

单色仪晶体的应力形变和热缓释研究

王纳秀 魏永钦 张莉 张映箕

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 报道了一种同步辐射光束线单色仪晶体的真空安装应力形变、热缓释方法及其实验结果,在总功率为 210W,最大功率密度为 $1.28\text{W}/\text{mm}^2$ 时,晶体形变的等效曲率半径大于 2000m,最大隆起高度小于 $0.1\mu\text{m}$.

关键词 同步辐射 热缓释 单色仪晶体

1 引言

晶体单色仪是同步辐射光束线专用的 X 射线单色化的关键部件,其受光表面接受的功率密度按工况的不同在每平方毫米零点几瓦到十几瓦之间,为了保证晶体在这样大的热负载下不受损伤并能够输出高品质的光,必须对晶体进行充分有效的冷却,即所谓的热缓释.热缓释效果的判定标准是晶体摇摆曲线的展宽幅度是否在可以接受的范围之内.用晶体表面形变表征时要求晶面形变引入的 X 射线入射角偏差小于 2 个弧秒,近似于等效曲率半径大于 1000m^{-1} .冷却效果达不到这一标准时,单色仪输出光的品质将明显变差,表现为能量分辨率变差,输出光的通量减小,甚至不能满足实验要求.国际上对插入件光束线的单色仪晶体用液氮进行低温冷却,对弯铁光束线的单色仪晶体用直接水冷方法冷却.日本光子工厂(PF)和 Spring-8 实验室对水冷的有效范围作了专门的实验研究,结果表明晶体表面功率密度小于 $1\text{W}/\text{mm}^2$ 时水冷效果能满足束线品质要求,大于 $1\text{W}/\text{mm}^2$ 时输出光的通量明显降低.直接水冷的有效范围为 $1\text{W}/\text{mm}^2$ 已成为公认的界限^[2].个别的例外是 ESRF^[1]在水冷晶体上加了十分复杂的自适应机构后,可接受的功率密度达到了 $1.7\text{W}/\text{mm}^2$,Spring-8 用结构复杂制作难度很大的针状圆柱结构的晶体也达到了 $1.7\text{W}/\text{mm}^2$ 的水平.但由于这两种方法的结构局限性,较难推广使用.常用的直接水冷结构有薄晶体微通道水冷法^[3],带月牙槽的厚晶体水冷法^[4],长方形管道内冷法^[5],微通道水冷法^[6]和水喷射冷却加自适应调节法^[2]等.国内现有的同步辐射装置的总功率和功率密度都较低,间接水冷或热管冷却就可以满足冷却要求,没有直接水冷却方法冷却晶体的经验,我们在上海光源预制研究经费的资助下对晶体的直接水冷却展开研究.

2 实验原理

单色仪晶体的真空密封安装过程必然形成应力形变,在真空环境和水冷条件下,大气压力和水压也会使晶体产生应力形变.后两种形变与热形变同向(本文称之为正向形变),不可能用冷却方法消除.本文用大视场干涉仪观察了各种安装条件下的应力形变,提出了控制和利用负向安装形变和冷却水压力自适应调节的方法,即在晶体的安装过程中人为地引入负向形变,使晶面沿其法线方向下凹,与预计的热形变方向相反,用以抵消晶体受大气压力、冷却水和热负载所产生的正向形变,从而在热负载条件下得到形变近乎为零的晶面.

实验时晶体放置在真空室内(真空度好于 1×10^{-3} Pa),与一个起集水箱作用的底座连接,由冷却水循环机供给的冷却水通过晶体内部的沟槽,对其进行直接冷却;用安装在真空室内的电子枪模拟 X 射线对晶体加热;在真空室外沿晶面的法线方向放置一台激光双面干涉仪¹⁾,测量晶面的形变,其原理见图 1. 具体的实验步骤为:1. 用水回路控制系统按物理要求调节水压、流速和水温;2. 按物理要求调节电子枪的电压和电流,使之满足功率和功率密度的要求,用此电子束加热晶体;3. 用干涉仪

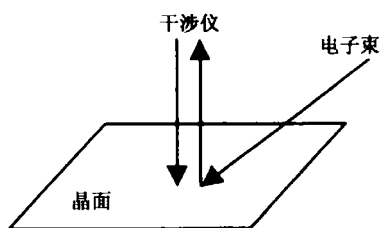


图 1 晶体表面形变测量原理

获取晶面面形的干涉图像,再离线解干涉图像,得到晶面的形变数据;4. 改变冷却和加热条件,测量不同热负载和冷却条件下的形变数据.

3 晶体冷却结构和反向预形变安装

晶体采用高纯度的单晶区融硅,取 Si(111)面为观测面.热负载引起的晶体形变是隆起和弓形两种形变的迭加.弓形形变量与晶面法线方向的温度梯度成正比,而隆起形变量与晶体厚度的平方成正比.为了减少晶体的变形,我们采用内部沿子午方向(即光轴方向)刻蚀半月形的流水沟槽的厚晶体直接水冷却结构^[4].这种结构既减小了晶体中心区域的厚度,使隆起形变减小,又使冷却面与受热面之间的距离减小,减小了温度梯度,还能使晶体有足够的整体厚度,保证一定机械强度.对 200W 以下的总功率和 1 W/mm^2 以下的功率密度,用有限元程序计算确定冷却水通道为槽宽 4mm,鳍宽 2mm,槽深 3mm 的 9 个槽组合的结构.为了得到最佳冷却效果,半月形沟槽的顶部有 6mm 长的平坦区,该段的厚度为 1mm.这种形状更能与高斯分布的光源形状相匹配.晶体的工作面积为 $(60 \times 40) \text{ mm}^2$,工作区四周刻四条 0.8mm 宽 4mm 深的槽,起应力缓冲作用,槽外侧是 10mm 宽 8mm 厚的平坦边缘,与真空安装用的压环相配.

晶体底座为集水箱结构,附有半月形的鳍壮物,一对一地插入晶体下部的半月形沟槽

1) 干涉仪的视场为 $(70 \times 60) \text{ mm}^2$,测量精度 $\sigma < 0.01 \mu\text{m}$

内,以迫使冷却水贴近晶体表面流动,提高冷却效率. 鳍的最高点与晶体内槽间的距离为 3mm. 晶体和底座之间用氟橡胶密封. 晶体、集水箱底座结构及安装示意图见图 2.

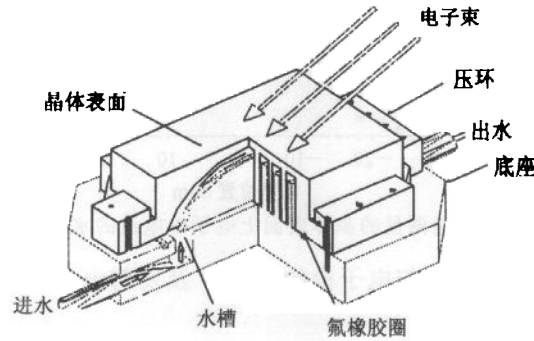


图 2 晶体、集水箱底座结构及安装示意图

紧固螺丝的预紧应力通过压环和软金属环传递到晶面上,并以晶体下表面真空密封胶圈为支点产生向下的力矩,使晶面形成向下凹的变形,其原理示意图见图 3. 为阐述方便,定义密封胶圈宽度的中心与金属丝中心的水平距离为压弯力臂,在同一安装模式下将四边的力臂固定一致. 力臂与预紧应力的乘积决定预形变的大小,实验中由于硅易碎和有真空密封因素而不能通过改变预紧应力来改变预形变的大小,只能通过改变力臂的大小来控制预形变的大小. 预紧应力用螺丝的紧固力矩来表征. 理论上可以用有限元分析软件对力臂的大小作估计,就我们的测量和分析结果而言在 $\pm 15\%$ 范围内达到一致. 软金属环采用直径 0.6mm 的铅保险丝制成的矩形环.

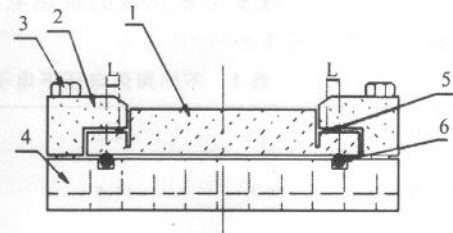


图 3 预形变结构原理图

1 晶体, 2 压环, 3 紧固螺丝, 4 底座, 5 软金属环, 6 真空密封胶圈, 7 L: 紧固力臂.

4 测量结果

4.1 电子枪功率分布

在没有高强度的同步辐射光源的情况下不得不用模拟热源进行实验. 在各种热源中,电子枪是比较合适的一种,电子束的密度分布为高斯型,电子束的中轴与晶面的法线夹角 45° . 电子枪采用钨丝发射、负高压与接地极加速引出的形式. 高压为 -8kV ,最大灯丝电流为 26A ,电子束最大流强为 100mA ,即总功率可达 800W . 接地极后面加圆筒式电聚焦镜,使圆形截面的电子束半高宽在 $10\text{--}16\text{mm}$ 范围内可调. 图 4 是实验测量的电子枪在晶体表面位置上电流的水平分布,半宽度为 15.8mm ,电子枪引出高压为 -8kV . 对高斯分布进行积分,得到总引出电流,与电子枪电源显示的发射电流相除,得到总功率引出效率 η ; 水平方向每毫米的峰值电流与总引出电流之比为 A_h ; 垂直方向每毫米的峰值电流与总

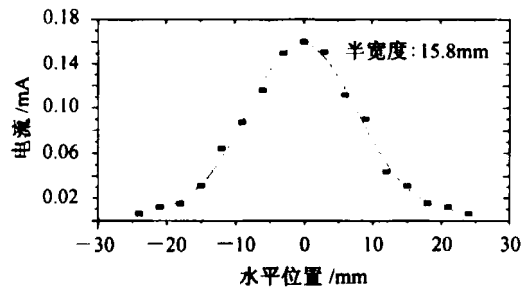


图 4 实验测量的晶体表面上电子枪电流的水平分布

引出电流之比 $A_v = A_b / \sin 45^\circ$; 则与电子枪的电压 V 及发射电流 I 相对应的总功率 P 和峰值功率密度 P_d 分别为

$$P = \eta \cdot V \cdot I,$$

$$P_d = V \cdot I \cdot A_v \cdot A_b \cdot \eta = C \cdot V \cdot I.$$

聚焦电压/V	0	-4080	-4450	-4640	-4830	-5010
半宽度/mm	15.8	14.5	12.8	11.7	10.8	10.9
功率密度系数 C	0.0024	0.0031	0.0044	0.0059	0.0065	0.0056

4.2 初装负预应变及其与水流量的关系

经过预备实验发现紧固力矩达到 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 以上时水通道的真空密封可以达到要求. 在实验中选紧固力矩为固定值 ($0.9\text{N}\cdot\text{m}$), 通过调整力臂的大小来调整负向形变的大小. 我们选择了力臂为 1mm 和 3mm 的两种情况进行实验, 测量了初装预形变, 真空状态和通冷却水之后的晶面形变, 其最大形变量列于表 2. 由表 2 可知, 力臂增大时负向的初装预形变增大, 抽真空后由于大气压力的正向作用, 形变减小, 通水后形变进一步减小. 图 5 给出了在 1mm 力臂和 $0.8\text{N}\cdot\text{m}$ 紧固力矩条件下形变量 (作图时已取正值) 与水流量的关系, 呈现非线性的关系.

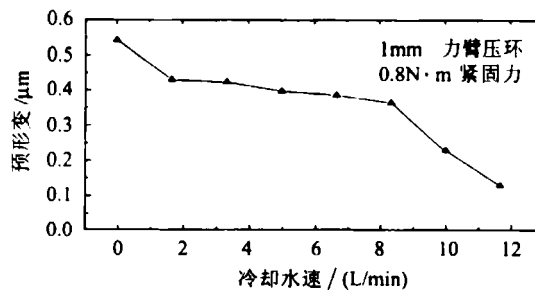


图 5 晶体形变量与冷却水流量的关系曲线

表 2 负向预形变面形的最大形变量(紧固力矩 0.9N·m)

力臂/mm	初装形变/ μm	抽真空后的形变/ μm	通水(10L/min)后的形变/ μm
1	-0.81	-0.60	-0.31
3	-1.2	-0.90	-0.68

4.3 冷却效果的实验测量

在晶体的压弯力臂为 3mm,紧固力矩为 0.8N·m 的安装条件下,测量不同热负载(总功率和功率密度)和冷却条件下的晶面形变. 图 6 是固定电子枪输出总功率 210W,水流

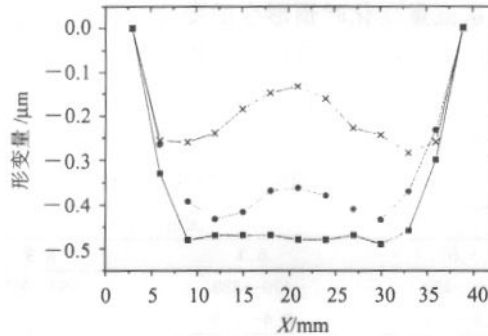


图 6 晶面中心线面形曲线随峰值功率密度的变化
3mm 压弯力臂,0.8N·m 紧固力矩,210W,10L/mm²;
功率密度:■ 0.65W/mm², ● 1.28W/mm², × 1.36W/mm².

量为 10L/min,调节电子束半高宽(功率密度)来改变热负载的测量结果. 功率密度为 0.65W/mm²时在约 27mm 的区间内的形变量为 -0.5 μm ,1.28W/mm² 时出现 0.08 μm 的隆起,1.36W/mm² 时隆起量增大到 0.22 μm . 图 7 是电子束半高宽固定为 15.8mm,调节电子枪输出总功率来改变热负载,晶面中心线变形曲线的等效曲率半径与接受功率的关系曲线. 为了作图方便,纵坐标用曲率半径的倒数(1/R)表示. 1/R = ± 0.001 的两条直线相应于曲率半径等于 $\pm 1000\text{m}$ 的界限,在两直线范围内的点代表有效冷却.

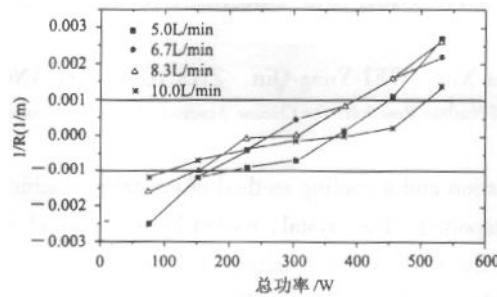


图 7 不同热负载下晶面曲率半径的变化曲线
 ± 0.001 的水平线表示曲率半径为 $\pm 1000\text{m}$ 的界限.

5 结果和讨论

本文提出的负向安装预形变的方法可以有效地抵消大气压力和水压力引起的应力形变,部分地抵消热形变,拓宽晶体可接收的功率和功率密度范围,在水槽宽度为 4mm 的条件下达到了与 1mm 情况下的冷却效果,从而降低晶体的加工难度.适当地调节水流量可以得到更好的冷却效果.从图 6 可知在总功率和功率密度分别为 210W 和 $1.28\text{W}/\text{mm}^2$ 的热负载下,晶体的形变量小于 $0.1\mu\text{m}$,等效曲线半径大于 2000m,完全能满足上海光源弯铁光束线晶体单色仪的需要;从图 7 可知在文中所述的安装条件下,不同的冷却流量所优化的冷却功率范围不同;水流量变化时预形变的变化与热形变的方向相反,有互相抵消的趋势,所以水流量的变化还有微小的自适应调节作用,表 3 为不同冷却流量相应的热负载范围.从图 7 还可看出本文所述方法的一个缺点,低于 100W 的总功率都得不到好的冷却,其原因是反向预形变太大所致,即该方法只用于热负载变化范围确定的情况.

表 3 不同冷却流量相应的热负载范围

	流量/(L/min)			
	5.0	6.7	8.3	10.0
总功率/W	200—450	170—380	150—380	110—500
功率密度/(W/mm^2)	0.5—1.1	0.4—0.9	0.4—0.9	0.3—1.2

感谢同步辐射室各位同仁提供的帮助和有益讨论.

参考文献 (References)

- 1 Michael Hart. Nucl. Instrum. and Methods 1990, **A297**:306—311
- 2 Tetsuro Mochizuki, Xiaowei Zhang, Hiroshi Sugiyama et al. Rev. Sci. Instrum. 1995, **66**:2167—2170
- 3 Hitoshi Yamaoka, Daniel Hausermann, Andreas K. Freund. Nucl. Instrum. and Methods 1994, **A351**:559—564
- 4 Oversluizen T, Matsushita T, Ishikawa T. Rev. Sci. Instrum. 1989, **60**:1493—1500
- 5 Bilderback D H. Rev. Sci. Instrum. 1989, **60**:1977—1978
- 6 Arthur J, Tompkins W H, Troxel C et al. Rev. Sci. Instrum. 1992, **63**:433—436

Research of Distortion and Cooling Method of DCM Crystal

WANG Na-Xiu WEI Yong-Qin ZHANG Li ZHANG Ying-Ji

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

Abstract The stress distortion and a cooling method of crystal of double crystal monochromator and its experimental result are reported. The crystal, cooled by this method and exposed to the heat load of total power of 210W and the peak power density of $1.28\text{W}/\text{mm}^2$, can be used for bending magnet beam line of Shanghai Synchrotron Radiation Facility.

Key words synchrotron radiation, cooling, crystal

Received 8 January 2002, Revised 25 March 2002