

文章编号: 1672-8785(2014)07-0037-07

基于热红外光谱响应的油库火灾 温度场反演方法研究

胡潭高^{1,2} 陈志莉³ 张登荣^{1,2*} 张煜洲^{1,2}

(1. 杭州师范大学理学院遥感与地球科学研究院, 浙江杭州 311121;
2. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 浙江杭州 311121;
3. 后勤工程学院, 重庆 401311)

摘要: 热辐射是油库火灾事故的主要危害特性之一, 而温度场又是其直接表现形式, 因此快速有效地监测温度场信息是迅速掌握灾情动态信息的最佳途径, 对提高油库火灾事故应急监测与快速响应能力、维护人民生命财产安全、保护生态环境以及大幅减少经济损失等具有重要意义。在国内外地表温度反演方法研究进展的基础上, 针对油库火灾爆炸事故的突发性特征, 通过分析环境温度急剧变化、遥感影像及反演参数难以获取等因素, 建立了一种基于热红外光谱和地面传感器数据的油库火灾温度场信息提取模型。通过设计模拟实验, 成功反演了试验场及其周边区域的地表温度情况。结果表明, 该模型能够快速有效地反演油库火灾事故发生区域的温度场信息。

关键词: 油库火灾; 热红外光谱; 回归模型; 温度场反演

中图分类号: TP75 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.07.009

Inversion of Oil Depot Fire Temperature Field Based on Thermal Infrared Spectral Response

HU Tan-gao^{1,2}, CHEN Zhi-li³, ZHANG Deng-rong^{1,2*}, ZHANG Yu-zhou^{1,2}

(1. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, College of Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China; 3. Logistical Engineering College, Chongqing 401311, China)

Abstract: Thermal radiation is one of the main hazard characteristics of oil depot fire and the temperature field is the direct representation of the thermal radiation. Therefore, rapid and effective monitoring of the temperature field information is the best way to quickly acquire dynamic fire information. It is of significance to the improvement of emergent oil depot fire accident monitoring and fast response ability, the maintenance of people's life, property and safety, the protection of ecological environment and the great reduction of economic losses etc. On the basis of the research progress in ground surface temperature inversion methods at home and abroad, an oil depot fire temperature field information extraction model based on thermal infrared spectral and ground-based sensor data is established. By designing simulation experiments, the ground surface temperature conditions in the test side and its surrounding

收稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201458; 21377166); 国家高技术研究发展计划项目(2012AA7013037)

作者简介: 胡潭高(1983-), 男, 浙江奉化人, 博士研究生, 主要从事资源环境遥感研究。

* 通讯作者: E-mail: zju_rs@126.com

areas are inverted successfully. The result shows that this model can be used to quickly and effectively inverse the temperature field information of the area in which oil depot fire accident happened.

Key words: oil depot fire; thermal infrared spectrum; regression model; temperature field inversion

0 引言

油库是国家石油储存和供应的基地，但由于其存储的油品是易燃易爆的危险品，它又是典型的重大工业危险源。随着社会经济的不断发展，我国拥有的油库数量及规模日益扩大。一旦发生火灾爆炸事故，其后果将会非常严重^[1]。作为潜在危险事故中的一类常见灾害，油库火灾的事故发生概率非常高。相关统计显示，油库火灾约占油库事故总数的 42.4% 以上^[2]，其中造成人员伤亡和财产损失的主要原因就是热辐射。在我国，由各类油库火灾事故带来的损失年均达数亿元。近年来，国内外已经连续发生了多起油库和罐区的重大火灾事故，并造成了重大经济损失^[3-5]。例如，2005 年 12 月 11 日，位于英国伦敦东北部的全英第五大油库——邦斯菲尔德油库发生连串爆炸事故，20 个容量为 3×10^6 gal 的油槽都被引爆，爆炸威力强大，火势惊人，烈焰产生的浓烟不断随着风势向东南及西南方向飘散。由于受到热辐射以及浓烟的影响，事故现场附近约 2000 名居民被迫撤离。这起爆炸事故可能是欧洲承平时期以来最为严重的一次意外事故。2009 年 10 月 29 日，印度石油公司位于印度西北部拉贾斯坦邦的一座大型油库突发大火并引发爆炸。由于缺乏有效监测手段，当地政府无法阻止大火继续燃烧，只能眼看着所有燃料全部烧尽。这起大火一直持续到 2009 年 11 月 11 日。该事故最终造成 12 人死亡，150 多人受伤，总损失价值约为 7.58 亿美元。2010 年 7 月 16 日，位于中国大连新港油品码头附近的一条输油管线发生爆炸，大火顷刻而发，迅速殃及大连保税区油库。一个体积为 1×10^5 m³ 的油罐爆裂起火，整个火场的陆地过火面积超过 6×10^4 m²，海面火场面积超过 1×10^4 m²。该事故严重威胁到周边多个原油储罐和危险化学品

存储区，对附近人民的生命财产安全及生态环境造成了严重破坏。2013 年 11 月 22 日，中石化管道公司位于中国山东省青岛经济技术开发区（即黄岛区）的输油管线破裂，造成原油泄漏，并相继发生爆燃。大量泄漏原油随雨水管道末端进入海面，继而发生原油燃烧起火。该事故造成 60 多人遇难，对当地民众及生态环境造成了难以挽回的损失。

通过综合分析各类油库火灾爆炸事故可以发现，这些事故一般会形成大范围火场和强烈热辐射等特征污染。因此，若要实现对油库火灾爆炸事故灾情动态信息的快速监测，获取事故现场的热辐射信息则是切实有效的手段之一，而事故发生地的地表温度信息又是热辐射信息的重要表现形式。如果能够快速反演温度场，那么就可以迅速掌握油库火灾事故的动态信息，从而实现对油库火灾事故的快速发现和大尺度动态监测。这对于提高突发油库火灾事故的应急监测与快速响应能力具有重要意义。

遥感技术具有多波段和多时相等特点，并能快速、连续、实时、大面积地获取地表信息^[6]。而热红外波段对温度具有高度敏感性，已经被广泛应用于地表温度信息的提取工作。如何准确反演地表温度是推动遥感技术精确化、定量化的关键点之一。

国内外的相关研究表明，基于热红外遥感技术的地表温度反演方法可以分为统计法和理论法两种^[7]。其中，统计法主要是通过实现遥感卫星和地面监测点的同步观测，获取与卫星遥感影像同一时相的地面观测数据，然后研究遥感图像与实测点之间的相互关系，从而对地表温度进行反演的。该方法的优势是其模型构建快速简单；缺点则是理论性弱，无法从基本原理上反映温度变化的内在关系。理论法是在消除各类外部因素的基础上，利用热辐射传输方

程来反演地表温度的。该方法是应用最为广泛的一种地表温度反演方法。研究人员根据热红外遥感数据的不同特点, 提出了一系列温度反演算法。这些算法归纳起来可以分为单通道算法、劈窗算法和多通道算法三大类^[8-10]。虽然上述方法能够准确反演地表温度, 并且能够从深层面上反映地表温度反演的内在关系, 但是针对油库火灾爆炸事故这种突发性环境污染事件, 它们还具有很大的局限性。由于在反演过程中会涉及众多参数, 这些方法并不能有效满足快速监测的需要。

综上所述, 本文将在国内外地表温度反演方法研究进展的基础上, 通过分析油库火灾爆炸事故发生时温度急剧变化、地面环境参数难以获取和突发性高等特征, 建立一种基于热红外光谱和地面传感器数据的油库火灾温度场信息提取模型, 以满足对油库火灾事故进行快速监测的需要。

1 模拟实验设计及数据

1.1 模拟实验设计

由于油库火灾爆炸事故具有很强的突发性, 而且在对真实事故开展实验时会受到较多条件的限制, 因此本文通过设计模拟实验来对油库火灾爆炸事故进行研究。本次模拟试验选择在重庆市沙坪坝区的一处空地上进行, 其周围地势空旷, 地表覆盖类型单一, 非常有利于开展监测实验。经过实验前的综合分析, 我们选定试验场的宽度为 29.5 m, 长度为 64.0 m; 对角线的

长度分别为 69.0 m 和 71.3 m; 在对角线位置上同时放置 4 个直径为 5 m 的火盆来模拟油库(中心位置的坐标为 29°38'0.48"N, 106°19'32.77"E)。图 1 所示为试验场的地理位置信息。

1.2 多光谱遥感影像

随着全球遥感卫星的不断发射, 有越来越多的星载传感器能够为地表温度反演研究提供热红外遥感数据, 比如 NOAA 系列卫星、Terra/Aqua 系列卫星、Landsat 系列卫星、风云系列卫星和环境卫星等。相关研究表明, 目前用于反演地表温度的热红外波段主要集中在 3~4 μm 和 10~13 μm 这两个区间内^[11]。

在模拟实验中, 我们选择空间分辨率相对较高的 HJ-1B 卫星载红外相机, 其光谱范围为 3.50~3.90 μm, 空间分辨率为 150 m。通过计算和分析卫星的准确过境时间, 选择在天气晴好的条件下进行油库火灾模拟试验。通过卫星姿态控制和编程获取了油库火灾模拟试验的热红外遥感影像(见图 2)。此次成像时间为 2013 年 2 月 5 日 15 时。

2 研究方法

本文根据实验目的设计了图 3 所示的技术方案, 用于验证基于热红外光谱响应的油库火灾温度场反演模型的有效性。

首先, 获取油库火灾区域的热红外遥感影像, 并对其进行标准化处理; 然后, 通过布设在油库周边的温度传感器获取油库爆炸时布设点的温度实测数据; 最后, 反演并求解上述两组数



(a)



(b)

图 1 试验场的地理位置: (a) 鸟瞰图; (b) 火盆中心位置



图2 HJ-1B 卫星的热红外影像

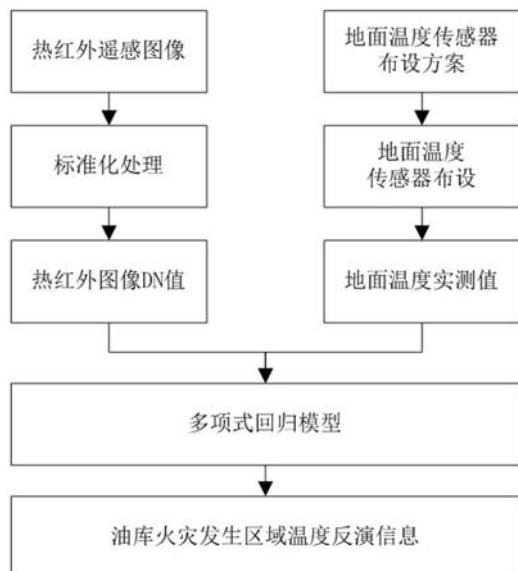


图3 基于热红外光谱响应的油库火灾温度场反演模型的技术路线

据之间的多项式回归模型，从而提取出油库火灾爆炸事故现场的温度场信息。

2.1 温度传感器布设方案

根据技术流程并结合油库火灾模拟实验，我们分别在油盆周边布设了 10 个温度传感器，用于监测油盆燃烧期间周边环境的温度变化情况。各个点之间位置的布设原则是需要考虑其与油盆燃烧中心的相对位置。考虑到 HJ-1B 卫

星在红外波段的空间分辨率为 150 m，我们将每个布设点之间的距离间隔定为 150 m。这样能够尽量避免由混合像元带来的误差，使每个地面观测点都代表 1 个像元。图 4 为模拟实验中温度测点的布设示意图。

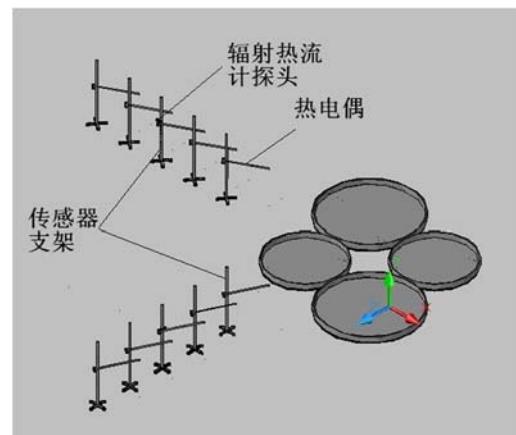


图4 模拟实验中温度测点的布设示意图

在燃烧过程中，我们通过传感器支架上的辐射热流计探头准确记录了 10 个温度测点的温度值。图 5 所示为模拟实验区内 10 个测点的温度信息随时间的变化情况。

2.2 标准化数据处理

在采集遥感图像的过程中，遥感器本身的结构性能、高度和姿态角变化，大气折光，地形

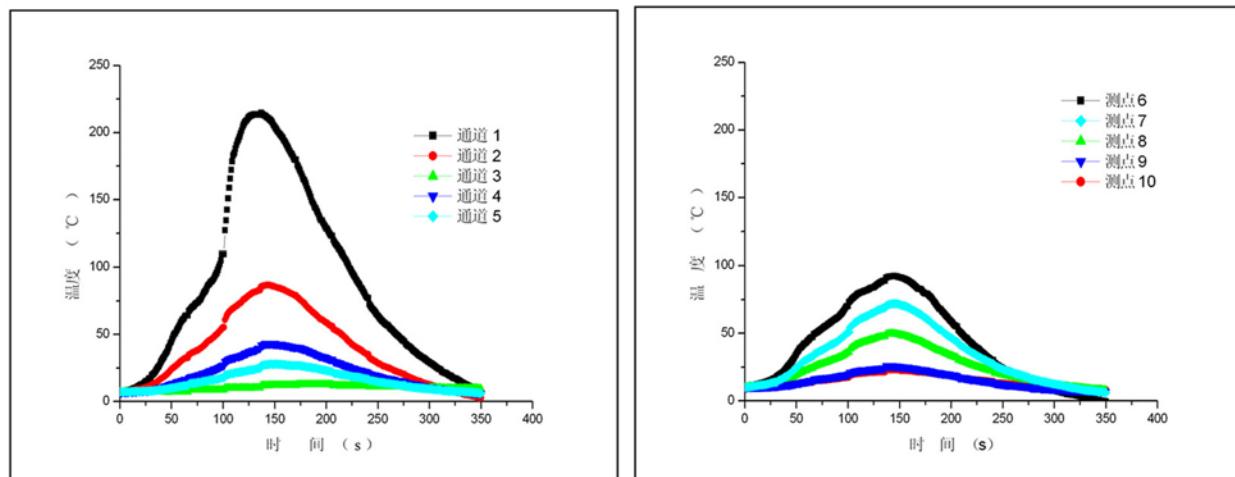


图 5 模拟实验区内 10 个测点的温度信息随时间的变化情况

起伏, 地球曲率及自转等因素都会引起遥感图像的几何变形^[12]。几何变形会使地面物体在图像中产生畸变, 造成图像几何形状或位置的失真。本文通过采集地面控制点数据对遥感影像进行了几何纠正。由于 HJ-1B 产品数据本身已经得到了初步的辐射校正, 我们没有对图像进行其他预处理(如大气校正), 而是在反演过程中采用了遥感图像的 DN 值。

2.3 回归模型的选择

由于热红外遥感影像对温度具有敏感性, 即地表温度越高, 热红外图像的反射率越高, 因此两者之间呈线性关系, 适用于线性回归模型和多项式回归模型。

线性回归模型是一种在回归分析中假定分析对象可表示为一些影响因素的线性函数的模型。一元线性回归模型用于分析一个自变量(X)与一个因变量(Y)之间的线性关系, 其一般形式为

$$y = a_0 + a_1 x \quad (1)$$

式中, x 为自变量; y 为因变量; a_0 和 a_1 为回归系数。

多项式回归模型是一种研究一个因变量与一个或多个其他变量之间的多项式关系的回归分析方法。当自变量只有一个时, 该模型称为一元多项式回归模型, 其回归方程为

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (2)$$

式中, x 为自变量; y 为因变量; a_0, a_1, \dots, a_n 为回归系数。

2.4 温度场反演信息

利用实测数据与热红外图像的 DN 值, 确定两种回归方法的回归系数。然后利用回归方程求解热红外图像中其他覆盖区域的地表温度, 从而获取模拟实验周边环境的温度场信息。

3 结果与分析

3.1 热红外图像值与地面温度实测值

通过记录油盆燃烧过程中的实测数据, 并结合 10 个观测点的经纬度坐标, 建立了两者之间的一一对应关系(见表 1)。

表 1 热红外图像值与地面温度实测值的对应关系

序号	热红外图像值	地面温度实测值(°C)
1	3682	170
2	2173	80
3	2004	50
4	1706	30
5	1583	15
6	3007	90
7	1702	50
8	1644	25
9	1821	50
10	2471	90

3.2 回归模型的建立

根据热红外图像值与地面温度实测值两组数据，分别建立了线性回归模型和多项式回归模型(结果见图 6)。

通过对分析，我们可以发现基于多项式回归模型的 R^2 比基于线性回归模型的大，但是两者差别很小，因此多项式回归模型和线性回归模型都适合于对热红外遥感影像进行温度反演。

3.3 温度场反演信息结果

我们利用线性回归模型对热红外图像进行了反演，并通过计算得到了地表温度图像(见图 7)。

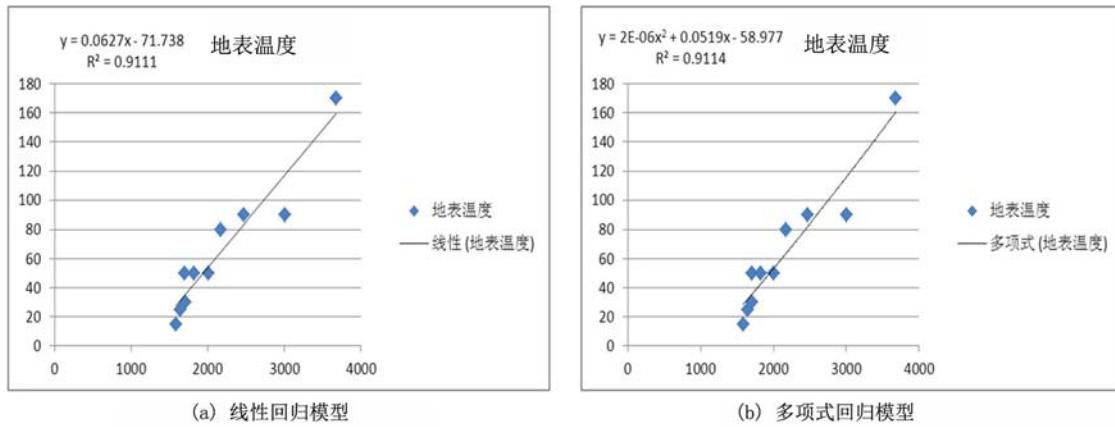
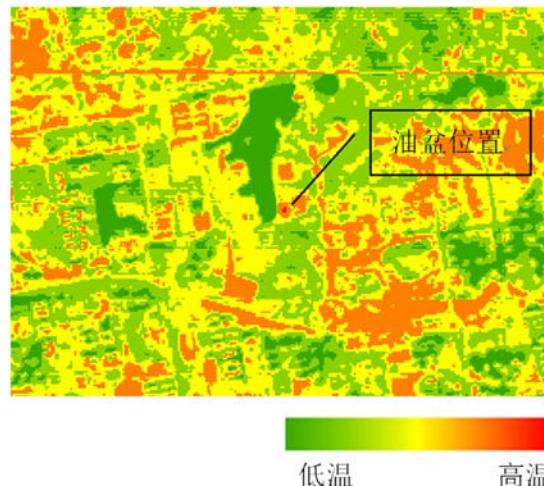


图 6 基于回归模型的热红外遥感影像温度反演



(a) 温度信息反演图像



(b) 温度信息渲染图像

图 7 星载红外遥感影像的温度信息渲染图

从图 7 中可以看出，油盆位置的温度明显高于周边地区，但是本次模拟实验的油库范围较小，因此对周围环境影响较小。

4 结束语

实验结果表明，利用热红外光谱响应特征并结合地面实测的温度传感器数据，能够监测油库火灾事故发生过程中周边环境的温度变化情况。该方法是一种比较有效的手段，尤其适合监测突发性油库火灾爆炸事故。

热红外遥感数据的空间分辨率相对较低，容易造成混合像元问题。这是引起地表温度反演精度降低的部分原因。在下一步的研究过程

中, 如果能够开展亚像元条件下的组分温度反演, 那么这将对于提高反演精度具有重要意义。另外, 虽然理论法反演模型能够真实反映地表温度变化的内在关系, 但是由于其辐射传输过程复杂、参数众多且获取困难, 在油库火灾事故温度场监测中反而不具备优势。如何事先引入先验知识和有效减少模型参数, 从而降低反演难度和增加稳定性, 将是研究热红外光谱响应特征与油库火灾事故温度场信息之间关系的重要内容。

参考文献

- [1] 武铜柱. 大型立式油罐发展综述 [J]. 石油化工设备技术, 2004, 25(3): 57–59.
- [2] 张莹, 刘峰, 杨光辉, 等. 大型油罐火灾爆炸危害性研究 [J]. 管道技术与设备, 2007, 4: 19–20.
- [3] Collier P C R. Fire in a Residential Building: Comparisons between Experimental Data and a Fire Zone Model [J]. Fire Technology, 1996, 32(3): 195–218.
- [4] 周荣义, 黎忠文, 牛会永. 基于突变理论的油库火灾爆炸分析与模糊动态评价 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(6): 97–101.
- [5] 庄磊, 陈国庆, 孙志友, 等. 大型油罐火灾的热辐射危害特性 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8(4): 110–114.
- [6] 盛莉, 黄敬峰, 郭瑞芳, 等. 综合利用环境星 CCD 和红外数据反演大气气溶胶光学厚度 [J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 277–282.
- [7] 张佳华, 李欣, 姚凤美, 等. 基于热红外光谱和微波反演地表温度的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2103–2107.
- [8] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region [J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3719–3746.
- [9] Anding D, Kauth R. Estimation of Sea Surface Temperature from Space [J]. Remote Sensing of Environment, 1970, 1(4): 217–220.
- [10] Gillespie A, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A Temperature and Emissivity Separation Algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1113–1126.
- [11] 孟鹏, 胡勇, 巩彩兰, 等. 热红外遥感地表温度反演研究现状与发展趋势 [J]. 遥感信息, 2012, 27(6): 118–123.
- [12] 李娜. 多传感器图像配准方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [18] Xu X F, Yin A Y, Du XL, et al. A Novel Sputtering Oxidation Coupling (SOC) Method to Fabricate VO₂ Thin Film [J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 2750–2753.
- [19] Balu R, Ashrit P V. Near-zero IR Transmission in the Metal-insulator Transition of VO₂ Thin Films [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92: 021904.
- [20] 曾国强, 叶勤, 张俊双, 等. 热氧化法制备二氧化钒薄膜及其相变温度研究 [J]. 真空, 2011, 48(2): 22–24.
- [21] Zhao L L, Miao L, Tanemura S, et al. A Low Cost Preparation of VO₂ Thin Films with Improved Thermochromic Properties from a Solution-based Process [J]. Thin Solid Films, 2013, 543: 157–161.
- [22] De Natale J F, Hood P J, Harker A B. Formation and Characterization of Grainoriented VO₂ Thin Films [J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66: 5844–5850.
- [23] Mlyuka N R, Kivaisi R T. Correlation between Optical, Electrical and Structural Properties of Vanadium Dioxide Thin Films [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41: 5619–5624.

(上接第 28 页)

- [12] Pan M, Liu J, Zhong H M, et al. Raman Study of the Phase Transition in VO₂ Thin Films [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 268: 178–183.
- [13] Pan M, Zhong H M, Wang S W, et al. Properties of VO₂ Thin Film Prepared with Precursor VO_{(acac)₂} [J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 265: 121–126.
- [14] West K G, Lu J, He L, et al. Ferromagnetism in Rutile Structure Cr Doped VO₂ Thin Films Prepared by Reactive-bias Target Ion Beam Deposition [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2008, 21(2): 87–92.
- [15] 刘中华, 何捷, 孟庆凯, 等. 退火真空度与氧化钒薄膜物相的相关性 [J]. 硅酸盐学报, 2007, 25(3): 348–353.
- [16] Fan L L, Wu Y F, Si C , et al. Oxygen Pressure Dependent VO₂ Crystal Film Preparation and the Interfacial Epitaxial Growth Study [J]. Thin Solid Films, 2012, 520: 6124–6129.
- [17] 潘梅, 钟红梅, 王少伟, 等. 氧含量对 VO_{2-x} 晶格特性和结构相变影响的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 93–96.