

# 基于有限元的同步辐射单色器一晶安装力学分析

金利民 徐中民 秦宏亮 宋 丽

(中国科学院上海应用物理研究所 张江园区 上海 201204)

**摘要** 双晶单色器是同步辐射光源光束线上的关键设备之一,其通过内部的第一晶体与第二晶体获得实验所需的单一波长的谱线,故晶体的装配安装直接影响实验站同步辐射光的品质。通过实验测试结合有限元分析的方法,建立单色器第一晶体在一定的螺栓紧固力下的有限元分析模型,验证模型的有效性,进而分析晶体的面形精度、安装机构的应力分布、“O”圈的形变等指标,研究安装过程中一晶及其安装机构的受力情况与力学响应,为高面形精度晶体的安装提供指导与借鉴。

**关键词** 同步辐射,单色器,第一晶体,有限元分析

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.030101

## Installation mechanical analysis of the first crystal of synchrotron radiation monochromator based on finite element analysis

JIN Limin XU Zhongmin QIN Hongliang SONG Li

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Zhangjiang Campus, Shanghai 201204, China)

**Abstract Background:** The double crystal monochromator is one of the key equipments on the beamline of synchrotron radiation light source. It obtains the required single wavelength light using the first crystal and the second crystal, thus the assembly and installation of the crystals directly affect the quality of synchrotron radiation. **Purpose:** The aim is to introduce the proposed method of finite element analysis (FEA), as well as providing useful guidance and reference for the high-precision installation of crystal with high surface quality. **Methods:** The simplified finite element model of the first crystal assembly subjected to a certain bolt fastening force is established. By validating the effectiveness of the model, as well as analyzing the slope error of crystal, the stress distribution of the installation parts and the deformation of the “O” ring, to study the mechanical response and mechanism of crystal and its mounting assembly during installation process. **Results:** It is found that the experimental result shows good agreement with FEA result, which proves the accuracy of the presented finite element model. For the phenomenon of stress concentration of various parts and deformation of “O” ring, all of which locate in the allowable range. **Conclusion:** The installation indicators of first crystal assembly meet the engineering requirements. And the proposed effective FEA technique is expected to be used for the mechanical properties analysis of synchrotron radiation facilities.

**Key words** Synchrotron radiation, Monochromator, The first crystal, FEA

国家自然科学基金(No.11105215、No.11175243)资助

第一作者:金利民,男,1984年出生,2012年于东华大学获博士学位,研究领域为同步辐射光学与技术

通信作者:宋丽, E-mail: songli@sinap.ac.cn

收稿日期:2016-11-14, 修回日期:2016-12-26

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11105215, No.11175243)

First author: JIN Limin, male, born in 1984, graduated from Donghua University with doctoral degree in 2012, focusing on synchrotron radiation optics & technology

Corresponding author: SONG Li, E-mail: songli@sinap.ac.cn

Received date: 2016-11-14, accepted date: 2016-12-26

030101-1

近年来, 具有高准直性、高亮度、低发散度等一系列优点的第三代同步辐射光源(如上海同步辐射光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF))已在物理、化学、生物、环保、考古等各个领域得到较为广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。作为同步辐射光源光束线上的关键设备之一, 双晶单色器的地位举足轻重, 其主要是利用安装于内的分光晶体对入射 X 射线的衍射作用, 将所需要的单一波长的谱线分离出来以用于特定的分析实验。如目前得到广泛应用的双晶单色器具有两块晶体, 即第一晶体与第二晶体。其中, 第一晶体主要是被用来确定出射光的波长, 即分离出实验站所需的单一波长的谱线; 第二晶体则主要是用以确定出射光的方向, 进而得到较高强度的单色光。值得一提的是: 为了保证由单色器分离出的单色光具有较高的品质, 进而能够满足后续的实验需求, 首先需确保晶体工作表面的光学质量, 即面形精度<sup>[4-5]</sup>。

在实际的工程应用中, 由同步辐射光带来的热负载、冷却介质(液氮或去离子冷却水)的流动所导致的压力以及真空负压等因素皆对晶体的面形精度产生一定的影响<sup>[6-8]</sup>。此外, 单色器中的晶体一般被安装于特制的夹持机构中。一般, 通过必要的机械结构设计, 该夹持机构可兼具平动与旋转的功能,

且可以附带用于降低受热晶体热载负效应的冷却装置, 从而保证晶体在各种工况中的正常工作状态。在安装晶体的过程中, 晶体不可避免地会受到来自于螺栓紧固力与安装机构的约束作用, 也会在一定程度上影响其面形精度, 进而影响光束线的品质与性能<sup>[4]</sup>。在此情况下, 实际操作时需综合考虑各项条件, 确保晶体的面形精度满足实际使用要求。

本文将对用于同步辐射光源的典型单色器一晶的安装力学性能进行有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)并经过实验验证。通过分析晶体在一定的螺栓紧固力下的面形精度、安装机构的应力分布、“O”圈的形变等指标, 研究安装过程中一晶及其安装机构的受力情况与力学响应, 为高面形精度晶体的安装提供指导与借鉴。

## 1 实验

### 1.1 一晶装配体

如图 1 所示, 单色器的一晶装配体的简易结构由螺栓、垫圈、晶体、“O”圈以及冷却底座所构成。其中, 螺栓、垫圈以及冷却底座的材料为钢, 晶体材料为单晶硅<111>, “O”圈的材料为氟橡胶。各种材料的性能参数列于表 1。

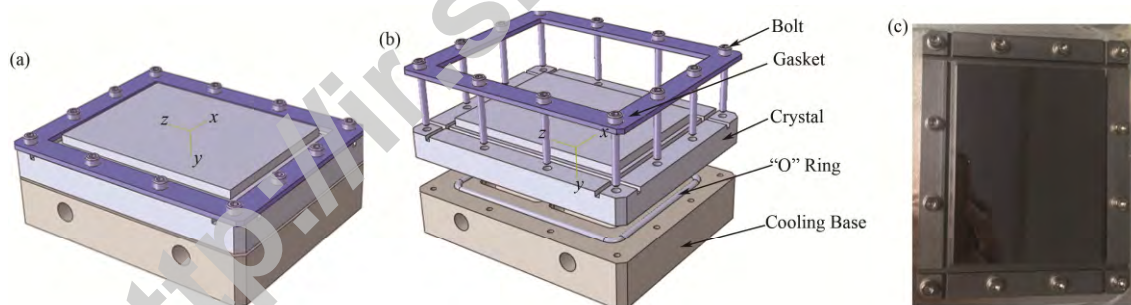


图 1 一晶装配体安装结构图 (a) 装配图, (b) 分解图, (c) 实物图  
Fig.1 Installation structure of first crystal assembly. (a) Assembly, (b) Exploded view, (c) Real view

表 1 材料相关属性参数  
Table 1 Mechanical parameters of materials.

材料 Material	密度 Density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 Elastic modulus / GPa	泊松比 Poisson's ratio	屈服应力 Yield stress / MPa	热导率 Thermal conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	热胀系数 Thermal expansion coefficient / $^{\circ}\text{C}^{-1}$
硅 Silicon	2 329	112.40	0.28	120.00	148.00	$2.50\times 10^{-6}$
钢 Steel	7 870	200.00	0.30	250.00	60.50	$1.20\times 10^{-5}$
氟橡胶 Fluorine rubber	1 850	$7.84\times 10^{-3}$	0.47	8.60	0.20	$1.45\times 10^{-4}$

## 1.2 实验条件与参数

实际工况中，通过紧固螺栓将一晶固定在垫片与冷却基座之间，进而形成一个稳定的装配整体。实验中，为达到预定的紧固作用且不导致各单元发生过大的应力与形变，且参考机械真空密封手册，由紧固螺栓带入的竖直向下的机械载荷被设定为 4 584 N。由于机械载荷被均分到 12 个螺栓上，则平均每个螺栓提供力约为 382 N。

实验中，使用力矩扳手较为精确地将每个紧固螺栓带入的力设置为 382 N，之后使用 ZYGO 激光干涉仪测量一晶工作面的面形。图 2 是使用 ZYGO 激光干涉仪测量晶体面形的示意图。

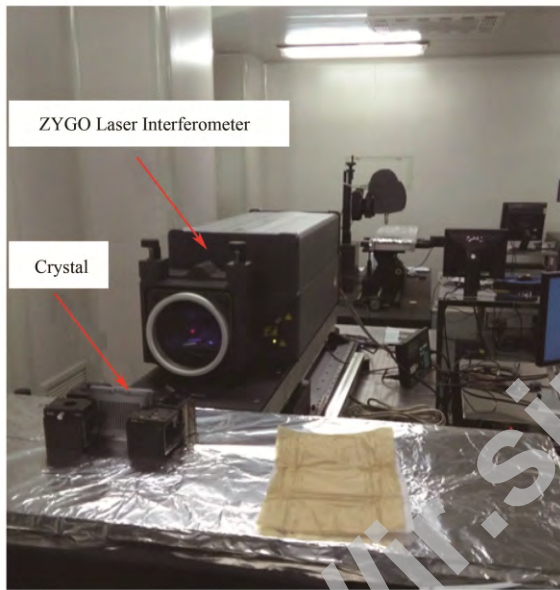


图 2 使用 ZYGO 激光干涉仪测量晶体面形的示意图  
Fig.2 Diagrammatic sketch for measuring optical surface quality of crystal using ZYGO laser interferometer.

## 2 有限元模型

为了进一步说明一晶装配体在特定机械载荷下的力学响应与面形精度，为实际工况提供可信且有效的第一手资料。通过 ANSYS WORKBENCH 有限元分析软件（版本 14.5），Windows XP 64 位版本操作系统，且考虑到模型与机械载荷的对称性，并节约计算资源与时间，如图 3(a)所示，建立经过合理简化的一晶装配体承载系统的 1/4 有限元模型。有限元模型的各分析模块的设置情况如下。

### 2.1 接触条件的设置

模型中，由于 12 个螺栓的紧固作用，装配体中各部件的接触面之间几乎无相对的滑移与运动，故在有限元模型中将各部件间的接触条件设定为“粘结(Bonded)”接触。

### 2.2 载荷与边界条件的设置

模型中，在每个螺栓孔处施加了竖直向下（即 +Z 方向）382 N 的力。一晶装配体的底面被完全固定。两个解剖面被分别施加了对称性约束。图 3(b)示出模型的边界条件设置。

### 2.3 网格化

对于模型的网格设置，根据图 3(a)的模型尺寸参数，确定网格格距，合理划分网格。模型中，需要加以重点关注的是位于晶体同步辐射受光面的中心部位，即大小为 57.6 mm×5.1 mm 的工作区域（对于 1/4 模型，则为 28.8 mm×2.55 mm）。因此，在短边与重点关注区域等处划分较多较细的网格，从而在保证网格合理精细度的基础上，又有利于计算的精确度。图 3(c)示出模型的网格化效果。

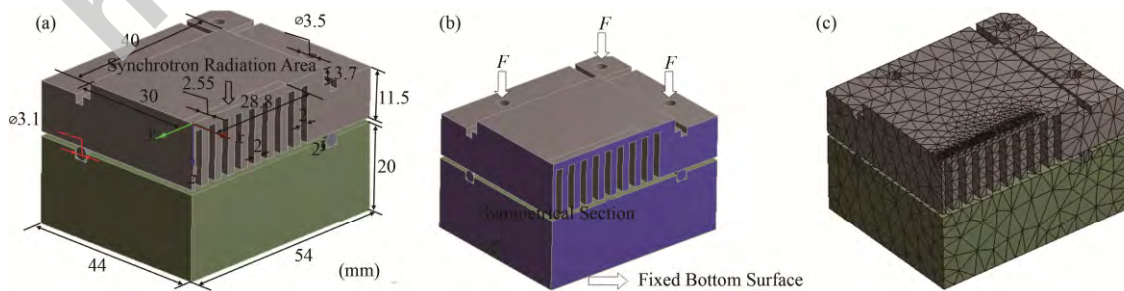


图 3 一晶装配体 1/4 有限元模型 (a) 模型, (b) 载荷和边界条件, (c) 网格化  
Fig.3 The 1/4 finite element model of first crystal assembly. (a) Model, (b) Load and boundary condition, (c) Mesh scheme

### 3 结果与讨论

#### 3.1 面形精度

面形精度是衡量同步辐射单色器晶体质量的重要指标。该指标的优劣直接影响光束线下游的实验站所用同步辐射光品质的好坏。如图 4 所示, 通过 ZYGO 激光干涉仪测量一晶工作区域的面形, 得到一晶的工作区域在子午方向面形精度的实测均方根 (Root mean square, RMS) 值, 约为  $7.97 \mu\text{rad}$ 。而根据有限元分析结果绘出一晶工作区域在子午方向的面形误差曲线, 如图 5 所示, 经过计算得到一晶工作区域子午方向的面形误差 RMS 值约为  $7.61 \mu\text{rad}$ , 与实际测量值基本一致, 证明了本文所建有限元模型的准确性。

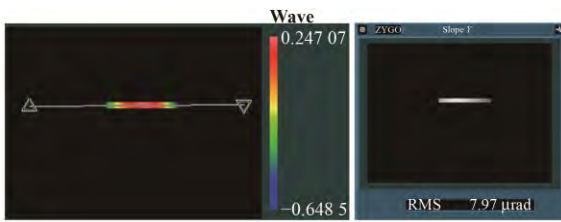


图 4 一晶工作区域的面形精度实测图

Fig.4 Measuring diagram of slope error for the working area of first crystal.

#### 3.2 应力分布

在一晶安装上线的过程中, 其各部件的应力分布与最大应力皆为重要指标, 直接关系到一晶装配体的正常工作以及整条光束线的正常运行。如图 6 所示, 给出一晶装配体以及各部件应力分布情况的有限元计算结果。从图 6 中可以看出, 对于一晶安

装机构的整体模型而言, 其最大应力出现在底部钢质支座的边角 (图 6(a)中箭头指示处), 此处即为支座结构的应力集中区域, 对应的最大应力约为  $104.2 \text{ MPa}$ , 远小于钢性支座的许用屈服应力  $250 \text{ MPa}$ , 为安全。对于一晶本身而言, 其最大应力位于底部冷却水道的边角 (图 6(b)中箭头指示处), 此处即为一晶的应力集中区域, 最大应力约为  $14.3 \text{ MPa}$ , 也小于其的许用屈服应力  $120 \text{ MPa}$ , 为安全。对于“O”圈, 其最大应力位于内环侧面某处 (图 6(c)中箭头指示处), 最大应力约为  $4.8 \text{ MPa}$ , 小于其的许用屈服应力  $8.6 \text{ MPa}$ , 也为安全。故对于一晶装配体, 其在安装上线的过程中, 结构应力设计满足实际需求。当然, 对于以上机构, 若处于应力过大的情况下, 可通过适当的局部增强或结构优化来降低应力, 从而使应力处于允许值范围内。

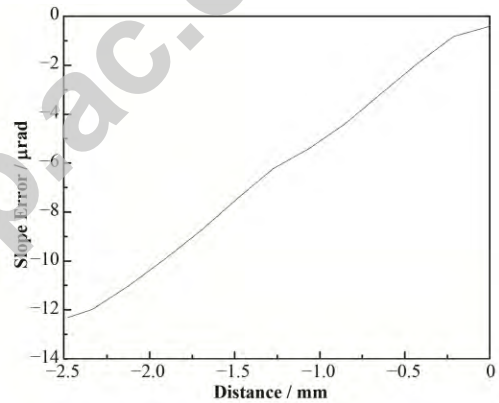


图 5 一晶工作区域子午方向的面形误差的 FEA 结果

Fig.5 FEA result on slope error along meridional direction for the working area of first crystal.

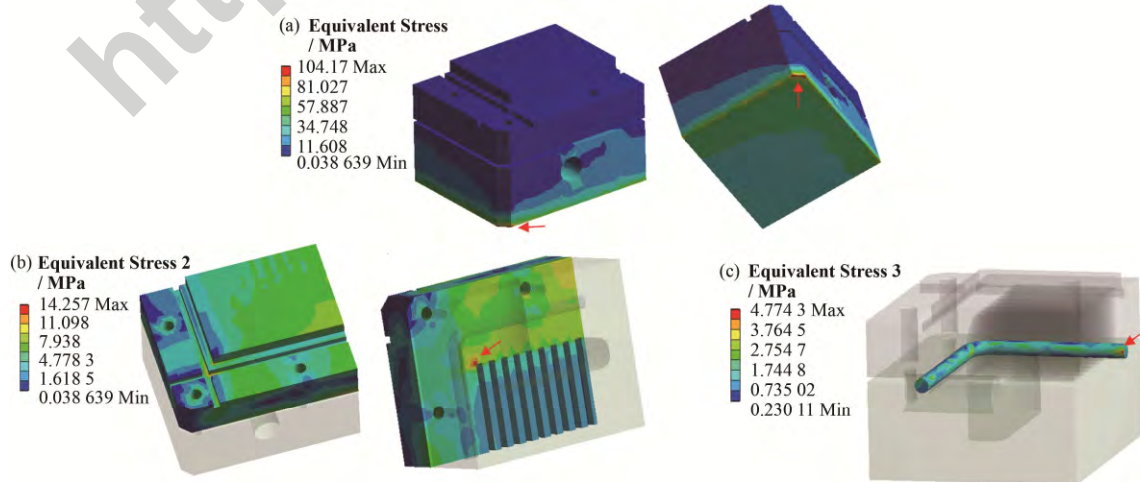


图 6 一晶安装机构的应力分布 (a) 一晶装配体, (b) 一晶, (c) “O”圈

Fig.6 Stress distribution in the assembly structure of first crystal. (a) Assembly, (b) First crystal, (c) “O” ring

### 3.3 “O”圈的形变分析

对于单色器一晶的安装系统，“O”圈具有十分重要的作用，其不仅在一晶与冷却底座之间提供软性的紧密接触，同时为内部含有流动性冷却水的系统结构提供有效的密封作用，以防止冷却水的外泄。在一定的装配外力的作用下，“O”圈被“压扁”至一定程度，即使得“O”圈与一晶之间，以及“O”圈与底座之间的接触状态，由近似的不太稳定的线接触转变为相对稳定的面接触。如图 7(a)所示，给出施载后“O”圈在竖直方向（即 Z 向）的变形云图。从图 7(a)可以发现，“O”圈与一晶相接触部位的位移最大，此处也正是前文所述的由线接触转变为面接触的主要区域。

为了进一步说明“O”圈的变形情况，图 7(b) 示出其截面的上、下半圆分别沿着竖直方向（即 Z

向）的变形曲线图。从图 7(b)可以看出，对于上半圆，其变形的情况呈现出明显的“中大边小两端为 0”的状态，即中间部位由于直接承受来自一晶的压力，变形量较大，约为 2.2 mm，处于正常变形量范围内。而由中间位置向两侧方向上，由于机构内“O”圈槽的约束效应，则显示出明显的较大幅度的变形量下降趋势，直至为 0。对于下半圆，其变形的情况呈现出明显的“中两侧大两端为 0”的状态，即中间部位由于直接承受来自冷却底座的约束力，变形量为 0。而由中间位置向两侧则显示出明显的大变形趋势，最大变形量约为 0.65 mm，同样地，由于“O”圈槽的约束效应，由两侧至两端出现变形量的“陡降”，直至为 0。综上所述，“O”圈的变形情况符合正常工作状态，可为冷却水通道提供有效的密封作用，满足使用需求。

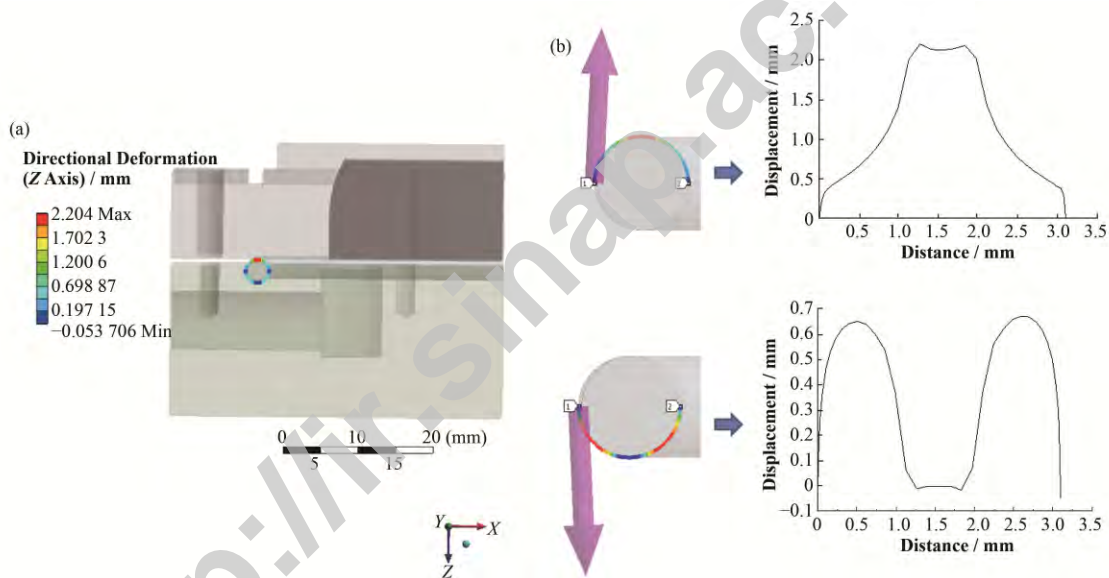


图 7 “O”圈的变形分布云图(a)和曲线(b)

Fig.7 Deformation distribution contour (a) and curve (b) of “O” ring.

## 4 结语

1) 面形精度是衡量同步辐射单色器晶体质量的重要指标，该指标的优劣直接影响实验站同步辐射光品质的好坏。通过 ZYGO 激光干涉仪测量一晶工作区域的面形，得到一晶的工作区域在子午方向的面形精度的实测值，与有限元分析结果值相一致，证明了本文所建有限元模型的准确性，可以用于单色器一晶装配体的受力分析。

2) 对于一晶安装机构的整体模型而言，其最大应力出现在底部钢质支座的边角。对于一晶本身而言，其最大应力位于底部冷却水道的边角。对于“O”圈，其最大应力位于内环侧面某处。以上区域即为

各部件发生应力集中现象的关键部位，各部件的应力处于正常工作范围。在应力过大的情况下，可通过适当的局部增强或结构优化来降低应力，从而使应力处于允许值范围内。

3) 对于“O”圈的上半圆，其变形情况呈现出明显的“中大边小两端为 0”的状态，即中间部位由于直接承受来自一晶的压力，变形量较大。而由中间位置向两侧方向上，由于机构内“O”圈槽的约束效应，显示出较大幅度的变形量下降趋势，直至为 0。对于下半圆而言，其变形情况呈现出明显的“中两侧大两端为 0”的状态，即中间部位由于直接承受来自冷却底座的约束力，变形量为 0。而由中间位置向两侧则显示出明显的大变形的大变

形趋势,由两侧至两端出现变形量的“陡降”,直至为0。此为“O”圈的正常工作状态,可为系统结构提供有效的密封作用,满足使用需求。

#### 参考文献

- 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.  
XU Hongjie. A new generation synchrotron radiation light source and its application[J]. Trends in Nuclear Physics, 1996, **13**(4): 25-27.
- 麦振洪. 同步辐射光源及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
MAI Zhenhong. Synchrotron radiation light source and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- 徐朝银. 同步辐射光学与工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013: 43-53.  
XU Chaoyin. Optics and engineering of synchrotron radiation[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2013: 43-53.
- 周泗忠, 屈卫德, 邓小国, 等. 单色器水冷晶体面形误差的研究[J]. 核技术, 2008, **31**(8): 565-570.  
ZHOU Sizhong, QU Weide, DENG Xiaoguo, *et al.* Slope errors of water cooling crystal surface for a double-crystal monochromator[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(8): 565-570.
- 温利, 周仁魁, 夏绍建, 等. 双晶单色器弧矢聚焦晶体面形有限元分析[J]. 光学技术, 2003, **29**(3): 313-315. DOI: 10.3321/j.issn:1002-1582.2003.03.020.  
WEN Li, ZHOU Renkui, XIA Shaojian, *et al.* Finite element analysis of diffracting surface of sagittally focusing crystal in double-crystal monochromator[J]. Optical Technique, 2003, **29**(3): 313-315. DOI: 10.3321/j.issn:1002-1582.2003.03.020.
- 柳晖, 高雪官, 姚婧. 同步辐射单色器晶体冷却结构的研究[J]. 核技术, 2008, **31**(9): 667-670.  
LIU Hui, GAO Xueguan, YAO Jing. A novel monochromator cooling crystal for synchrotron radiations[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(9): 667-670.
- 王纳秀, 张映箕. 液氮冷却单色仪晶体的热应变分析[J]. 核技术, 2002, **25**(6): 401-407.  
WANG Naxiu, ZHANG Yinji. Analysis of thermal distortion of crystal of DCM cooled by liquid nitrogen[J]. Nuclear Techniques, 2002, **25**(6): 401-407.
- 高立丹, 李彬, 盛伟繁. 液氮冷却硅晶体单色器的流固耦合传热研究[J]. 低温与超导, 2014, **42**(2): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7100.2014.02.006.  
GAO Lidan, LI Bin, SHENG Weifan. Fluid-solid coupling heat transfer analysis of cryogenically cooled silicon crystals[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, **42**(2): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7100.2014.02.006.