

Diagnostic of Infrared Temperature Measurement and Its Application in Tokamak

Bo Shi^{1,2,3}, Weihua Wang^{1,3}, Hui Zhang³, Jinhong Yang³, Xiaomin Ma³, Huihui Shan³, Ping Wang³

¹Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

³Institute of Applied Physics, Army Officer Academy of PLA, Hefei Anhui

Email: shibo1982_1982@126.com

Received: Oct. 7th, 2015; accepted: Oct. 24th, 2015; published: Oct. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The fusion energy and the potential reactor Tokamak for fusion are introduced in this paper. Then, the infrared temperature measurement principle, diagnostic system and its application on EAST, JET, Tore Supra etc. are discussed. Reference for the diagnostic of infrared temperature measurement of Tokamak can be provided in this paper.

Keywords

Tokamak, Diagnostic of Infrared Temperature Measurement, EAST

红外测温诊断原理及其在核聚变装置托卡马克中的应用

史博^{1,2,3}, 汪卫华^{1,3}, 张辉³, 杨锦宏³, 麻晓敏³, 单会会³, 王平³

¹中国科学院合肥物质科学研究院, 等离子体物理研究所, 安徽 合肥

²中国科学技术大学, 科学岛分院, 安徽 合肥

³中国人民解放军陆军军官学院, 应用物理研究所, 安徽 合肥

文章引用: 史博, 汪卫华, 张辉, 杨锦宏, 麻晓敏, 单会会, 王平. 红外测温诊断原理及其在核聚变装置托卡马克中的应用[J]. 核科学与技术, 2015, 3(4): 140-147. <http://dx.doi.org/10.12677/nst.2015.34020>

Email: shibo1982_1982@126.com

收稿日期: 2015年10月7日; 录用日期: 2015年10月24日; 发布日期: 2015年10月30日

摘 要

本文在介绍聚变能及其可能实现装置托卡马克聚变堆的基础上, 结合红外测温原理及其系统, 论述了红外测温诊断在EAST、JET、Tore Supra等托卡马克装置上的应用, 为托卡马克聚变堆红外测温诊断提供参考。

关键词

托卡马克, 红外测温诊断, EAST

1. 引言

传统的煤、石油、天然气等石化能源,是古代生物遗体在长期的与氧隔离的地质条件下形成的,这种有限的资源经不起现代工业的巨大消耗。取之不尽的核能源,将使人类摆脱能源危机[1]。聚变能量是通过轻原子核(氢的同位素氘和氚)发生聚变核反应释放出来的。半个世纪以来,世界上许多国家一直在从事核聚变研究工作,主要是由于聚变反应堆所使用的燃料容易得到,而且取之不尽。据估计,地球上有海水 10^{21} 千克,每千克海水含氘0.03克,共含氘 3×10^{16} 千克,以全世界能源消耗年平均 2×10^{20} 焦耳计算,地球上的氘可使用 3×10^{10} 年之久[2]。

托卡马克是一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形装置,其中央是一个环形的真空室,外部缠绕着线圈,通电时内部会产生巨大的螺旋磁场,加热并控制等离子体,创造氘、氚实现聚变的环境,并实现人类对于聚变反应的控制。图1为中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所的托卡马克装置EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak)的结构示意图。

第一壁是托卡马克装置中面对等离子体的一层固体结构,也就是真空室壁,用于封闭等离子体。在托卡马克装置等离子体运行过程中,第一壁材料特别是限制器和偏滤器区域会受到强烈的热负荷作用。开展对聚变装置的第一壁温度测量和热负荷特性的研究将为未来聚变实验装置的安全运行、第一壁材料的优化选择和结构设计、改善等离子体性能提供重要的依据。

2. 红外测温原理

红外线的波长为0.76微米~100微米,是自然界存在的一种最为广泛的电磁波辐射,它基于任何物体在常规环境下都会产生自身的分子和原子无规则的运动,并不停地辐射出热红外能量,分子和原子的运动愈剧烈,辐射的能量愈大。

普朗克黑体辐射公式给出,温度为 T 的黑体在单位时间内从单位表面积辐射出的波长为 λ 的单位波长区间的电磁波能量为:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

其中: k 是玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; h 是普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s。此公式给出了黑体的温度与辐射能量之间的关系[3]。

黑体是一个理想模型，其吸收本领最强，辐射本领也最强，而实际的物体的辐射本领要小于黑体，所以红外测温中还有一个重要参数就是发射率 ε ，也称“辐射率”或辐射系数。物体的发射率是物体在一定温度下辐射的热能与黑体在同温度下辐射能量的比值，实际物体的发射率在 0 到 1 之间，它是影响红外测温结果的直接因素。物体的发射率随材料的性质和表面状态变化而变化，即任何物体的发射率因材料而异，取决于其材料的性质，而同一材料的发射率又与其表面状态有关，如光洁度、氧化程度及其覆盖层等，它还随被测物的温度变化而有所变化。因此，发射率的标定是红外测温前的一项重要工作，通过黑体热辐射公式及实际物体的发射率便可得到实际物体的辐射能量与表面温度间的关系。

温度在绝对零度以上的物体，都会因自身的分子运动而辐射出红外线。红外测温的主要设备红外热像仪，通过非接触探测红外能量(热量)，将物体辐射的功率信号转换成电信号后，成像装置的输出信号就可以完全一一对应地模拟扫描物体表面温度的空间分布，进而在显示器上生成热图像和温度值，并可以对温度值进行计算，它利用物体表面温度和其辐射之间的关系来计算得到温度分布。

3. 红外测温诊断在托卡马克装置上的应用

3.1. 红外测温诊断系统介绍

托卡马克上基本的红外测温诊断系统，如图 2 所示，主要包括红外热像仪、触发采集、远程传输和控制几个部分。在放电过程中由于有辐射存在，不便于人直接操作，所以采取触发采集的方法，在托卡马克放电前如提前 100 ms 触发，热像仪接收到触发信号后开始采集数据，设置采集时间，如 10 s，则 10 s 后采集结束。本地电脑放置在托卡马克装置附近，温度数据及图像存储在本地电脑内，可通过远程控制电脑查看、处理。

3.2. 红外测温诊断在 EAST 上的应用

EAST 是中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置，它具有非圆截面和全超导磁体系统。

通过在红外热像仪前加一组透镜组成了内窥镜，内窥镜的透镜组部分进入了真空室，其视场范围更广，观测范围比红外热像仪在窗口外观测要大很多。EAST 上的大视场红外/可见集成式内窥镜，可同时采集红外图像和可见图像。

图 3 为内窥镜系统三维图，考虑到未来 ITER 强烈的中子辐照，其很多诊断要求只能开一个小孔来观测，所以 EAST 的红外系统内窥镜前端采用小孔入射方式。视场光从小孔进入，经内部椭球面镜、平

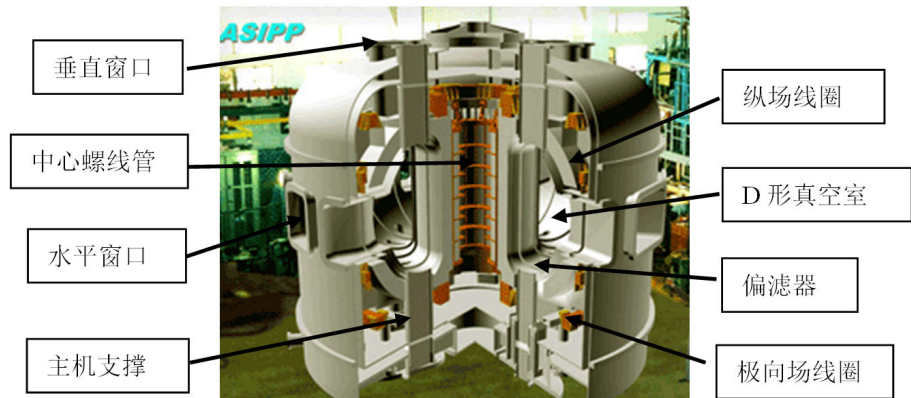


Figure 1. Structure sketch map of EAST
图 1. EAST 结构示意图

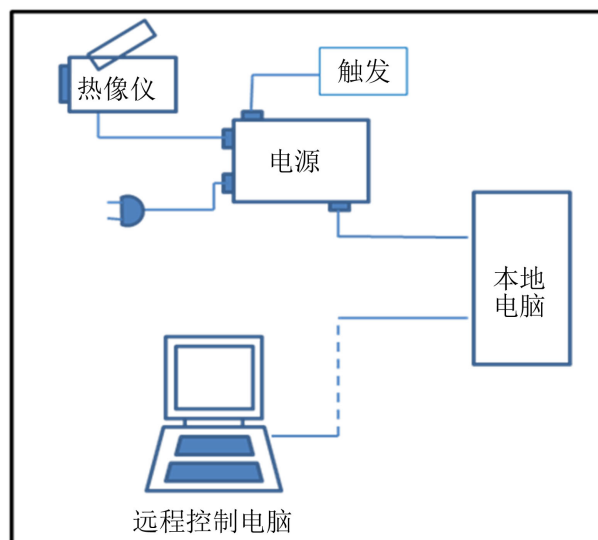


Figure 2. Schematic diagram of infrared diagnosis system

图 2. 红外诊断系统示意图

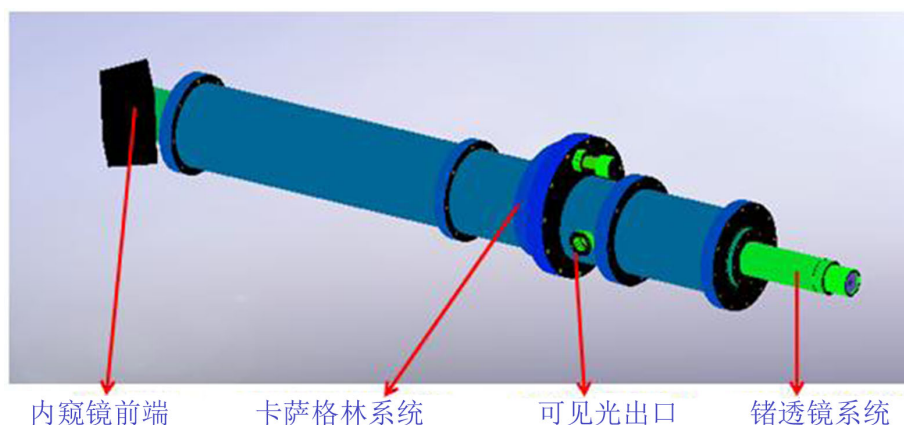


Figure 3. Three-dimensional map of endoscope system

图 3. 内窥镜系统三维图

面镜反射为近平行于内窥镜的光线，再经卡萨格林系统将光线聚焦，由红外透镜组(锩透镜系统)成像于红外探测器上。所有的反射镜都采用镀金膜，镀金膜在红外波段有很强的反射率，高达 98%。

图 4 所示为集成式内窥镜的位置及观测范围，内窥镜安装在 K 窗口，可观测 P、O、N 三个窗口范围内的上、下偏滤器，限制器及低杂波天线，如图 5 所示。图 4 为红外图像，不同的颜色即代表不同的温度，红外相机在工作过程中，将所有观测部分的温度记录下来，通过专用软件即可对测量结果进行处理。

3.3. 红外测温在 JET (Joint European Torus)上的应用[4] [5]

JET 是欧洲的托卡马克，其内窥镜系统可同时进行红外观测和可见光观测，观测范围为上偏滤器、内壁、外部极向限制器、ICRF (离子回旋频段)天线和上限制器。图 6 所示为内窥镜结构，内部装有一组透镜组，使其观测到了内部很大范围。图 7 为红外图像，显示了通过内窥镜观测到的 JET 内壁的温度分布。

EAST 上的红外测温系统与 JET 上的系统是基本相同的，其特点都是通过红外/可见集成式内窥镜进

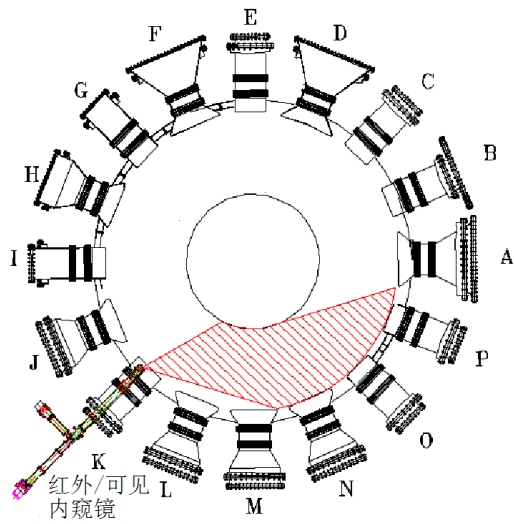


Figure 4. Integrated endoscope and observation range of EAST
图 4. EAST 上的集成式内窥镜及观测范围示意图

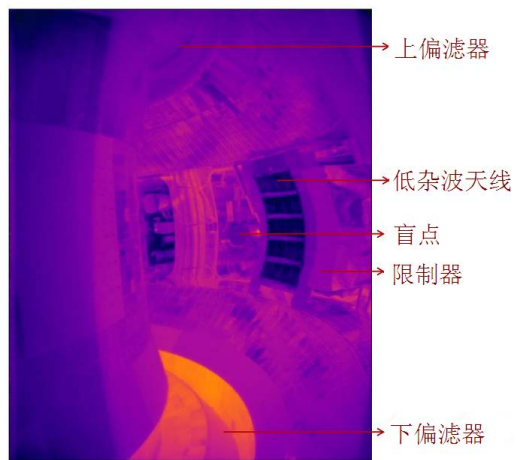


Figure 5. Endoscope infrared image of EAST
图 5. EAST 上内窥镜的红外图像

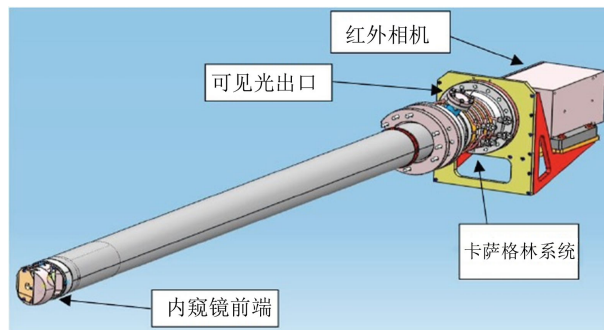


Figure 6. Infrared endoscope structure of JET
图 6. JET 上红外内窥镜结构

行观测，视场范围更广，不仅可获得红外图像和温度数据，还可获得可见图像。而其缺点也是由于视场

范围广造成的，由于同时可观测不同区域，这些区域的材料不同，发射率也是不同的，在设置一定的材料发射率后会给温度测量带来一定的误差，则材料的发射率应该按照主要观测的区域进行设置。

3.4. 红外测温在 ASDEX Upgrade 上的应用[6] [7]

ASDEX Upgrade 是德国的托卡马克装置，图 8 中左图为 ASDEX Upgrade 上红外热像仪观测示意图，可观测上偏滤器，右图为红外热像仪测量的上偏滤器温度分布红外图像。图 9 所示为 ASDEX Upgrade 上通过红外热像仪监测 ICRH (离子回旋频段波加热)天线和保护限制器(通过反射镜)的示意图。

ASDEX Upgrade 的红外相机由于放置于窗口外观测，其视场范围相对较小，每个红外相机只能观测到部分第一壁表面。但正是由于每个相机观测的范围有限，其观测范围内材料发射率基本相同，温度数据的准确性相对较高一些。

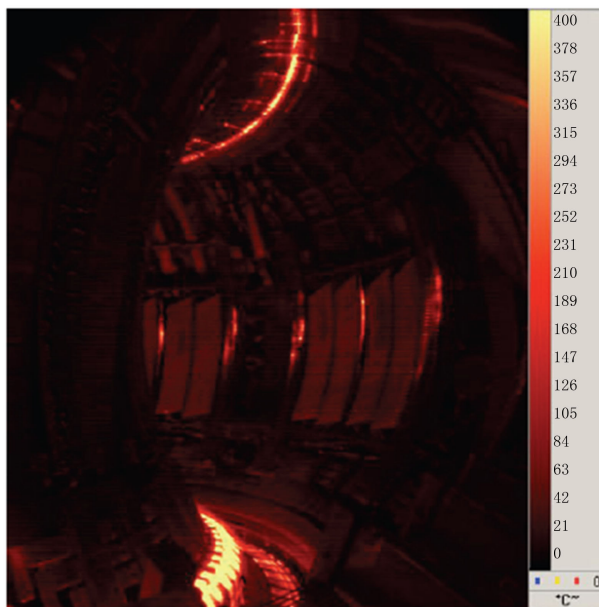


Figure 7. Temperature difference measured by endoscope
图 7. 内窥镜观测到的温度差

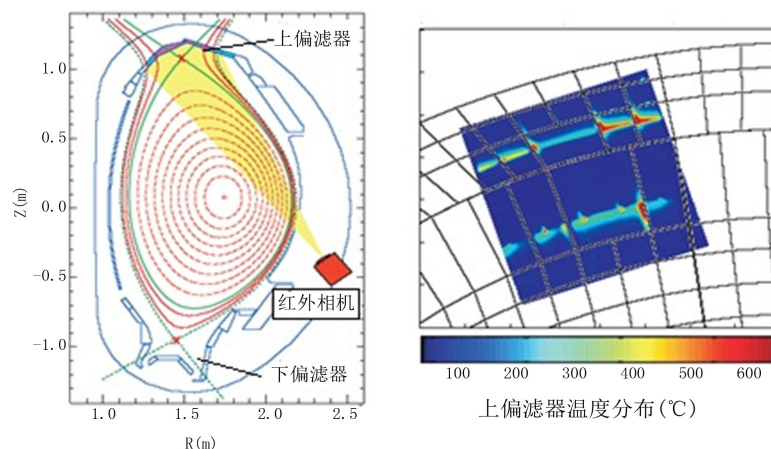


Figure 8. Upper divertor temperature measured by infrared camera in ASDEX Upgrade
图 8. ASDEX Upgrade 上红外热像仪测量上偏滤器温度

3.5. 红外测温在 Tore Supra 上的应用[8]

法国的托卡马克 Tore Supra，红外测温系统的设计是为了观测整个环向限制器表面(15 m 长，总面积 7.5 m²)，以及五个加热天线。为了覆盖整个环向限制器和所有天线，E1~E6 六个水冷红外内窥镜沿环向 360 度均匀分布可观测 A1~A4 四个天线，内窥镜 E7 观测天线 A5。

图 10 中，左图为通过七个内窥镜和五个天线的分布，右图为内窥镜观测到的环向限制器和天线的红外图像。

4. 结束语

红外测温诊断，是获取托卡马克聚变堆第一壁温度及热负荷的重要手段，对第一壁进行实时监测与

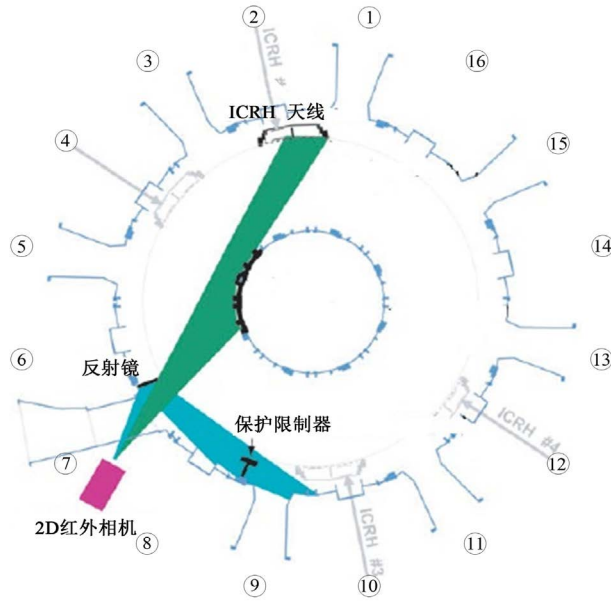


Figure 9. Observing ICRH antenna and protective limiter by 2D infrared camera in ASDEX Upgrade
图 9. ASDEX Upgrade 上通过红外热像仪监测 ICRH 天线和保护限制器

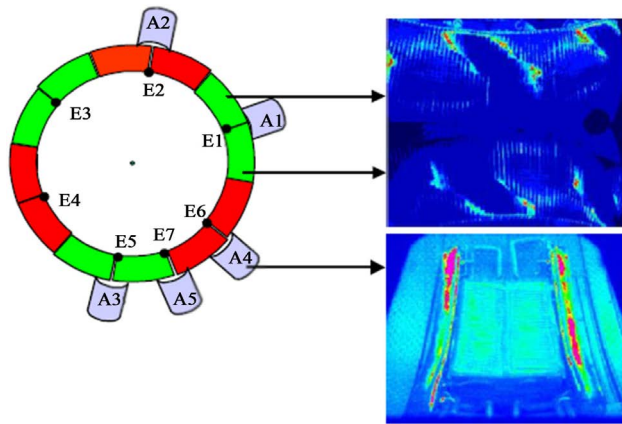


Figure 10. Observing limiter and antenna by 7 endoscopes in Tore Supra
图 10. Tore Supra 上通过七个内窥镜观测限制器和天线

分析,并用于实时反馈控制,对聚变实验装置、聚变堆的安全运行具有重要作用,获取的数据可进行第一壁热负荷的计算,也可对第一壁材料的优化选择和结构设计等提供重要参考依据。本文在介绍聚变能及其可能实现装置托卡马克的基础上,结合红外测温原理及其系统,论述了红外测温诊断在 EAST、JET、Tore Supra 等托卡马克装置上的应用,总结了其优缺点。对于未来的聚变堆 ITER,可通过内窥镜系统对第一壁进行大范围观测,并用于实时反馈控制;同时对于重点关注的区域如偏滤器还可通过红外相机进行单独观测,以提高数据的可信度,红外测温诊断将会成为 ITER 上必不可少的诊断手段。

基金项目

国家磁约束聚变研究专项(No. 2013GB113004), 国家自然科学基金(No. 11505290, No. 91326101)。

参考文献 (References)

- [1] 郭星渠 (1990) 核能——现实与未来的选择. 中信出版社, 北京.
- [2] 姚若河, 张晓东 (2001) 托卡马克等离子体中的能量和 H 模. *广西物理*, **4**, 8-10.
- [3] 张三慧 (2010) 大学基础物理学下(第 2 版). 清华大学出版社, 北京, 245-246.
- [4] Gardarein, J.L., Corre, Y., et al. (2009) Thermal quadrupoles approach for two-dimensional heat flux estimation using infrared and thermocouple measurements on the JET Tokamak. *International Journal of Thermal Sciences*, **48**, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.02.005>
- [5] Gauthier, E., Roche, H., et al. (2007) ITER-like wide-angle infrared thermography and visible observation diagnostic using reflective optics. *Fusion Engineering and Design*, **82**, 1335-1340. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.06.026>
- [6] Kirk, A., Eich, T., et al. (2005) The spatial structure of type-I ELMs at the mid-plane in ASDEX upgrade and a comparison with data from MAST. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **47**, 995-1013. <http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/47/7/003>
- [7] Eich, T., Herrmann, A., et al. (2005) Type-I ELM substructure on the divertor target plates in ASDEX upgrade. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **47**, 815-842. <http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/47/6/007>
- [8] Guilhem, D. and Bondil, J.L. (2005) Tore-Supra infrared thermography system, a real steady-state diagnostic. *Fusion Engineering and Design*, **74**, 879-883. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.08.021>