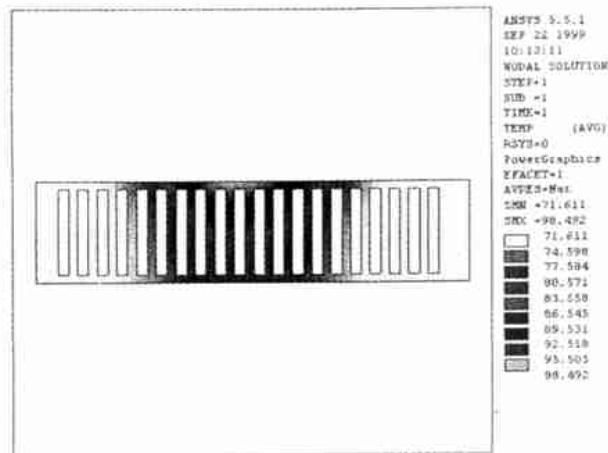


图 3(b) 晶体垂直剖面上的温度 (K) 分布

Fig. 3(b) Temperature distribution of the vertical cross surface of crystal

2.5 晶体的热应变分析过程和结果

采用与热分析相同的体模型,将热单元类型转变成相应的结构单元类型;再将热分析的温度分布数据作为结构分析的单元负载施加在相应的节点上;最后用 ANSYS 静态结构分析技术求解纯热应力所产生的热变形。在实际分析过程中,把液氮饱和气压值作为均匀负载施加在冷却槽的内表面以等效液体压力对晶体的作用,晶体受光表面无约束。图 4(a)是晶体受光面热应变分布,图 4(b)是晶体受光面中心直线(沿 X 射线入射方向)上热应变分布(形变数据按上表面为零作坐标变换),晶面在垂直光束线方向的弓形形变高为 $0.07\mu\text{m}$,相应的等效弯曲半径为 5.6km ,平均倾斜误差 RMS 值 $2.33\mu\text{rad}$ 。

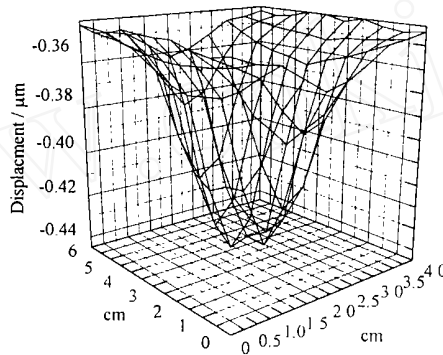


图 4(a) 晶体受光面热应变分布

Fig. 4(a) Distribution of thermal distortion of the surface of crystal

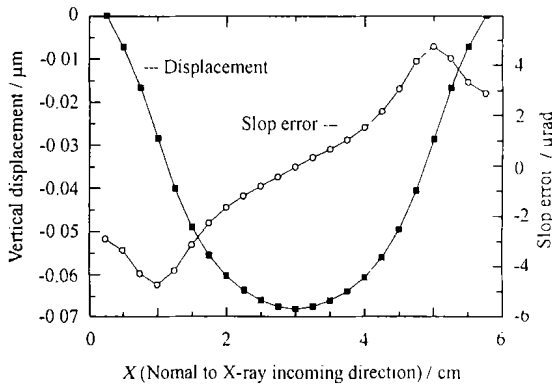


图 4(b) 晶体受光面中心直线上热形变分布

Fig. 4(b) Distribution of thermal distortion of center line of the surface of crystal

2.6 摇摆曲线的 SHADOW 追迹结果及分析

对晶体单色器技术的参数要求而言,晶体摇摆曲线半高宽的展宽幅度不超过晶体本征宽度即可使晶体的能量分辨率与本征能量分辨率的偏差在可以接受的范围之内。按 1.2 所述方法获得晶体表面变形条件下晶体摇摆曲线的半高宽。图 5(a)是 Si(111) 晶体表面在不同变形幅度条件下(10keV 时)的摇摆曲线;图 5(b)是 Si(111) 晶体表面在不同能量和变形幅度条件下的摇摆曲线半高宽。晶体表面变形对晶体摇摆曲线的展宽是晶面变形条件下摇摆曲线半高

宽与完整晶体半高宽之差。从图 5(b)可知,在液氮冷却条件下, Si(111) 晶体热应变造成的晶面变形对摇摆曲线的展宽在小于 40keV 的能量范围内低于其本征半高宽,从晶体单色仪的要求角度而言,冷却是充分的,晶体变形参数满足晶体单色器的要求。

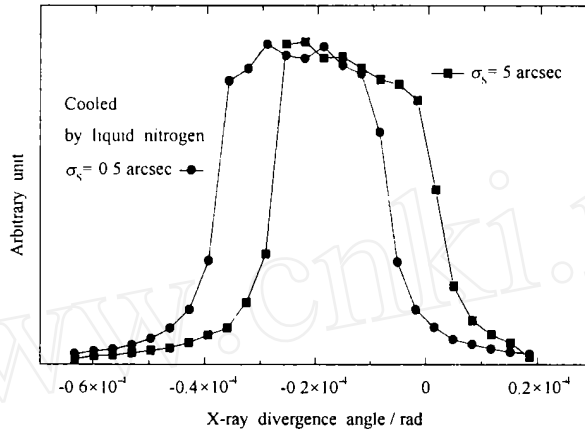


图 5(a) 在不同面形误差条件下(10keV, X 射线)晶体的摇摆曲线

Fig. 5(a) Rocking curves of crystal at different distortion of surface at 10keV X-ray

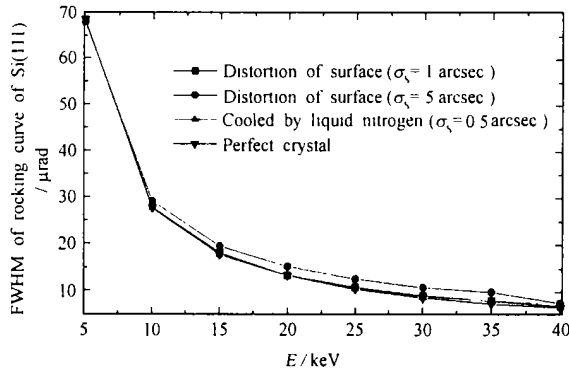


图 5(b) 不同表面条件下晶体摇摆曲线半高宽与 X 射线能量的关系

Fig. 5(b) FWHM of rocking curves of crystal vs energy of X-ray at different surface condition

3 结论

采用本文优化的液氮冷却设计方案,在承受 $4.5\text{W}/\text{mm}^2$ 峰值功率密度和 1.52kW 总功率的热负荷条件下, Si(111) 晶体单色仪受光表面热应变产生的倾斜误差的 RMS 值为 $2.33\mu\text{rad}$; 晶体整体弓形形变等效半径为 5.6km ,热变形的负面效应完全控制在光束线物理设计要求的范围之内。

本文尝试着用光束线物理设计专用的 SHADOW 程序计算在高热负载和液氮冷却环境下晶体的摇摆曲线,将有限元分析得到的面形参数数据代替晶体的平面面形,对入射光进行一对一的追迹计算。结果表明对倾斜误差小于 $2.33\mu\text{rad}$ 的晶体,在 X 射线能量低于 40keV 范围

内,晶面变形引起的晶体摇摆曲线半高宽的展宽幅度低于其本征宽度,表明本文的尝试是成功的。用这一方法可以在光束线的物理设计过程中对单色仪的摇摆曲线进行预言,便于优化设计。

致谢 感谢线站分总体各位同仁的有益讨论和帮助。

参 考 文 献

- 1 Joks S. Nuclear Instrument and Method, 1991, **A306**:386—390
- 2 Sanchez del Rio M, Marcelli A. Nuclear Instrument and Method, 1992, **A319**:170—177
- 3 Mochiznkt T. Rev Sci Instrum, 1995, **66**:2167—2170

Analysis of thermal distortion of crystal of DCM cooled by liquid nitrogen

WANG Naxiu ZHANG Yinji

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract

The FEA result of the first crystal of double crystal monochromator (DCM) at SSRF, which is exposed to Wiggler source and cooled by liquid nitrogen was reported. The slope error of the surface exposed to high thermal load is $2.33\mu\text{rad}$. We also try to calculate the full width at half maximum (FWHM) of the crystal rocking curve by SHADOW software. The result indicates that design of cooling system and method are quite enough to meet with the requirement of DCM. And it is an efficient way of predicting optical parameter of DCM by calculating the FWHM of rocking curve of crystal with thermal distortion by SHADOW.

Key words Synchrotron radiation, Rocking curve, Liquid nitrogen cooling, Finite element analysis, Optics trace

CLC O734, TB131