

分类号 TK519

密级 _____

UDC 620

编号 200628014924008

中国科学院研究生院 硕士学位论文

智能玻璃建筑节能特性分析

梁庆

指导教师 徐刚 研究员 中国科学院广州能源研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 热能工程

论文提交日期 2009-05 论文答辩日期 2009-05

培养单位 中国科学院广州能源研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 李戡洪 研究员

摘要

智能玻璃能够根据人的意愿或者外界环境的变化动态的调节太阳光的输入，是新一代的建筑节能玻璃，目前引起广泛的关注。本文选取了两种典型的智能玻璃——电致变色玻璃和 VO_2 热色玻璃，采用动态能耗分析软件 EnergyPlus 分别对其建筑节能特性进行了分析，具体研究内容如下：

(1) 讨论了电致变色玻璃不同控制方式对其节能效果的影响。结果表明，电致变色玻璃选用合适的控制方式可以显著降低建筑的能耗，但如果控制方式选用不当，采用电致变色玻璃后建筑的能耗反而会高于采用普通白玻的能耗。此外，无论在何种控制方式下，采用电致变色/LOW-E 的节能效果都要优于电致变色/白玻中空玻璃。

(2) 对 VO_2 光学薄膜的膜系结构进行了优化，研究了外观颜色与膜层厚度的关系，设计出的 $\text{TiO}_2(135\text{nm})/\text{VO}_2(50\text{nm})/\text{ITO}(45\text{nm})/\text{glass}$ 三层膜结构相对于 $\text{VO}_2(50\text{nm})/\text{glass}$ 的单层膜结构，太阳能调节量提高了从 3.7% 提高到 9.8%，半导体状态时的可见光透过率从 33.6% 提高到 55.5%，金属状态时的可见光透过率从 34.0% 提高到 50.0%，同时半导体与金属状态时的膜面发射率都有很大程度的降低。

(3) 研究了 VO_2 热色玻璃的热学性能和建筑节能特性，重点分析了膜层结构、膜面位置、建筑的地理位置等因素对 VO_2 热色玻璃建筑节能效果的影响。结果表明，对于单层 VO_2 热色玻璃，其功能膜面朝向室内比朝向室外可以获得更好的节能效果，而对于由 VO_2 热色玻璃与白玻组成的双层玻璃，其功能膜面位于室内玻璃的外侧时 VO_2 很难起到相应的调节作用。另外，与其他类型的玻璃相比，虽然一定膜层结构下 VO_2 热色玻璃在不同地区的建筑能耗低于白玻，但是在全年以采暖为主的严寒地区和全年以空调为主的夏热冬暖地区， VO_2 热色玻璃的节能效果分别不及高透型和遮阳型 LOW-E 玻璃。

关键词：建筑节能；智能玻璃；光热计算；能耗分析

Abstract

Windows capable of regulating solar/heat transmission according to people's willingness or the circumstance changes are called smart window. As a new generation of energy saving glass, smart window is extensively paid attention at present. This paper analyzes the effects of electrochromic window and VO₂-based thermochromic window for energy efficiency in buildings using dynamic simulation software EnergyPlus. The specific studies are as follows:

(1) The effect of different control strategies on building energy consumption of electrochromic window is discussed. The results show that the building energy consumption can be reduced by using the appropriate control strategies for electrochromic window. However, if the selection of control strategies is improper, the energy consumption will be higher than using clear glass for using electrochromic window. Besides, no matter what kind of control strategies, the performance is better than EC/clear insulating glazing unit for EC/LOW-E insulating glazing unit.

(2) The thickness of VO₂ film is optimized, and the relationship between appearance color and film thickness is studied. Compare to a single structure of VO₂(50nm)/glass, the performance of a TiO₂(135nm)/VO₂(50nm)/ITO(45nm)/glass proposed is improved: The solar energy regulating variable increases from 3.7% to 9.8%, the luminous transmittance for S-phase increases from 33.6% to 55.5%, and for M-phase increases from 34.0% to 50.0%. At the same time, the emittance is decreased for both S and M phases of VO₂ film.

(3) The thermal property and effect of building energy saving of VO₂-based thermochromic window is studied. The relationship between the effect of building energy saving and the factors such as the film structure, the film position or the geographic location of building is emphatically analyzed. The results show that the building energy consumption will be reduced more if the film is located at indoor for the single glass, but for the double glass made up of VO₂-based thermochromic window and clear glass, it can't be play the corresponding regulation role for VO₂. In

addition, for VO₂-based thermochromic window, the building energy consumption will be lower than the clear glass in different climatic regions, but it will be higher than high or low solar transmittance LOW-E glass in severe cold zone or hot summer and warm winter zone, respectively.

Key words: building energy saving; smart window; photothermal calculation; energy consumption analysis

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
第一章 绪 论.....	1
1.1 建筑节能与智能玻璃.....	1
1.2 智能玻璃研究及其发展现状.....	2
1.2.1 气致变色玻璃.....	2
1.2.2 电致变色玻璃.....	3
1.2.3 光致变色玻璃.....	4
1.2.4 热致变色玻璃.....	4
1.3 本论文的研究内容.....	8
第二章 建筑能耗计算方法及模拟软件.....	9
2.1 建筑能耗计算方法.....	9
2.1.1 稳态法.....	9
2.1.2 动态法.....	9
2.2 建筑能耗模拟软件.....	9
2.2.1 开发背景.....	10
2.2.2 负荷模拟.....	11
2.2.3 系统模拟.....	12
2.2.4 设备模拟.....	12
2.2.6 计算思路.....	12
2.2.5 EnergyPlus的特点及应用.....	13
第三章 电致变色玻璃节能特性分析.....	16
3.1 电致变色玻璃控制方式.....	16
3.2 建筑能耗分析.....	18
3.2.1 建筑模型.....	18
3.2.2 玻璃性能参数.....	19

3.2.3 计算条件.....	19
3.3 计算结果及其分析.....	19
第四章 VO ₂ 热色玻璃节能特性分析.....	23
4.1 VO ₂ 光学薄膜结构的优化.....	23
4.1.1 薄膜设计的基本原理.....	23
4.1.2 膜系结构与计算数据.....	24
4.1.3 计算结果及其分析.....	25
4.2 VO ₂ 热色玻璃热学性能研究.....	32
4.2.1 窗户的传热原理.....	32
4.2.2 计算数据与过程.....	35
4.2.3 计算结果及其分析.....	36
4.3 建筑能耗分析.....	43
4.3.1 建筑模型及计算条件.....	44
4.3.2 计算结果及其分析.....	45
第五章 结论与展望.....	54
参考文献.....	56
附录 攻读硕士学位期间发表的论文及专利.....	62
致 谢.....	63

第一章 绪论

1.1 建筑节能与智能玻璃

建筑节能是在 1973 年发生世界性“石油危机”之后，日益发展壮大起来的。随着石油等一次能源的日益紧张，能源紧张问题以成为世界公认的重要课题，国内各大城市也出现了电力吃紧等状况，所以作为解决这一问题的两个方面——新能源的开发和节能技术被提升到前所未有的高度。特别是节能技术，它已经渗透到能源使用的整个过程。随着世界能源问题的日益紧迫，人们生活水平不断提高，以及科学技术的加速发展，特别是计算机的广泛应用，建筑节能技术也已经上升到了一个崭新的阶段，已经成为建筑、热工、机电、卫生、经济及计算机等学科的交叉学科。建筑节能这一概念，现在不仅是要消极地在建筑使用过程中减少能量的损耗，而且逐渐被赋予“提高建筑物中能源利用效率”的意义。建筑能耗一般包括采暖、空调、热水供应、炊事、照明、家用电器等耗能，它在西方发达国家占社会能源总消耗的 30%~50%，而在我国建筑能耗也占社会总能耗的比例也已经达到了 30%（不包括建材生产能耗）^[1]，并且有进一步提升的趋势。所以，建筑节能在整个节能战略中占有重要的地位，是毋庸置疑的。

影响空调采暖能耗的四大围护部件即门窗、墙体、屋面、地面，以门窗的绝热性能最差，但是为了满足采光、装饰与立面设计要求，建筑门窗有不断增大的趋势，门窗是能量流失的重要原因之一，而建筑玻璃又是门窗的主要构件，因此，使用高性能的节能玻璃，可以显著改善室内热环境和提高建筑节能水平。

目前市场上的节能玻璃主要有热反射玻璃、热吸收玻璃、低辐射玻璃以及由这些玻璃与白玻组成的中空玻璃、真空玻璃等，但上述节能玻璃的光学性质是固定的，不能根据外界环境的变化而变化，因此人们希望能开发一种具有智能调节能力的玻璃，它能够根据人的意愿或者外界环境的变化动态的调节太阳光的反射和透射，进一步提高人的舒适性和建筑的节能效果，这种玻璃即被称为智能玻璃。

1.2 智能玻璃研究及其发展现状

实现玻璃智能调光有多种方式。这些智能玻璃主要依靠沉积在玻璃上的薄膜，在某些物理因素（如光、电或热等）的激发下使薄膜的光学性质发生改变，从而实现对太阳能辐照的调节。薄膜光学性质的改变通称为变色。变色效应可分为气致变色、电致变色、光致变色、以及热致变色等等，基于这些变色效应的智能玻璃称为气致变色（气色）、电致变色（电色）、光致变色（光色）、以及热致变色（热色）玻璃等，其中气色玻璃和电色玻璃属于主动式智能玻璃，它们能够按照人的意愿主动的调节太阳光的输入，光色玻璃和热色玻璃属于被动式智能玻璃，主要是依靠外界环境的变化来实现太阳能辐照的调节。

1.2.1 气致变色玻璃

气致变色薄膜窗由于其具有结构相对电致变色简单、连续性控制透过率范围更大等有点，特别是三氧化钨气致变色薄膜，使用寿命较长、变色效率较高，可以用溶胶—凝胶法制备来降低成本，其在气致变色薄膜方面的研究越来越受到人们的重视。 WO_3 薄膜气致变色的原理可简述为输入到薄膜表面的氢气分子经催化剂的作用，使其发生分解，形成氢原子，然后在纳米多孔钨种扩散，进入 WO_3 分子中，这样使无色的 WO_3 分子变成蓝色钨青铜结构 HWO_3 。其机理如图 1 所示。

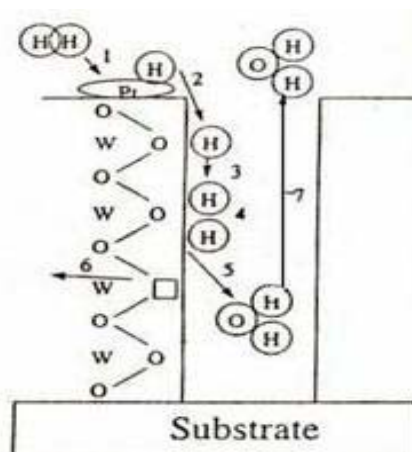


图 1 WO_3 气致变色薄膜变色微观过程示意图

针对类似 WO_3 金属氧化物金属薄膜，由于薄膜具有变色时间较长、需要较为

昂贵的贵金属作催化剂、制备工艺对其性能影响较大等缺点，国内外做了掺杂、工艺改性方面的研究，取得了不错的成效，中科院广州能源研究所用溶胶凝胶法掺杂二氧化硅，制得成本相对较低、薄膜结构疏松（有利于H的运输）的薄膜就是其中一例^[2]。今后金属氧化物薄膜窗的发展方向是，寻找贵金属催化剂的替代材料、改造工艺降低成本、研究新的掺杂特性等。

1.2.2 电致变色玻璃

电致变色效应最初是指在材料上施加高压使其变色，而现在一般均指的是电化学变色，即由于外界电场的作用，而发生电化学反应，导致电致变色材料光学性质发生变化，产生致变色的效果。具有电致变色效应的材料通常称之为电致变色材料^[3]，电致变色材料有有机电致变色材料和无机电致变色材料之分，他们应用于节能窗的技术，也是较其他纳米薄膜节能窗技术更为成熟的技术。电致变色智能窗由于具有透光度可在较大范围内任意调节（80%~10%）、多色连续变化、驱动电压低、控制简单、省电、受环境影响小等优点，其节能效果也较光致变色节能窗明显^[4]，因此受到普遍的关注，所以对其研究起步较早，取得了一些较为成熟的成果，现在已经有商品化产品。

电致变色镀膜玻璃变色的基本原理如图2所示，当两导电层加正向电压，IS层中离子被抽出，通过IC层（离子的导体，电子的绝缘体），进入工作层EC，引起变色；当加上反向电压，工作层的离子又被抽回到贮存层，颜色又恢复，其关键是变价离子的存在。例如典型的电致变色介质 WO_3 作变色层的电化学反应方程式为：

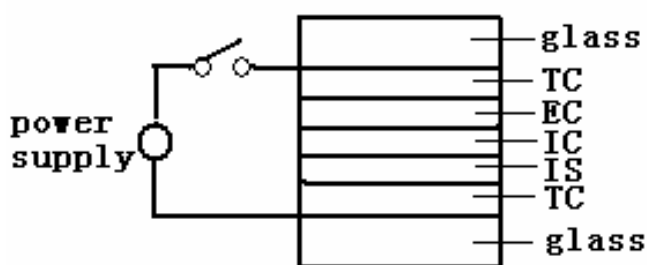
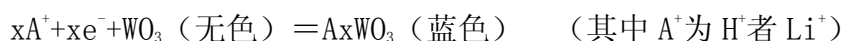


图2 电致变色工作膜层示意图

TC—透明导电层，EC—电变色涂层，IC—导离子层，IS—离子贮存层

无机和有机材料的差别在于：无机材料是利用材料中的缺陷作为通道传输离子；有机材料能溶解支持电解质，发生离子迁移。

80年代以来，人们对电致变色玻璃的材料(包括电致变色材料、透明导电材料、对电极材料，离子导电材料)和器件的结构，制造工艺及性能进行了大量的研究工作。其中研究得最多的是作为电致变色智能玻璃关键材料的电致变色膜。电致变色薄膜的制备涉及薄膜制备的各种技术如物理气相沉积、化学气相沉积、电化学沉积及溶胶—凝胶等。研究表明，制膜方法和工艺条件的控制对薄膜的电致变色特性起着关键作用。在众多被研究的电致变色膜如无机阴极着色材料 WO_3 、 MoO_3 、 V_2O_5 、 Nb_2O_5 ，无机阳极着色材料 Ir_2O_3 、 NiO 、 Cr_2O_3 和有机化合物聚苯胺(PANI)，聚环氧乙烷(PEO)等中， WO_3 和 NiO 膜具有着色效率高、可逆性好、响应时间短、寿命长、成本低等优点，因而被认为是最有发展前途的电致变色材料。

实际在电致变色薄膜中离子的输运变色机理相当复杂，至今没有完全弄明白，例如虽然对单组成氧化物(例如 WO_3 等)的电化学反应形成较统一的想法，但对其变色的微观过程说法各异(提出了多种模型)；而电致变色薄膜结构相对复杂，致使其材料制备工艺复杂；由于薄层间的扩散等作用，使得薄膜性能的稳定性和持久性控制难度很大，这些方面的研究有待深入。

1.2.3 光致变色玻璃

光致变色材料是指在可见光范围内，因光照而产生可逆光谱着色的材料。无机光致变色薄膜变色的基本原理是材料化学中的色心原理，即在有无光照的条件下，电子在两种色心缺陷之间跃迁^[5]，典型离子如 $\alpha-WO_3$ 、 $\alpha-MoO_3$ 等。而有机光致变色薄膜的基本原理一般是在光照条件下的有机物的开闭环可逆反应。由其原理决定的，光致变色薄膜智能窗具有制备简单、制备成本相对其他智能窗低(但离商品化还有很大距离)、运行成本低等优点；但它的缺点也很明显：采光透过率可调范围小(最大幅度50%)、变色反应迟钝、薄膜性能随温度升高变色效率下降、变色的可控性差(不能随季节变化)等。

1.2.4 热致变色玻璃

热色玻璃是基于环境温度的改变实现玻璃透光率的调节。热色材料通常都存

在一个相变温度，在相变温度之上或之下，材料表现出的不同的光学性质。热色材料的种类虽然较多，但要在建筑节能中获得应用，相变温度要求在室温附近(28℃左右)，因而可供选择的余地并不大。通过多年的研究，目前来看有几种材料比较有发展前途：热光聚合物、手性剂添加型液晶、以及无机薄膜 VO_2 。前两者在低温下呈透明状，高温下呈浑浊状，与电色液晶玻璃类似。由它们所形成的热色玻璃具有制备工艺简单的优点，但高温下玻璃呈浑浊状，影响视觉。而对于无机材料 VO_2 ，其特点是，相变前后光学性能的改变主要发生在红外区域（波长 $\lambda > 1000\text{nm}$ ），在可见光区域变化很小，对视觉不会造成影响，因此 VO_2 热色玻璃是目前研究的热点。

VO_2 的热致相变现象是在上世纪五十年代末被F. J. Morin^[6]首次发现。钒的大部分氧化物都有这种特性，只是相变的温度各有不同，但 VO_2 由于相对其他相变材料，具有最接近室温的相变温度，因此而受到广泛的关注和研究。

VO_2 薄膜在相变温度 T_c （ T_c 一般为68℃）时，结构就发生相变。在 T_c 以下， VO_2 是半导体相，对于阳光中的红外区无反射；在 T_c 以上，显示出金属相，在红外区表现出反射特性。图3^[7]为 VO_2 薄膜电阻温度特性曲线。

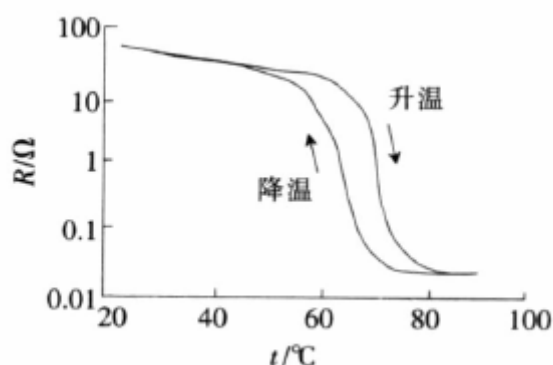


图3 VO_2 薄膜电阻温度特性曲线

从图中可以看好出，随着温度的升高，薄膜的电阻逐渐减小，减小的速度很慢。当温度升到60℃以后，电阻随着温度的升高迅速减小，当温度升到74℃后，电阻随温度升高而下降的速度又开始减慢。降温过程中的电阻变化与升温过程趋势相同，温度降低到71℃以后，电阻迅速变大，当温度降低到58℃以后，电阻变化又趋于平缓，开始恢复至原来低温状态时的值。变色后随着温度的降低，电阻

可恢复到相变前的状态，相变前后的升温曲线和降温曲线并不重合，有一个弛豫过程，这种现象称为热滞现象，图中曲线称为热滞回线。由此可以发现，VO₂薄膜的热致变色是可逆相变过程。

在低温半导体相到高温金属相的转变过程中，光谱透过率在可见光区(380nm< λ <760nm)变化不大，但在红外光区(λ >760nm)变化明显，由低温时的中等透过转变为高温时很低的透射率，特别在 λ >1500nm后，红外光线基本不透过。图4^[8]为VO₂薄膜在低温20℃和高温80℃时的光谱透过曲线。

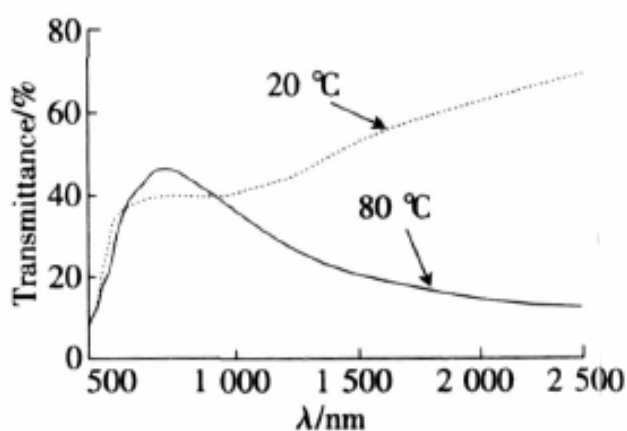


图4 VO₂薄膜20℃和80℃时的透射光谱曲线

由于晶体VO₂的相变温度约为68℃，这一温度对于普通的窗户而言是太高了。因此，如果二氧化钒薄膜要在智能窗方面有所应用，主要面临的问题是要将其相变温度降低到30℃左右，而且相变前后在太阳能红外区透过率有较大的变化，这样才能保证温度低于室温时让更多的光能进入室内，当温度高于室温时让较少的光能进入室内。目前已经在降低相变温度方面的研究已经取得了巨大的进展。实验证实，价态金属掺杂（如W、Mo、Mn等）和非金属掺杂（如F）可有效地把VO₂的相变温度从68℃降低到室温或更低的温度^[9-12]。

解决了相变温度高这个问题，基于VO₂的节能窗似乎是指日可待了。然而，事实并非如此，VO₂节能玻璃经过了几十年的研究，至今未有成品问世，技术上首先遇到了一个问题：可见光透过率太低。这主要源于两个原因：一个是VO₂的本征吸收，另一个就是薄膜的光反射。50nm厚的VO₂薄膜可见光积分透过率只有32%左右。降低膜厚虽可使透过率增加，但以牺牲薄膜的开光比为代价，会严重

削弱薄膜相变前后对太阳能的调节效率,从而会使产品失去节能效果^[13-14]。另一个办法就是通过光学减反射来实现增透。 VO_2 在可见光区域的复折射率较大^[15],约为 $3.1+i0.3$,反射率很高,进行减反射设计是非常必要的。20世纪80年代末期,瑞士科学家Granqvist领导的工作小组率先在这方面作了较多的尝试^[16],但实验结果却令人失望。他们发现,当一层 SiO_2 减反膜沉积在 VO_2 薄膜上后,由于界面分子的“锁定效应”, VO_2 的热色特性将会极大地削弱,多数情况下会完全丧失。遗憾的是,在这之后,有关 VO_2 减反射的研究几乎没有继续深入。 VO_2 的应用研究则主要集中在红外开关器件、光学存储和薄膜制备工艺等方面,而在节能应用方面的研究则很少见诸报道。

2002日本AIST的Jin Pin等人^[17],分析界面分子锁定效应发生机理的基础上,优化磁控溅射制备工艺,成功地尝试了 TiO_2 减反射膜的沉积。在玻璃基底上制备出 $\text{TiO}_2/\text{VO}_2/\text{TiO}_2$ 夹层式薄膜结构,这种结构不仅使 VO_2 可见光透过率从30.9%提高到57.6%,而且表现出良好的热致变色性能, VO_2 的相变温度降低为 58.5°C 。这期间,韩国清水大学也开展了类似的工作,实现了 SiO_2 在 VO_2 上的有效沉积^[18],他们发现在 VO_2 上沉积 SiO_2 后可见光透过率提高15%,其相变温度为 70°C ,具有热致变色性。最近,Xu G等^[19]又研究了单层 ZrO_2 薄膜对 VO_2 减反射的影响,在石英玻璃上的 VO_2 薄膜上沉积单层 ZrO_2 薄膜后可见光透过率从32.3%提高到50.5%,且其热色性能基本不受影响。英国Salford大学Evans^[20]则采用化学气相沉积方法(CVD),正在研究 TiO_2 在 VO_2 上形成的的制备工艺。Saitzek等^[21]在2007年研究了 CeO_2/VO_2 二层膜结构的制备与热色性能。

国内科研工作者对 VO_2 也开展了不少工作,但这些工作主要集中在 VO_2 的制备工艺与热色性能的研究等方面。中山大学郑臣谋等^[22-23]主要研究了 VO_2 纳米粉体的制备工艺;上海大学的Peng与Jian^[24]和四川大学的黄维刚等^[22]分别考察了金属掺杂的 VO_2 纳米粉体的相变特性。同济大学吴卫和等^[25]与兰州物理研究所刘向等^[26]利用溅射成膜方法分别研究了高价态金属掺杂对 VO_2 薄膜相变温度与光学特性的影响。华中科技大学的张驰等^[27]主要研究了热处理工艺以及缓冲层对 VO_2 纳米薄膜相变温度的影响。中国科学院电子学研究所Wang^[28]、国防科技大学吕凤军与斯永敏^[29]、哈尔滨工业大学刘金城等^[30]分别研究了 VO_2 薄膜磁控溅射镀膜工艺,包括衬底温度、溅射功率、工作气压、氧分压、退火处理等对 VO_2 组份与

薄膜导电性能的影响。

而对于 VO_2 热色玻璃的研究与开发, 就目前公开报道的文献材料来看, 国内在这方面开展的实质性工作非常少, 但可见光透过率的问题以及减反射技术的应用, 已经引起了不少科研工作者的注意^[31-33]。

1.3 本论文的研究内容

虽然国内外很多的科研机构和公司都投入了大量的人力、物力和财力进行智能玻璃的研究与开发, 但是目前他们还主要是专注于材料本身的性能研究及制备工作, 而对智能玻璃应用于建筑后的节能效果除西方学者曾对电致变色和聚合物型热色玻璃做过许多有益的探讨外, 其他几乎是一片空白, 因此有必要对此做进一步的研究。

本文分别选取主动式和被动式智能玻璃其中的一种电致变色玻璃和 VO_2 热色玻璃, 采用动态能耗分析软件 EnergyPlus^[34]对其建筑节能特性进行分析。

电致变色玻璃窗的控制方式是影响其节能效果的重要因素, 因此本论文将重点分析不同的控制方式对建筑能耗的影响。

VO_2 热色玻璃是目前研究最多的一种热致变色玻璃, 现在主要存在着可见光透过率低、太阳能调节量低、发射率高等问题^[35], 本文将通过光学薄膜的设计与优化提高 VO_2 热色玻璃的光学性能, 同时对 VO_2 外观颜色的改变做以初步的探讨, 然后将重点研究不同外界环境条件下 VO_2 热色玻璃的热学性能, 最后结合不同地区的气候特点综合评价 VO_2 热色玻璃的节能效果。

第二章 建筑能耗计算方法及模拟软件

2.1 建筑能耗计算方法

由于节能的需要和计算机的发展,研究建筑物冷、热负荷的计算方法得到迅速发展。建筑物耗热量指标的计算方法很多,根据计算方法所依据的数学模型,可以分为两类:一类是建立在稳定传热理论基础上的简易估算法;另一类是建立在不稳定传热理论基础上的动态模拟法^[36]。

2.1.1 稳态法

稳态法的特点是简易,它将供暖期或供暖期中的各旬、各月的热耗量按稳定传热进行计算,而不考虑各部分围护结构的蓄热影响,由于采暖时间较长,温度的日际波动周期也较长,围护结构蓄热对整个采暖期耗热量的影响甚微;而且对于通常的工程设计来说,一般只需知道整个建筑或单位建筑在一个采暖期内的耗热量,并不需要详细掌握热耗随时间变化的具体情况。因此,在工程界,稳态计算方法被广发采用。稳态法包括:有效传热系数法、度日法、BIN方法、温度湿频法及满负荷系数法等。

2.1.2 动态法

动态模拟法对各种影响因素考虑较细,得出的结果也比较精确。应用动态模拟法进行热耗量计算时,必须借助计算机来完成。由于随机气象模型研究工作的进展和电子计算机的飞速发展,建筑热环境的随机分析从20世纪80年代起,国内很多学者致力于此方面的研究,取得的巨大的成果,使得动态模拟现在已经在各个研究机构和大专院校普及开来。动态法主要包括:反应系数法/传递函数法、有限差分或有限元等数值方法。

2.2 建筑能耗模拟软件

世界上有很多用来设计或分析建筑及暖通空调系统的软件,它们具有不同的

功能和复杂程度，面向不同的用户，大致可分为以下四大类^[36,37]。

(1) 设计用软件 (Practitioner Design Tools): 建筑师、工程师等用来进行建筑及系统设计的软件，如 AutoCAD;

(2) 建筑全能耗分析软件: 用来模拟建筑及系统的实际运行状况，从而预测年运行能耗和费用的软件;

(3) 能耗与环境影响分析软件 (Energy and Environmental Screening Tools): 主要用来分析采用新的节能技术所带来的经济及环境效益，往往对计算进行简化，输入也比较简单，并能够迅速地给出比较直观的结果;

(4) 专业分析软件 (Specialized Analysis Tools): 应用于科研，拥有专门开发的精确的模型，例如计算流体力学 (CFD) 模拟软件 Fluent、照明模拟软件 Radiance 等。

建筑全能耗分析软件可以用来模拟建筑及空调系统全年逐时的负荷及能耗，有助于建筑师和工程师从整个建筑设计过程来考虑如何节能。大多数的建筑全能耗分析软件由四个主要模块构成：负荷模块 (Loads)、系统模块 (Systems)、设备模块 (Plants) 和经济模块 (Economics) ——LSPE。这四个模块相互联系形成一个建筑系统模型。

目前世界上比较流行的建筑全能耗分析软件主要有：Energy-10、TRACE、DOE-2、BLAST、EnergyPlus、TRNSYS、DeST 等。这些软件具有各自的特点，下面将重点介绍本文计算中所采用的新一代建筑全能耗分析软件 EnergyPlus^[38]。

2.2.1 开发背景

EnergyPlus 是一个建筑全能耗分析软件 (Whole Building Energy Analysis Tool)。它是在能耗分析 BLAST (Building Load And System Thermodynamic) 和 DOE-2 的基础上研制开发的。BLAST 和 DOE-2 是分别由美国国防部和美国能源部资助开发的两种功能相似的能耗分析软件，在过去几十年的发展中，这两种程序的适用范围和计算结果的准确性均在世界范围内获得了广泛的认可。然而随着近些年来计算机技术的发展，这两种软件的进一步开发出现了很多问题。一方面：

由于 BLAST 和 DOE-2 采用的都是较低版本的 Fortran77 语言编写,其语言非通用化结构特点制约着软件的开发,使其难以跟上现代软件的发展步伐。另一方面,旧有的计算机模拟理论(非模块化思维等)使得源程序代码的维护、修改及二次开发均变得困难,并且随着软件功能的日益扩展,其程序代码也变得越来越“臃肿”,为了修改或者开发软件的某项功能,设计者不得不先花费大量的时间去熟悉整个软件,并且大部分时间是去了解与其修改内容并无关联的程序代码,而这必然造成时间和费用上的巨大浪费。与此同时,很多人也曾质疑为什么美国政府会同时资助两个功能相似的软件的开发。虽然早在 1994 年初,便有专家提出关于联合开发 BLAST 和 DOE-2 的建议。但直到 1995 年,美国国防部由于受财政预算限制决定中止开发 BLAST,才使这种建议变得可能。1996 年,在美国能源部的资助下,原来 BLAST 和 DOE-2 的开发人员合并一处,决定开发一个全新的能耗分析软件——EnergyPlus。而 BLAST 和 DOE-2 也将分别于 1998 年春季推出最后一个版本后退出历史舞台,而作为其替代产物 EnergyPlus 则于 2001 正式推出了其第一个版本。

2.2.2 负荷模拟

EnergyPlus 是一个建筑能耗逐时模拟引擎,采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法。在计算负荷时,时间步长可由用户选择,一般为 10~15min。在系统的模拟中,软件会自动设定更短的步长(小至数秒,大至 1h) 以便于更快地收敛。EnergyPlus 采用 CTF 来计算墙体传热,采用热平衡法计算负荷。CTF 实质上还是一种反应系数法,但它的计算更为精确,因为它是基于墙体的内表面温度,而不同于一般的基于室内空气温度的反应系数法。热平衡法是室内空气、围护结构内外表面之间的热平衡方程组的精确求解方法,它突破了传递函数法的种种局限,如表面传热系数和太阳辐射得热可以随时间变化等。在每个时间步长,程序自建筑内表面开始计算对流、辐射和传湿。由于程序计算墙体内表面的温度,因此可以模拟辐射式供热与供冷系统,并对热舒适进行评估。区域之间的气流交换可以通过定义流量和时间表来进行简单的模拟,也可以通过程序链接的 COMIS (LBNL 开发的用来模拟建筑外围护结构的渗透、区域之间的气流与污染物交换的免费专业分析软件) 模块对自然通风、机械通风及烟囱效应等引起的区域间的气流和污染物的

交换进行详细的模拟。窗户的传热和多层玻璃的太阳辐射得热可以用 WINDOW5^[39] (LBNL开发的计算窗户热性能免费专业分析软件) 计算。遮阳装置可以由用户设定, 根据室外温度或太阳入射角进行控制。人工照明可以根据日光照明进行调节。在EnergyPlus中采用各向异性的天空模型对DOE-2的日光照明模型进行了改进, 以更为精确地模拟倾斜表面上的天空散射强度。

2.2.3 系统模拟

EnergyPlus采用模块化的系统模拟方法, 时间步长可变。空调系统由多个部件构成, 这些部件包括风机、冷热水及直接蒸发盘管、加湿器、转轮除湿装置、蒸发冷却装置、变风量末端装置、风机盘管等。部件的模型有的简单, 有的复杂, 输入的复杂性也不同。这些部件由模拟实际建筑管网的水或空气环路连接起来, 每个部件的前后都需设定一个节点, 以便连接。这些连接起来的部件还可以与房间进行多环路的连接, 因此可以模拟双空气环路的空调系统, 如独立式新风系统 (dedicated outdoor air system, DOAS)。一些常用的空调系统类型和配置已做成模块, 包括双风道的定风量空气系统和变风量空气系统、单风道的定风量空气系统和变风量空气系统、组合式直接蒸发系统、热泵、辐射式供热和供冷系统、水环热泵、地源热泵等。

2.2.4 设备模拟

EnergyPlus 模拟的冷热源设备包括吸收式制冷机、电制冷机、引擎驱动的制冷机、燃气轮机制冷机、锅炉、冷却塔、柴油发电机、燃气轮机、太阳能电池等。这些设备分别用冷水、热水和冷却水回路连接起来。设备模拟采用曲线拟合法。

2.2.6 计算思路

BLAST 和 DOE-2 采用的都是顺序模拟的计算思路。即按照建筑物负荷, 空气处理设备负荷, 和中心冷/热站负荷的顺序依次进行模拟计算, 而在这几者之间并没有相互的反馈处理。EnergyPlus 则体现的是一种整体模拟思路, 即首先根据用户定义的室外气象条件、围护结构情况以及所要控制的室内热环境的温湿

度状态等,计算出在一定的时间步长内的室内热负荷情况,并将其负荷状况在这个计算时间步长内传给系统设备模拟模块。接下来的过程,系统设备模拟模块计算出该负荷状况下供热或制冷系统所对应的设备负荷。并将该设备负荷在下一个计算时间步长内反馈给热质平衡模拟模块,并对比设备负荷状况是否与房间负荷状况匹配,如果不匹配,则根据反馈的负荷情况相应调整室内热环境的状态值。由于空间温度的精确预测与诸如设备选型、系统容量、人员舒适性和健康等多方面的情况都是紧密相关的,所以通过使用这种整体模拟技术,原来 BLAST 和 DOE-2 顺序模拟方法所导致的最大缺陷——由于没有 HVAC 系统设备负荷反馈所导致的空间温度的不精确问题将被克服。

2.2.5 EnergyPlus的特点及应用

EnergyPlus 具有以下主要特点:

- (1) 采用集成同步的负荷/系统/设备的模拟方法。
- (2) 在计算负荷时,用户可以定义小于1 h的时间步长;在系统模拟中,时间步长自动调整,以加快收敛。
- (3) 采用热平衡法模拟负荷。
- (4) 采用CTF模拟墙体、屋顶、地板等的瞬态传热。
- (5) 采用三维有限差分土壤模型和简化的解析方法对土壤传热进行模拟。
- (6) 采用联立的传热和传质模型对墙体的传热和传湿进行模拟。
- (7) 采用基于人体活动量、室内温湿度等参数的热舒适模型模拟热舒适度。
- (8) 采用各向异性的天空模型以改进倾斜表面的天空散射强度。
- (9) 先进的窗户传热的计算,可以模拟包括可控的遮阳装置、可调光的电致变色玻璃等。
- (10) 日光照明的模拟,包括室内照度的计算、眩光的模拟和控制、人工照明的减少对负荷的影响等。
- (11) 基于环路的可调整结构的空调系统模拟,用户可以模拟典型的系统,

而无需修改源程序。

(12) 与一些常用的模拟软件链接, 如WINDOW5, COMIS, TRNSYS, SPARK等, 以使用户对建筑系统作更详细的模拟。

(13) 源代码开放, 用户可以根据自己的需要加入新的模块或功能。

作为新一代的建筑能耗分析软件, EnergyPlus 在相关的研究领域已得到了一定范围的应用和发展^[40]。天津大学刘洋等^[41]使用 EnergyPlus 对天津某住宅小区的建筑能耗进行了一定周期的模拟计算, 比较分析了模拟计算和实际测量的结果, 认为 EnergyPlus 能够用于建筑能量动态负荷的定量计算和定性分析。Bojci 等^[42]利用 EnergyPlus 对某香港典型高层建筑采用三种不同玻璃材料后的建筑能耗的影响进行了评估分析, 认为对于香港的公共高层建筑而言, 使用昂贵的高级玻璃材料以降低空调能耗费用并不合算。哈尔滨工业大学高甫生等^[43]采用 EnergyPlus, 以某博览中心展厅为建筑模型, 对采用不同玻璃的玻璃幕墙建筑设计日冷、热负荷及月能耗和全年能耗进行了模拟计算, 以分析玻璃类型和地理位置对玻璃幕墙建筑能耗的影响。同济大学蒋葛等^[44]结合 Airpark 和 EnergyPlus 对采用双层皮玻璃幕墙(Double-skin facade, 简称 DSF)的一个简单标准建筑模型进行了模拟计算, 以分析 DSF 对建筑能耗的影响。

Hsieh 等^[45]运行 EnergyPlus 对台北大安地区的居民楼和商用楼进行了模拟计算。在此基础上, 结合地理信息收集系统(Geographical information system, 简称 GIS)提供的地理数据分析了该地区的建筑排热情况, 并提出了四种降低建筑排热的策略。Miyazaki^[46]等人运用 EnergyPlus 对一种复合玻璃窗对建筑能耗的影响进行了模拟分析。该窗由两层玻璃和一层半透明太阳能板组成, 通过比较计算得出了使建筑能耗最低的最佳太阳能板透射率和最佳窗墙比。天津大学田晶等^[47]利用 EnergyPlus 分析建筑热敏感性以及夏季室内设计温度不同时城市热岛对办公建筑冷负荷的影响。北京工业大学曾源等^[48]运用 EnergyPlus 对北京某高层写字楼进行了能耗及节能控制策略的模拟, 并根据模拟结果对该大厦的楼宇控制系统进行了设计, 实现了建筑能耗模拟和楼宇控制系统节能运行的人工连接。

同济大学潘毅群等^[38]运用 EnergyPlus 对卡内基梅隆大学一座名为 BAPP(Building as power plant, 以建筑为热电厂的示范教学办公楼)所采用的冷热

电三联供系统进行了全年模拟,并根据模拟结果对整个系统进行了全年能耗和经济性分析。大连理工大学孟世荣等^[49]采用 EnergyPlus 对冬季集热蓄热式太阳能建筑的动态能耗进行了模拟研究,计算了无辅助热源时通过建筑围护结构的各种形式传热量和有辅助热源时的采暖负荷。模拟结果表明,当室内无辅助热源时,集热蓄热墙能显著增加室内得热,提高室内温度,室内负荷的动态模拟结果将是被动式太阳能建筑的辅助能源运行方案、设备选择的基础。上海交通大学周宴平等^[50]在自主开发的变频多联空调模型的基础上,以某一简单建筑模型为对象,对变频多联空调机组进行了模拟,并与变风量(VAV)系统和风机盘管加新风系统的比较,验证了变频多联空调系统的节能性。

在 EnergyPlus 的二次开发方面,Ihm 等^[51]在能耗分析软件 BLAST 原有的冰蓄冷模型的基础上开发了 EnergyPlus 的冰蓄冷模型。上海交通大学周宴平等^[50]在 EnergyPlus 的基础上进行了二次开发,运用 Fortran90 编写了变频多联空调系统的模型,通过模拟计算结果与实验数据的对比验证了模型的正确性。天津大学刘俊杰等^[52]采用混合语言编程的思想,运用 VB6.0 开发出功能齐全、简单汉化用户界面,以 EnergyPlus 为内部计算引擎的能耗分析软件。

英国 DesignBuilder 软件公司开发了以 EnergyPlus 为计算引擎的能耗分析软件 DesignBuilder^[53]。该软件有良好的用户界面,能够大大降低建筑建模的难度和内部负荷等各种参数的输入设置时间。同时,软件自带了较为完善的参数标准数据库和模板。此外,软件还可以对 EnergyPlus 的模拟计算结果进行后处理,输出模拟结果的曲线图和 EnergyPlus 所采用的 IDF(Input Data File,输入数据文件)格式文件。但由于 DesignBuilder 开发时间不长,其所支持的空调系统装置还较少,如果建筑对象采用较为复杂的空调系统或其空调系统的运行策略较为复杂时,则需在 EnergyPlus 中进行进一步的输入和设置。

第三章 电致变色玻璃节能特性分析

如前文所述,电致变色是指材料在电场的作用下价态与化学组分发生可逆变化,导致其光学性质也发生变化,从而产生变色的现象。电致变色玻璃窗就是利用材料的这一特性实现对太阳光的动态调节。目前,国内外很多大学和科研机构均在从事这方面的研究和开发工作,其中工作的一个重点就是选择适当的控制方式调节太阳光的输入,以达到最大限度地降低建筑的能耗和提高用户的舒适性的目的。本章首先介绍电致变色玻璃窗的控制方式,然后结合某一典型的办公室房间分析比较了在北京地区气候条件下不同的控制方式对建筑照明能耗、供热能耗以及供冷能耗的影响。

3.1 电致变色玻璃控制方式

可以采取两种系统调节电致变色玻璃的状态:开/关系统和线性控制系统^[54]。图 1a 为开/关系统,它表示当某一控制参数小于转换点 I 时,电致变色玻璃处于漂白态 (bleach),即玻璃在完全透明状态下运行,而当这一控制参数大于转换点 I 时,玻璃处于着色态 (coloured),即玻璃在完全着色状态下运行;图 2b 为线性控制系统,当控制参数小于 I 及大于 DI 时,玻璃分别处于漂白态和着色态,而处于之间时,玻璃的光学参数则随控制参数的变化而线性变化。控制参数不仅可以是太阳辐射强度,也可以是温度、照度、房间负荷等,也可以是这些参数相互之间的组合。此外, I、DI 也可视为时间点,表示在不同时间段内,玻璃处于不同的状态。

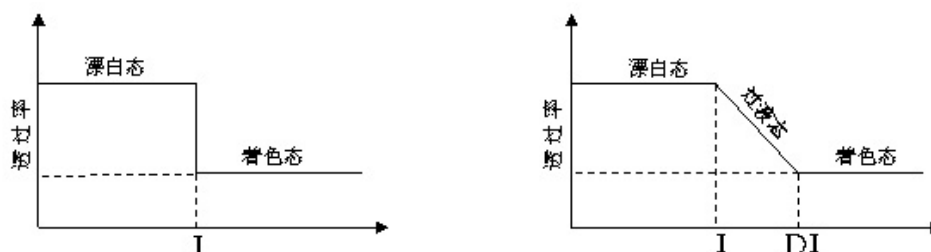


图 1 电致变色玻璃窗开/关与线性控制系统^[9]

不同类型的控制参数构成了不同的控制方式,这些方式各有其特点。

Sullivan^[55]研究美国加利福尼亚一全年以冷负荷为主的的城市发现,当照明负荷为建筑能耗必须考虑的重要组成部分时,以日光照度做为控制参数转换点能够更好地降低建筑能耗,而当照明负荷可以忽略时,以房间冷负荷作为转换点能够更好地减少房间太阳辐射得热。Karlsson^[56]认为以太阳辐射强度或房间照度与以温度或空间负荷作为转换点相比,前者能够更好的提高人体舒适性。Gugliermetti^[57]以太阳辐射强度做为转换点,分析了地中海气候条件下的三个城市分别采用开/关和线性控制方式时建筑能耗情况,结果表明,采用线性控制方式能够提供比开/关方式更好的舒适性,然而采用两种方式所计算出的建筑能耗却相差无几。

为简化计算,本文仅分析开/关控制系统下选取不同类型参数的控制方式时建筑能耗的变化情况,具体方式如下:

- (1) 电致变色玻璃全年处于漂白态。
- (2) 电致变色玻璃全年处于着色态。
- (3) 5.01—9.30 日着色态运行, 10.01—4.30 日漂白态运行。
- (4) 5.01—9.30 日 11:00 至 15:00 着色态运行,其余时间段内均为漂白态运行。
- (5) 设置点的照度小于 500lux 时漂白态运行,其余时间段内均为漂白态运行。
- (6) 房间温度达到 26℃时着色态运行,其余时间段内均为漂白态运行。
- (7) 户外温度大于 20℃着色态运行,反之漂白态运行。
- (8) 窗户上的太阳辐射强度大于 350W/m²着色态运行,反之漂白态运行。
- (9) 户外温度大于 20℃并且窗户上的太阳辐射强度大于 350W/m²着色态运行,反之漂白态运行。

上述控制方式中,1-4 均属于以时间为转换点的计划控制方式,6、7 是分别以室内和户外温度为转换点的控制方式,5、8 分别以房间照度和窗户外太阳辐射强度为转换点的控制方式,9 则是由方式 7 和 8 构成的组合控制方式。

3.2 建筑能耗分析

3.2.1 建筑模型

模型为北京某幢三层建筑物中的一房间，该房间的建筑平面图如图 2 所示，该房间是 3.2 m 高的办公室，其南向窗台高 0.75 m，窗墙面积比为 51.1%，东、西、北向以及上下楼板均与结构相似的空调房间相邻。建筑维护结构材料列于表 1。

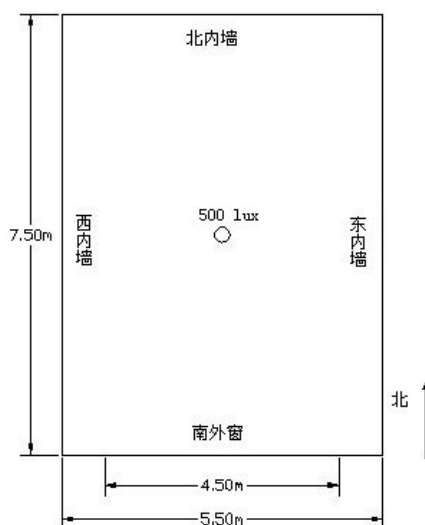


图 2 建筑平面图

室内天花板、墙壁和地板的可见光的反射率分别为 70%，70%和 35%，热红外的反射率均为 90%。光源采用 300 W 的荧光灯，发出的光线中可见光占 37%、热红外部分占 18%，其余能量通过对流形式直接散发到房间空气中。照度参考点（500 lux）设置在距地板高度 0.75 m 的房间平面的中心，光源功率可以根据参考点照度的变化线性可调。

表 1 建筑材料

外墙 mm	内墙 mm	屋面 mm	楼板 mm	地面 mm
外抹白灰砂浆面 25	内抹水泥砂浆 20	水泥粗砂焦渣垫层 15	混凝土 200	混凝土 200
聚苯板 25	砖 200	聚氨酯涂膜防水层 10	内抹水泥砂浆 20	
混凝土 200	内抹水泥砂浆 20	聚苯乙烯保温板 25		
内抹水泥砂浆面 20		钢筋混凝土 200		
		内抹水泥砂浆 20		

3.2.2 玻璃性能参数

玻璃窗的性能参数由窗户性能分析软件 WINDOW5.0 计算得到,结果列于表 2,其中 1 号玻璃窗的组成结构为 6 mm 电致变色玻璃+13 mm 空气+6 mm 白玻,2 号玻璃窗的组成结构为 6 mm 电致变色玻璃+13 mm 空气+6 mm LOW-E 玻璃,电致变色玻璃、白玻、LOW-E 玻璃的光学数据均来源于文献[58]。

表 2 双层玻璃性能参数

	玻璃窗类型	传热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	太阳得热系数/%	可见光透过率/%
1 号玻璃窗	EC bleached/clear	2.67	73	75
	EC colored/clear	2.67	21	11
2 号玻璃窗	EC bleached/LOW-E	1.77	62	72
	EC colored/LOW-E	1.77	15	11

3.2.3 计算条件

采用 EnergyPlus 软件计算,模拟时间为每天 8:00~18:00,空气渗透量假定为 0.25ACH,不考虑人员及除荧光灯以外的其它设备的散热,采用国际典型气象年(IWEC)数据,空调温度设定为 26℃,采暖温度设定为 20℃。

3.3 计算结果及其分析

图 3(a)、(b)分别为电致变色/白玻、电致变色/LOW-E 双层玻璃在各种控制方式下房间的照明负荷、热负荷和冷负荷,其中控制方式 1 与 2 为电致变色玻璃在两种极端状态运行,此时电致变色玻璃分别相当于普通白玻、热吸收玻璃。由于方式 1 下玻璃的太阳得热系数和可见光透过率全年都处于极大值,因此可以保证全年有最低的照明和热负荷,但也由此造成了较高的冷负荷。方式 2 虽然太阳得热系数全年都处于最小值,但由于可见光透过率也处于最小值,这就不可避免的造成了较高的照明负荷,同时由于照明负荷的增加,光源对外散失的热量也增加,由此导致房间的冷负荷与其它几种控制方式相比也不是最小值。

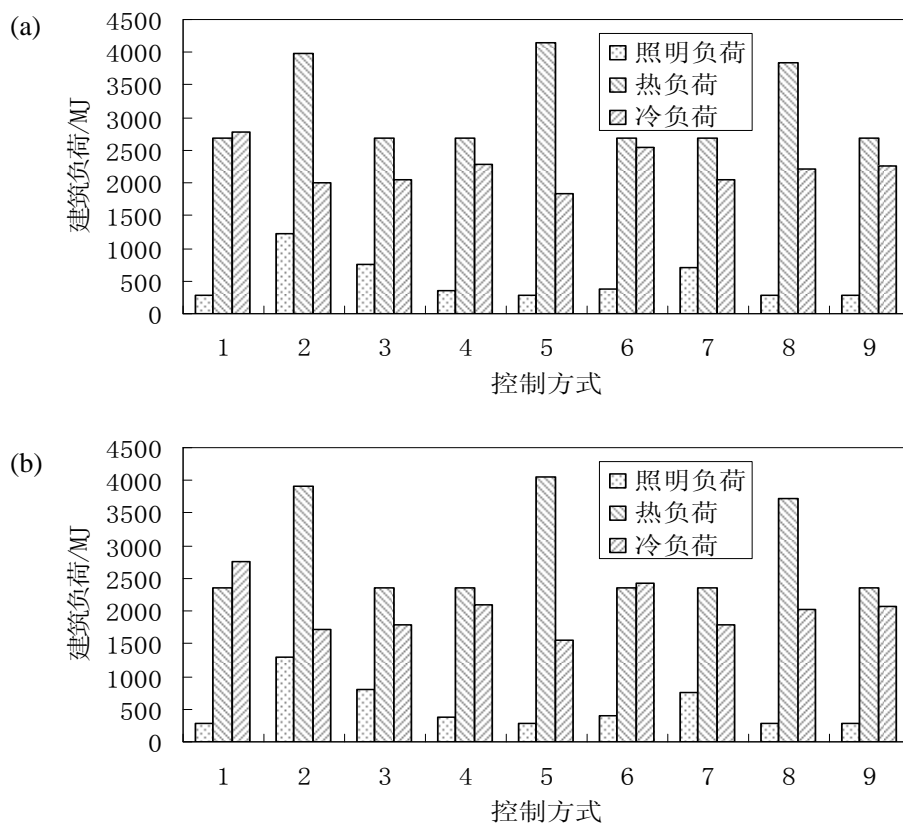


图3 不同控制方式下房间的照明负荷、热负荷和冷负荷

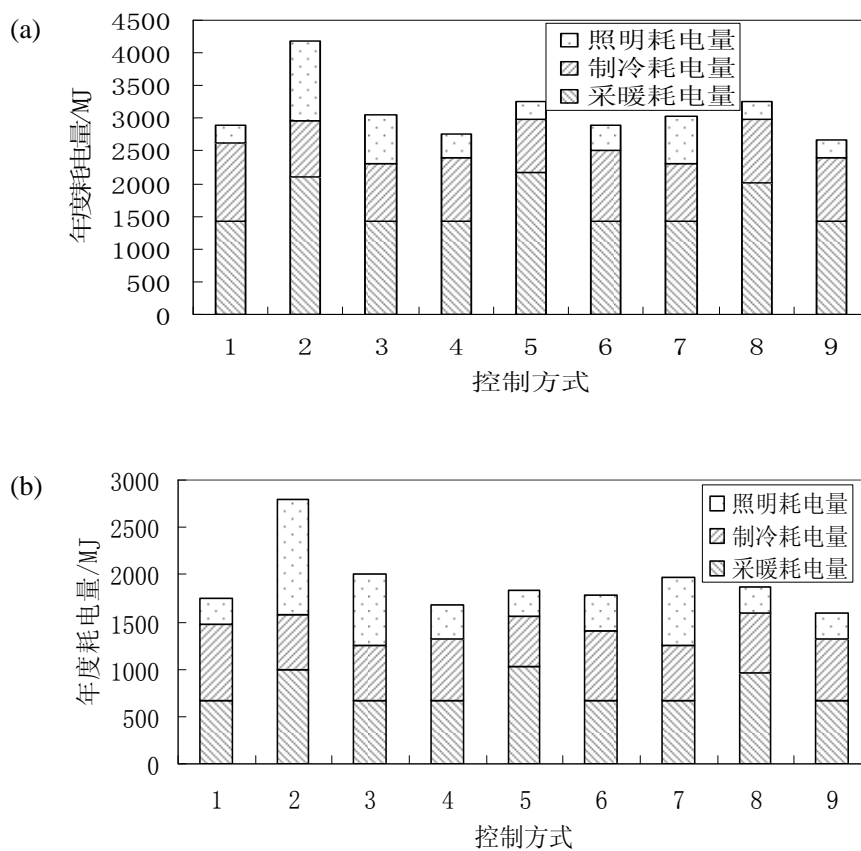


图4 电致变色/白玻在不同控制方式下房间的耗电量

为了比较各种控制方式的综合性能，利用公式 $E=W+Q_h/\varepsilon_h+Q_c/\varepsilon_c$ 把照明负荷、热负荷和冷负荷全部折合为耗电量，式中 E 为耗电量， W 、 Q_h 和 Q_c 分别为照明负荷、热负荷和冷负荷， ε_h 、 ε_c 分别为房间热力系统的采暖能效比和制冷能效比。图 5、6 中 a 采用的是某中央空调 HVAC 系统，采暖能效比 ε_h 取值为 1.9，制冷能效比 ε_c 取值为 2.3；b 为某空调热泵系统，采暖、制冷能效比 ε_h 、 ε_c 分别取值为 4.0，3.49。从图中可以看出，虽然采用的空调设备的能效比不同，但由于方式 9 同时兼顾了照明、采暖和供冷，消耗的电力在 9 种控制方式中是最小的，与方式 1、2 相比，电致变色/白玻在 a 系统下分别节能 7.9%、36.3%，在 b 系统下节能 8.6%、43.0%；电致变色/LOW-E 在 a 系统下分别节能 10.7%、68.9%，在 b 系统下节能 11.4%、88.1%；。而方式 3、5、7、8 耗电量反而高于方式 1，说明如果控制方式选用不当，房间采用电致变色玻璃玻璃窗后的的能耗反而会高于普通白玻。同时可以看到，控制方式 3 和 7 冷、热负荷的耗电总量是所有方式中最小的，说明该房间如果对照明要求不高，选用这两种控制方式是比较合适的。

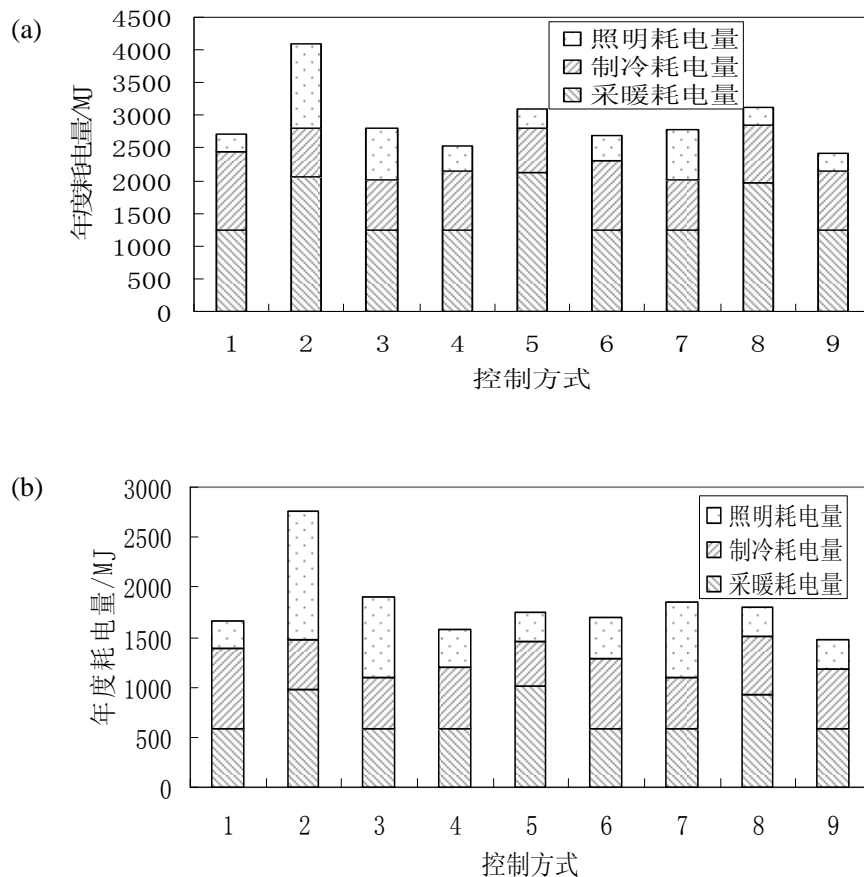


图 5 电致变色/LOW-E 玻璃在不同控制方式下房间的耗电量

此外，虽然在各种控制方式下电致变色/ LOW-E 的照明耗电量都要高于电致变色/白玻，但总的节能效果前者要高于后者，比如在 a、b 空调系统下采用控制方式 9，前者分别比后者节能 9.0%、7.5%，说明采用 LOW-E 与电致变色玻璃组合而成的窗户可以进一步降低建筑的能耗。

第四章 VO₂ 热色玻璃节能特性分析

4.1 VO₂ 光学薄膜结构的优化

4.1.1 薄膜设计的基本原理

在没有个人计算机之前,人们为了计算反射率和透射率,采用过菲涅尔系数递推法、菲涅尔系数矩阵法,也采用过导纳递推法和导纳矩阵法,但是在个人计算机普及的今天,几乎所有的膜系设计软件都采用导纳矩阵法^[59]。

采用导纳矩阵法推导多层介质膜与基底组合的等效光学导纳 Y 与介质膜层及基底结构参数之间的定量关系式,其方法与单层介质膜时等效光学导纳的求法完全相同,即基本思想仍是等效界面思想。基本方法为:①在每一界面运用电磁场边界条件公式,将同一界面两侧的电磁场联系起来;②利用与电磁场传播相伴的位相差,将同一膜层中上下两界面内侧的电磁场联系起来。

对于 k 层膜系,其与基底组成的特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{pmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

其中 η_j 是第 j 层膜的导纳, δ_j 是第 j 层膜的相位厚度, η_{k+1} 是基底介质的导纳。多层膜与基片的组合导纳为 $Y=C/B$, 则膜系的反射率和透射率分别为

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (4-2)$$

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (4-3)$$

其中 η_0 为入射介质的导纳。通过式(4-2)、(4-3)可以计算出 300~2500nm 的太阳光谱波长范围内,膜系的太阳能反射率和透射率,可见光反射率和透射率。根据膜系在 2500nm 附近反射率的大小及变化趋势,可以直观地判定膜系发射率

的高低,另外还可以根据薄膜的反射和透射光谱依照色度学理论^[60],计算膜系透过颜色与反射颜色的色度坐标,参照色度图,确定出薄膜的反射和透射的颜色。

4.1.2 膜系结构与计算数据

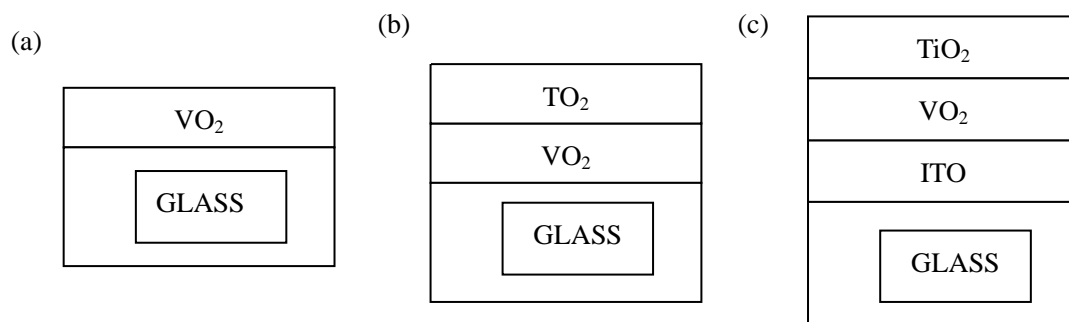


图1 膜层结构

本文计算中所提到的单层膜、双层膜、三层膜结构分别如图1(a)、(b)、(c)所示。所用到 VO_2 、ITO的光学常数均来源于实验数据,图2为在 20°C 和 90°C 下测量的 VO_2 的 n 、 k 值,在这两种温度下, VO_2 分别处于半导体(S相)和金属(M相)状态。从图中可以看出,两种状态 VO_2 的光学常数在可见光区域($380\sim 780\text{nm}$)变化很小,而在红外部分变化很大,因此就可以通过合适的膜系设计,使 VO_2 热色玻璃在两种下的可见光透过率相差很小的情况下,使太阳能调节量达到最大。

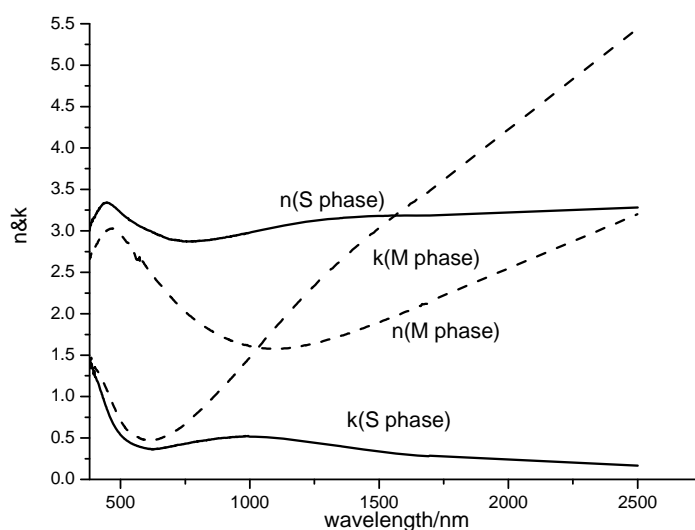


图2 VO_2 的光学常数

图 3 为 ITO 的光学常数,另外本文计算中所采用的 TiO₂和玻璃的光学常数分别取 2.75 和 1.52,大气质量取 AM 2.0,太阳能、可见光透过率均根据 GB/T 2680-94 计算。

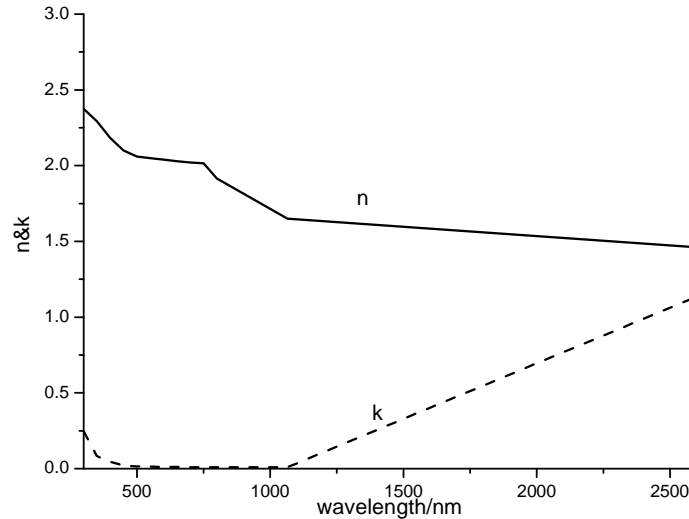


图 3 ITO 的光学常数

4.1.3 计算结果及其分析

4.1.3.1 单层膜结构

图 4、图 5 分别表示 VO₂在不同厚度下的可见光与太阳能透过率, S 表示 VO₂的半导体状态, M 表示其金属状态, S-M 表示太阳能调节量,即 VO₂处于半导体状态时的太阳能透过率与处于金属态时的差值,以下图形中 S、M、S-M 表示义均与此相同。

图 4 表明,在 VO₂薄膜厚度小于 50nm 时,半导体的可见光透过率大于金属态,而在 50nm 以上与之相反,金属态的可见光透过率要高于半导体状态,并且在膜厚小于 50nm 时,两种状态下的可见光透过率均随薄膜厚度的增加而减小,而在 50-80nm 处,半导体态见光的透过率反而随膜厚的增加而有轻微的提高,由此导致在 80nm 处两种状态下的可见光透过率之间的差值达到最大值,以上计算的均与文献[13]一致。

图 5 表明,在 VO₂薄膜厚度小于 50nm 时,太阳能调节量变化很小,在膜厚超

过 50nm 才有显著的增加,薄膜厚度为 145nm 时,太阳能调节量达到最大值 11.8%,而此时半导体与金属状态的可见光透过率分别为 15.4%和 12.2%,如此低的可见光透过率明显无法满足于实际应用。另外,对于 50nm 的 VO_2 薄膜厚度,我们计算的两种状态下的太阳能透过率分别为 37.3%、33.5%,可见光透过率分别为 33.6%、34.0%,根据 2500nm 的反射率估算的光谱发射率分别为 0.777, 0.433,同样存在着太阳能调节量较小,可见光透过率较低,半导体状态时的发射率较高这些问题。

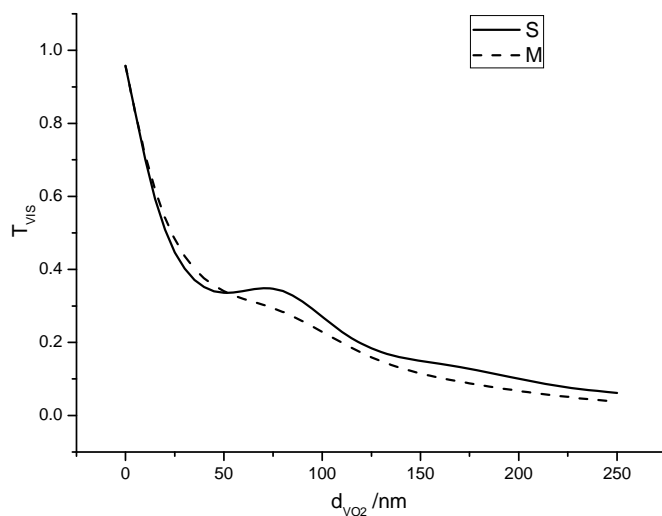


图 4 单层 VO_2 薄膜在不同厚度下的可见光透过率

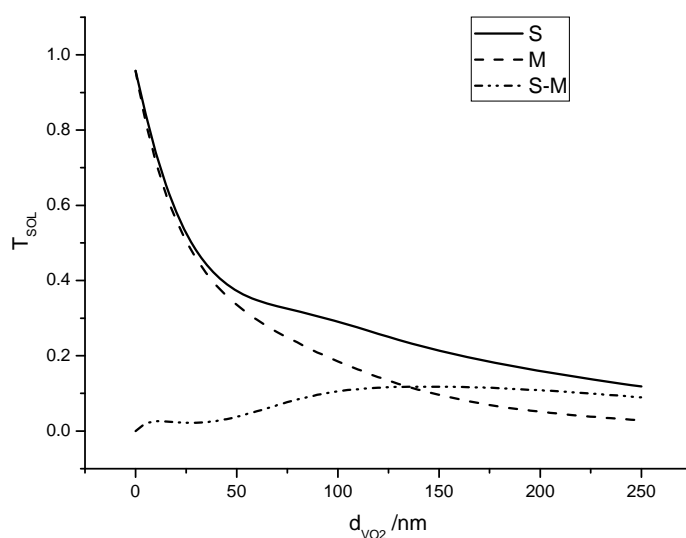


图 5 单层 VO_2 薄膜在不同厚度下的太阳能透过率

4.1.3.2 双层膜结构

图 6、图 7 分别表示 VO₂ 薄膜厚度为 50nm 时，双层薄膜可见光透过率和太阳能透过率与 TiO₂ 厚度的关系。

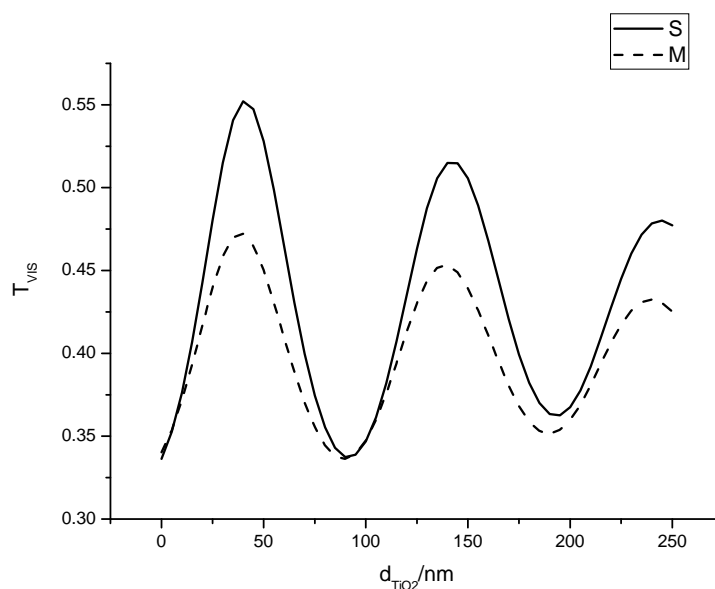


图 6 双层薄膜可见光透过率与 TiO₂ 厚度的关系 ($d_{VO_2}=50nm$)

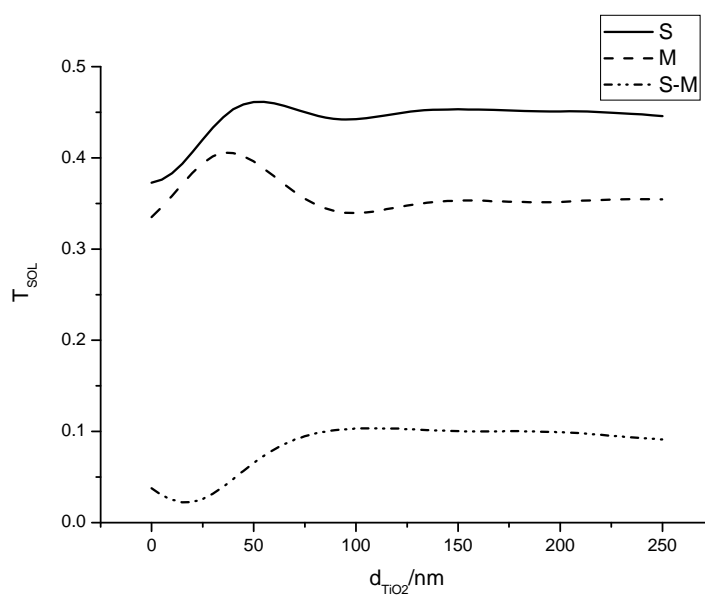


图 7 双层薄膜太阳能透过率与 TiO₂ 厚度的关系 ($d_{VO_2}=50nm$)

从图 6 可以看出, 随着 TiO_2 厚度的增加, 可见光透过率在 $0\sim 200\text{nm}$ 之间出现两个极大值, 分别处在 40nm 与 140nm 处, 其中 $d_{\text{TiO}_2}=40\text{nm}$ 时, 两种状态下薄膜的可见光透过率分别为 55.2% 、 47.2% , $d_{\text{TiO}_2}=140\text{nm}$ 时, 两种状态下薄膜的可见光透过率分别为 51.5% 、 45.3% , 后者略低于前者, 但均高于厚度为 50nm 单层 VO_2 的可见光透过率.

图 7 表明, 太阳能调节量在 TiO_2 厚度为 $20\sim 75\text{nm}$ 之间时随着膜厚的增加而显著提高, 之后趋于稳定, 所以 $d_{\text{TiO}_2}=140\text{nm}$ 对应的太阳能调节量为 10.1% , 而 $d_{\text{TiO}_2}=40\text{nm}$ 对应的太阳能调节量仅为 4.8% , 因此在实际应用中优先选用前者.

4.1.3.3 三层膜结构

表 1 三层膜结构光学性质计算结果统计表

编号	$\Delta T'_{\text{SOL}}$	T_{VIS}		膜厚/nm			ΔT_{SOL}	η
		S(max)	M	d_{TiO_2}	d_{VO_2}	d_{ITO}		
1	$\cong 7\%$	0.615	0.570	145	35	50	0.073	14.2%
2	$\cong 8\%$	0.595	0.542	145	40	45	0.081	16.3%
3	$\cong 9\%$	0.566	0.523	135	45	55	0.090	18.9%
4	$\cong 10\%$	0.524	0.470	135	55	40	0.104	23.4%
5	$\cong 11\%$	0.496	0.445	130	60	40	0.111	25.9%
6	$\cong 12\%$	0.454	0.398	135	65	5	0.120	29.3%
7	$\cong 13\%$	0.399	0.345	125	75	5	0.131	34.3%
8	$\cong 14\%$	0.353	0.302	110	80	0	0.140	38.3%
9		0.224	0.166	80	115	0	0.159	54.1%

对于三层膜结构, 我们以 5nm 为间隔, 分别计算了 TiO_2 、 VO_2 、 ITO 薄膜厚度从 0 到 250nm 太阳能与可见光透过率的变化情况, 对这 132651 组数据进行了统计分析, 结果见表 1。表 1 中编号 1 表示在保证太阳能调节量 $\Delta T'_{\text{SOL}}$ 不低于 7% 的前提下, 半导体状态 VO_2 复合膜结构所能达到的可见光透过率最高值为 0.615 , 此时金属态的可见光透过率为 0.570 , TiO_2 、 VO_2 、 ITO 薄膜厚度分别为 145nm 、 35nm 、 50nm , 在此膜厚下太阳能实际调节量 ΔT_{SOL} 为 0.073 , 太阳能调节率 (太阳能调节量/半导体状态的太阳能透过率) 为 14.2% ; 编号 2 表示在保证太阳能调节量 $\Delta T'_{\text{SOL}}$ 不低于 8% 的前提下, 半导体状态 VO_2 复合膜结构所能达到的可见光透过率最高值为 0.595 , 此时金属态的可见光透过率为 0.542 , TiO_2 、 VO_2 、 ITO 薄膜厚度分别为 145nm 、 40nm 、 45nm , 在此膜厚下太阳能实际调节量 ΔT_{SOL} 为 0.081 , 太阳能调节率为 16.3% ……, 编号 9 表示复合膜所能达到的最大太阳能调节量为

0.159, 调节率为 54.1%, 此时 TiO₂、VO₂、ITO 薄膜厚度分别为 80nm、115nm、0nm, 两种状态下的可见光透过率分别为 0.224 和 0.166。

另外, 从表 1 可以看出, 太阳能调节量随着 VO₂ 薄膜厚度的增加而提高, 而可见光透过率的变化规律与之相反, 因此在实际应用中需要结合建筑的位置和使用情况选择合适的薄膜厚度使其太阳能和可见光透过率都处以合理值。

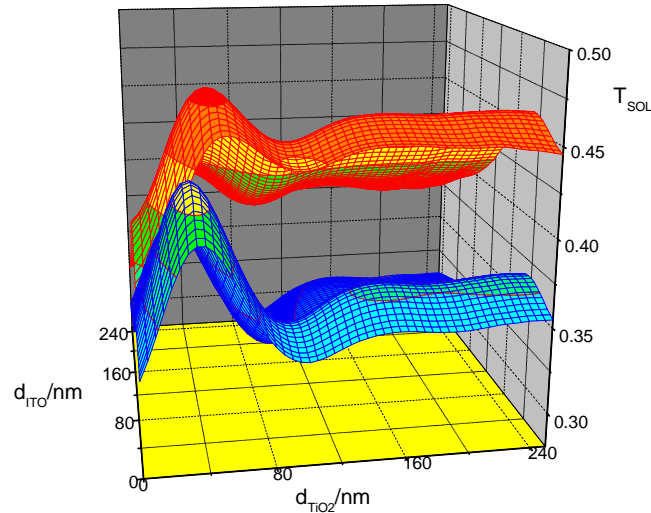


图 8 太阳能透过率与 TiO₂、ITO 膜厚的关系 ($d_{VO_2}=50\text{nm}$)

图 8 表示 VO₂ 薄膜厚度为 50nm 时复合薄膜在两种状态下的透过率与 TiO₂、ITO 膜厚的关系, 其中上部的曲面为 VO₂ 处于半导体状态, 下部的曲面 VO₂ 处于金属状态, 上下曲面的最大垂直距离即太阳能调节量的最大值为 0.104, 与之对应的 TiO₂、ITO 薄膜厚度分别为 95nm、75nm, 此时两种状态下可见光的透过率分别为 0.404、0.382。为了进一步提高薄膜的可见光透过率, 我们计算了不同 TiO₂、ITO 厚度下复合薄膜在两种状态下的可见光透过率, 如图 9(a)、(b) 所示。结合图 10(a)、(b) 可知, 在 TiO₂、ITO 膜厚分别从 0 变化到 250nm 的过程中, 两种状态下的可见光透过率均出现六个极大值点, 并且两种状态在各个极大值点对应的位置也基本相同。表 2 具体列出了六个极大值点对应的各种参数, 从中可以看出, 在这六种膜系下的可见光透过率均高于单层 VO₂ 薄膜, 其中 1#膜系所能达到的可见光透过率最大, 两种状态下可见光透过率分别为 58.2%, 52.1%, 但此时太阳能调节量仅为 4.2%。综合考虑各种因素, 我们认为 3#膜系为优化的最佳结果, 在这种膜系下两种状态下的可见光透过率分别为 55.5%, 50.0% (50nm 单层 VO₂

膜: 33.6%, 34.0%), 太阳能调节量为 9.7% (50nm 单层 VO_2 膜: 3.8%), 根据 2500nm 的反射率估算的光谱发射率分别为 0.502, 0.394 (50nm 单层 VO_2 膜: 0.777, 0.433)。此外, 表 2 还给出了各种膜系下计算出来的反射和透射颜色, 从表中可以看出, 虽然不同膜层厚度对应的透射色基本是一致的, 但其反射色却有着粉红、粉黄、浅蓝等颜色的变化, 因此我们可以通过调整膜层的厚度来改变 VO_2 热色玻璃的外观颜色。

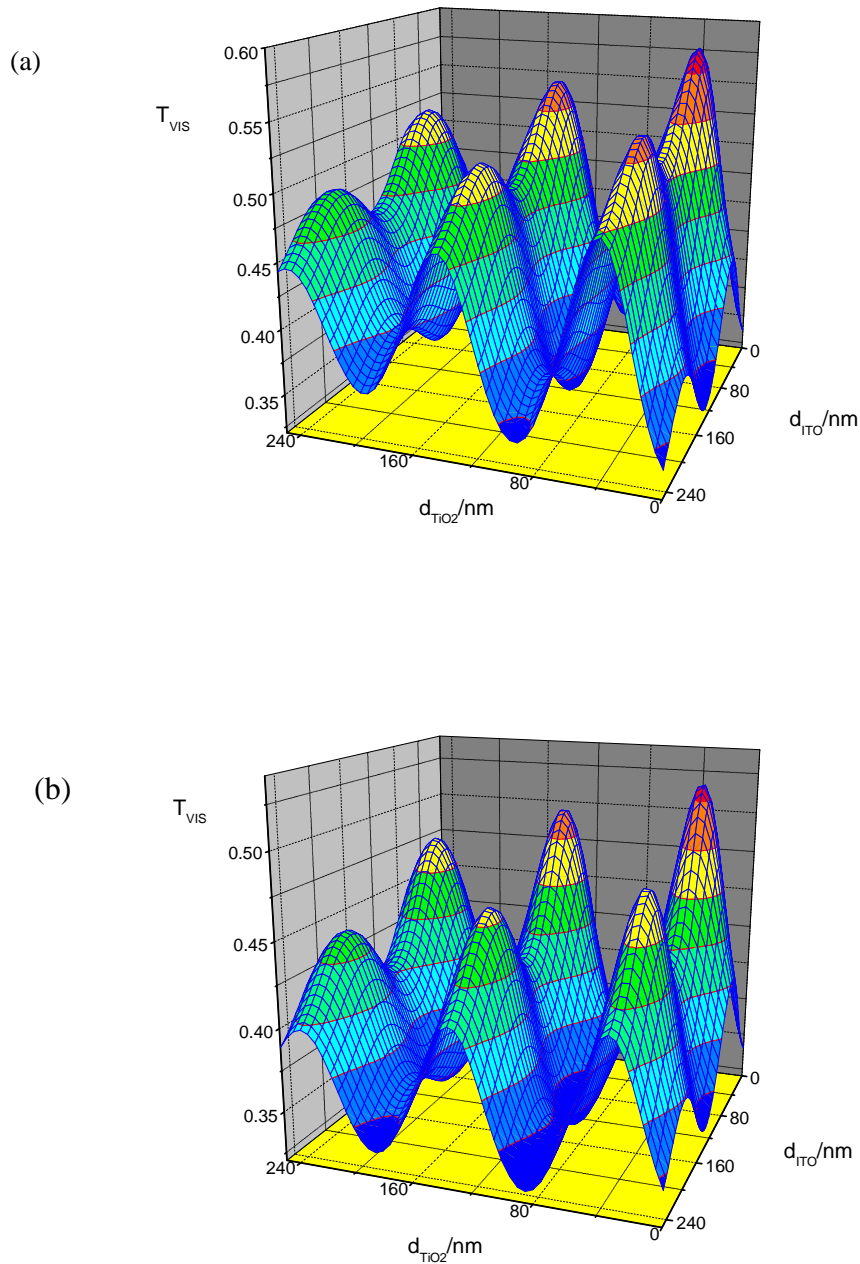


图 9 可见光透过率与 TiO_2 、ITO 膜厚的关系 ($d_{\text{VO}_2}=50\text{nm}$)

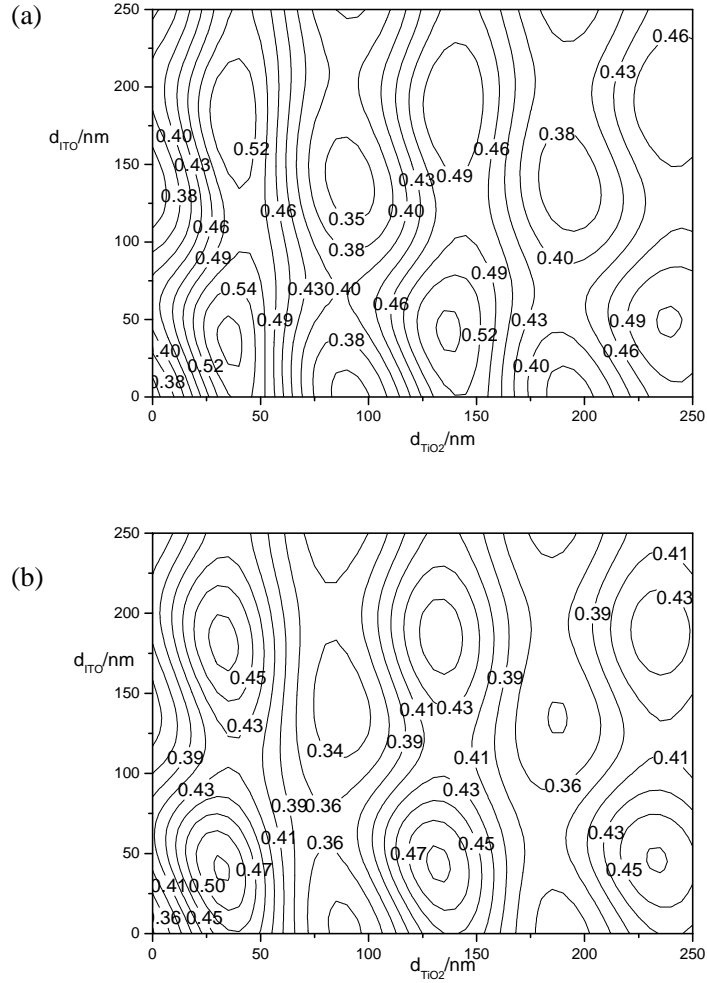









图 10 图 9 对应的等高线图

表 2 三层膜结构光学性质计算结果统计表 ($d_{VO_2}=50nm$)

编号	$d_{TiO_2}/d_{VO_2}/d_{ITO}$ (nm)	状态	Color (R/T)	T_{vis}	T_{sol}	ΔT_{sol}	η	Emis
1	35/50/35	S		0.582	0.469	0.042	9.0%	0.669
		M		0.521	0.427			0.441
2	35/50/180	S		0.543	0.402	0.033	8.2%	0.596
		M		0.483	0.368			0.604
3	135/50/45	S		0.550	0.460	0.097	21.1%	0.502
		M		0.500	0.363			0.394
4	140/50/190	S		0.516	0.394	0.078	19.8%	0.541
		M		0.459	0.315			0.582
5	240/50/50	S		0.519	0.460	0.094	18.1%	0.575
		M		0.472	0.366			0.376
6	240/50/195	S		0.488	0.391	0.073	18.7%	0.665
		M		0.441	0.318			0.595

4.2 VO₂热色玻璃热学性能研究

4.2.1 窗户的传热原理

4.2.1.1 窗户的物理传热模型

在有太阳辐射的情况下,考虑有 N 层玻璃的窗户,忽略通过窗框的传热与玻璃边缘和窗框之间的传热,可以认为窗户仅由 M 层玻璃和 $N-1$ 个密闭空间组成。假设每层(如第 i 层)玻璃有3个节点:第 i 层的中心节点 i 、第 i 层的两个表面节点 s_{2i-1} 和 s_{2i} ,如图11。玻璃本身的热容量不考虑。窗户传热方式有:与室内外环境的辐射换热、最外表面强迫对流换热、最内表面自然对流换热、玻璃层间的对流换热和辐射换热、玻璃层内的导热以及玻璃对太阳能的吸收。太阳光一部分直接透过窗户进入室内,还有一部分是由各层玻璃的中心节点吸收太阳能量后,以点内热源的形式向室内传热。

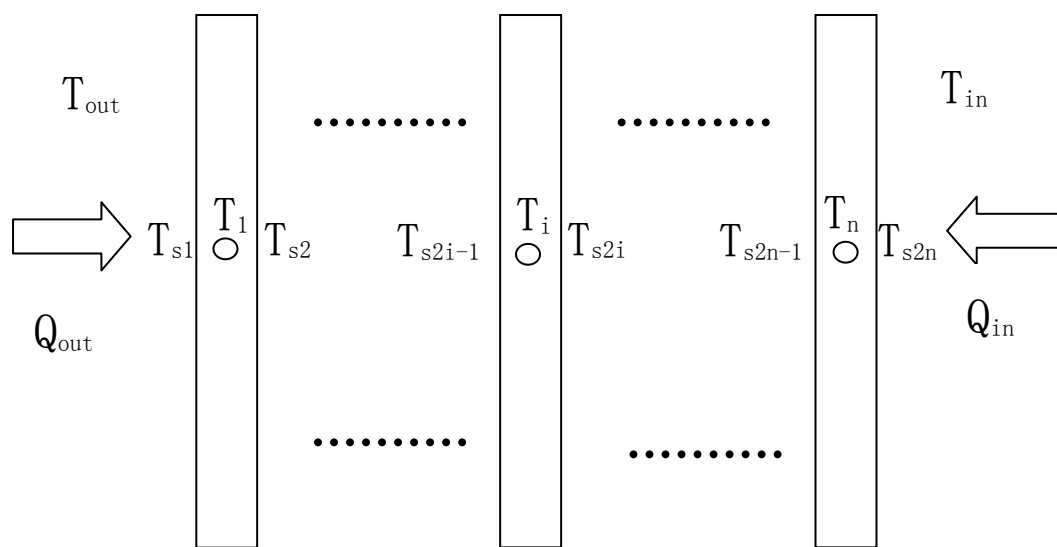


图 11 窗户计算模型

4.2.1.2 表面温度的确定

第 i 层玻璃的中心节点热平衡方程^[61]:

$$\frac{T_i - T_{i-1}}{R_i} + \frac{T_i - T_{i+1}}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} = 0 \quad (4-4)$$

式中, R_{i-1} 、 R_{i+1} 分别为第 i 中心节点与第 $(i-1)$ 中心节点之间、第 i 中心节点与

第 $(i+1)$ 中心节点之间的换热热阻,即玻璃层内的导热、层间的对流换热和辐射换热的热阻之和,其中

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d_1}{k_1} \quad (4-5)$$

$$R_{n+1} = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d_n}{k_n} \quad (4-6)$$

$$R_{i+1} = \frac{1}{h_{c,gap,i} + h_{r,gap,i}} + \left(\frac{0.5d_i}{k_i} + \frac{0.5d_{i+1}}{k_{i+1}} \right) \quad i=2, \dots, n \quad (4-7)$$

式中, $h_{c,out}$ 、 $h_{r,out}$ 分别是玻璃外表面的对流和辐射换热系数, $h_{c,in}$ 、 $h_{r,in}$ 分别是玻璃内表面的对流和辐射换热系数, $h_{c,gap,i}$ 、 $h_{r,gap,i}$ 分别是 i 与 $i+1$ 层玻璃之间的对流和辐射换热系数。

玻璃表面温度由下式求取:

$$T_{s1} = \left(\frac{T_1}{R_{k,1}} + \frac{T_{out}}{R_{h,1}} \right) / \left(\frac{1}{R_{k,1}} + \frac{1}{R_{h,1}} \right) \quad (4-8)$$

$$T_{sn} = \left(\frac{T_n}{R_{k,n}} + \frac{T_{in}}{R_{h,n+1}} \right) / \left(\frac{1}{R_{k,n}} + \frac{1}{R_{h,n+1}} \right) \quad (4-9)$$

$$T_{s2i} = \left(\frac{T_i}{R_{k,i}} + \frac{T_{s2i+1}}{R_{h,i+1}} \right) / \left(\frac{1}{R_{k,i}} + \frac{1}{R_{h,i+1}} \right) \quad (4-10)$$

$$T_{s2i-1} = \left(\frac{T_{i+1}}{R_{k,i+1}} + \frac{T_{s2i}}{R_{h,i+1}} \right) / \left(\frac{1}{R_{k,i+1}} + \frac{1}{R_{h,i+1}} \right) \quad (4-11)$$

其中 $R_{h,n+1} = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}}$, $R_{k,1} = \frac{0.5d_1}{k_1}$, $R_{h,n+1} = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}}$, $R_{k,n} = \frac{0.5d_n}{k_n}$,

$$R_{h,j} = \frac{1}{h_{c,j} + h_{r,j}}, \quad R_{k,j} = \frac{0.5d_j}{k_j}, \quad j=2, \dots, n-1$$

4.2.1.3 对流换热系数计算

外表面的对流换热系数是风速和风向的函数：

$$\text{迎风情况下, 若风速 } v \text{ 大于 } 2 \text{ m/s, } h_{c,out} = 8.07v^{0.605} \quad (4-12)$$

$$\text{若风速小于 } 2 \text{ m/s, } h_{c,out} = 12.27 \quad (4-13)$$

$$\text{背风情况下, } h_{c,out} = 18.64(0.3 + 0.05v)^{0.605} \quad (4-14)$$

对垂直安装的窗户, 内表面对流换热系数是温差的函数：

$$h_{c,in} = 1.77(T_{s2n} - T_{in})^{0.25} \quad (4-15)$$

各个层间的对流换热系数

$$h_{c,i} = \lambda \times Nu / \omega \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (4-16)$$

对于 $Ra < 2 \times 10^5$,

$$Nu = [1 + (0.0303Ra^{0.402})^{11}]^{0.091} \quad (4-17)$$

4.2.1.4 辐射热阻计算

最外表面辐射换热热阻

$$R_{r,out} = 1/h_{r,out} = 1/[\varepsilon_{s1}\sigma(T_{s1}^2 + T_{out}^2)(T_{1,s1} + T_{out})] \quad (4-18)$$

最内表面辐射换热热阻

$$R_{r,in} = 1/h_{r,in} = 1/[\varepsilon_{s2n}\sigma(T_{s2n}^2 + T_{in}^2)(T_{1,s2n} + T_{in})] \quad (4-19)$$

层间辐射换热热阻

$$R_{r,i+1} = 1/h_{r,i+1} = (1/\varepsilon_{s2i} + \varepsilon_{s2i+1} - 1)/[\sigma(T_{s2i}^2 + T_{s2i+1}^2)(T_{s2i} + T_{s2i+1})] \quad (4-20)$$

4.2.1.5 室内得热量计算

$$Q_{in} = T_{sol} \times I_{sol} + (h_{c,in} + h_{r,in}) \times (T_{s2n} - T_{in}) \quad (4-21)$$

式中, Q_{in} 为室内得热量, T_{sol} 为玻璃的太阳能透过率, I_{sol} 为太阳辐射强度。

4.2.2 计算数据与过程

4.2.2.1 计算数据

如无特别说明，本文热学以及建筑能耗计算中所采用的VO₂热色玻璃光学数据均为4.1.1.3节所提到的3#膜系，其两种状态下光谱曲线如图12(a)、(b)所示，其中(a)表示半导体状态，(b)表示金属状态，曲线T、Rf、Rb分别表示玻璃的透过率、膜面的反射率和无膜面的反射率。此外，我们假定由于掺杂作用，VO₂的相变温度降到室温，即VO₂低于26℃时处于半导体状态，高于29℃处于金属状态，而在此温度之间，VO₂为过渡态，其光学性质随膜面温度的变化而线性变化。

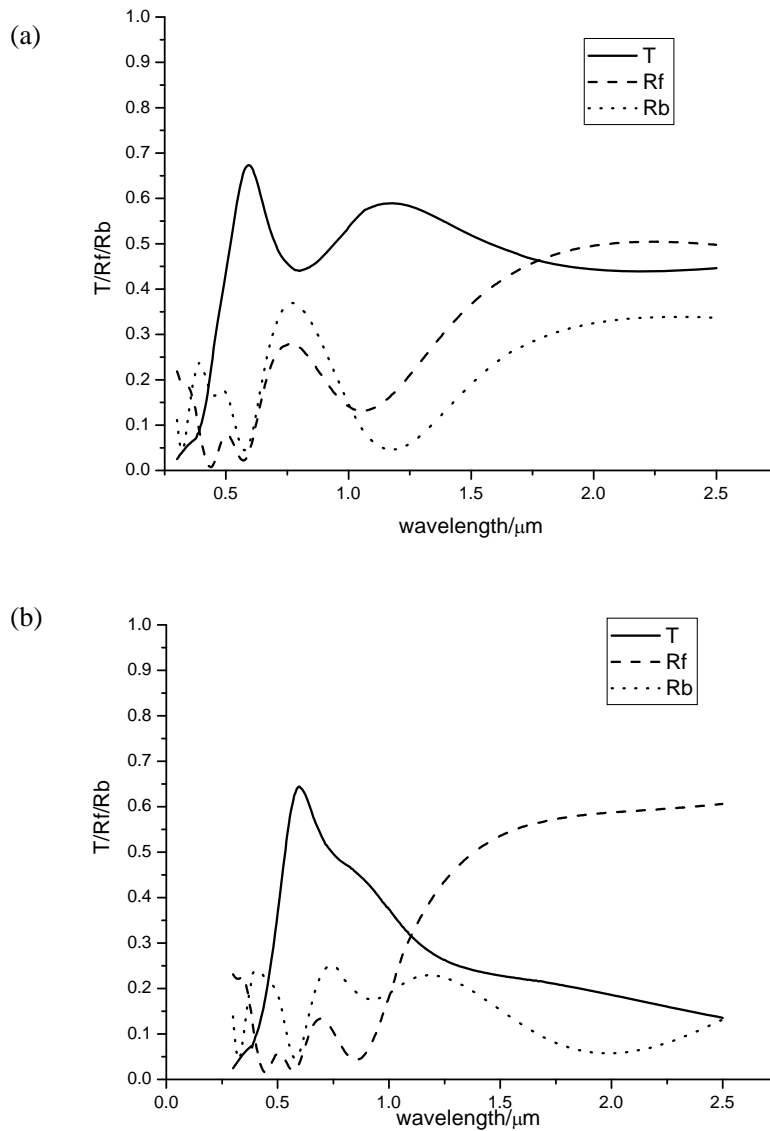


图12 VO₂热色玻璃光谱曲线

作为对比，表3详细列出了利用Optics软件^[39]采用W5_NFRC_2003标准计算的各种玻璃的光学数据，其中VO₂(S)、VO₂(M)分别表示处于半导体和金属状态的VO₂热色玻璃，Clear、LOW-E(H)、LOW-E(L)分别为普通白玻、高透型和遮阳型LOW-E玻璃，三种玻璃的参数均取自IGDB数据库^[63]。

另外，本文在计算中，室外对流换热系数统一取值为20 W/m²，室内温度为20℃。

表3 各种玻璃的光学数据

类型	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	emis1	emis2
VO ₂ (S)	0.489	0.189	0.200	0.585	0.053	0.098	0	0.502	0.837
VO ₂ (M)	0.392	0.184	0.174	0.541	0.040	0.101	0	0.394	0.837
Clear	0.784	0.071	0.071	0.885	0.080	0.080	0	0.837	0.837
LOW-E(H)	0.572	0.189	0.263	0.843	0.051	0.041	0	0.840	0.060
LOW-E(L)	0.336	0.253	0.247	0.515	0.187	0.025	0	0.840	0.098

4.2.2.2 计算过程

基本计算过程如图13所示，首先假定2N个表面节点的温度 T_{si} ，并以此求出各部分的热阻，然后根据公式(4-4)联立线性方程组求出各中心节点的温度 T_i ，继而根据公式(4-8~4-11)解得下一步的各表面温度 T'_{si} ，重复此过程，直到求出收敛解，最后根据公式(4-21)求出室内得热量。

4.2.3 计算结果及其分析

4.2.3.1 单层玻璃

图14表示太阳辐射强度为500 W/m²，不同环境温度下VO₂热色玻璃表面的温度，其中图14(a)为VO₂膜面朝向室外的情况，图14(b)为VO₂膜面朝向室内的情况，图中曲线 t_f 、 t_b 分别表示室内、室外玻璃面的温度。从图中可以看出，在这两种情况下，当室外环境温度超过21℃时，VO₂都达到了其相变起始温度26℃，此时由于金属态VO₂的太阳能吸收率大于半导体态，而发射率小于金属态，平衡温度会升高。

图15表示VO₂膜面在不同位置时室内得热量与环境温度的关系，a、b分别表示膜面朝向室外和室内的情况，从图中可以看出，由于玻璃外表面与室外的温差一般要高于内表面与室内的温差，因此膜面在室内的隔热效果一般要高于放在

室外，由此导致膜面放在室内时在冬季室外温度较低时候，房间得热量较高，减少了冬季热负荷，而在夏季温度较高的情况下，房间得热量较低，减少了夏季冷负荷，很明显这更有利于建筑的节能。

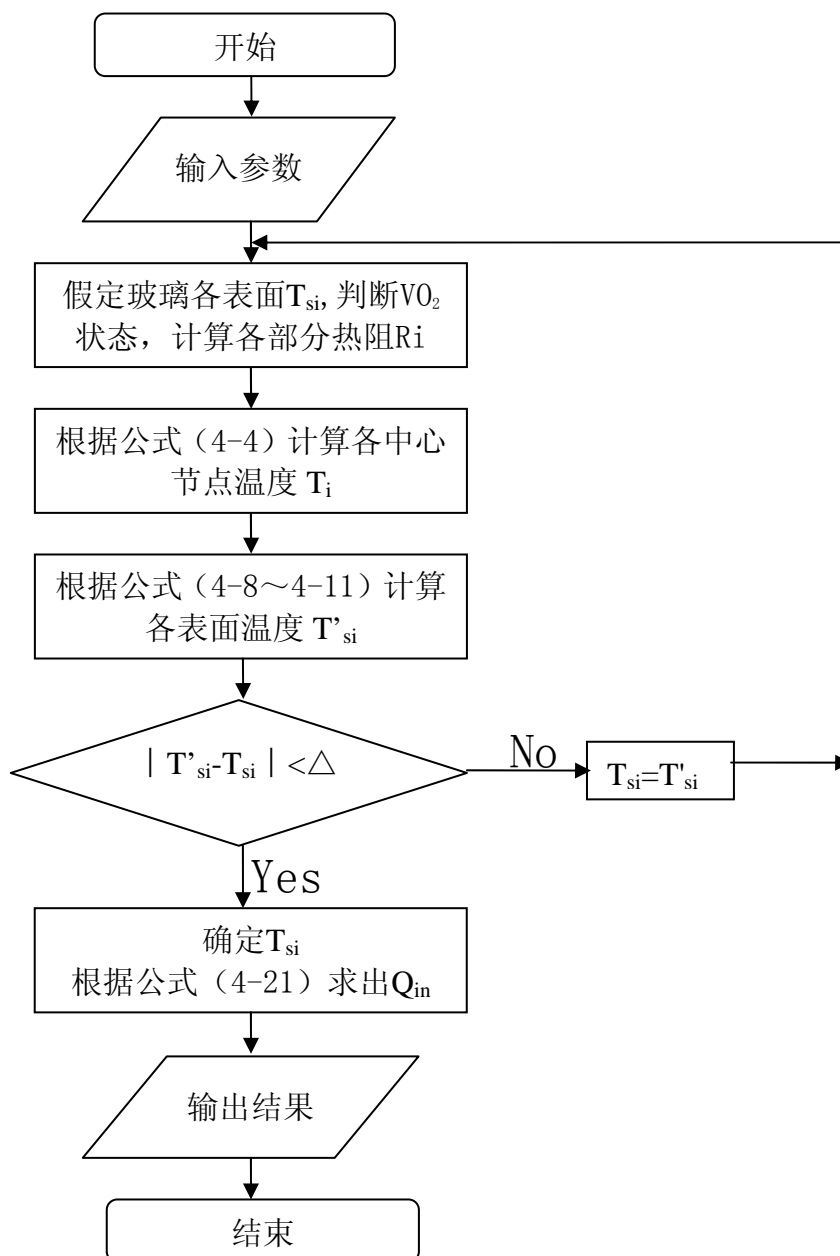


图 13 计算流程图

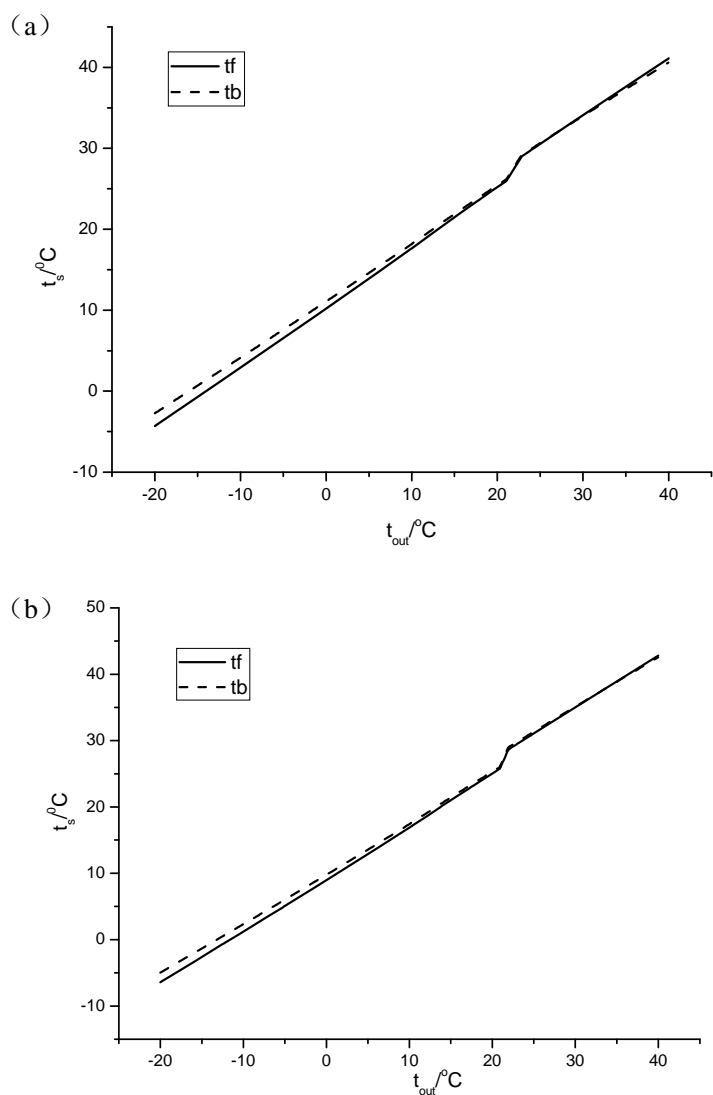


图 14 不同环境温度下 VO₂ 热色玻璃(单层)表面的温度

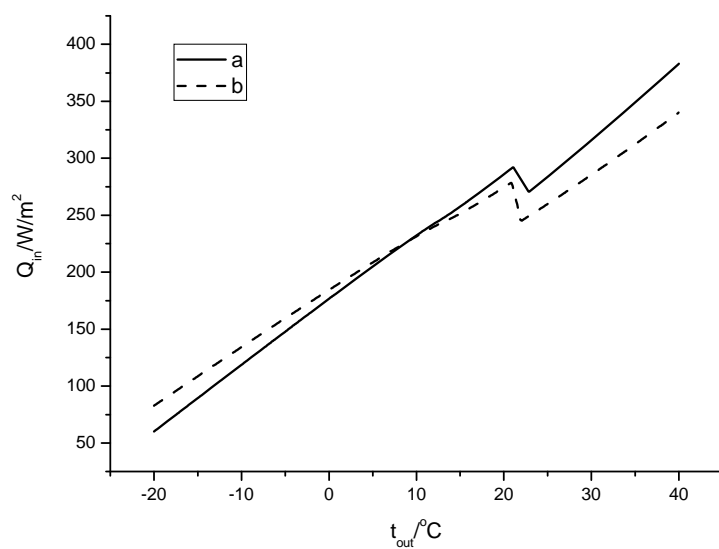


图 15 VO₂ 膜面在玻璃(单层)不同位置时室内得热量与环境温度的关系

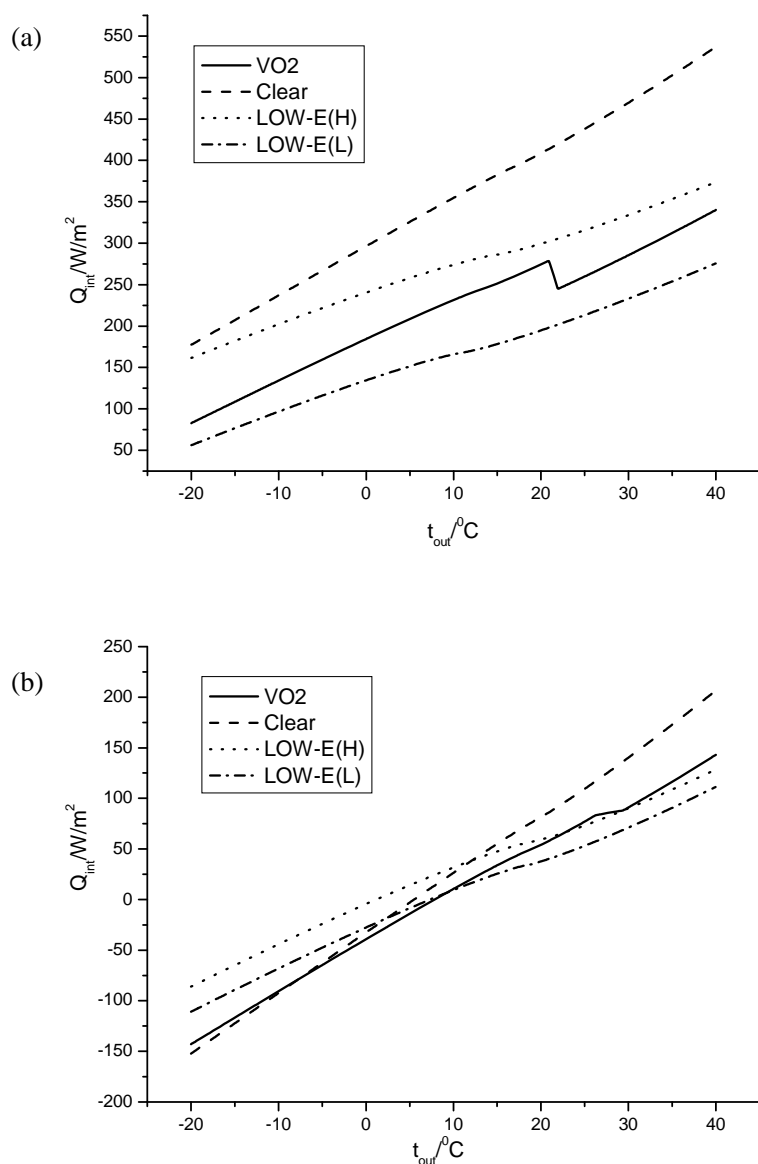


图 16 使用不同玻璃（单层）时室内得热量与环境温度的关系

图 16 (a)、(b) 分别表示在太阳辐射强度为 500 W/m^2 、 100 W/m^2 时使用不同玻璃（单层）时室内得热量与环境温度的关系，其中曲线 VO₂ 代表 VO₂ 热色玻璃，Clear 代表普通白玻，LOW-E(H)、LOW-E(L) 分别代表高透型和遮阳型 LOW-E 玻璃，VO₂、LOW(H)、LOW(L) 膜面均朝向室内。从图 16 (a) 中可以看出，在太阳辐射强度较高时室内得热量主要与玻璃的太阳能透过率有关，所以使 VO₂ 热色玻璃时房间得热量低于普通白玻和高透型 LOW-E 玻璃，但要高于遮阳型 LOW-E 玻璃，在这种情况下使用 VO₂ 热色玻璃冬季房间热负荷要比遮阳型 LOW-E 玻璃低，夏季冷负荷要比普通白玻和高透型 LOW-E 玻璃低。而在太阳辐射强度较低时，玻璃表面

的发射率同样对房间得热量有着重要影响，对照图 16 (b) 可知，由于我们计算中所采用的 VO₂ 热色玻璃的发射率较高，因此在这种情况下其整体性能要低于 LOW-E 玻璃，但在一定的环境温度下仍然优于白玻。

4.2.3.2 双层玻璃

对于低辐射中空玻璃，其低辐射膜面一般位于外玻璃的内表面或者内玻璃的外表面，对于 VO₂ 中空玻璃，我们同时研究了这两种布置对其热学性能的影响，为了便于分析比较，我们另外计算了白玻组成的中空玻璃的热学性能，表 4 列出了三种双层玻璃的光学数据，其中 VO₂(a) 表示 6 mm VO₂ 热色玻璃+12.7 mm 空气+6mm 白玻，VO₂ 膜面位于室外玻璃的内表面，VO₂(b) 表示 6mm 白玻+12.7 mm 空气+6mm VO₂ 热色玻璃，VO₂ 膜面位于室内玻璃的外表面，Clear 表示 6mm 白玻+12.7mm 空气+6mm 白玻；Tsol、Rsol1、Rsol2、Tvis、Rvis1、Rvis2 和 Rvis2 分别表示太阳能透过率、前表面太阳能反射率、后表面太阳能反射率、可见光透过率、前表面可见光反射率、后表面可见光反射率，Abs1 表示室外玻璃的吸收率，Abs2 表示室内玻璃的吸收率。

另外，为了简化计算，我们忽略 VO₂ 的热滞性，同时忽略其过渡态，即假定 VO₂ 在高于 28℃ 时为金属态，低于 28℃ 为半导体态。

表 4 中空玻璃的光学数据

玻璃类型		Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Abs1	Abs2
VO ₂ (a)	S	0.3879	0.2185	0.1838	0.5196	0.1259	0.1214	0.3215	0.0721
	M	0.3140	0.1870	0.1779	0.4800	0.1256	0.1113	0.4460	0.0530
VO ₂ (b)	S	0.3879	0.1838	0.2185	0.5196	0.1214	0.1259	0.1686	0.2597
	M	0.3140	0.1779	0.1870	0.4800	0.1113	0.1256	0.1695	0.3386
Clear		0.6262	0.1168	0.1168	0.7887	0.1433	0.1433	0.1518	0.1052

图 17 表示在太阳辐射强度为 500 W/m² 下，不同环境温度下 VO₂ 热色玻璃(双层)表面的温度，其中 (a) 表示膜面位于室外玻璃的内表面，(b) 表示膜面位于室内玻璃的外表面，图中曲线 ts1、ts2、ts3、ts4 依次表示从室外到室内四个玻璃表面的温度。从图中可以看出膜面处在室外玻璃内表面时，当室外环境温度超过 21℃ 时，VO₂ 达到其相变温度，而膜面处在室内玻璃外表面时，室外环境温度超过 7℃，VO₂ 就由半导体态转变到金属态，因此这可能会造成在太阳辐射强度高而环境温度低的采暖季节，VO₂ 就处于金属状态，达不到应有的节能效果。

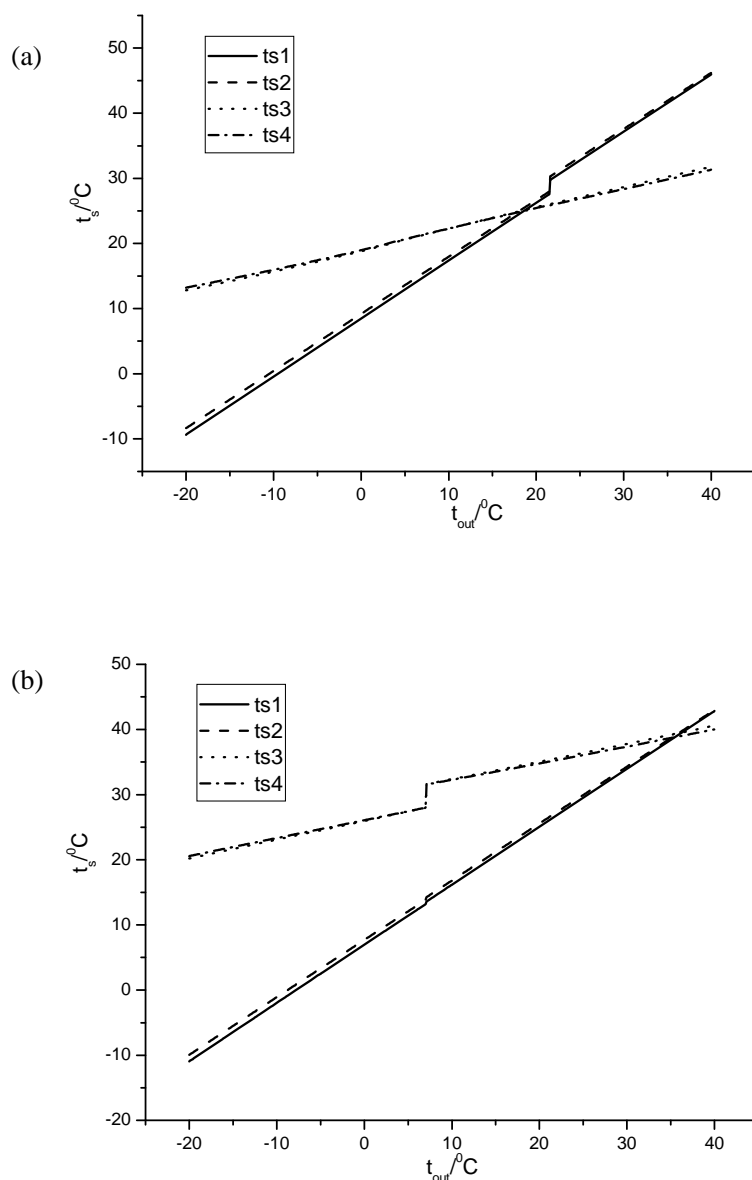
图 17 不同环境温度下 VO₂ 热色玻璃(双层)表面的温度

图 18 表示 VO₂ 膜面在玻璃(双层)不同位置时室内得热量与环境温度的关系, a、b 含义与图 17 相同, 曲线 s、m 分别表示假定 VO₂ 在半导体和金属态运行, 不发生相变, 箭头则表示 VO₂ 热色玻璃实际运行时室内得热量的变化情况。由图可知, 当膜面位于室外玻璃的内表面时, VO₂ 在半导体状态运行时室内得热量远高于其在金属态运行, 因此这更有利于冬季减少房间的热负荷, 夏季减少房间冷负荷, 但是当膜面位于室内玻璃的外表面时, 两种状态下房间得热量却相差很小, 因此在这种情况下 VO₂ 很可能起不到应有的调节作用。

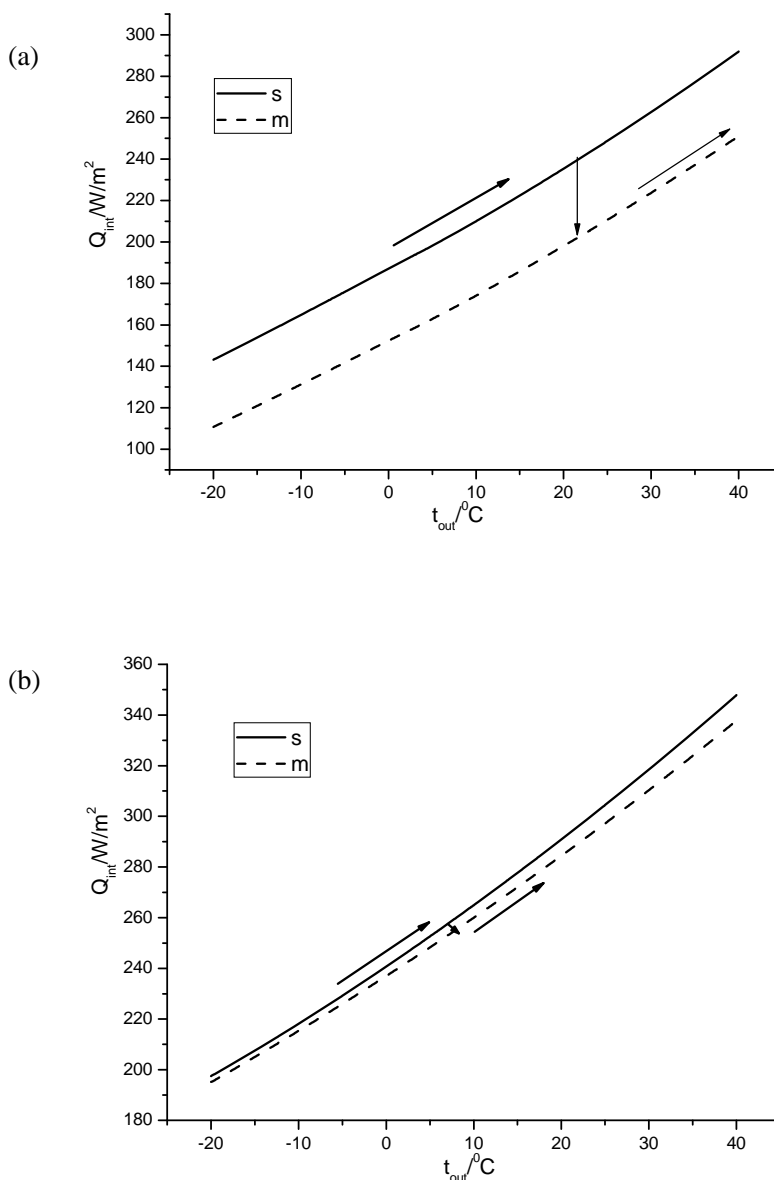


图 18 VO₂膜面在玻璃（双层）不同位置时室内得热量与环境温度的关系

图 19 (a)、(b) 分别表示太阳辐射强度为 500 W/m²、100 W/m²时使用不同玻璃（双层）时室内得热量与环境温度的关系。虽然 VO₂ 热色玻璃的发射率要低于普通白玻，但其太阳能透过率也远低于白玻，由此造成与白玻中空玻璃相比，使用 VO₂ 中空玻璃固然可以降低夏季冷负荷，但也会造成较高的冬季热负荷。同时从图形中可以看出，膜面位于室内玻璃的外表面时的室内得热量要大于用于室外玻璃的内表面，这也与 LOW-E 中空玻璃的使用情况相一致^[62]。另外，当太阳辐射强度为 500 W/m²时，膜面位于室外玻璃内表面和室内玻璃外表面两种情况下，VO₂

发生相变时的环境温度分别为 21℃、7℃，而当太阳辐射强度为 100 W/m² 时，环境温度分别为 27℃、36℃，这说明当膜面位于室内玻璃的外表面时，膜面的温度较强的依赖于太阳辐射强度的变化，由此更容易造成在采暖季 VO₂ 已处于金属态或者是空调季仍处于半导体态这两种情况而使 VO₂ 达不到相应的调节作用。

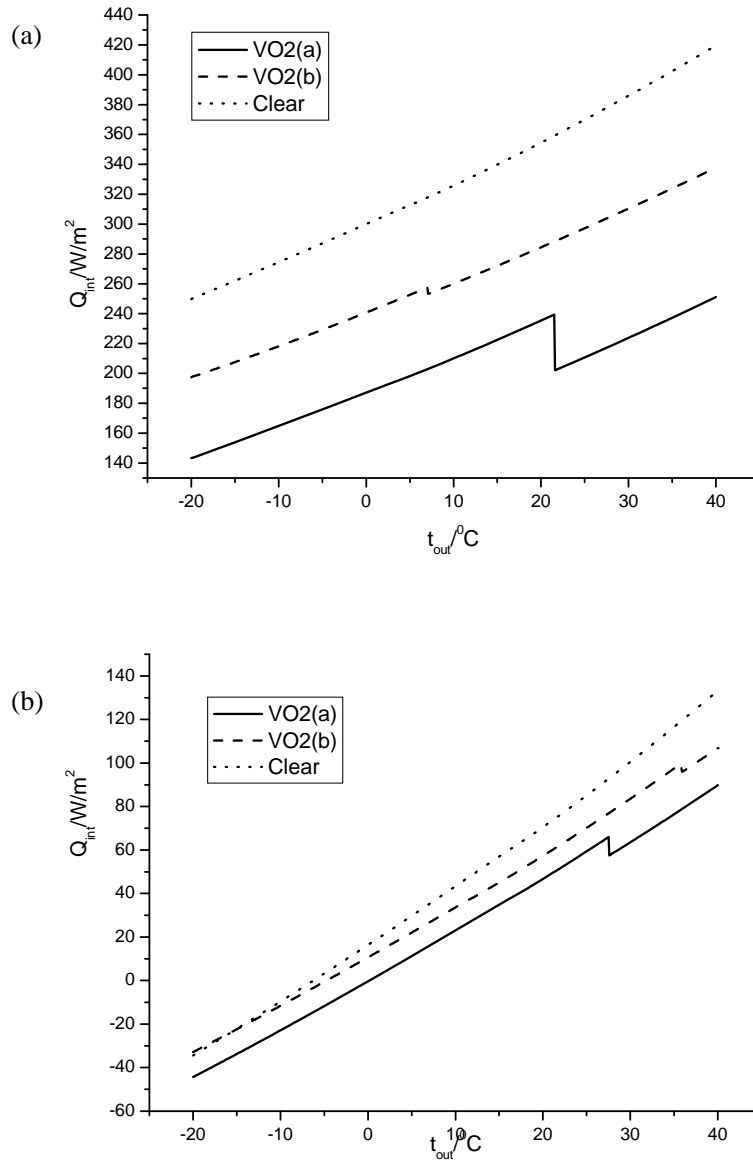


图 19 使用不同玻璃（双层）时室内得热量与环境温度的关系

4.3 建筑能耗分析

上一节分析了室外对流换热系数、太阳辐射强度等条件一定情况下，室内得热量与环境温度的关系，而在建筑玻璃的实际应用过程中，各种环境参数都是在

不断变化的，因此研究玻璃的节能特性，必须结合当地的气候特点，以及建筑的构型和使用状况等方面的因素综合考虑，本节将对此详细分析。

4.3.1 建筑模型及计算条件

模拟选用房间的建筑平面图与 3.2 节提到的房间相同，此外，由于房间三面临内墙以及上下楼板均与空调房间相邻，为了减少计算时间，我们假定这五个表面绝热，外墙的 U 值经 EnergyPlus 计算为 $0.78 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

计算中所采用的单层玻璃即为上文中所提到的 VO2、Clear、LOW-E(H)、LOW-E(L)，双层玻璃为这些玻璃与 Clear 组成的中空玻璃，其具体性能参数见表 5 (WINDOWS 5.0 计算)，其中 VO2(a)、VO2(b)、Clear 的含义与表 4 相同，LOW-E(Ha) 表示 6 mm LOW-E(H) 热色玻璃+12.7 mm 空气+6 mm 白玻，LOW-E(Ha) 膜面位于室外玻璃的内表面，LOW-E(Hb) 表示 6 mm 白玻+12.7 mm 空气+6 mm LOW-E(H) 热色玻璃，LOW-E(H) 膜面位于室内玻璃的外表面，LOW-E(La) 表示 6 mm LOW-E(L) 热色玻璃+12.7 mm 空气+6 mm 白玻，LOW-E(La) 膜面位于室外玻璃的内表面，LOW-E(Lb) 表示 6 mm 白玻+12.7 mm 空气+6 mm LOW-E(L) 热色玻璃，LOW-E(L) 膜面位于室内玻璃的外表面。

表 5 双层玻璃性能参数

玻璃类型		传热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	太阳得热系数	可见光透过率
VO2 (a)	S	2.352	0.479	0.520
	M	2.222	0.407	0.480
VO2 (b)	S	2.352	0.586	0.520
	M	2.222	0.572	0.480
Clear		2.677	0.714	0.789
LOW-E(Ha)		1.698	0.540	0.749
LOW-E(Hb)		1.699	0.585	0.749
LOW-E(La)		1.769	0.344	0.457
LOW-E(Lb)		1.770	0.553	0.457

模拟中设定的其他计算条件为：室内天花板、墙壁和地板的可见光的反射率分别为 70%，70%和 35%，热红外的反射率均为 90%。光源采用 300 W 的荧光灯，发出的光线中可见光占 37%、热红外部分占 18%，其余能量通过对流形式直接散发到房间空气中。照度参考点（500 lux）设置在距地板高度 0.75 m 的房间平面的中心，光源功率可以根据参考点照度的变化线性可调。模拟时间为每天

8:00~18:00, 空气渗透量假定为 1.2 ACH, 不考虑人员及除荧光灯以外的其它设备的散热, 采用国际典型气象年 (IWEC) 数据, 空调温度设定为 26℃, 采暖温度设定为 20℃, 窗户均朝南向。

4.3.2 计算结果及其分析

4.3.2.1 单层玻璃

图 20 为假定 VO₂ 热色玻璃全年都在单一状态运行下房间的照明负荷、热负荷和冷负荷 (建筑地点: 北京), 其中 VO₂(S) 表示热色玻璃全年都在半导体态下运行, VO₂(M) 表示热色玻璃全年都在金属态下运行。从图中可以看出, 由于半导体状态 VO₂ 的太阳能透过率大于金属状态 VO₂, 因此 VO₂(S) 的热负荷低于 VO₂(M), 但其冷负荷要高于 VO₂(M), 同时由于半导体状态 VO₂ 的可见光透过率大于其金属状态, 因此其照明负荷也略低于金属状态。

在本文以下的讨论中, 如无特别说明, VO₂ 热色玻璃的热负荷均指其在半导体状态下运行的热负荷, 冷负荷均指其在金属状态下运行的冷负荷, 作为节能效率的保守估计, 照明负荷取其在金属状态运行下的负荷。

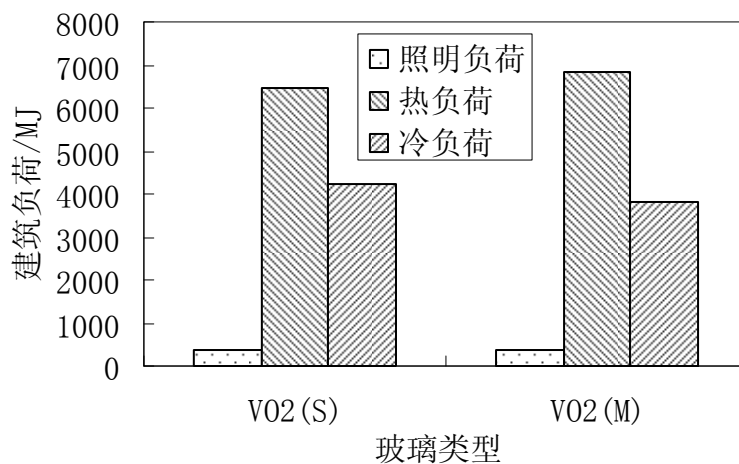
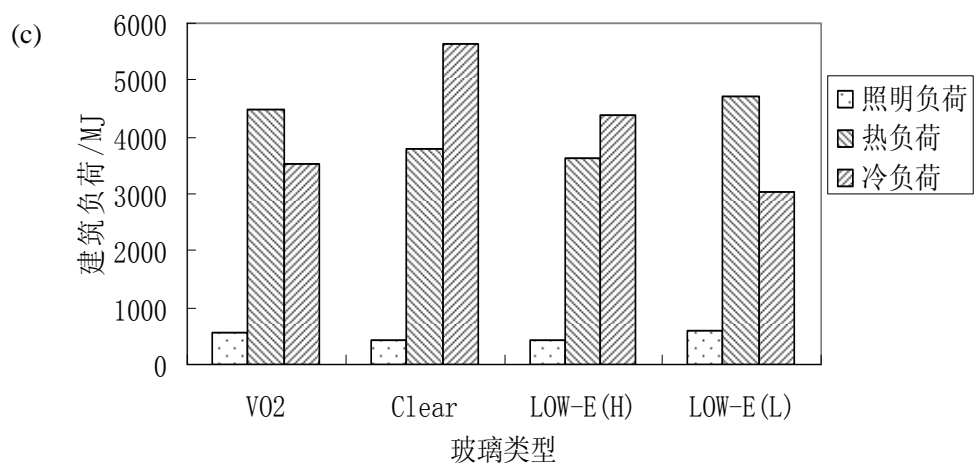
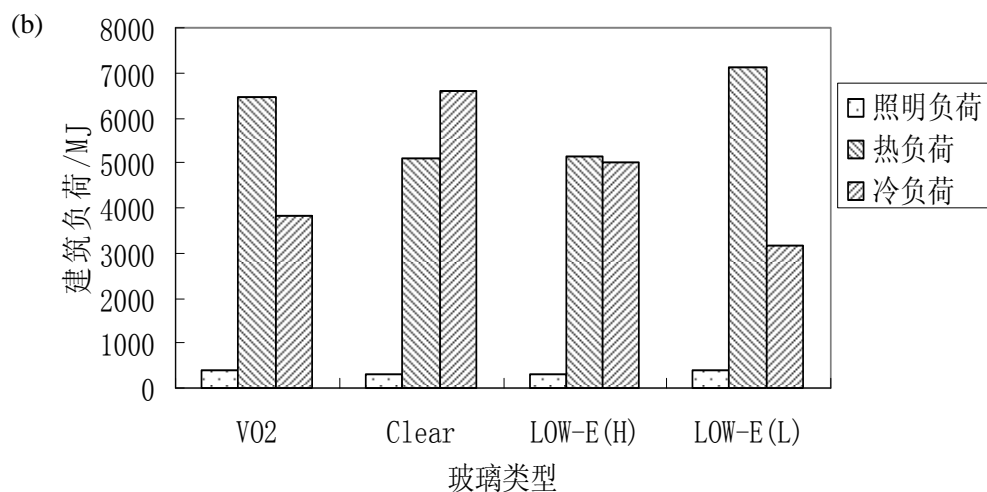
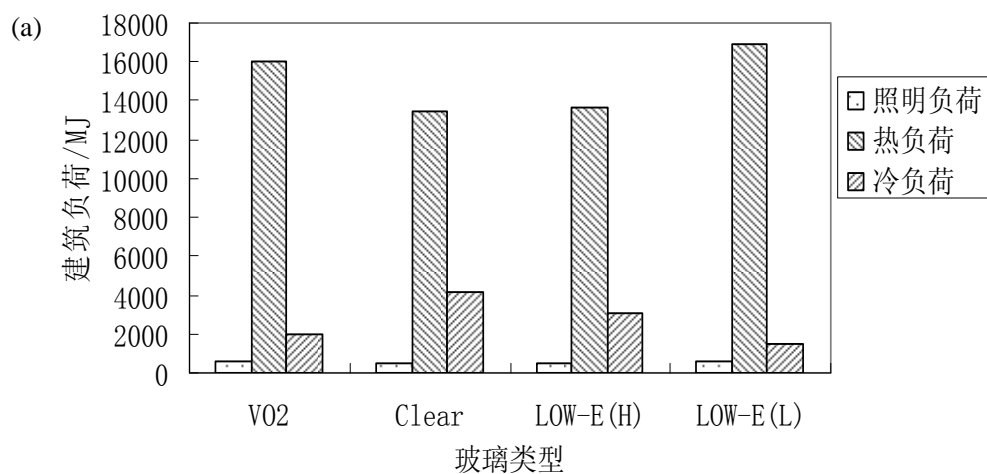


图 20 VO₂ 热色玻璃全年在单一状态运行下房间的负荷 (北京)

考虑到气候特征不同的地区对玻璃窗的热工性能要求也有所不同, 根据《民用建筑热工设计规范》^[63], 我们分别从严寒、寒冷、夏热冬冷和夏热冬暖地区中选择了四个有代表性的城市——哈尔滨、北京、上海和广州, 进行能耗模拟分析,

以比较不同类型玻璃窗对建筑能耗影响的程度。图 21(a)、(b)、(c)、(d) 分别为在这四个城市气候条件下房间的负荷。



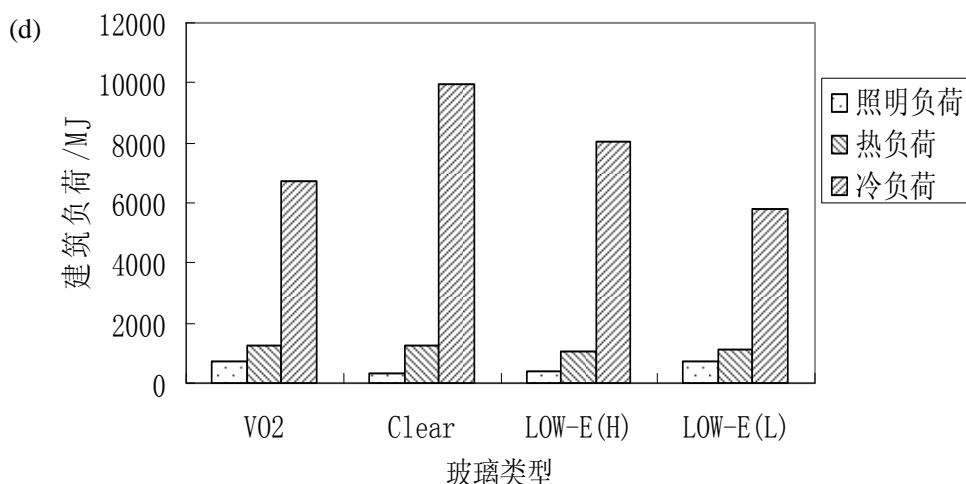


图 21 各种玻璃在不同气候条件下房间的负荷

四个地区的气候特点为：

哈尔滨地处欧亚大陆东岸中纬度地带，属于严寒地区。主要特点是冬冷夏暖，寒冷期长，全年日照充足，比较平均，四季分明。年平均气温为 7°C ，冬季寒冷，平均气温 -10°C 。低于 0°C 的日期平均为55天，冬季极端最低气温为 -31°C ，夏季平均气温 22°C ，极端最高气温为 38°C ，高温时段一般较短，且昼夜温差较大，所以感觉并不炎热。我国以哈尔滨为代表的严寒地区主要包括内蒙古和东北北部地区、新疆北部地区、西藏和青海北部地区，典型的城市有齐齐哈尔、沈阳、乌鲁木齐等。

北京属于寒冷地区，划分为此区的主要指标为最冷月平均温度 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ ，辅助指标为日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数 $90\sim 14$ 天。此区气候特点为冬季较长且寒冷干燥，夏季炎热湿润，降水量相对集中。春秋季短促，气温变化剧烈。春季雨雪稀少，多大风及风沙天气，冬季多冰雹和雷暴。气温年较差大，日照丰富。我国以北京为代表的寒冷地区主要包括华北、新疆和西藏南部地区及东北南部地区，典型的城市有北京、太原、安阳、洛阳、开封等。

上海属夏热冬冷地区，春、秋两季相加约130天，冬天约126天，夏天约110天，年平均气温 16°C 左右。一年四季变化分明是上海气候的特征。7、8月份气温最高，月平均约 28°C ，1月份最低，月平均约 4°C 。冬天寒冷，夏天炎热，全年日照充足。以上海为代表的气象区域范围大致在陇海线以南，南岭以北，四川盆地以东的长江中下游地区，典型的城市有上海、杭州、武汉、长沙、南昌等。

广州属夏热冬暖地区，年平均气温为21.4~21.9℃，最热为7~8月，平均气温28.0~28.7℃，极端高温38.7℃，最冷为1月，平均气温12.4~13.5℃，广州地处低纬度，地表接受太阳辐射量较多，但平均日照时间比较短，年内太阳辐射以2~4月最低，7~1月比较高。以广州为代表的气候区域范围大致在南岭以南的华南地区，典型城市有广州、深圳、厦门、海口等。

从图 21(a)、(b)、(c)、(d)可以看出，在哈尔滨、北京，由于白玻、高透型 LOW-E 玻璃、VO₂ 热色玻璃、遮阳型 LOW-E 玻璃的太阳能透过率依次降低，因此采用这四种玻璃后的房间热负荷依次降低，房间冷负荷依次升高，而对于上海、广州，由于其冬季太阳辐射量相对较低，与太阳能透过率相比，玻璃的发射率对建筑能耗同样存在着较大的影响，采用白玻时的热负荷反而略高于采用高透型 LOW-E 玻璃。同时由于白玻、高透型 LOW-E 玻璃、VO₂ 热色玻璃、遮阳型 LOW-E 玻璃这四种玻璃的可见光透过率是依次降低，因此在四个地区的照明负荷也是依次增大。另外，从图中可以看出，由于上海、广州两个地区的日照时间相对较短，因此其照明负荷在建筑负荷中占有相当大的比重，是建筑能耗中不可忽略的因素。

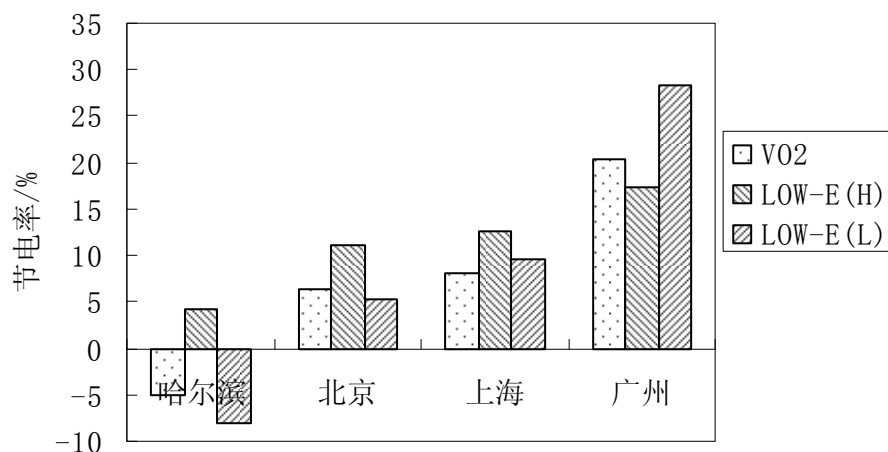


图 22 不同气候条件下各种玻璃的节电率

为了综合比较各种玻璃能耗的大小，我们按照 3.3 所介绍的方法把热负荷和冷负荷均折算成耗电量，采暖、制冷能效比分别取 1.9，2.3（以下如无特别说明，能效比取值与此相同）。图 22 是在上述四个城市下，VO₂ 热色玻璃、高透型

LOW-E 玻璃、遮阳型 LOW-E 玻璃与白玻相比所计算出来的节电率，由图可知，除哈尔滨外，三种玻璃的节能效果都由于白玻。对于 VO₂ 热色玻璃，其在北京的节能效果要优于遮阳型 LOW-E 玻璃，但低于高透型 LOW-E 玻璃，而在广州其节能效果与之相反，在上海其节能效果均低于这两种玻璃。

4.3.2.2 双层玻璃

图 23 是假定 VO₂ 热色玻璃（双层）全年都在单一状态情况下运行时房间的负荷，由图可知，当 VO₂ 膜面位于室外玻璃的内表面时，VO₂ 热色玻璃半导体状态时的热负荷低于金属状态时的热负荷，而金属态时的冷负荷要低于半导体状态时的冷负荷，但是当 VO₂ 膜面位于室内玻璃的外表面时，两种状态下的热负荷和冷负荷都相差无几，这与 4.2.3.3 节中分析的结果相一致。

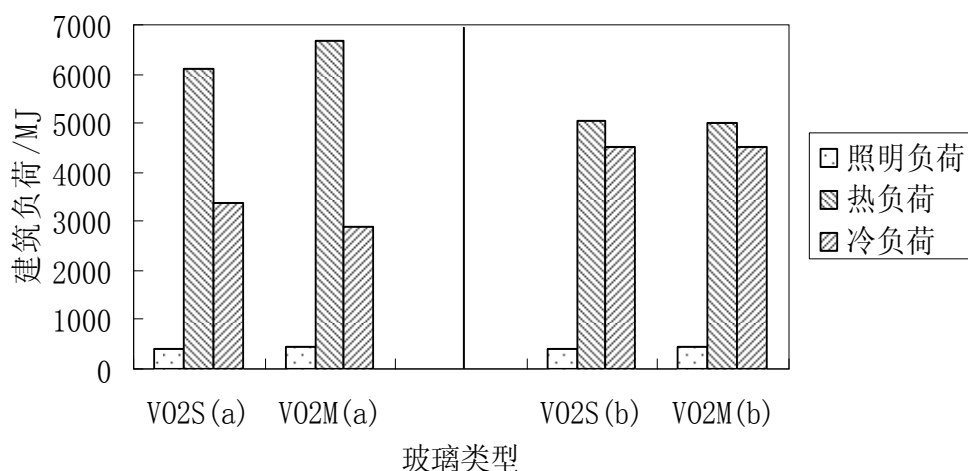


图 23 VO₂ 热色玻璃（双层）全年在单一状态运行下房间的负荷(北京)

图 24 表示不同玻璃类型（双玻）下房间的照明负荷、热负荷和冷负荷，从图中可以看出无论是对于 VO₂ 热色玻璃，还是对于高透型和遮阳型 LOW-E 玻璃，膜面在内玻璃外表面时的热负荷低于在外玻璃的内表面时的热负荷，而膜面在外玻璃内表面时的冷负荷则要低于在内玻璃的外表面时的热负荷，这也与 4.2.3.2 节中分析的结果相一致。

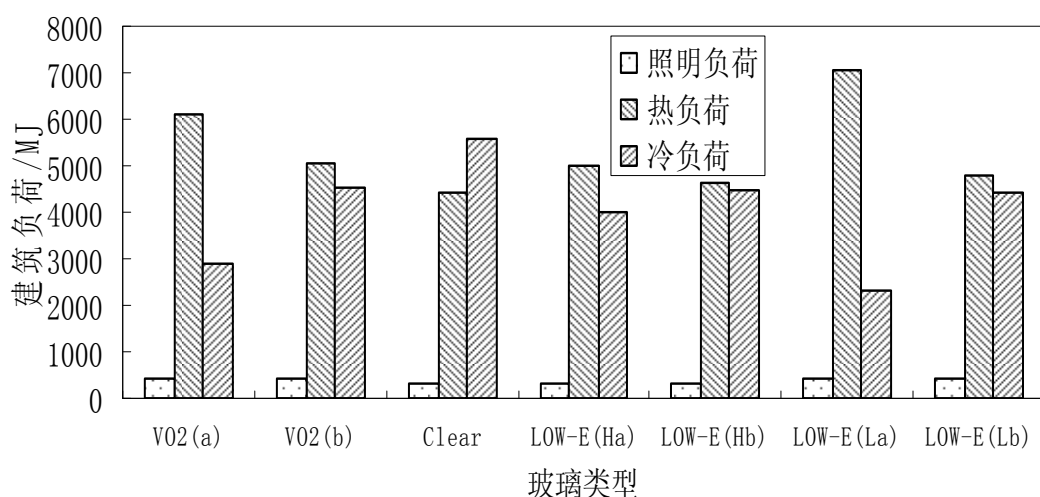


图 24 不同玻璃类型（双玻）下房间的负荷（北京）

图 25 是各种双层玻璃相对于单玻的节电率，可见相对于单玻，各种双玻的节电量都超过了 10%。对于由 VO₂ 热色玻璃组成的中空玻璃，其最大节能率为 16.3%，超过白玻组成的中空玻璃，但仍然要低于由高透型 LOW-E 玻璃组成的中空玻璃。

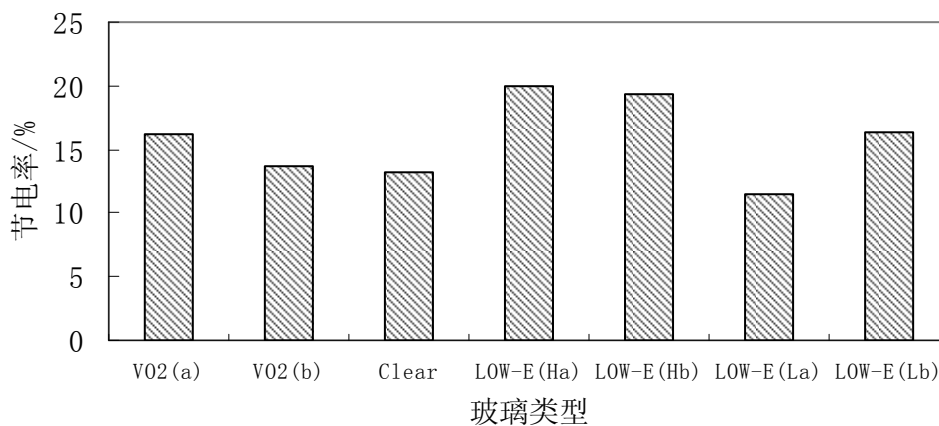


图 25 各种玻璃（双玻）的节电率

4.3.2.3 进一步讨论

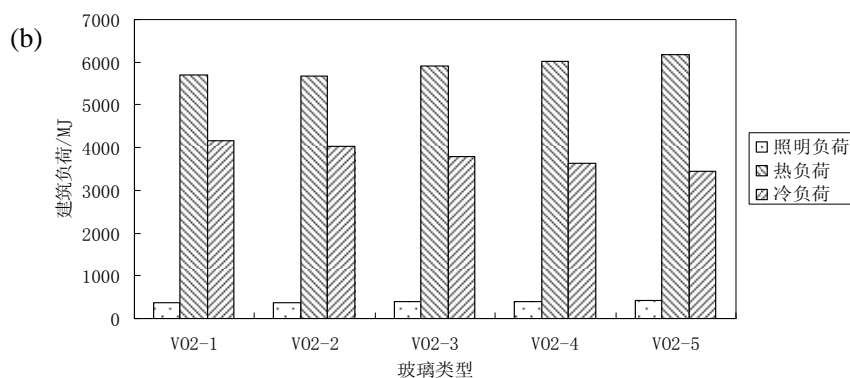
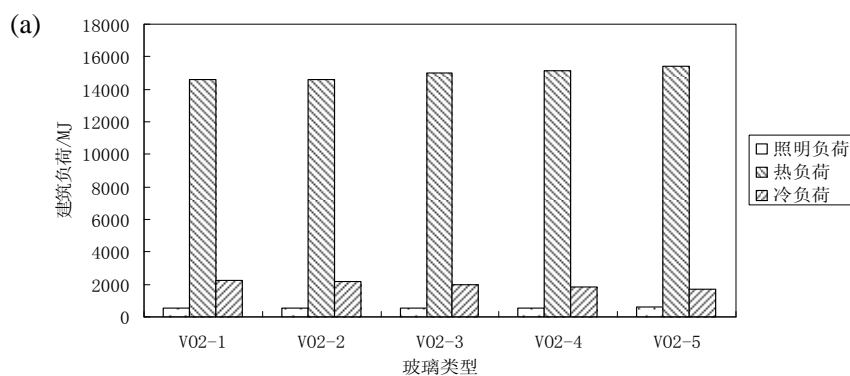
从上面的计算结果可以看出，相对于低辐射玻璃，VO₂ 热色玻璃似乎并不具有节能优势，这主要由于计算中所采用的 VO₂ 热色玻璃发射率过高的缘故。因为

ITO 具有低辐射特性, 其发射率可低于 0.14^[62], 而我们在上面的计算中所采用的发射率是根据 VO₂ 热色玻璃在 2500 nm 的反射率估算, 其值远大于 0.14, 明显不符合实际情况, 因此我们在下面讨论 VO₂ 热色玻璃膜层结构对节能效果的影响时, VO₂ 热色玻璃膜面得发射率统一取 0.15, 无膜面的发射率统一取 0.837。

表 6 不同膜层结构下 VO₂ 热色玻璃光学数据

类型		Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir
V02-1 (145/40/45)	S	0.523	0.198	0.204	0.636	0.059	0.122	0
	M	0.446	0.187	0.166	0.600	0.044	0.125	0
V02-2 (135/45/55)	S	0.517	0.176	0.189	0.618	0.053	0.086	0
	M	0.424	0.176	0.167	0.571	0.056	0.094	0
V02-3 (135/50/45)	S	0.489	0.189	0.200	0.585	0.053	0.098	0
	M	0.392	0.184	0.174	0.541	0.040	0.101	0
V02-4 (135/55/40)	S	0.472	0.184	0.198	0.548	0.057	0.101	0
	M	0.366	0.181	0.179	0.500	0.043	0.106	0
V02-5 (130/60/40)	S	0.450	0.193	0.201	0.513	0.067	0.094	0
	M	0.337	0.189	0.183	0.469	0.044	0.094	0

表 6 为不同膜层厚度下 VO₂ 热色玻璃的光学数据, 其中 V02-3 为表 2 中的 3# 玻璃, V02-1、V02-2、V02-4、V02-5 分别为表 1 中的 2#、3#、4#、5# 玻璃。



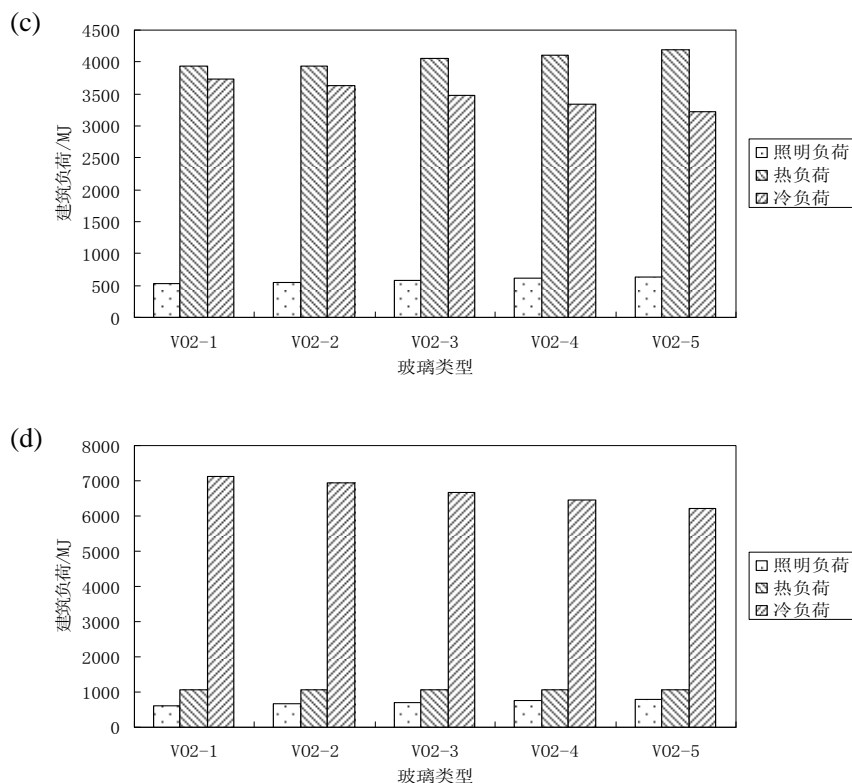


图 26 不同气候条件下各种 V0₂ 热色玻璃类型下房间的负荷

图 26 表示不同气候条件下在各种 V0₂ 热色玻璃类型下房间的负荷,其中(a)、(b)、(c)、(d)分别为哈尔滨、北京、上海、广州。从图中可以看出,因为 V02-1、V02-2、V02-3、V02-4、V02-5 可见光透过率依次降低,所以在各个城市的照明负荷依次升高,因为其金属状态的太阳能透过率依次降低,所以其冷负荷也依次降低。另外,虽然 V02-2 半导体状态的太阳能透过率略低于 V02-1,但其太阳能吸收率大于 V02-1,由此造成进入房间的二次辐射增大,降低了房间的热负荷,所以在几种热色玻璃中, V02-2 的热负荷是最低的。

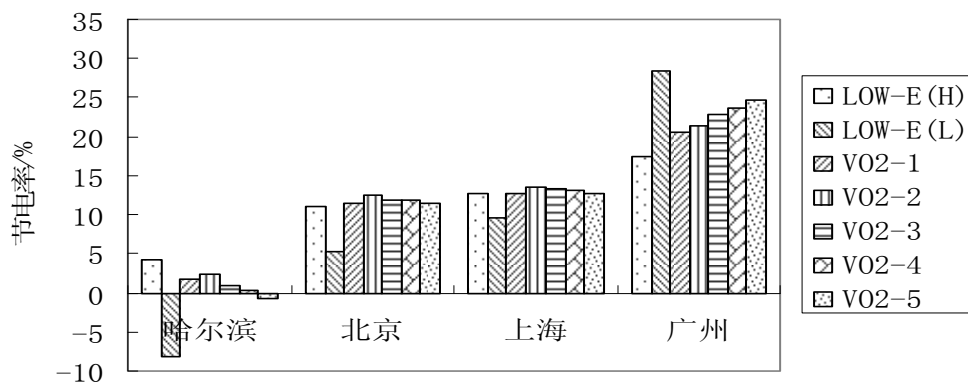


图 27 不同气候条件下各种玻璃的节电率

图 27 表示不同气候条件下各种玻璃相对于白玻的节电率。对于 VO₂ 热色玻璃，除 VO₂-5 由于其半导体状态的太阳能透过率远低于白玻，以至于在严寒地区建筑能耗较白玻高外，其他 VO₂ 热色玻璃都具有一定的节能效果。另外，相对于 LOW-E 玻璃，VO₂ 热色玻璃的节能效果在严寒地区低于高透型 LOW-E 玻璃，在夏热冬暖地区低于遮阳型 LOW-E 玻璃，但是在寒冷地区以及夏热冬暖地区，其节能效果都要优于 LOW-E 玻璃。

第五章 结论与展望

本文研究了电致变色玻璃窗控制方式对建筑能耗的影响，优化了 VO_2 光学薄膜的膜系结构，同时研究了 VO_2 热色玻璃的热学性能和建筑节能特性，论文的主要成果和结论如下：

(1) 电致变色玻璃窗选用合适的控制方式可以显著降低建筑的能耗，但如果控制方式选用不当，采用电致变色玻璃后建筑的能耗反而会高于采用普通白玻的能耗。此外，无论在何种控制方式下，采用电致变色/LOW-E 的节能效果都要优于电致变色/白玻中空玻璃。

(2) 通过膜系结构的优化，设计出 $\text{TiO}_2(135\text{nm})/\text{VO}_2(50\text{nm})/\text{ITO}(45\text{nm})/\text{glass}$ 三层膜结构，使其相对于 $\text{VO}_2(50\text{nm})/\text{glass}$ 的单层膜结构，太阳能调节量从 3.7% 提高到 9.8%，半导体状态时的可见光透过率从 33.6% 提高到 55.5%，金属状态时的可见光透过率从 34.0% 提高到 50.0%，同时半导体与金属状态时的膜面发射率都有很大程度的降低。

(3) VO_2 热色玻璃外观颜色的改变能够通过调整膜层的厚度来实现，因此可以把 VO_2 热色玻璃设计成红、粉红、蓝、深蓝等颜色，从而满足人不同的视觉要求。

(4) 对于单层 VO_2 热色玻璃，其功能膜面朝向室内比朝向室外可以获得更好的节能效果。对于由 VO_2 热色玻璃与白玻组成的双层玻璃，其膜面位置对建筑能耗的影响与由 LOW-E 和白玻组成的双层玻璃相似，膜面位于室内玻璃的外表面与位于室外玻璃的内表面相比，采暖季房间具有更低的热负荷，但空调季也将具有更高的热负荷。同时，当膜面位于室内玻璃的外表面时，膜面的温度较强的依赖于太阳辐射强度的变化，由此很可能造成在采暖季 VO_2 已处于金属态或者是空调季仍处于半导体态这两种情况，另外，假定 VO_2 分别处于半导体和金属状态下所计算的热负荷和冷负荷也相差无几，因此膜面处于这个位置时 VO_2 很难起到相应的调节作用。

(5) VO_2 热色玻璃的节能效果不仅与其自身的光学性质有关，而且与建筑的

地理位置等因素密切联系。由于 VO_2 热色玻璃半导体态的太阳能透过率低于高透型 LOW-E 玻璃，金属态的太阳能透过率高于遮阳型 LOW-E 玻璃，并且两种状态下的发射率均高于 LOW-E 玻璃，因此在全年以采暖为主的严寒地区和全年以空调为主的夏热冬暖地区， VO_2 热色玻璃的节能效果分别不及高透型和遮阳型 LOW-E 玻璃。

由于时间不足和条件的限制，还有很多有意义的工作没有开展，这些工作值得未来继续探讨，从而丰富完善本课题的内容：

(1) 电致变色玻璃除本文介绍的几种控制方式外，还可以采用更复杂的控制方式，如 PID 和神经模糊控制^[65, 66]等，至于究竟采用何种控制方式才能够获得最佳的节能效果和人体舒适度，需要结合建筑的结构、功能以及所在地的气候特点等因素做进一步研究。

(2) 相对于 LOW-E 玻璃，本文计算中所采用的 VO_2 热色玻璃发射率仍然较高，因此下一步有必要根据实际实验参数对计算数据进行调整。毫无疑问，假如 VO_2 热色玻璃半导体状态和金属状态时的光学性能能够分别接近高透型和遮阳型 LOW-E 玻璃，其节能潜力将是不言而喻的。

(3) 掺杂必然会改变 VO_2 的光学性质，因此本课题下一步工作的另一个重点将是研究掺杂效应对 VO_2 热色玻璃的光热性能以及节能效果的影响。

参考文献

- [1] 朱盈豹. 保温材料在建筑墙体节能设计中的应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 徐雪青, 沈 辉. $\text{WO}_3\text{-SiO}_2$ 复合薄膜结构和气致变色性能研究 [A]. 厦门: 第一届全国纳米技术与应用学术会议论文集 [C], 2000.
- [3] LAMPERT C M. Electrochromic materials and devices for energy efficient windows [J]. *Solar Energy Mater.* 1984, 11(1-2): 1-27.
- [4] ALIEV A E, SHIN H W. Nanostructured materials for electrochromic devices [J]. *Solid State Ionics*, 2002, 154-155: 425-431.
- [5] GALVAO J R, SCARMINIO J. Photochromism in tungsten oxide thin films of different compositions [J]. *Quim Nova* 2003, 26(4): 488-492.
- [6] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature [J]. *Phys Rev Lett*, 1959, 3(1): 34-36.
- [7] BETEILLE F, MAZEROLLES L, LIVAGE J. Microstructure and metal-insulating transition of VO_2 thin films [J], *Material Research Bulletin*, 1999(34): 2177-2184.
- [8] U G, JIN P, TAZAWA M, et al. Optimization of antireflection coating for VO_2 -based energy efficient window [J]. *Sol. Energy Mat. Sol. Cells*, 2004, (83): 29-37.
- [9] BURKHARDT W, CHRISTMANN T, MEYER B K, et al. W-and F-doped VO_2 films studied by photoelectron spectrometry [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 345(2): 229-235.
- [10] JIN P, TAZAWA M, KEYAMA M, et al. Growth and characterization of epitaxial films of tungsten-doped vanadium dioxide on sapphire (110) by reactive magnetron sputtering [J]. *J Vac Sci Technol A*, 1999, 17(4): 1817-1821.

- [11] LIVAGE J. Optical and electrical properties of vanadium oxides synthesized from alkoxides [J]. *Coordination Chem Rev*, 1999, 190-192: 391-403.
- [12] WU Z P, MIYAHITA A, YAMAMOTO S. Molybdenum substitutional doping and its effects on phase transition properties in single crystalline vanadium dioxide thin film [J]. *J Appl Phys*, 1999, 86(9): 5311-5317.
- [13] XU G, JIN P, TAZAWA M, et al. Tailoring of luminous transmittance upon switching for thermochromic VO₂ films by thickness control [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2004, 43(1): 186-187.
- [14] XU G, JIN P, TAZAWA M, et al. Thickness dependence of optical properties of VO₂ thin films epitaxially grown on sapphire [J]. *Appl Surf Sci*, 2005, 244(1-4): 449-452.
- [15] TAZAWA M, ASADA H, XU G. Optical constants of VO₂ films and design of a solar energy control window [J]. *Mater Res Soc Symp*, 2004, P785: 345-348.
- [16] BABULANAM S M, ERIKSSON T S, NIKLASSON G A, et al. Thermochromic VO₂ films for energy-efficient windows [J]. *Sol Energy Mater*, 1987, 16(5): 347-363.
- [17] JIN P, XU G, TAZAWA M, et al. A VO₂-based multifunctional window with highly improved luminous transmittance [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2002, 41(3A): L278-L280.
- [18] LEE M H. Thermochromic glazing of windows with better luminous solar transmittance [J]. *Sol Energy Mat Sol Cells*, 2002, 71(4) : 537-540.
- [19] EVANS P, PEMBLE M E, SHEEL D W, et al. Multi-functional self-cleaning thermochromic films by atmospheric pressure chemical vapour deposition [J]. *J Photochem Photobiol A*, 2007, 189(2-3): 387-397.
- [20] SAITZEK S, GUINETON F, SAUQUES L, et al. Thermochromic CeO₂-VO₂ bilayers: Role of ceria coating in optical switching properties [J]. *Opt Mater*, 2007, 30(3): 407-415.
- [21] 雷德铭, 郑臣谋, 何山, 等. 不同整比性 VO₂ 纳米粉体的合成 [J]. 高等学校

- 化学学报, 2003, 24 (5): 761-764.
- [22] 何山, 韦柳娅, 傅群, 等. 二氧化钒和三氧化二钒研究进展 [J]. 无机化学学报, 2003, 19(2): 113-118.
- [23] PENG Z F, JIAN W. Synthesis and characterization of tungsten doped vanadium dioxide nanopowders by thermolysis [J]. Chin Chem Lett, 2006, 17(10): 1417-1420.
- [24] 黄维刚, 林华, 范樵乔, 等. 掺 Mo 纳米 VO₂ 粉体的相变特性研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10): 1554-1556.
- [25] 吴卫和, 王德平, 黄文岳, 等. 掺杂与热处理温度对VO₂ 薄膜性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2006, 9(5): 548-554.
- [26] 刘向, 崔敬忠, 梁耀延, 等. 掺钨二氧化钒薄膜的制备与分析 [J]. 真空与低温, 2004, 10(2): 85-88.
- [27] 张弛, 刘梅冬, 曾亦可, 等. VO₂ 薄膜的研究和应用进展 [J]. 材料导报, 2003, 17(F09): 214-217.
- [28] WANG L, LI J P, GAO, et al. Effects of deposition parameters on the properties of VO₂ thin films [J]. Prog Nat Sci, 2003, 16(11): 1193-1197.
- [29] 吕凤军, 斯永敏. VO₂ 镀膜工艺与薄膜导电性的研究 [J]. 材料导报, 2004, 18(F04): 237-241.
- [30] 刘金城, 鲁建业, 田雪松, 等. 磁控溅射法制备二氧化钒薄膜最佳参量的研究 [J]. 光子学报, 2003, 32(1): 65-67.
- [31] 陈长琦, 陈庆连, 王君, 等. VO₂ 的 MIT 特性及应用机理 [J]. 红外, 2005, 9: 5-8.
- [32] 李锦, 魏红莉, 何峰. VO₂ 薄膜智能玻璃的研究进展 [J]. 玻璃, 2006, 33(1): 45-48.
- [33] 沈楠, 李毅, 易新建. 纳米 VO₂ 薄膜的制备及其可见光透过率的改善 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 199-202.
- [34] CRAWLEY D B, LAWRIE L K, WINKELMANN F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program [J]. Energy and

- Buildings, 2001, 33(4): 319-33.
- [35] 何云富, 徐刚, 朱俊, 等. VO₂ 热色智能玻璃研究进展 [J]. 微纳电子技术, 2008, 45(7): 387-391,396.
- [36] 徐占发. 建筑节能技术实用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [37] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 江亿. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST [J]. 暖通空调. 2004, 34(7): 48-56.
- [38] 潘毅群, 吴刚, HARTKOPF V. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用 [J]. 暖通空调, 2004, 34(9): 2-7.
- [39] LBNL. WINDOW 5.0 user manual [DB/OL]. (2008-05-19). <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html>.
- [40] 朱文敏. 基于 ENERGYPLUS 的微型三联供系统模拟与分析 [D]. 上海交通大学硕士学位论文, 2007.
- [41] 刘洋, 刘俊杰, 朱能. 住宅建筑能耗的动态模拟 [J], 煤气与电力, 2004, 1: 1720.
- [42] BOJIC M, YIK F, Application of advanced glazing to high rise residential buildings in hong kong [J]. Building and Environment, 2007, 42: 820-828.
- [43] 高甫生, 杨慧媛. 玻璃幕墙建筑能耗分析 [J], 暖通空调, 2006, 36(7): 13-17.
- [44] 蒋萼, 龙惟定. 双层皮玻璃幕墙建筑的能耗分析和优化设计 [J], 暖通空调, 2006, 36(11): 58-63.
- [45] HSIEH C M, ARAMAKI T, HANAKI, K. Estimation of heat rejection based on the air conditioner use time and its mitigation from buildings in Taipei City [J]. Building and Environment. 2007, 42(9): 3125-3137.
- [46] MIYAZAKI T, AKISAWA A, KASHIWAGI, T. Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows. Renewable Energy [J], 2005, 30(3): 281-304.
- [47] 田晶, 黄勇波, 朱能, 等. 城市热岛作用下办公建筑冷负荷的影响因素分析 [J]. 流体机械, 2005, 33(5): 54-57.
- [48] 曾源, 贾衡, 李炎锋. 风机盘管空调系统夏季节能模拟与控制研究 [J]. 暖通

- 空调, 2006, 36(11): 117-120.
- [49] 孟世荣, 陈滨. 集热蓄热墙式太阳能建筑的能耗模拟研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2006, 2(4): 16-21.
- [50] 周宴平, 吴静怡, 王如竹. 变频多联空调能耗仿真程序的开发研究 [J]. 制冷与空调, 2006, 6(5): 31-34.
- [51] IHM A, KRARTI M, HENZE G P. Development of a thermal energy storage model for EnergyPlus [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(8), 807-814.
- [52] 刘俊杰, 刘洋, 朱能. EnergyPlus 建筑能耗分析软件汉化用户应用界面的开发 [J]. 暖通空调, 2005, 3(9): 114-118.
- [53] 刘鑫, 张鸿雁. EnergyPlus 用户图形界面软件 Design Builder 及其应用 [J]. 西安航空技术高等专科学校学报, 2007, 25(5): 34-37.
- [54] GUGLIERMETTI F, BISEGNA F. Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate [J]. Building and Environment, 2003, 38(3): 479-492.
- [55] SULLIVAN R, LEE E S, PAPAMICHAEL K, et al. Effect of switching control strategies on the energy performance of electrochromic windows [A]. Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII [C], Freiburg, Germany: 1994, 2255: 443-455.
- [56] KARLSSON J, KARLSSON B, ROOS A. Control strategies and energy saving potentials for variable transmittance windows versus static windows [A]. Proceedings of Eurosun [C], Copenhagen, Denmark: 2000.
- [57] GUGLIERMETTI F, BISEGNA F. Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate [J]. Building and Environment, 2003, 38 (3): 479-492.
- [58] LBNL. International Glazing Database [EB/OL]. (2004-10-18). <http://windows.lbl.gov/materials/IGDB/default.htm>.
- [59] 卢进军, 刘卫国. 光学薄膜技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [60] 汤顺青. 色度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [61] LBNL.WINDOW 4.0 Documentation of Calculation Procedures [DB/OL].

- (2008-05-19). <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html>.
- [62] 刘志海, 李超. 低辐射玻璃及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [63] GB50176—1993, 民用建筑热工设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
- [64] KARLSSON J. Control system and energy saving potential for switchable windows [A]. Seventh International IBPSA Conference [C], Rio de Janeiro, Brazil, 2001, 199-206.
- [65] ASSIMAKOPOULOS M N, TSANGRASSOULIS A, GUARRACINO G, et al. Integrated energetic approach for a controllable electrochromic device [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(5): 415-422.
- [66] ASSIMAKOPOULOS M N, TSANGRASSOULIS A, SANTAMOURIS M, et al. Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies [J]. Building and Environment, 2007, 42(8): 2829-2834.

附录 攻读硕士学位期间发表的论文及专利

- [1] 梁庆, 徐刚, 甄恩明, 陈丽华, 苗蕾. 透明导电薄膜对太阳能平板集热器性能的影响 [J]. 微纳电子技术, 2009, 45(11): 643-646, 671.
- [2] 梁庆, 徐刚. 电致变色玻璃窗节能特性分析 [J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 470-474.
- [3] XU G, HUANG C M, LIANG Q, TAZAWA M, JIN P. Wavelength multiplexing and tuning in nano-Ag/dielectric multilayers. Applied Physics A [J], 2009, 94: 525-530.
- [4] 徐刚, 陈丽华, 梁庆, 徐雪青, 苗蕾. 一种隔热陶瓷制品及其制备方法 [P]. 中国专利: 200810028864.9, 2008-10-29.
- [5] 徐刚, 陈丽华, 梁庆, 徐雪青, 李新军. 一种自洁净隔热保温陶瓷及其制备方法 [P]. 中国专利: 200810028663.4, 2008-10-22.
- [6] 徐刚, 梁庆, 陈丽华, 徐雪青, 苗蕾. 一种自洁净隔热保温陶瓷制品及其制备方法 [P]. 中国专利: 200810028862.X, 2008-10-29.

致 谢

本论文是在导师徐刚博士的悉心指导下完成的，首先我要衷心感谢徐老师在这三年的学习生活中给我的无私关怀与帮助。徐老师严谨的科学态度、执着的事业心、渊博的学识和敏锐的洞察力，不仅引领我沿着正确的科研道路前进，而且使我懂得了许多为人处事的道理。从导师那里所获得的知识 and 领悟的人生真谛，是我一生中宝贵的财富，在此我特别向徐老师表示最诚挚的谢意！

感谢苗蕾和徐雪青博士在论文上对我的指导，两位老师务实的工作作风、高度负责的精神和诲人不倦的工作态度为我树立了教育和科研工作者的榜样。

实验室何云富、王春平、张英、陈德明、马健伟、陈丽华、王银玲等师兄师姐和甄恩明、黄志锋、王泉河、苏丽芬等同学在科研中为我提供了很多宝贵的经验和资料，黄春明博士、黄华凇、李注苓等工作人员也在我的学习和生活中给予了很大的帮助，在此一并表示感谢。

很高兴能与你们一起度过这难忘的三年时光，请接受我深深的祝福，同时也祝愿我们的太阳能实验室未来科研成果频出，明天更加美好！

感谢中国科学院广州能源研究所的各位领导、各位老师，是你们的关心与帮助为我们营造了良好的学习、生活和科研环境！

最后我要深深的感谢我的父母，“谁言寸草心，报得三春晖”。在此祝愿天下所有含辛茹苦把子女抚养成人的父母都永远平安、健康、快乐、幸福！