

英国散裂中子源工程材料原位加载衍射实验高温样品环境优化设计

詹霞 Joe Kelleher 高建波 马艳玲 初铭强 张书彦 张鹏 Sanjooram Paddea 贡志锋 侯晓东

High temperature sample environment upgrade of ISIS engineering materials *in-situ* diffraction experiment

Zhan Xia Joe Kelleher Gao Jian-Bo Ma Yan-Ling Chu Ming-Qiang Zhang Shu-Yan Zhang Peng Sanjooram Paddea Gong Zhi-Feng Hou Xiao-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 132901 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182295

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182295>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国散裂中子源在大气中子单粒子效应研究中的应用评估

Application and evaluation of Chinese spallation neutron source in single-event effects testing

物理学报. 2019, 68(5): 052901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181843>

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报. 2018, 67(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

中国散裂中子源反角白光中子束流参数的初步测量

Experimental result of back-streaming white neutron beam characterization at Chinese spallation neutron source

物理学报. 2019, 68(8): 080101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182191>

湿度环境下钙钛矿太阳能电池薄膜微结构演化的同步辐射原位实时研究

An *in-situ* real time study of the perovskite film micro-structural evolution in a humid environment by using synchrotron based characterization technique

物理学报. 2017, 66(1): 018401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.018401>

基于原位X射线衍射技术的动态晶格响应测量方法研究

Experimental investigation on dynamic lattice response by *in-situ* Xray diffraction method

物理学报. 2017, 66(13): 136101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.136101>

极端条件下物质磁性的原位测量

In-situ magnetic measurements of substances under extreme conditions

物理学报. 2017, 66(3): 037403 <https://doi.org/10.7498/aps.66.037403>

英国散裂中子源工程材料原位加载衍射实验 高温样品环境优化设计*

詹霞^{1)3)†} Joe Kelleher²⁾ 高建波¹⁾³⁾ 马艳玲¹⁾³⁾ 初铭强⁴⁾ 张书彦¹⁾³⁾
张鹏¹⁾ Sanjooram Paddea⁵⁾ 贡志锋¹⁾³⁾ 侯晓东⁶⁾

1) (东莞材料基因高等理工研究院, 东莞 523808)

2) (英国散裂中子源, 哈维尔 OX11 0QX)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

4) (中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

5) (英国公开大学材料工程学院, 米尔顿凯恩斯 MK7 6AA)

6) (英国考文垂大学未来运输与城市研究所, 考文垂 CV1 5FB)

(2018年12月29日收到; 2019年5月7日收到修改稿)

英国散裂中子源 (ISIS) 在工程材料中子衍射领域有着十余年丰富的研究经验, 最为典型的衍射谱仪之一的 Engin-X 在材料、加工等方向有着广泛应用, 包括残余应力分布测量、金属相变分析、微观力学研究等. Engin-X 通过设置红外加热型高温炉配套材料试验机的样品环境以实现中子衍射原位高温力学实验, 目前原位实验中高温炉最高设计温度可达 1100 °C. 通过优化高温炉反射罩形状、布局、反射涂层, 以及合理设置反射挡板等措施 (例如采用一种椭圆-圆组合形状的反射罩), 可实现更优的光线聚焦效果. 模拟计算得知样品的能量吸收可提高 109% 以上, 最终高温可达 1400 °C. 相关研究有望拓展 Engin-X 中子衍射技术在材料研究领域的应用, 同时也为中国散裂中子源 (CSNS) 工程材料衍射谱仪样品环境设计提供借鉴经验.

关键词: 散裂中子源, 原位实验, 样品环境, 高温炉

PACS: 61.05.fm, 07.20.Hy, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.68.20182295

1 引言

工程材料衍射谱仪广泛应用在材料及加工领域, 用于研究材料内部微观结构, 如残余应力、相变、微观力学等, 涉及的行业包括航空航天、轨道交通、核能开发等. 为了更准确地研究材料性能, 高温原位实验样品环境受到越来越多的关注, 资料显示在中子衍射和同步辐射装置的工程应用中原位实验采用红外加热型高温炉较为普遍^[1,2]. 考虑

样品通常较小高温炉反射罩优先选用椭圆形^[3], 自 1979 年 Eyer 等^[4] 提出双椭圆反射罩高温炉开始, 改进型双椭圆高温炉^[5]、四椭圆高温炉^[6] 及六椭圆高温炉^[7] 陆续投入应用. 英国散裂中子源工程材料衍射谱仪 Engin-X 采用红外加热型四椭圆反射罩高温炉, 最高设计温度可达 1100 °C, 至今已使用十余年^[8-10]. 与 Engin-X 相似的中子谱仪还包括洛斯阿拉莫斯国家实验室的 SMART^[11,12] 以及日本散裂中子源的 TAKUMI^[13,14], 前者高温炉为电阻丝加热型, 后者为红外加热型. 两台中子谱仪均

* 广东省引进创新创业团队项目 (批准号: 2016ZT06G025) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xia.zhan@ceamat.com

有着良好的实验应用经验, SMART 电阻丝高温炉结构复杂价格昂贵, 加载条件下样品最高加热温度可达 1500 °C, 但在中低温实验中高温炉调试过程复杂且耗时较长; TAKUMI 使用卤素灯管加热, 最高温度可达 1000 °C. 随着用户对中子衍射原位实验提出更高要求, Engin-X 现有条件已不能满足部分合金材料的高温实验需求, 本文将详细介绍 Engin-X 红外加热型高温炉的现状和优化设计.

2 高温炉现状

Engin-X 红外加热型高温炉中样品位于高温炉中心处, 上下两侧各有 2 个加热单元, 每个加热单元含半椭圆形铝制外罩及卤素灯管, 铝罩内层抛光处理增强反射效果. 图 1(a) 为 Engin-X 高温炉加热单元实物图^[8], 图 1(b) 为 Engin-X 高温炉加热单元简化图.

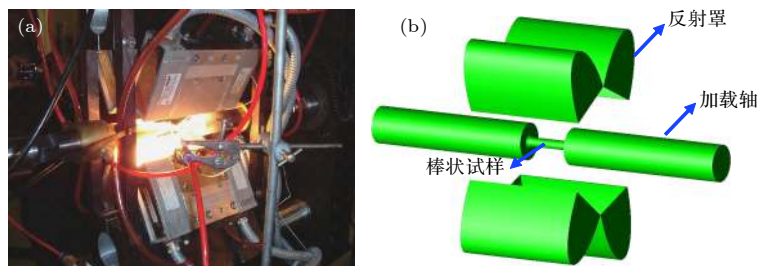


图 1 (a) Engin-X 高温炉加热单元实物图; (b) Engin-X 高温炉加热单元简化图

Fig. 1. (a) Engin-X furnace heating unit current layout; (b) Engin-X furnace heating unit simplified schematic drawing.

图 2 为 Engin-X 高温原位实验设备布置示意图, 共设有两组中子探测器, 以中子入射方向为参考方向 (垂直纸面向内), 探测器分别位于 $\pm 90^\circ$ 位置, 探测器在垂直方向覆盖范围为 $\pm 21^\circ$ ^[15], 故要求高温炉半椭圆反射罩需为衍射中子预留至少

42°的衍射覆盖角, Engin-X 实际留有约 60°的衍射覆盖角, 整套加热装置由 PRECISION CONTROL SYSTEMS 公司研制^[16]. 为进一步提升加热温度, 本文从反射罩结构、布局、反射涂层以及衍射覆盖角等方面着手优化设计.

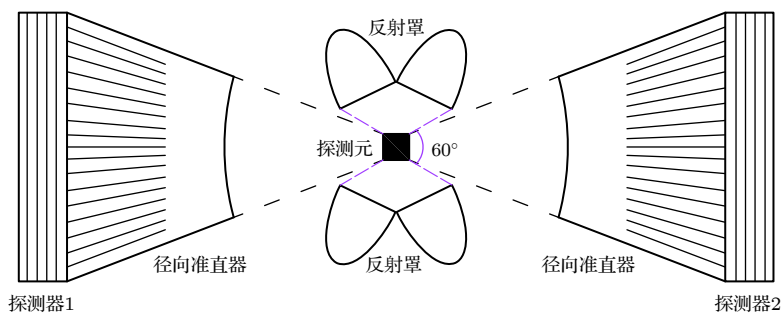


图 2 Engin-X 高温原位实验设备布置示意图

Fig. 2. Engin-X setup for *in-situ* high temperature experiments.

3 高温炉结构优化和模拟

3.1 反射罩结构设计

采用两种结构设计, 椭圆-圆组合反射罩和椭圆-圆-椭圆组合反射罩, 相似的几何设计理念在专利“一种基于双反射罩的均匀照明系统”中也有体现^[17]. 椭圆-圆组合反射罩及其几何特征如图 3(a)

所示, 灯管位于椭圆第一焦点处, 样品位于椭圆第二焦点处, 并以灯管中心为圆心、灯管至椭圆弧边缘点距离为半径作两段对称圆弧, 同时满足椭圆弧边缘点、圆弧边缘点和样品中心点三点共线以实现较优光线出射量. 要确定椭圆-圆组合反射罩的最优形状, 需要设定四个变量, 包括椭圆第一焦距 L_1 、第二焦距 L_2 、椭圆弧深度 D 以及切线夹角 θ , 对反射罩几何形状进行设定. Engin-X 现有高温炉

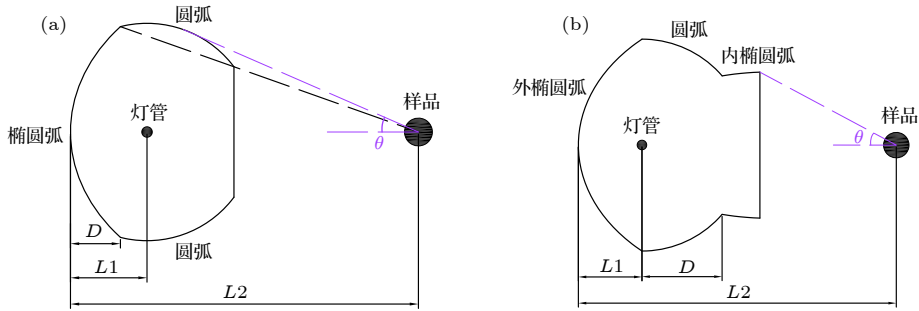


图 3 (a) 椭圆-圆组合反射罩几何关系图; (b) 椭圆-圆-椭圆组合反射罩几何关系图

Fig. 3. (a) Combined ellipse-sphere reflector geometrical layout; (b) combined ellipse-sphere-ellipse reflector geometrical layout.

衍射覆盖角可由 60° 缩小至 55° , 对四反射罩布局而言, 可推算出 θ 取值应为 $(180^\circ - 55^\circ - 4 \times 3^\circ) \div 4 = 28.25^\circ$, 此处的 3° 为考虑的反射罩厚度.

椭圆-圆-椭圆组合反射罩及其几何特征如图 3(b) 所示, 外椭圆第一焦点与内椭圆第一焦点重合, 外椭圆第二焦点与内椭圆第二焦点重合; 灯管位于第一焦点处, 样品位于第二焦点处; 以灯管中心为圆心、灯管至外椭圆弧边缘点距离为半径作两段对称圆弧, 该圆弧再分别与内椭圆弧相交. 要确定椭圆-圆-椭圆组合反射罩的最优形状, 需要设定四个变量, 包括外椭圆第一焦距 L_1 、第二焦距 L_2 、圆弧深度 D 以及连线夹角 θ , 对反射罩几何形状进行设定, 此处 θ 值为 28.25° , 与椭圆-圆组合反射罩布局保持一致.

3.2 光线聚焦模拟计算

模拟计算采用的 TracePro 程序是一款普遍用

于照明系统、光学分析、辐射度分析及光度分析的 光学仿真软件, 具体地, 对加热炉组件进行三维建模, 设定光源参数如功率、光谱分布、光线数量等, 定义各部件性能参数包括材料、表面特性等, 以样品为研究对象, 软件可追迹到达样品表面的光源直射光线、反射光线的数量和光谱分布, 再结合样品材料特性计算出可吸收的热辐射能量, 即称为样品吸收能量. 模拟运用 Macro Language 进行设定, 可追迹加热炉三维模型动态变化过程中样品处的光线聚焦效果, 确定样品最优吸收能量. 模拟时除反射罩截面形状改变、反射罩内层镀金以外, 部件其他性能参数和几何尺寸均与 Engin-X 现有高温炉实际情况保持一致, 具体参数见表 1. 高温炉通常选用短波光卤素灯管对金属样品进行热辐射加热, 集中在近红外波段, 该波段范围内镀金层有更好的反射效率^[18,19], 也在其他加热装置反射罩上得到了应用^[6,7,20].

表 1 TracePro 模拟中高温炉各部件参数设定

Table 1. Parameters of furnace components in TracePro simulation.

卤素灯管		反射罩		螺纹棒状试样		材料试验机加载轴	
材料	钨	长度/mm	102	中间段长度/mm	42	单侧长度/mm	150
加热段长度/mm	75	材料	铝, 内层镀金	中间段直径/mm	8	直径/mm	32
加热功率/W	2000			材料	因科镍718	材料	因科镍718

椭圆-圆组合反射罩 L_1, L_2 取值不同反射罩形状各异, 从而导致样品加热效果不同, Engin-X 现有高温炉中椭圆第二焦距为 100 mm, 为匹配相同样品台尺寸, 优化模拟中 L_2 拟定在 80—120 mm 的范围. 结果如图 4 所示, 整体而言 L_2 值越小样品吸收能量越多, 当 L_2 为定值时, 样品吸收能量随着 L_1 值的变化先增大后减小. 取出各曲线最优值并拟合, 结果见图 5(a) 中的红线, 此曲线即为样

品最优能量吸收曲线, 任一 L_2 值对应一个最优反射罩形状. 为了进一步验证最优反射罩形状的内在几何关系, 增加了一组模拟对比, 即限定椭圆弧深度与 L_1 值相等并称之为临界形状, 模拟结果见图 5(a) 中的黑线. 对比可知, 临界形状和最优形状的样品能量吸收非常接近, 即表明当椭圆弧深度刚好取到第一焦点或附近时可使加热单元实现最优聚光效果, 达到样品的最高加热温度, 与 Engin-X 现

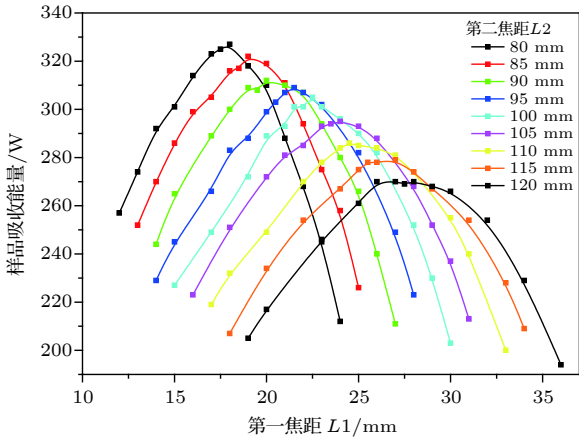


图 4 椭圆-圆组合反射罩下样品能量吸收模拟结果
Fig. 4. Sample energy absorption mounted by combined ellipse-sphere reflector.

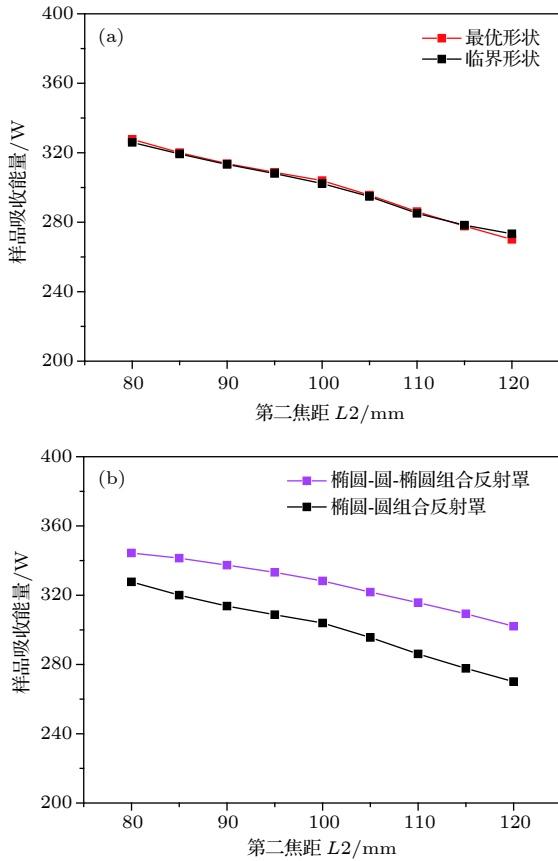


图 5 (a) 椭圆-圆组合反射罩下样品能量吸收对比;
(b) 椭圆-圆组合反射罩和椭圆-圆-椭圆组合反射罩下样品最优能量吸收对比
Fig. 5. (a) Sample energy absorption comparison under combined ellipse-sphere reflector; (b) sample energy absorption comparison between optimized ellipse-sphere and optimized ellipse-sphere-ellipse reflector.

有高温炉模拟结果相比, 样品最大能量吸收可提高 72%。在上下反射罩之间增加铝制挡板, 靠样品

侧内表面进行抛光处理, 可进一步增加反射到样品的光线数量, 尤其可以增加到达样品两端加载轴的光线数量, 两者均有利于样品温度的提升. 在四周 (轴向两端和侧向两端) 增加挡板后增强效果明显, 但实验时通常在侧向两端预留中子散射窗口以减少中子强度损失同时实现观测目的, 以两侧各设置一半面积挡板为例, 此时样品最大能量吸收可提升 109%.

参考椭圆-圆模拟结果, 可以假定椭圆-圆-椭圆组合反射罩中外椭圆弧深度与第一焦距 L_1 值相等, TracePro 模拟椭圆-圆-椭圆结构下的最优能量吸收结果如图 5(b)(粉线) 所示, 整体变化趋势与椭圆-圆组合反射罩模拟结果类似但样品的能量吸收略优 10%, 增加相同设置的反射挡板后较椭圆-圆组合反射罩挡板模型提升了 6%.

4 高温炉温度场模拟计算

采用 ANSYS 软件对椭圆-圆组合反射罩结构的高温炉温度场进行热模拟计算, 模拟计算的加热单元几何结构与 TracePro 中光路模拟结构保持一致, TracePro 模拟计算得到的样品吸收能量值同时作为输入参数代入热计算. 选用的标准棒状试样中间段长度 42 mm (螺纹段除外)、直径 8 mm, 仅考虑反射罩单一结构优化, 此时试样最高加热温度可达 1291 °C; 从应用角度考虑, 参照上文轴向、侧向挡板设置方案进行分析, 试样中轴线温度分布见图 6(a), 温度从中心往轴向两侧逐渐降低. 中子衍射实验试样的取样大小典型值为 4 mm × 4 mm × 4 mm 的立方体, 为了进一步研究取样范围内的温度分布, 选取棒状试样中心位置 4 mm × 4 mm × 4 mm 的体积元并沿着试样轴向、径向各截取中心面, 相应的温度分布分别见图 7(a) 和图 8(a). 从两个横截面温度分布可以看出, 选取的体积元内温度差可控制在 5 °C 以内, 最高温度约为 1399 °C, 且从表面到中心逐渐降低.

椭圆-圆-椭圆组合反射罩结构高温炉温度场热模拟计算同样选取棒状试样中心位置 4 mm × 4 mm × 4 mm 的体积元. 仅考虑反射罩单一结构优化, 此时试样最高加热温度可达 1317 °C, 设置相同挡板后, 模拟结果如图 6(b)、图 7(b) 和图 8(b) 所示. 结果表明, 温度差仍控制在 5 °C 以内, 最高温度约为 1423 °C.

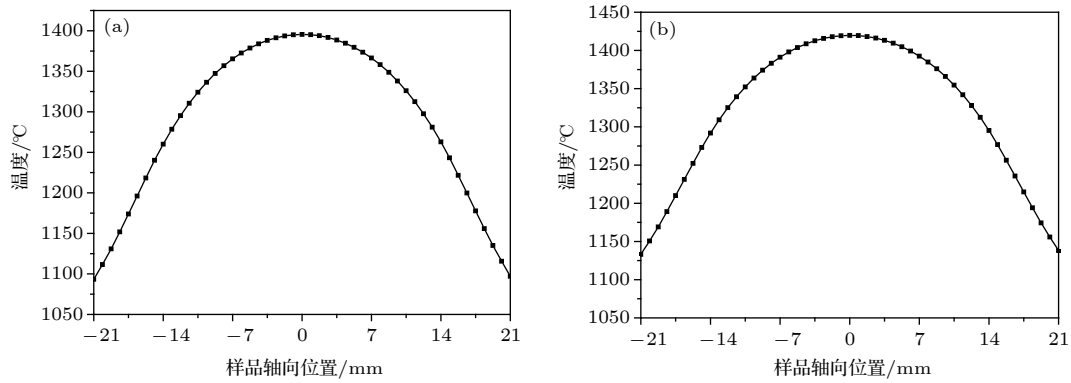


图 6 热模拟中棒状试样在 (a) 椭圆-圆组合反射罩下和 (b) 椭圆-圆-椭圆组合反射罩下中轴线的温度分布
 Fig. 6. Simulated central axial temperature distribution of screw-threaded sample under (a) ellipse-sphere reflector and (b) ellipse-sphere-ellipse reflector.

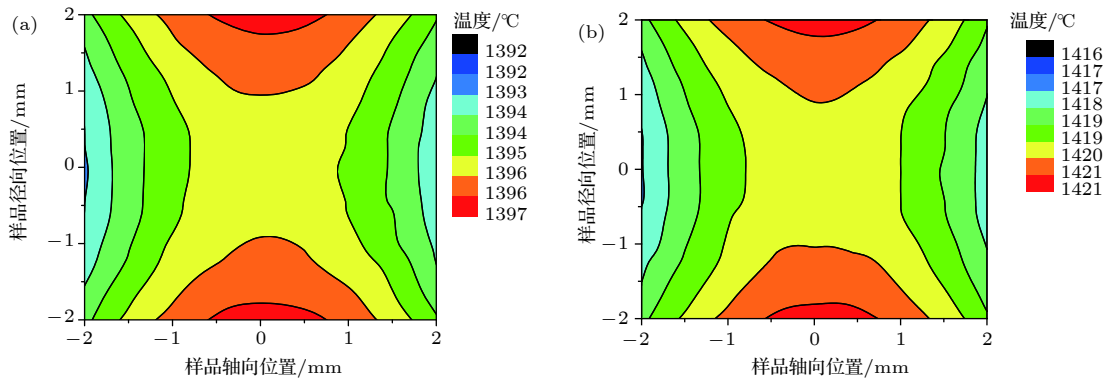


图 7 热模拟中棒状试样中心处 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 体积元在 (a) 椭圆-圆组合反射罩下和 (b) 椭圆-圆-椭圆组合反射罩下轴向横截面温度分布
 Fig. 7. $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ gauge volume simulated axial cross-section temperature distribution of screw-threaded sample under (a) ellipse-sphere reflector and (b) ellipse-sphere-ellipse reflector.

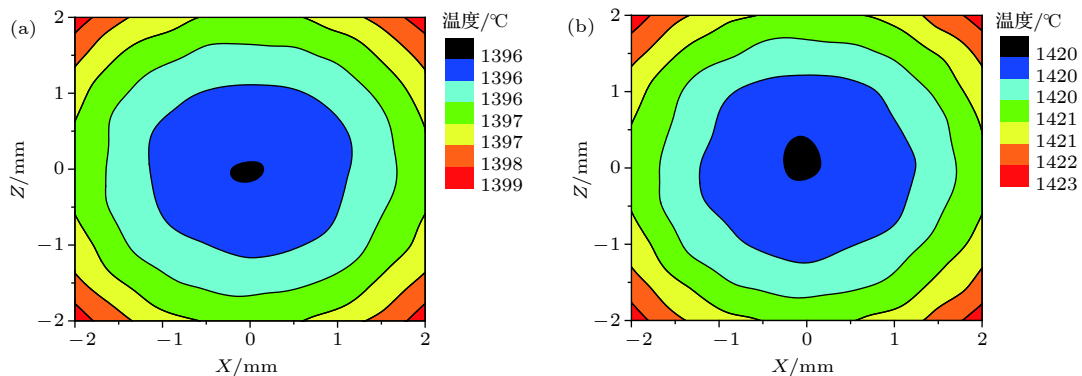


图 8 棒状试样中心处 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 体积元在 (a) 椭圆-圆组合反射罩下和 (b) 椭圆-圆-椭圆组合反射罩下径向横截面温度分布
 Fig. 8. $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ gauge volume simulated radial cross-section temperature distribution of screw-threaded sample under (a) ellipse-sphere reflector and (b) ellipse-sphere-ellipse reflector.

5 高温炉温度场实验验证

为验证模拟计算的准确性, 在 Engin-X 中子

谱仪上完成高温拉伸实验: 直径 8 mm 因科镍棒状试样, k 型热电偶, 空气氛围, 在灯管 70% 功率下试样最高温度达到 860 °C, 100% 功率下最高温度达到 1003 °C. 图 9 为试样加热阶段实物图展示,

中心和两侧共设有 3 个热电偶。

用上文中提及的思路,对现有高温炉进行光线聚焦和温度场的模拟计算,设置相同参数(含高温炉形状、灯管、反射层、夹具、试样等)后,得到如图 10 所示的结果。可以看出,70% 加热功率下试样最高加热温度可达 899 °C,100% 加热功率下试样最高加热温度可达 1048 °C。考虑到现有高温炉装置在中子谱仪上已使用 10 余年,存在焦点对中略有错位,反射罩反射层质量略有下降等原因,所以实验测量值比理论模拟值略低一些,总体而言实验与模拟结果基本一致,验证了模拟思路和方法的可行性。

结合上一章节模拟结果分析,仅考虑反射罩单一结构优化,椭圆-圆组合反射罩比现有半椭圆反

射罩使样品最高加热温度从 1048 °C 提高到 1291 °C,椭圆-圆-椭圆组合反射罩则提高到 1317 °C,优化结果较为明显。

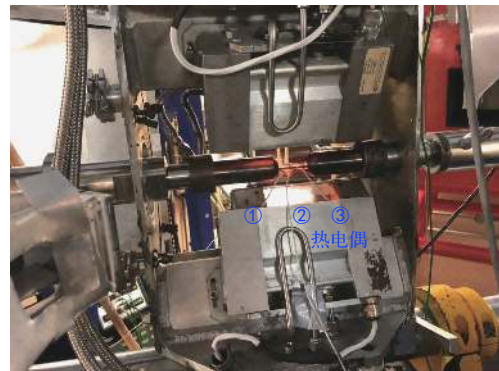


图 9 高温拉伸实验试样加热阶段实物图

Fig. 9. Sample heating process in high temperature tensile test.

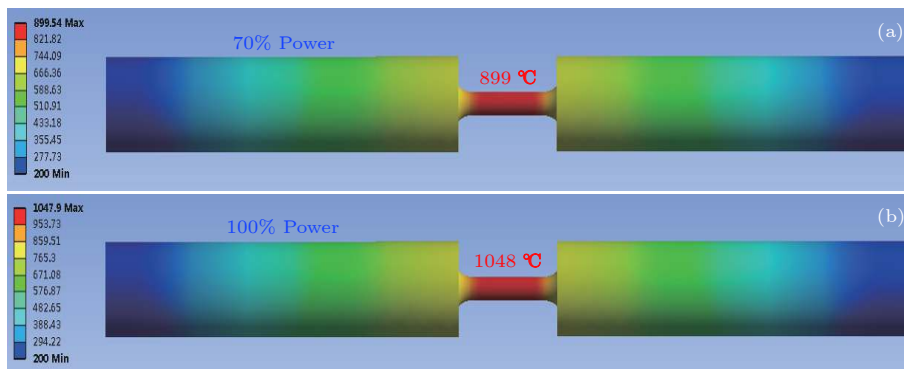


图 10 热模拟中棒状试样在 (a) 70% 加热功率和 (b) 100% 加热功率下的温度分布

Fig. 10. Simulated temperature distribution of screw-threaded sample under (a) 70% heating power and (b) 100% heating power.

6 结 论

英国散裂中子源工程材料衍射谱仪 Engin-X 通过优化原位加载衍射实验样品环境中红外加热型高温炉反射罩形状、布局、反射涂层,以及合理设置反射挡板等措施实现更优的光线聚焦效果,样品最高加热温度可以达到 1400 °C,制造周期短经济性良好且安装调试简便。在其他参数相同的前提下,椭圆-圆-椭圆组合反射罩相对椭圆-圆组合反射罩的光线聚焦效果略优,样品加热温度约高 20 °C,但该结构使得样品操作空间变小,考虑更换及维护的便利性,椭圆-圆组合反射罩优势更明显,下一步将完成反射罩制造并安装于 Engin-X 样品台进行实验验证。该优化设计有望拓展 Engin-X 中子衍射技术在材料研究领域的应用,同时也为

中国散裂中子源工程材料衍射谱仪样品环境设计提供借鉴经验。

参考文献

- [1] Makowska M G, Kuhn L T, Cleemann L N, Lauridsen E M, Bilheux H Z, Molaison J J, Santodonato L J, Tremsin A S, Grosse M, Morgano M, Kabra S, Strobl M 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 125109
- [2] Danilewsky A, Wittge J, Hess A, Croll A, Allen D, McNally P, Vagovic P, Cecilia A, Li Z, Baumbach T, Gorostegui-Colinas E, Elizalde M R 2010 *Nucl. Instrum. Methods B* **268** 399
- [3] Lee E H, Hwang J S, Lee C W, Yang D Y, Yang W H 2014 *J. Mater. Process. Technol.* **214** 784
- [4] Eyer A, Nitsche R, Zimmermann H 1979 *J. Cryst. Growth* **47** 219
- [5] Lorenz G, Neder R B, Marxreiter J, Frey F, Schneider J 1993 *J. Appl. Cryst.* **26** 632
- [6] Sarin P, Yoon W, Jurkschat K, Zschack P, Kriven W M 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 093906

- [7] Haboub A, Bale H A, Nasiatka J R, Cox B N, Marshall D B, Ritchie R O, MacDowell A A 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 083702
- [8] 英国散裂中子源官网 <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/ENGINX-Furnace.aspx> [2018-12-29]
- [9] Haynes R, Paradowska A M, Chowdhury M A H, Goodway C M, Done R, Kirichek O, Oliver E C 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 047002
- [10] Paradowska A M, Baczmansk A, Zhang S Y, Rao A, Bouchard P J, Kelleher J 2011 *161st Iron and Steel Institute of Japan Meeting* Tokyo, Japan, March 25-27, 2011, p539
- [11] Bourke M A M, Dunand D C, Ustundag E 2002 *Appl. Phys. A* **74** S1707
- [12] 洛斯阿拉莫斯国家实验室官网 <https://lansce.lanl.gov/facilities/hujan/instruments/smarts/index.php>[2018-12-29]
- [13] 日本散裂中子源官网 <https://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/se/bl19.html>[2018-12-29]
- [14] Harjo S, Ito T, Aizawa K, Arima H, Abe J, Moriai A, Iwahashi T, Kamiyama T 2011 *Mater. Sci. Forum* **681** 443
- [15] Santisteban J R, Daymond M R, James J A, Edwards L 2006 *J. Appl. Crystallogr.* **39** S12
- [16] [PRECISION CONTROL SYSTEMS公司官网 <http://www.pcscontrols.com/>][2018-12-29]
- [17] Kang W M 2015 CN201510009283
- [18] Optical Properties of Metals, Hass G <https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/aip/aip-handbook-section6g.pdf> [2019-3-20]
- [19] Sadao A 2012 *The Handbook on Optical Constants of Metals* (Vol. 1) (Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.) p68
- [20] Zhang F B, Bian J, Du L X, Wang G D, Liu X H 2006 *Heat Treat. Met.* **31** 89 (in Chinese) [张福波, 边军, 杜林秀, 王国栋, 刘相华 2006 *金属热处理* **31** 89]

High temperature sample environment upgrade of ISIS engineering materials *in-situ* diffraction experiment*

Zhan Xia^{1)3)†} Joe Kelleher²⁾ Gao Jian-Bo¹⁾³⁾ Ma Yan-Ling¹⁾³⁾
Chu Ming-Qiang⁴⁾ Zhang Shu-Yan¹⁾³⁾ Zhang Peng¹⁾
Sanjooram Paddea⁵⁾ Gong Zhi-Feng¹⁾³⁾ Hou Xiao-Dong⁶⁾

1) (*Centre of Excellence for Advanced Materials, Dongguan 523808, China*)

2) (*ISIS Neutron and Muon Source, Harwell OX11 0QX, United Kingdom*)

3) (*Songshan Lake Laboratory for Materials Science, Dongguan 523808, China*)

4) (*Shanghai Aircraft Manufacturing Co.,Ltd, Shanghai 200436, China*)

5) (*Materials Engineering Department, Open University, Milton Keynes MK7 6AA, United Kingdom*)

6) (*Research Institute for Future Transport & Cities, Coventry University, Coventry CV1 5FB, United Kingdom*)

(Received 29 December 2018; revised manuscript received 7 May 2019)

Abstract

The ISIS Neutron Facility of Rutherford Appleton Laboratory (RAL) in the UK plays an important and world leading role in in-situ engineering materials testing, one of the most typical neutron diffractometers known as Engin-X, used to measure residual stress and phase transformation and to do micromechanics research, through using different sample environment equipment, such as mechanical fatigue loading frame, cryogenic temperature furnace of cooling the sample down to 1.5 K and particularly high temperature furnace of heating the sample up to 1100 °C under loading condition. The present maximum heating capability of the Engin-X high temperature furnace at ISIS can be increased to above 1100 °C, that would allow more extremely challenging high temperature engineering problems around the world to be investigated. With this ambition in mind, in this paper we use TracePro software initially to optimize the geometry of the present Engin-X furnace reflectors and their configurations' arrangement. One is to use ellipse-sphere combination and the other is to use ellipse-sphere-ellipse combination to replace the present Engin-X high temperature furnace's half ellipse reflector geometry. The results show that the former plus further reflector surface coating and reasonable side shielding arrangement result in a total increase of 109% of energy absorption by the sample. The latter makes a further 6% of increase of energy absorption by the sample. Such results are further checked by subsequent ANSYS thermal analysis to investigate the temperature distributions within the centre portion of the sample. The ANSYS simulation results further reveal that both the ellipse-sphere and ellipse-sphere-ellipse configurations are able to increase the maximum capability of the Engin-X high temperature furnace at ISIS from the present 1100 °C to 1399 °C and 1423 °C, respectively. In this paper, we present the details of the simulations and all the configurations of the Engin-X high temperature furnace.

Keywords: ISIS, in-situ experiment, sample environment, high temperature furnace

PACS: 61.05.fm, 07.20.Hy, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.68.20182295

* Project supported by the Introducing Innovative and Entrepreneurial Research Team Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2016ZT06G025).

† Corresponding author. E-mail: xia.zhan@ceamat.com