



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

真空玻璃

唐健正 等著

 武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Special Funds for
Academic Publications

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

真空玻璃

屠健正 等著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

真空玻璃是新型节能玻璃,本书对其原理、性能、关键技术及发展历史作了全面论述。

本书的主要内容包括:真空玻璃的结构、原理,与中空玻璃的区别及其综合性能优势;真空玻璃发展历史及所用材料和工艺概述;真空玻璃传热系数及太阳辐射相关参数等热工性能的分析计算和测量方法;真空玻璃力学性能的理论分析计算及测量方法;真空玻璃实际应用中各种技术问题的研讨等。

本书可作为玻璃行业和建筑行业特别是真空玻璃相关行业的技术人员、管理人员的参考书,也可作为大专院校相关专业师生的参考书及相关企业的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

真空玻璃/唐健正等著. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.7

ISBN 978-7-5629-5722-5

I. ①真… II. ①唐… III. ①真空-特种玻璃 IV. ①TQ171.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 083430 号

项目负责人:李兰英

责任编辑:李兰英

责任校对:张莉娟

封面设计:匠心文化

出版发行:武汉理工大学出版社

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.5

字 数:426 千字

版 次:2018 年 7 月第 1 版

印 次:2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价:198.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

作者简介

唐健正,澳大利亚籍华裔学者,真空玻璃发明人,生于1938年12月,祖籍江苏省南通市,1957年高中毕业于北京市第三十一中学,1963年毕业于北京大学物理系,后留校任教27年,历任助教、讲师、副教授、教研室主任,1990—1998年以高级访问学者的名义在悉尼大学应用物理系工作期间与该系主任R. E. Collins教授合作申请多项真空玻璃国际发明专利。根据悉尼大学“发明人确认书暨发明人权益分配协议”,两位发明人获得



“等额对半分配”的权益。1995年日本板硝子玻璃公司取得真空玻璃专利使用权并于1997年初投产,日本报纸称为“神奇玻璃”的真空玻璃开始被用于建筑领域,开创了节能玻璃的新纪元,使科学家自1893年保温瓶发明以来的百年梦想成真。

唐健正与R. E. Collins教授等人合作发表了多篇论文。其中,1993年在《太阳能》杂志上发表的《透明真空平板玻璃》一文获1997年国际太阳能协会“鲁道夫最佳论文奖”,真空玻璃也获得澳大利亚科技奖。1993年由悉尼大学提名以“特殊技能人才”类别邀请唐健正加入澳大利亚籍。

1998年唐健正回国后先在青岛新立基技术应用有限公司任技术总监,建立了实验基地,后于2001—2016年在北京新立基真空玻璃技术有限公司任首席科学家、技术总监,同时兼任北京市真空玻璃工程技术中心主任,2005年北京市外国专家局授予唐健正“外国专家证”,2007年中国公安部授予其“外国人永久居留证”。

唐健正回国后申请了国内外真空玻璃专利20多项,有些专利解决了真空玻璃发展中的难题,具有国际领先水平,唐健正先后在国内外发表数十篇论文并多次发表演讲,对真空玻璃的研究和应用起了很大的推动作用。

前 言

真空玻璃是依据保温瓶原理制作的新型节能玻璃,从1913年第一个真空玻璃专利出现至今已有百余年的历史,从1997年第一条真空玻璃生产线出现至今也已有20年之久。这20年来,中国真空玻璃企业已从1998年建立的“青岛新立基”一家发展为“北京新立基”“青岛新亨达”“洛阳兰迪”“台湾玻璃”“河南龙旺”“天津沽上”“西安彩珠”“哈尔滨鑫马”“江苏晶麦德”“北京明旭”“青岛中腾志远”“北京明日之星”等“百花齐放”的局面。

国际上,继日本板硝子(NSG)公司之后,韩国、美国及英国、法国、德国、俄罗斯等欧洲国家都出现过研发真空玻璃的机构,有成功的也有失败的。除板硝子公司外,美国佳殿(Guardian)、日本松下(Panasonic)和韩国 Eagon 等公司都已建成生产线,还有一些玻璃及门窗制造企业也在积极建设或洽购生产线。

为了适应真空玻璃的发展需要,中国早已制定了真空玻璃行业标准,目前正在制定真空玻璃检测标准。国际上,ISO 组织也在制定真空玻璃方面的标准。

在全球节能减排潮流的推进下,真空玻璃产业的发展已是大势所趋。然而迄今为止,还没有一本全面论述真空玻璃的专著问世。笔者从事真空玻璃研发及产业化已近30年,在工作中也深感需要一本专著从技术上总结真空玻璃上百年的发展历史,全面论述真空玻璃的原理、性能及关键制造技术,让从业者少走弯路,让后来者尽快入门,共同在前人的基础上创新发展,克服各种困难,推动真空玻璃事业前进。时不待我,机不可失,出于上述目的,笔者和编写组其他人员一起竭力编写了此书。

本书内容分为7章及附录。

第1章介绍了真空玻璃的定义、结构及传热特点;与中空玻璃相比,详细分析了真空玻璃的综合性能优势;从技术角度回顾了真空玻璃发展历史,并对其产业化前景做了分析探讨。

第2章介绍了制造真空玻璃所需的玻璃、封边、封口、支撑物、吸气剂等材料的性能、分类及选型。

第3章对国内外制造真空玻璃的各种工艺,包括真空获取及封离技术,从理论到实际做了详尽介绍。

第4章对真空玻璃、中空玻璃及复合真空玻璃的主要热工参数,包括传热系数(U 值)及太阳辐射相关参数(如遮阳系数等)的物理意义及计算方法做了详尽论述。

第5章为真空玻璃力学分析。从玻璃材料的基本力学性能入手,分析了大气压作用下真空玻璃的应力分布及表面各部位应力计算方法,特别分析了钢化真空玻璃表面应力重分

布导致的“类”钢化状态;提出了真空玻璃支撑物间距的优化设计方案并给出计算案例,对真空玻璃生产中经常发生的支撑物缺位的影响做了分析,提出了支撑物缺位许可界定参考数;分析了温差等因素造成真空玻璃炸裂的机理及应对措施;对真空玻璃的承载特性及抗风压性能、抗冲击性能、抗振动性能也做了分析计算。

第6章介绍了真空玻璃有别于其他玻璃的性能测量方法,特别论述了正在研发中的真空玻璃 U 值的两种测量方法:防护热板法和均温板法。在力学性能方面,介绍了抗弯曲及抗冲击强度和表面应力的检测方法,特别介绍了钢化真空玻璃碎片检测方法。

第7章为真空玻璃应用技术概述,介绍了真空玻璃整窗及幕墙的 U 值计算方法;在建筑门窗及采光顶应用时的选型;复合真空玻璃安装方向的选择;真空玻璃在冷链、太阳能、智能玻璃、调光玻璃及内置百叶玻璃等领域应用时的技术问题探讨,以及建筑门窗节能计算及检测方法等。

附录中除编入了传热学名词解释及单位换算关系外,还编制了中空玻璃及真空玻璃传热系数数据表,以方便读者查阅。

为了满足不同读者的需要,本书采取了深入浅出、图文并茂的方式写作,并尽可能简化数学公式推导。同时,本书又列出大量中外参考文献,便于有需要的读者查阅。

本书第1章、第4章、第6章第6.1节由北京新立基真空玻璃技术有限公司许威和笔者编写,第2章、第3章由李洋编写初稿,后经中国建筑材料科学研究总院有限公司李要辉审阅并做了部分修改。第5章和第6章第6.2节由中国建材检验认证集团股份有限公司刘小根编写。第7章第7.1~7.2节由许威编写,第7.3~7.8节由北京新立基真空玻璃技术有限公司侯玉芝编写,第7.9节由北京新立基真空玻璃技术有限公司刘甜甜编写。附录由刘甜甜、侯玉芝、许威编制。笔者对全书做了反复审阅与修改。

本书由武汉理工大学李宏和扬州大学张瑞宏审稿。

本书是上述人员集体辛勤工作的结晶。很多工作是利用业余时间和节假日完成的,笔者在此表示衷心的感谢!同时,感谢武汉理工大学出版社对本书出版工作的支持及所付出的辛勤劳动。

本书的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金和扬州大学机械工程学院的经济支持,在此一并表示感谢!

谨以此书献给慈父唐璞和慈母蒋琪华。

由于笔者水平所限,书中错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

唐健正

2018.3.1

目 录

1 真空玻璃概述	(1)
1.1 真空玻璃的定义、结构及传热特点	(1)
1.1.1 真空玻璃的定义	(1)
1.1.2 真空玻璃的结构	(1)
1.1.3 真空玻璃的传热特点	(2)
1.2 真空玻璃的综合性能优势	(5)
1.2.1 传热系数小	(5)
1.2.2 隔声性能好	(9)
1.2.3 防结露性能好	(14)
1.2.4 降低表面“冷辐射”	(15)
1.2.5 放置角度对 U 值无影响	(15)
1.2.6 应用地域广	(16)
1.2.7 寿命长	(16)
1.2.8 抗风压性能好	(19)
1.3 真空玻璃的发展历史	(20)
1.3.1 真空玻璃的启蒙阶段	(20)
1.3.2 从实验室到产业化的突破阶段	(25)
1.3.3 真空玻璃产业化发展阶段	(39)
1.4 真空玻璃产业现状及发展方向	(48)
1.4.1 真空玻璃产业现状	(48)
1.4.2 真空玻璃产业发展方向	(50)
参考文献	(52)
2 真空玻璃所用材料及选型	(55)
2.1 玻璃基片	(55)
2.1.1 浮法玻璃	(55)
2.1.2 镀膜玻璃	(57)
2.1.3 钢化玻璃	(60)
2.2 封边材料	(63)

2.2.1	真空玻璃对封边材料的技术要求	(63)
2.2.2	含铅低熔点玻璃粉	(65)
2.2.3	无铅低熔点玻璃粉	(66)
2.2.4	调和剂	(67)
2.2.5	真空密封胶	(67)
2.3	支撑物材料	(68)
2.3.1	真空玻璃对支撑物的技术要求	(68)
2.3.2	金属支撑物	(68)
2.3.3	玻璃支撑物	(68)
2.3.4	其他	(70)
2.4	封口材料	(70)
2.4.1	封口玻璃管	(70)
2.4.2	金属封口片	(71)
2.4.3	封口玻璃珠	(72)
2.5	吸气剂	(72)
2.5.1	吸气剂的分类	(72)
2.5.2	吸气剂在真空玻璃中的应用	(75)
2.5.3	吸气剂的作用	(76)
	参考文献	(80)
3	真空玻璃制造方法及工艺	(82)
3.1	支撑物布放方法及工艺	(82)
3.1.1	支撑物点阵布放工艺	(82)
3.1.2	玻璃粉膏点胶工艺	(83)
3.1.3	玻璃板腐蚀工艺	(83)
3.2	封接焊料涂布方法及工艺	(84)
3.2.1	错台结构布粉方法及工艺	(84)
3.2.2	平封结构布粉方法及工艺	(84)
3.2.3	玻璃粉膏调和工艺	(85)
3.3	封边方法及工艺	(85)
3.3.1	低熔点玻璃粉封边技术	(85)
3.3.2	金属封边技术	(88)
3.4	真空获取技术及工艺	(91)
3.4.1	真空基本知识	(91)
3.4.2	排气温度和排气时间的设计	(92)
3.4.3	真空杯排气技术	(97)

3.4.4	真空炉排气技术	(97)
3.4.5	真空卫生	(98)
3.5	封离技术	(98)
3.5.1	玻璃管封口	(98)
3.5.2	封口片封口	(99)
3.5.3	封离时真空度的变化	(99)
	参考文献	(99)
4	真空玻璃热工参数及其计算方法	(100)
4.1	真空玻璃热工参数和建筑能耗的关系	(100)
4.1.1	玻璃窗能耗的来源	(100)
4.1.2	“得热”与“失热”、“保温”与“隔热”——窗户节能设计思路	(101)
4.2	玻璃窗传热系数	(102)
4.2.1	建筑围护结构对传热系数的要求	(102)
4.2.2	窗框传热系数 U_f 及玻璃传热系数 U_g 与玻璃窗传热系数 U_w 的关系	(103)
4.3	玻璃中心区域传热系数 U_g 的计算	(105)
4.3.1	单片玻璃传热系数的计算	(105)
4.3.2	真空玻璃、中空玻璃的中心区域传热系数的计算	(109)
4.3.3	复合真空玻璃的结构和传热系数的计算方法	(117)
4.4	真空玻璃与中空玻璃太阳辐射相关参数的计算	(119)
4.4.1	玻璃与太阳辐射相关参数简介	(119)
4.4.2	节能玻璃所用原片的品种及其与太阳辐射相关的性能	(123)
4.4.3	真空玻璃与中空玻璃太阳辐射相关参数的计算	(125)
4.4.4	复合真空玻璃太阳辐射相关参数的计算方法	(129)
4.4.5	计算的误差分析	(138)
	参考文献	(140)
5	真空玻璃力学分析	(142)
5.1	玻璃材料基本力学性能	(142)
5.1.1	玻璃弯拉作用下的变形与强度特征	(142)
5.1.2	玻璃材料的断裂力学	(143)
5.1.3	玻璃材料的统计力学强度	(144)
5.1.4	影响玻璃强度的主要因素	(144)
5.2	大气压作用下真空玻璃的应力分布	(146)
5.2.1	支撑部位玻璃上(外)表面处应力计算	(146)
5.2.2	两支撑点对角连线中点处玻璃下(内)表面处应力计算	(148)

5.2.3	支撑物支撑应力	(148)
5.2.4	支撑物与玻璃基片之间的接触应力	(149)
5.2.5	真空玻璃边缘封接部位应力及封接强度	(156)
5.2.6	钢化真空玻璃应力重分布	(159)
5.3	真空玻璃支撑物布放间距优化设计	(161)
5.3.1	玻璃表面最大持久拉应力	(161)
5.3.2	支撑物与玻璃接触应力	(161)
5.3.3	支撑物压应力	(162)
5.3.4	封接边缘拉应力	(162)
5.3.5	真空玻璃变形	(162)
5.3.6	算例	(164)
5.4	支撑物缺位对真空玻璃影响分析	(165)
5.4.1	支撑物缺位对真空玻璃的弯曲应力和弯曲变形影响及分析	(165)
5.4.2	支撑物缺位时真空玻璃基片的弯曲应力和变形	(165)
5.4.3	支撑物缺位许可界定	(168)
5.5	真空玻璃温差应力与变形	(168)
5.5.1	温差作用下真空玻璃变形与应力计算	(169)
5.5.2	装配约束对真空玻璃温差造成的应力影响分析	(172)
5.5.3	减小温差导致真空玻璃破裂概率的措施	(173)
5.6	真空玻璃热应力及热炸裂	(173)
5.7	真空玻璃边缘热封接残余应力	(174)
5.8	真空玻璃夹层应力	(176)
5.9	真空玻璃承载特性与强度设计	(177)
5.9.1	弯曲载荷作用下真空玻璃等效厚度	(177)
5.9.2	真空玻璃抗风压性能	(179)
5.9.3	真空玻璃抗风压性能计算实例	(180)
5.10	真空玻璃抗冲击性能	(182)
5.11	真空玻璃抗振动性能	(182)
	参考文献	(182)
6	真空玻璃性能检测方法	(184)
6.1	真空玻璃 U 值的测量方法	(184)
6.1.1	真空玻璃 U 值测量的重要性	(184)
6.1.2	设计制作热导测量仪的难度	(186)
6.1.3	防护热板法 U 值测量仪	(188)
6.1.4	用热流计加均温板测量真空玻璃 U 值的方法	(199)

6.1.5	防护热板法和均温板法实测结果比对	(201)
6.1.6	测量 U 值时应注意的问题	(202)
6.2	真空玻璃力学性能测试	(202)
6.2.1	弯曲强度测试	(203)
6.2.2	抗冲击强度测试	(203)
6.2.3	表面应力测试	(205)
6.2.4	真空玻璃应力光弹性检测	(206)
6.2.5	钢化真空玻璃碎片数量检测方法	(207)
	参考文献	(208)
7	真空玻璃应用领域技术概述	(209)
7.1	节能建筑中真空玻璃的选型	(209)
7.1.1	真空玻璃用 Low-E 玻璃	(209)
7.1.2	真空玻璃热工参数	(209)
7.1.3	真空玻璃在被动房中的应用	(210)
7.2	真空玻璃整窗或幕墙传热系数的计算	(213)
7.2.1	真空玻璃整窗传热系数的计算公式	(213)
7.2.2	真空玻璃框与面板接缝的线传热系数	(214)
7.3	“中空+真空”复合真空玻璃安装方向比较	(222)
7.4	采光顶复合真空玻璃选型	(224)
7.4.1	采光顶对玻璃的要求	(224)
7.4.2	复合真空玻璃结构选择及安装注意事项	(225)
7.5	真空玻璃在冷链行业的应用	(227)
7.5.1	冷柜门对玻璃的要求	(227)
7.5.2	真空玻璃用于冷柜的优势	(228)
7.5.3	冷柜门安全要求	(231)
7.6	太阳能真空玻璃	(231)
7.6.1	光伏真空玻璃	(231)
7.6.2	光热真空玻璃	(234)
7.7	LED 智能真空玻璃	(236)
7.8	遮阳系数可调的复合真空玻璃	(237)
7.8.1	调光真空玻璃	(237)
7.8.2	中空内置百叶复合真空玻璃	(238)
7.9	建筑门窗的节能计算和检测	(242)
7.9.1	建筑门窗的节能计算	(242)
7.9.2	建筑门窗节能计算条件参数	(247)

7.9.3	四个城市建筑门窗热工参数计算	(251)
7.9.4	公共建筑节能计算结果	(252)
7.9.5	住宅建筑节能计算结果	(253)
7.9.6	温室气体和污染物排放计算结果	(254)
7.9.7	建筑门窗节能检测方法	(255)
参考文献.....		(255)
附录.....		(257)
附录 A	传热学名词解释	(257)
附录 B	传热系数的三种单位及其换算关系	(258)
附录 C	美国 R 值与 U 值对应关系	(258)
附录 D	标准大气压下不同温度时的饱和水蒸气分压强 p_s	(259)
附录 E	中空玻璃及真空玻璃传热系数数据表	(262)
附录 F	国内外真空玻璃相关标准	(267)

1 真空玻璃概述

1.1 真空玻璃的定义、结构及传热特点

1.1.1 真空玻璃的定义

真空玻璃是指两片或两片以上平板玻璃以支撑物隔开,周边密封,在玻璃间形成真空层的玻璃制品^[1]。

1.1.2 真空玻璃的结构

真空玻璃是一种新型的节能玻璃,目前真空玻璃的一种结构如图 1.1 所示。它由两块平板玻璃构成,玻璃板之间用高度为 0.1~0.5 mm 的支撑物呈方阵排列隔开,四周使用低熔点焊料将两片玻璃封接,其中一片玻璃上留有抽气孔,真空排气后用封口片和低温焊料将抽气口封住形成真空腔,为保持真空度长期稳定,真空层内置有吸气剂。真空玻璃的原片可以采用普通玻璃,也可以采用钢化或半钢化玻璃。为了提高热工性能,通常选用一片或两片低辐射玻璃(又称 Low-E 玻璃),Low-E 玻璃的膜置于真空层的内表面。为提高安全性,也可以将真空玻璃通过复合中空或夹胶的方式与另外一片或两片玻璃组合成“复合真空玻璃”。

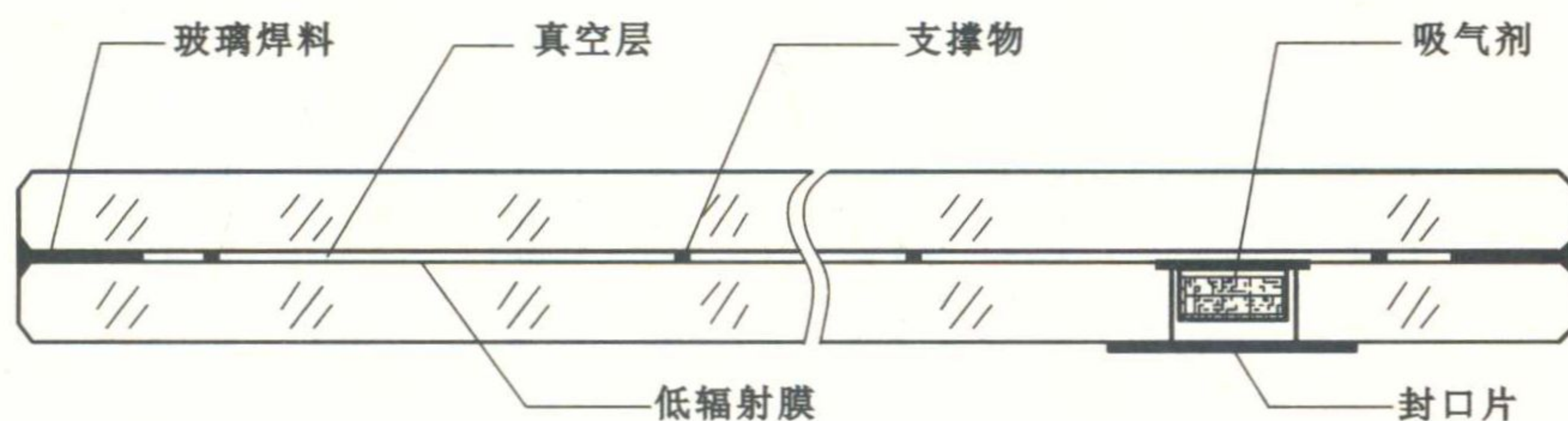


图 1.1 真空玻璃的一种结构

中空玻璃是目前节能玻璃的主流产品,其结构如图 1.2 所示。两片玻璃中间间距 6~24 mm,周边用密封胶黏结密封,玻璃层间填充干燥气体。分子筛干燥剂一般置于间隔材料中,用以吸收气体中的水汽以防内部结露。Low-E 玻璃的膜面置于中空结构的内表面。

由此可见,真空玻璃和中空玻璃的相同点都是由两片玻璃构成,两者的结构差异如表 1.1 所示。

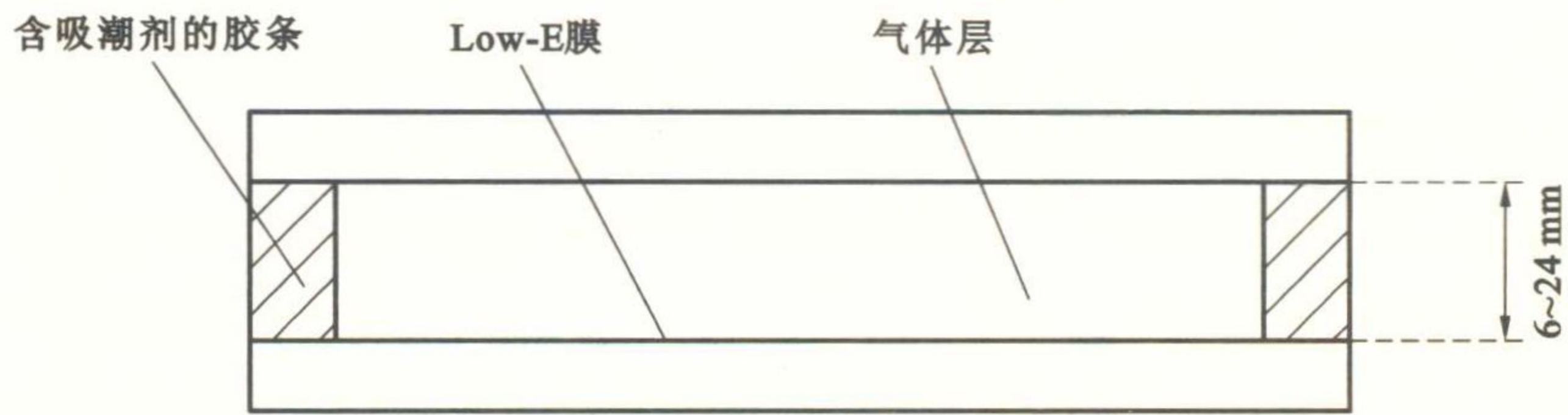


图 1.2 Low-E 中空玻璃的结构示意图

表 1.1 真空玻璃与中空玻璃的结构差异

项目 \ 类别	真空玻璃	中空玻璃
周边密封材料	低温焊料(玻璃或金属材料)	有机结构胶
抽气口	玻璃焊料密封	无
间隔层材料	真空+微小支撑物	空气或惰性气体
间隔层厚度	0.1~0.5 mm	6~24 mm

1.1.3 真空玻璃的传热特点

由于结构不同,真空玻璃与中空玻璃的传热机理也有所不同。图 1.3 为两者简化的传热机理示意图。真空玻璃中心部位传热由辐射传热和支撑物传热及残余气体传热三部分构成,合格产品中残余气体传热可以忽略不计;而中空玻璃则由气体传热(包括传导和对流)和辐射传热构成。

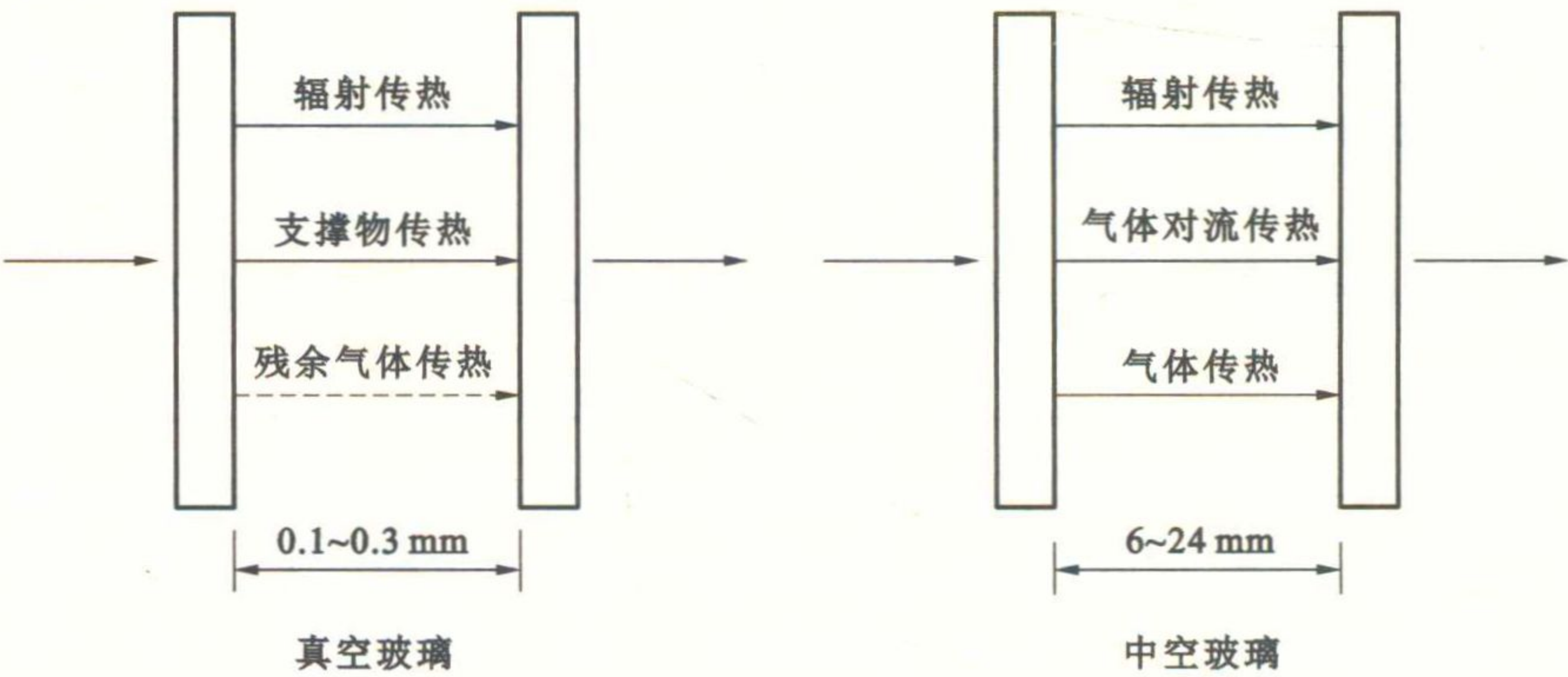


图 1.3 真空玻璃和中空玻璃的传热机理示意图

由此可见,要减小温差引起的传热,真空玻璃和中空玻璃都要减小辐射传热,有效的方法是采用 Low-E 玻璃,在兼顾其他光学性能要求的条件下,Low-E 玻璃辐射率越低越好。二者的不同点是真空玻璃不但要确保必需的真空度,使残余气体传热减小到可以忽略的程度,还要尽可能减小支撑物的传热;中空玻璃则要尽可能减小气体传热。为了减小气体传热并兼顾隔声性及厚度等因素,中空玻璃的空气层厚度一般为 6~24 mm,以 12~16 mm 居多。要减小气体传热,还可用相对分子质量较大的气体(如惰性气体:氩气、氮气、氙气等)来

代替空气,但即便如此,气体传热仍占据主导地位。

支撑物的存在使真空玻璃中心部位的传热是非均匀分布的。真空玻璃的热量流动方式如图 1.4 所示。

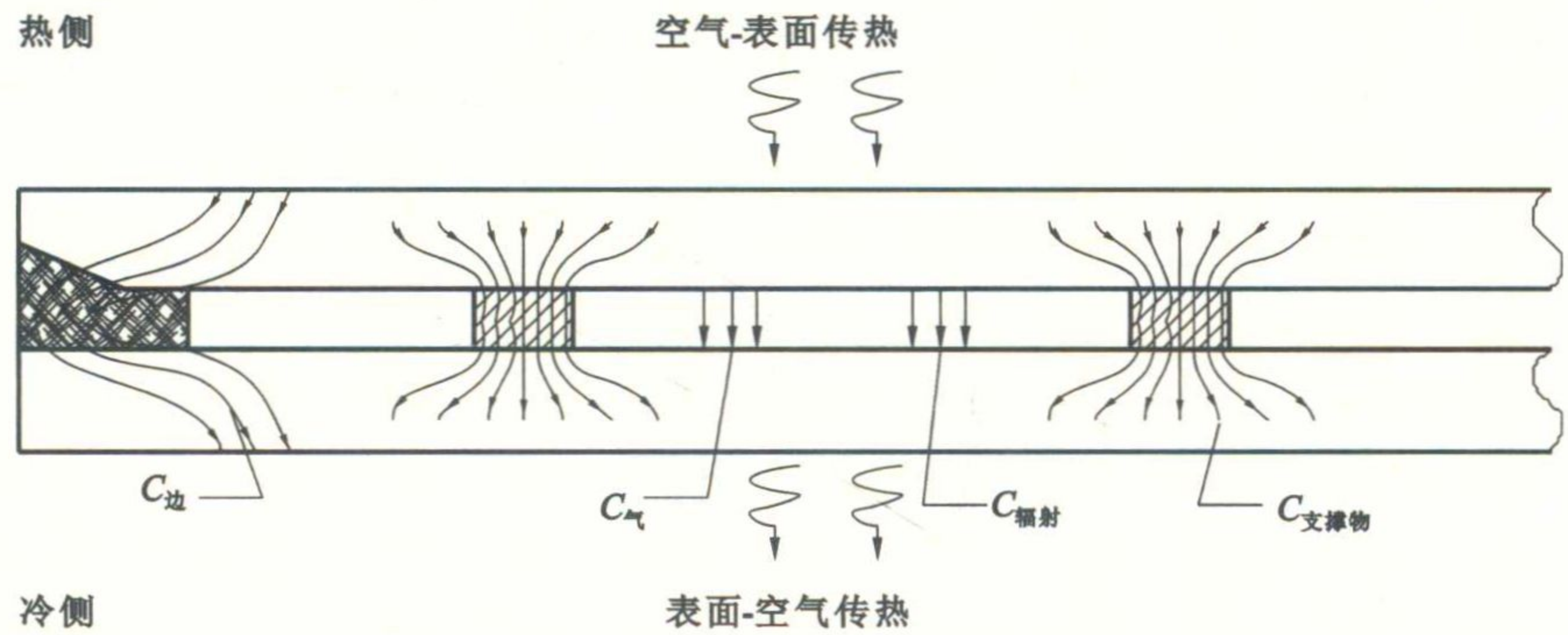


图 1.4 真空玻璃传热示意图

玻璃中心部位的实际热导可用式(1.1)表示：

$$C_{\text{真空}} = C_{\text{辐射}} + C_{\text{支撑物}} + C_{\text{气}} = C'_{\text{真空}} + C_{\text{气}} \tag{1.1}$$

式中, $C_{\text{辐射}}$ 是辐射热导; $C_{\text{支撑物}}$ 是支撑物热导; $C_{\text{气}}$ 是真空层内残余气体的热导。

$C'_{\text{真空}} = C_{\text{辐射}} + C_{\text{支撑物}}$ 是真空玻璃中心部位热导的理想值,当材料和温度确定以后,它们都有确定值,可以视为常数。真空玻璃产品实测热导值的波动,很大程度上是由 $C_{\text{气}}$ 值的波动引起的,而影响 $C_{\text{气}}$ 值的最主要因素就是真空层内残余气体的量,或者说是真空层内的气压。所以,可以通过测量 $C_{\text{气}}$ 来推算出真空玻璃内部的气压。

1999 年 12 月,清华大学付承诵等人对真空玻璃的传热特性用红外热像仪进行了测量,测量装置如图 1.5 所示。

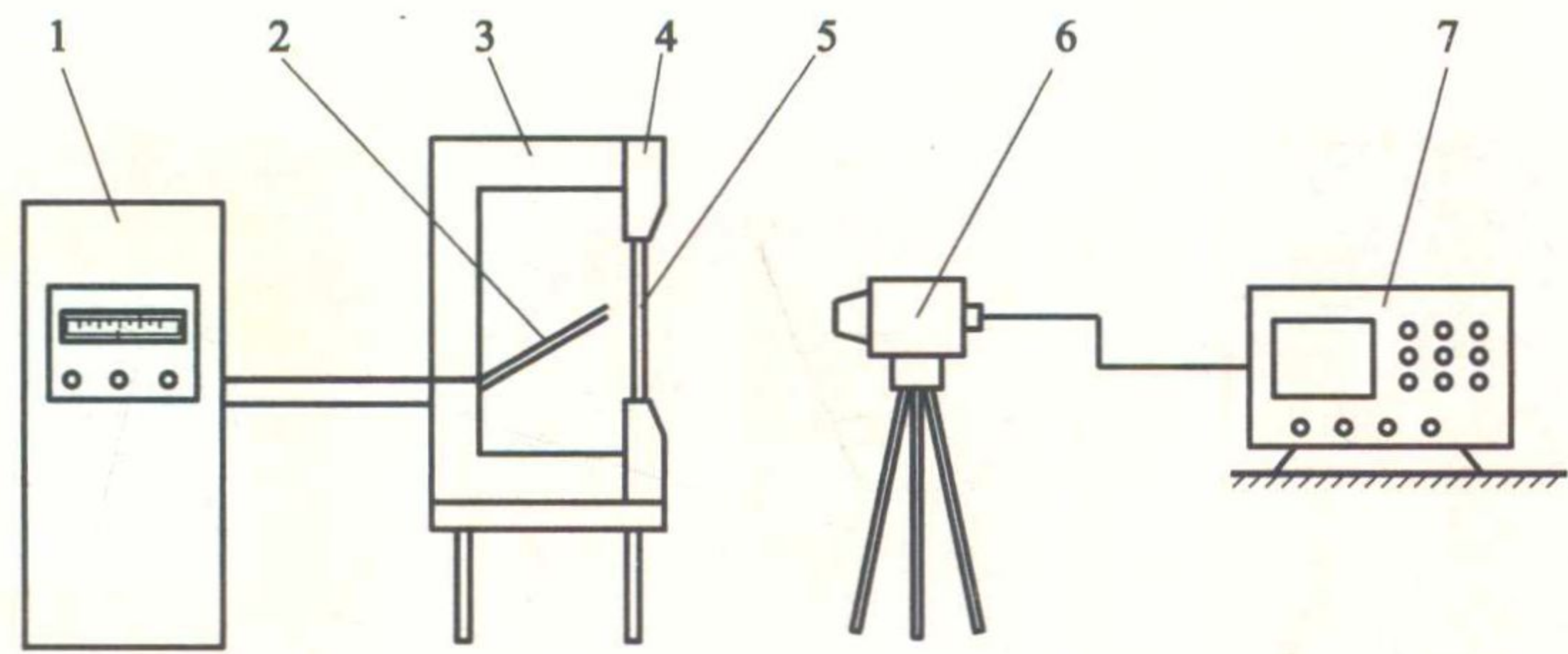


图 1.5 红外热像仪测量装置示意图

1—温度控制器;2—热电偶;3—保温箱;4—保温箱盖;5—真空玻璃;6—热像仪镜头;7—热像仪控制器

本试验在恒温箱体内模拟 60℃ 的环境温度下,采用红外热像仪对三种不同类型的真空玻璃,包括真空玻璃不镀膜(简称 N-N)、真空玻璃单层镀膜(简称 K-N)及真空玻璃双层镀膜(简称 K-K)对室温面的温度场进行了测量,数据见表 1.2。得到三种真空玻璃在室温面上的温度分布图(图 1.6)和温度场的彩色热像图(图 1.7)。对上述三种真空玻璃的保温性能进行了对比。试验结果表明,镀膜的真空玻璃的保温效果远好于不镀膜的真空玻璃,即“双层镀膜”优于“单层镀膜”,“单层镀膜”优于“不镀膜”。

温差 $\Delta T = (60 - 20)^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$ 时真空玻璃从边缘至中心的温度测量数据见表 1.2, 图 1.6 为相应的温度分布曲线。

表 1.2 温差为 40°C 时真空玻璃从边缘至中心的温度测量数据

测点	N-N 各测点温度($^\circ\text{C}$)	K-N 各测点温度($^\circ\text{C}$)	K-K 各测点温度($^\circ\text{C}$)
1	45	39.84	27.26
2	—	36.20	25.94
3	42.47	32.17	23.96
4	39.35	29.44	20.88
5	38.57	26.19	18.68

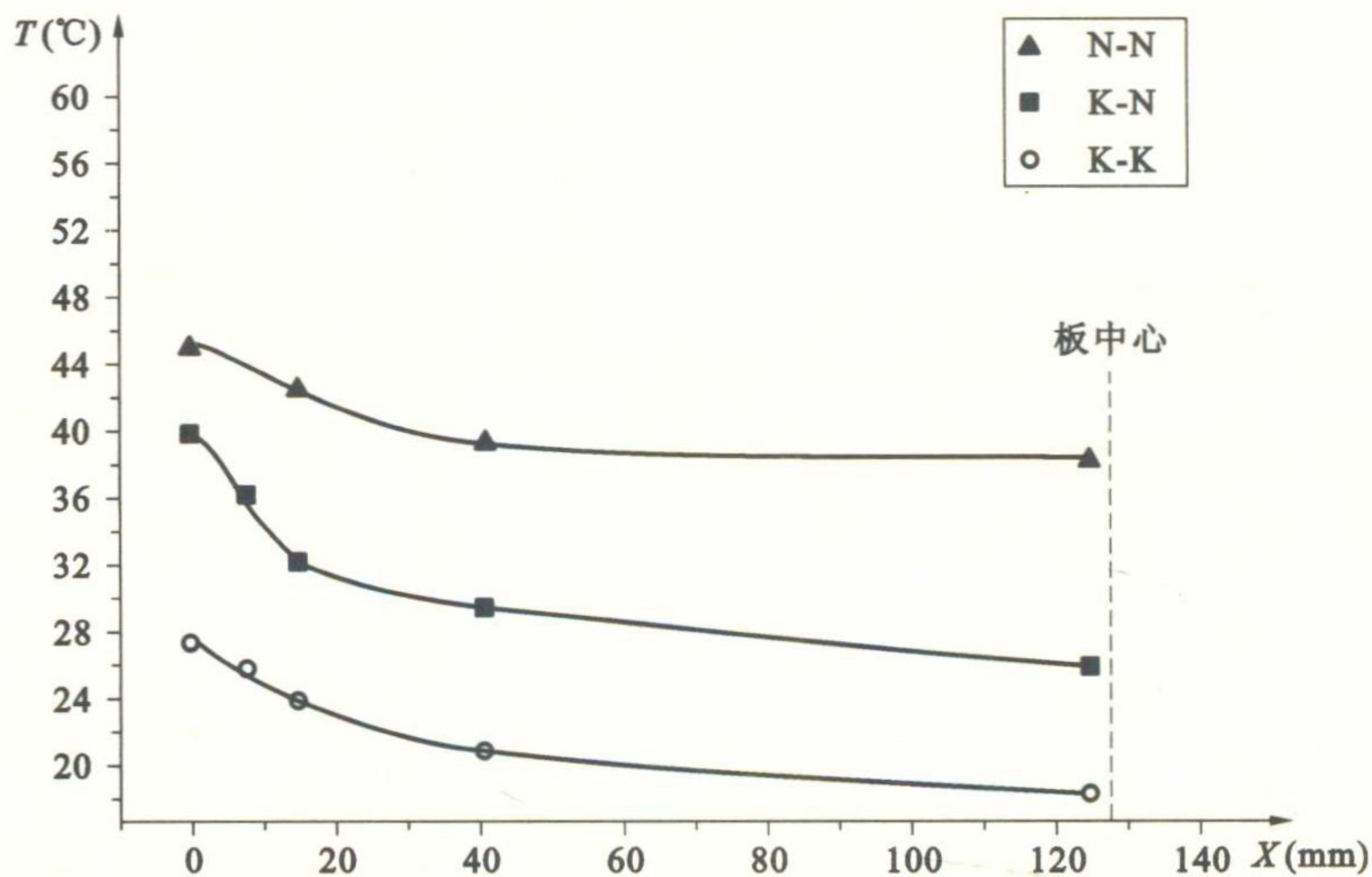


图 1.6 温差为 40°C 时三种真空玻璃从边缘至中心的温度分布曲线

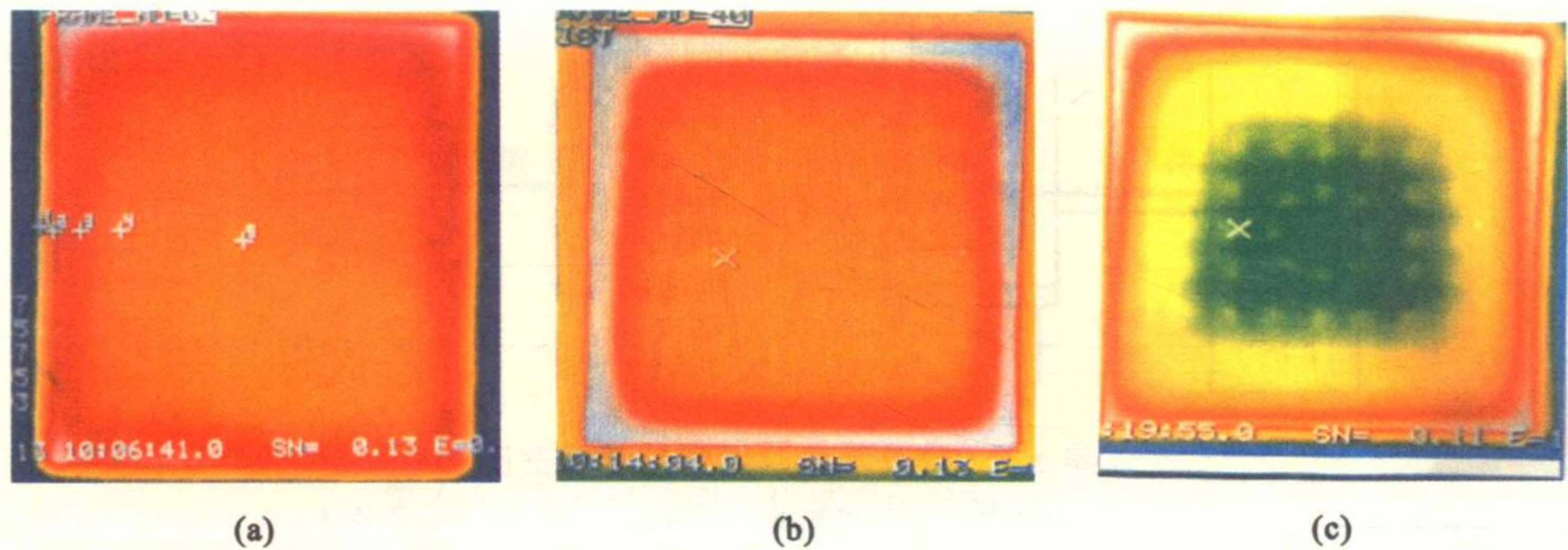


图 1.7 三种真空玻璃的红外彩色热像图片

- (a) N-N 250 mm×250 mm, 恒温腔 60°C , 室温 23°C , 室内侧样品中心 38.57°C ;
- (b) K-N 250 mm×250 mm, 恒温腔 60°C , 室温 20°C , 室内侧样品中心 26.19°C ;
- (c) K-K 250 mm×250 mm, 恒温腔 60°C , 室温 18°C , 室内侧样品中心 18.68°C

三种真空玻璃的红外彩色热像图片见图 1.7, 用不同颜色显示了温度的分布。由图 1.7 可以看出:

(1) 在恒温箱内温度和室温的温差下,其室温一侧表面的温度 N-N 最高,K-N 其次,K-K最低。这说明镀膜可以大幅度提高真空玻璃的保温性能。

(2) 每块真空玻璃的表面温度均是:边缘高,中心低。这是因为真空玻璃的边缘密封部分无真空层,故其热传导远大于中心区。

(3) 由图 1.7(c)可以看出,支撑物的局部区域温度较高,这是由于支撑物的直接热传导造成的。

(4) 用红外热成像技术测量真空玻璃表面温度分布,在测量方法上具有非接触式、全场性的突出优点,且其数据采集和处理的自动化程度比较高。它为更全面深入地定量分析和研究真空玻璃这种新产品的隔热性能提供了一种重要的测量手段和科学实验依据。

从图 1.7(c)K-K 真空玻璃的图片可以看到,支撑物所在位置的温度高于其周边的温度,在 1993 年悉尼大学用冷箱拍摄的高分辨率图像(图 1.8)上,这一特点更为明显。

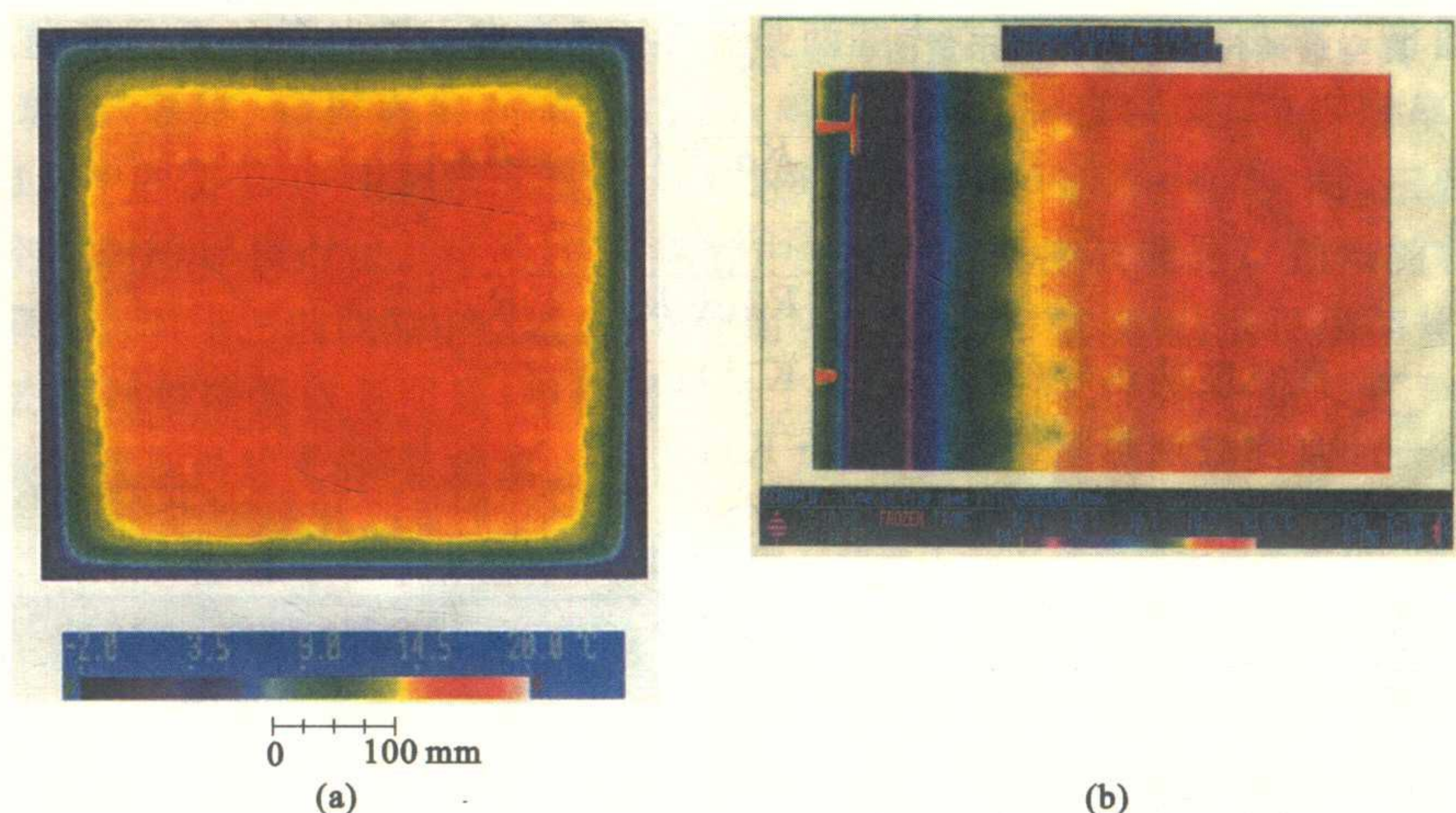


图 1.8 真空玻璃热成像图(悉尼大学拍摄)

(a) 全图;(b) 边部截图

1.2 真空玻璃的综合性能优势

真空玻璃是新兴的高科技节能产品,其制造工艺复杂,应用于节能要求很高的建筑。而中空玻璃为大众所知,发展至今已有 50 多年的历史,技术相对较成熟,其窗框等配套设施也较完善,应用于节能要求一般或较高的建筑。本节以中空玻璃和真空玻璃性能比较的方式来介绍真空玻璃综合性能优势。

1.2.1 传热系数小

1. 传热系数的定义及计算方法

传热系数^[2]定义:两侧环境温度差为 1 K(1 °C)时,在单位时间内通过单位面积传递