

建筑玻璃 光学检测技术及应用

Optical Measurement
Technology and Application for
Glass in Building

主 编 张喆民
副主编 苑 静 黄达泉

中国建材工业出版社

建筑玻璃光学检测技术及应用

Optical Measurement Technology and Application for Glass in Building

主 编 张喆民

副主编 苑 静 黄达泉

参 编 王 威 吴 筱 许海凤 钟星辉

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑玻璃光学检测技术及应用 / 张喆民主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2019. 12
ISBN 978-7-5160-2672-4

I. ①建… II. ①张… III. ①建筑玻璃-光学检验
IV. ①TQ171.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 203130 号

内 容 简 介

本书以建筑玻璃光学检测技术为基础, 介绍了建筑玻璃的特性表征、特性检测要求及相关标准、光学检测相关基础知识、特性参数检测原理及仪器、相关标准样品、仪器校准、测量误差分析与测量结果评定、国内外建筑玻璃光热参数计算软件及玻璃数据库。

本书适合玻璃性能及工艺方法科研单位、相关质量监督管理部门、玻璃生产企业工艺人员、玻璃性能检验人员、玻璃检测仪器研发及生产企业技术人员使用, 可作为玻璃检测人员培训教材和检测工作的参考资料。

建筑玻璃光学检测技术及应用

Jianzhu Boli Guangxue Jiance Jishu ji Yingyong

张喆民 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 12

字 数: 220 千字

版 次: 2019 年 12 月第 1 版

印 次: 2019 年 12 月第 1 次

定 价: 68.00 元

本社网址: www.jcbs.com, 微信公众号: zgjcgycbs

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

序一

玻璃材料在建筑玻璃领域的应用最为广泛，在建筑中无论是外观、围护结构，还是节能效果等方面均起着越来越重要的作用。建筑节能玻璃已经成为了一种高科技产品，其光学、热工、物理等性能指标直接关系到建筑玻璃的外观效果、舒适性、节能性及安全性。随着人们生活水平的不断提高，人们对建筑幕墙、门窗用玻璃的各项性能指标及其检测水平提出了更高要求，同时玻璃的相关检测技术也得到了快速发展。由于建筑玻璃是建材传统产品，且具有透明这一特性，大家容易“视而不见”，很多功能和性能无法透过人的感观去辨识，需要通过先进的检测手段获得产品的独特性能参数，进而评价玻璃产品的技术水平。

在建筑玻璃的生产过程中需要一系列的实验室性能检测和在线检测，以保证玻璃产品的质量，例如：浮法玻璃、在线镀膜玻璃、离线低辐射镀膜玻璃采用在线检测技术对透射光谱、反射光谱、颜色及色差等参数进行在线测量；而中空镀膜玻璃等成品建筑玻璃一般采用实验室或现场测量仪器对可见光透反射比、太阳能总透射比、传热系数、表面应力等参数进行测量。在玻璃安装现场和玻璃已经安装的情况下，对玻璃进行重要参数的检测也非常必要，可以避免以次充好的现象出现。先进的检测手段是产品质量控制及保障市场公平竞争的有力武器，建筑节能玻璃的应用和发展需要政府、社会团体、企业、检测机构等力量共同推动。

《建筑玻璃光学检测技术及应用》是玻璃行业少有的玻璃检测类综合性技术书籍，由北京奥博泰科技有限公司的张喆民博士、行业内长期从事玻璃检测的技术人员以及专业的检测仪器研发工程师合力撰写，是他们多年的实践经验整理提

升的结晶。该书包括光学检测基础知识、相关标准、玻璃的特性表征、检测仪器的测试原理及使用等方面内容，并且汲取了玻璃性能研究和检验专业资深专家的宝贵经验，内容翔实且契合行业发展需求，值得玻璃行业的从业者学习和分享。该书不仅可以作为玻璃生产、检测和检验人员的培训教材，也可作为建筑节能设计、质检机构人员的技术参考书，对玻璃质量水平和玻璃从业人员技术水平的提高均具有重要意义。

在此，我向建筑玻璃行业同仁推荐《建筑玻璃光学检测技术及应用》一书，并祝本书出版发行取得圆满成功！

中国建筑玻璃与工业玻璃协会 会长

张佰恒

序二

人们常说眼睛是心灵的窗户，那么门窗就是建筑的眼睛，玻璃就是建筑灵魂的使者。玻璃自发明以来，经过前人的不懈努力已经形成了相对完善的技术和产品体系。然而长久以来，建筑领域对于建筑玻璃应用存在着很大的误区，特别是建筑节能要求的提升使玻璃成为“罪魁祸首”，设计师对玻璃光学特征，特别是日新月异的玻璃领域的新技术、新产品概念不清，导致在工程中错误应用甚至产生隐患。

张喆民博士从事建筑光学性能及检测技术研究多年，颇有建树。本书从建筑玻璃的应用角度出发，归纳总结了最新的国家及行业标准要求，内容涵盖了基本的光学原理，包括光源、光的传输、光度与色度以及光谱等知识；系统介绍了表征建筑玻璃性能的特性参数及检测方法，具体到专用检测仪器的特点、使用、校准等一系列知识，为门窗幕墙的从业技术人员提供了有效的参考工具，使之能快速掌握建筑玻璃的应用技术。

本书为设计师提供了选用依据，为检测人员控制工程质量提供了有效的手段。该书深入浅出，思路清晰，有原理、有方法，是一本难得的跨行业的教材，值得大家一读。

教授级高级工程师

中国建筑金属结构协会检测认证分会 会长

国家建筑幕墙门窗质量监督检验中心 常务副主任

中国建筑科学研究院 建筑幕墙门窗研究中心 主任

全国建筑幕墙门窗标准化技术委员会 (SAC/TC 448) 秘书长

王洪涛

前 言

在建筑玻璃科研、生产和应用工作中，光学检测技术已成为有力的技术支撑和必不可少的技术手段。我国众多建筑幕墙工程中，从建筑玻璃组成结构设计和采购，到质量检验，均涉及玻璃的光学参数和热工参数（以下简称：光热参数）的检测。设计师根据建筑的综合需求，选定合适光热参数的节能玻璃，以达到建筑外观、内部采光、节能及舒适性的要求。工程项目方根据设计指标要求定制或选购合格的玻璃产品，工程验收方根据设计指标现场检验工程项目实际使用的玻璃产品是否符合验收要求。

在玻璃研发过程中，人们需要对不同工艺条件下的玻璃光热参数进行计算和检测，以评定玻璃的质量特性。尤其是近些年，随着市场对建筑玻璃功能上的需求不断提高，镀膜工艺不断更新，以满足人们对建筑玻璃外观、采光、节能及舒适性方面的要求，这就要求在科研、生产等环节对玻璃进行相关参数的检测，为人们提供实验和理论依据，进而保证玻璃的质量，提高工作效率，降低成本。在玻璃的生产过程中，为保证产品质量均匀、性能稳定，需要对生产过程进行全面在线和离线检测。例如磁控溅射镀膜生产线，需要对原片玻璃的颜色、镀膜室内透射光谱、出片台处透反射光谱和颜色均匀性以及面电阻进行在线检测，而红外反射比、膜层辐射率一般采用实验室仪器进行离线检测。

北京奥博泰科技有限公司多年来从事玻璃性能检测仪器的研发及生产工作，所研制的仪器设备已经装备了多条浮法玻璃在线镀膜生产线、离线镀膜生产线，台式及便携式玻璃光热参数检测仪器得到行业内用户的认可。作为相关标准的主要起草单位之一，积极从事有关标准的制定和修订工作，在日常检验工作中积累

了丰富的经验和体会。

2015年,我国实施了制造强国战略第一个十年的行动纲领——《中国制造2025》,玻璃作为无机非金属材料中最重要的部分之一,在建筑、汽车、光伏新能源、家具、电器等行业应用广泛。为响应国家供给侧改革和化解落后产能的号召,重点城市新建公共建筑全面执行GB 50189《公共建筑节能设计标准》。住房城乡建设部为贯彻落实国家关于建筑节能和发展绿色建筑的法律法规和政策,对建筑节能和绿色建筑实施情况开展了专项检查,包括:新建建筑执行建筑节能强制性标准、超低能耗建筑建设、既有居住建筑节能改造、公共建筑节能监管体系建设及节能改造、可再生能源建筑应用等工作推进情况以及地方相关配套政策法规制定实施情况。建筑玻璃的光热参数,作为建筑节能推广及实施工作的参考指标,起到了关键性作用。为此,建筑玻璃行业不断推出新型节能玻璃成品,得到广泛应用。玻璃生产企业的质量控制和检验工作必须适应这一新形势的需要,广泛推广玻璃性能相关检测技术,培养检测人员业务能力,提高行业整体检测水平,为我国玻璃产品走向世界提供基础保障。为此,我们编写了《建筑玻璃光学检测技术及应用》一书。

本书依据近年来国家颁布实施的有关玻璃产品性能和检验方法标准、相关检测仪器的现行标准等对玻璃检测项目的需求来编写,侧重于玻璃的光学基础参数以及光学热工参数的检测技术。作者团队均为玻璃行业长期从事玻璃性能检测、仪器设备研制一线工作的高级专业技术人员,具有坚实的理论知识基础,多年来积累了丰富的实践经验和心得体会。

本书共分8章:第1章简单介绍建筑玻璃的特性表征,并且给出了特性参数相关标准及检测要求,方便大家了解目前各类建筑玻璃的性能参数及其检测意义,查阅各特性参数在标准中的要求;第2章介绍光学检测相关基础知识;第3章介绍建筑玻璃特性参数的光学检测技术及原理,包含各特性参数的概念、计算

方法、数据处理、相关检测技术、检测仪器及其原理；第4章介绍专用检测仪器，包括各类特性参数的实验室检测仪器、在线检测仪器、现场检测仪器的使用介绍；第5章介绍检测仪器用标准样品，包含标准样品/标准物质概述、标准样品的分类及作用、标准样品的基本要求、标准样品的使用等内容；第6章介绍仪器校准相关内容，包含校准概述、相关概念、校准规范、校准过程和校准示例；第7章介绍测量误差分析与测量结果评定，包括误差理论基础知识、测量不确定度评定基础知识和不同情况下的不确定度评定示例；第8章介绍国内外建筑玻璃用光热参数计算软件及玻璃数据库，方便大家了解玻璃特性参数计算常用软件工具。

本书适合玻璃性能及工艺方法科研单位、相关质量监督管理部门、玻璃生产企业工艺人员、玻璃性能检验人员、玻璃检测仪器研发及生产企业技术人员使用，可作为玻璃检测人员培训教材和检测工作的参考资料。

本书在编写过程中，参考了有关的专业技术文献和书籍，汲取了玻璃性能研究和检验专业资深专家的宝贵经验，得到了编写人员和中国建材工业出版社编审人员的合力支持，在此谨致以诚挚的谢意。

限于作者水平，本书不足之处在所难免，敬请同行指正。



2019年9月

作者简介



张喆民，1996年9月毕业于北京理工大学，光学测量专业，博士学位。长期从事光学测量、光电技术应用、光学检测技术研究，曾主持兵器、航天领域重大科研项目，曾获得兵器工业部级科技进步奖二等奖。

现任全国颜色标准委员会副主任委员、全国白度标准工作组主任委员、全国建筑用玻璃标准化技术委员会委员、全国工业玻璃和特种玻璃标准化技术委员会委员、中国光学学会光学测量专业委员会委员、建筑玻璃与工业玻璃协会专家组成员。

主要起草七项国家标准和多项行业标准，获多项发明专利。

在光学材料、建筑材料和节能材料的光学性能检测技术方面经验丰富。1988年开始从事玻璃检测仪器研发，先后研制了汽车玻璃透射比测定仪、安全玻璃抗冲击试验机、玻璃雾度测定仪、反射比测定仪、镀膜在线光学监控系统、玻璃应力检测仪、光伏及光热发电用玻璃光学性能检测系统、节能玻璃光热参数现场检测系统等近百种仪器设备，广泛应用于工业玻璃和建筑节能玻璃的生产过程、实验室和现场检测。

目 录

第 1 章 建筑玻璃特性表征及相关标准	1
1.1 概述	1
1.2 建筑玻璃特性参数的概念	2
1.2.1 光学参数	2
1.2.2 热工参数	3
1.2.3 应力	4
1.3 标准中对各类玻璃特性参数的要求	4
1.4 玻璃特性参数检测相关标准	7
第 2 章 光学基础知识	10
2.1 光的本质	10
2.1.1 光的简介	10
2.1.2 光波	11
2.1.3 光源	12
2.2 光的传输	15
2.2.1 透射	15
2.2.2 反射	18
2.2.3 吸收	22
2.3 光的偏振	23
2.3.1 光的双折射	24
2.3.2 应力双折射	24
2.3.3 双折射测量的应用	25
2.4 光度学与色度学	26
2.4.1 光度学基础知识	26
2.4.2 色度学基础知识	29
2.4.3 颜色与计算	35
2.5 太阳光谱	39
2.5.1 太阳光谱概述	39

2.5.2	国内外相关标准及信息比对	41
2.5.3	太阳光谱的选用	44
第3章	建筑玻璃特性参数的光学检测原理	46
3.1	建筑玻璃特性参数	46
3.1.1	光学参数	46
3.1.2	热工参数	70
3.1.3	厚度参数	75
3.1.4	应力参数	76
3.2	建筑玻璃特性参数的检测原理与仪器	79
3.2.1	光学特性检测原理与仪器	79
3.2.2	热工特性检测原理与仪器	84
3.2.3	厚度检测原理与仪器	86
3.2.4	应力检测原理与仪器	88
第4章	专用检测仪器	90
4.1	实验室检测仪器	90
4.1.1	透射比反射比检测仪器	90
4.1.2	雾度检测仪器	94
4.1.3	辐射率检测仪器 AE-2	96
4.1.4	耐磨实验机 BTA-5000	96
4.2	在线检测仪器	98
4.2.1	离线镀膜玻璃检测仪器	98
4.2.2	浮法在线镀膜玻璃检测仪器	102
4.2.3	其他玻璃深加工生产线专用在线检测仪器	104
4.3	现场检测仪器	104
4.3.1	光热参数综合检测仪器	105
4.3.2	厚度检测仪器	107
4.3.3	应力检测仪器	111
4.3.4	手持式惰性气体分析仪	117
4.3.5	光谱测色仪器	118
第5章	检测仪器用标准样品/标准物质	124
5.1	标准样品/标准物质概述	124
5.1.1	标准样品/标准物质的定义	124
5.1.2	标准样品的分类及作用	124

5.1.3	标准样品的基本要求	125
5.1.4	标准样品的使用	125
5.2	建筑玻璃检测仪器用国家标准样品	127
5.2.1	GSB 02-3411—2017 低辐射镀膜玻璃 (Low-E 玻璃) 光热参数标准样品	127
5.2.2	GSB 02-3413—2017 镀膜玻璃可见光反射比标准样品	129
5.2.3	GSB 02-3414—2017 镀膜玻璃可见光透射比标准样品	130
第 6 章	检测仪器的校准	131
6.1	校准概述	131
6.1.1	校准的定义	131
6.1.2	校准相关名词概念	131
6.1.3	计量校准规范的主要内容	132
6.1.4	校准过程	132
6.2	建筑玻璃检测仪器的校准示例	133
6.2.1	校准测试过程示例	133
6.2.2	示值误差不确定度评定示例	136
6.2.3	校准记录及校准证书示例	139
第 7 章	测量误差分析与测量结果评定	142
7.1	误差理论基本知识	142
7.1.1	名词解释	142
7.1.2	测量误差的分类与处理	143
7.2	测量不确定度评定	148
7.2.1	不确定度	148
7.2.2	标准不确定度分量的评定	149
7.2.3	合成标准不确定度的评定	151
7.2.4	扩展不确定度的评定	152
7.2.5	测量结果的报告与表示	153
7.3	不确定度评定示例	153
7.3.1	中空玻璃测厚仪玻璃厚度测量不确定度评价	153
7.3.2	透射比测定仪的测量不确定度评定	156
7.3.3	测量某块 Low-E 玻璃可见光透射比的测量结果 不确定度评定	158
第 8 章	国内外建筑玻璃用光热参数计算软件及玻璃数据库	161

8.1 光热参数计算软件	161
8.1.1 WINDOW 和 Optics 软件介绍	161
8.1.2 粤建科®MQMC 软件介绍	163
8.1.3 Caluwin 整窗热工计算软件介绍	164
8.1.4 奥博泰 GlasSmart1000 软件介绍	166
8.1.5 中空玻璃传热系数移动端计算工具	166
8.2 玻璃数据库	169
8.2.1 国际玻璃数据库	169
8.2.2 中国玻璃数据库	170
参考文献.....	172

第 1 章 建筑玻璃特性表征及相关标准

本章简要介绍了建筑玻璃的分类与特性表征、特性参数概念、标准中对各类玻璃特性参数的要求、特性参数的检测与计算方法的相关标准以及仪器校准用国家标准样品。

1.1 概 述

“建筑玻璃”是指应用于建筑上的玻璃的统称，一般分为围护结构玻璃（用于建筑外）和内部玻璃，例如幕墙玻璃、屋面玻璃、门窗玻璃、雨棚玻璃、栏板玻璃、楼梯玻璃、地板玻璃、游泳馆水下观察窗等。建筑物采用的玻璃通常有平板玻璃以及由平板玻璃作为原片制作的深加工玻璃，如钢化玻璃、半钢化玻璃、夹层玻璃、镀膜玻璃、中空玻璃和真空玻璃等。随着技术的发展，出现了一些新型功能的玻璃制品如光伏建筑一体化（building integrated PV, BIPV）发电玻璃、电致变色玻璃、光致变色玻璃、气候调光玻璃等。

用于建筑外围护结构的玻璃，除了满足建筑设计外观的要求外，从节能角度来说，还应根据不同气候区及建筑部位，实现采光、保温、隔热等功能；同时从安全性来讲，应具备抗一定动能刚体冲击、抗人体撞击和特定的破碎的能力，应能够经受风载荷、雪载荷、冰雹、地震力等。

由于玻璃品种繁多，评价和表征各种玻璃性能特性的参数也很多，不同应用情况对其性能的要求就不同，本章主要探讨可通过光学检测技术来表征的建筑玻璃的特性参数，那么这些特性参数都有哪些呢？图 1-1 中给出了建筑玻璃主要特性参数，供大家参考。

如上约 20 个参数中，大部分参数对于评价玻璃的节能性、整个建筑的能耗及安全性至关重要，例如，太阳能总透射比及红外热能总透射比决定着进入室内的太阳辐射得热量；可见光透射比越高，室内的照明能耗越低；镀膜玻璃的表面辐射率、中空腔体的厚度以及气体体积浓度等，直接决定着玻璃的太阳能总透射比和传热系数，即隔热保温性能；表面应力的大小直接关系到玻璃使用的安全性。

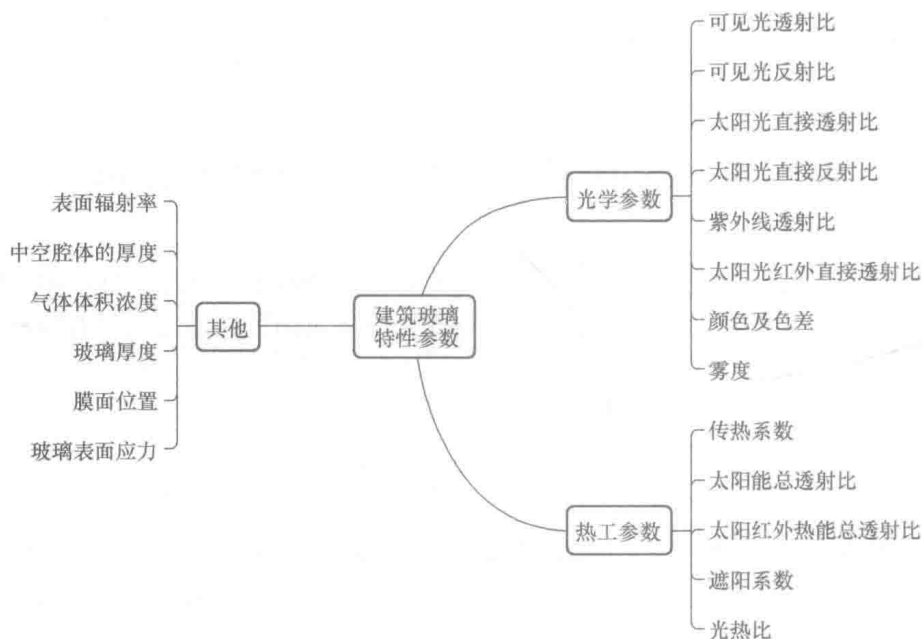


图 1-1 建筑玻璃主要特性参数图

1.2 建筑玻璃特性参数的概念

为了方便大家理解各特性参数的意义，下面给出相关参数的定义或释义。

1.2.1 光学参数

(1) 可见光透射比 (visible light transmittance): 在可见光 (380~780nm) 范围内, 透过被测物体的光通量与入射光通量之比。

其中光通量即指可见光通量, 所以可以省略“在可见光 (380~780nm) 范围内”这一句, 但在非光学领域为不产生歧义, 可以加以说明。“light transmittance”一般指可见光透射比, “visible”可以省略。由于可见光透射比与入射光光源光谱分布、人眼视见函数、入射角、接收条件等多种因素相关, 所以可见光透射比应明确说明光源和接收者的光谱条件与几何条件。由于这一参数是比值, 所以入射光通量和出射光通量并不需要测量绝对量, 下面的参数涉及比值的也是同样道理。

(2) 可见光反射比 (visible light reflectance): 在可见光 (380~780nm) 范围内, 经被测物体反射后的反射光通量与入射光通量之比。

(3) 太阳光直接透射比 (solar direct transmittance): 波长范围 300~2500nm 的太阳光辐射透过被测物体的辐射通量与入射的辐射通量之比。

此参数不包含物体由于吸收红外热辐射而产生的二次热传递, 不能将此概念

直接用于描述玻璃的遮阳性能。

(4) 太阳光直接反射比 (solar direct reflectance): 波长范围 300~2500nm 的太阳光辐射被被测物体反射的辐射通量与入射的辐射通量之比。

(5) 太阳光红外直接透射比 (solar infrared direct transmittance): 被测物体在 780~2500nm 波长范围内的太阳光直接透射比。

(6) 紫外线透射比 (UV-transmittance): 波长范围 300~380nm 的太阳光辐射透过被测物体的辐射通量与入射的辐射通量之比。

(7) 透射颜色 (transmission color): 光透过玻璃后的颜色。一般指光入射角不大于 10° 的条件下的透射颜色。

(8) 反射颜色 (reflection color): 光经玻璃反射后的颜色。

(9) 垂直反射颜色 (vertical reflection color): 光入射角不大于 10° 的条件下, 光经过玻璃各面反射后, 在与入射角相同的接收角条件下的镜面反射颜色。

(10) 偏角反射颜色 (off-angle reflection color): 光入射角大于 10° 的条件下, 玻璃的镜面反射颜色。通常为 30° 偏角反射颜色、 45° 偏角反射颜色和 60° 偏角反射颜色。

(11) 玻璃色差 (color difference of glass): 玻璃之间或玻璃与目标颜色间的颜色差异, 也指同一片玻璃不同位置间的颜色差异, 分为透射色差和反射色差, 以 ΔE_{ab}^* 表示。

(12) 偏角色差 (off-angle color difference): 相同测量角度条件下, 偏角反射颜色的色差。

(13) 片内色差 (glass unit color difference): 相同测量条件下, 同一片玻璃内不同测量位置之间的色差。

(14) 片间色差 (pane-to-pane color difference): 相同测量条件下, 玻璃之间色差的极大值, 用于表征玻璃之间的颜色一致性。

(15) 同批色差 (same batch color difference): 相同测量条件下, 同一批次玻璃中按抽样规则抽出多片玻璃样品的片间色差, 用于表征同批次玻璃的颜色一致性。

(16) 批间色差 (color difference between batches): 相同测量条件下, 对于不同批次玻璃产品, 在某一批次中, 抽取一定数量的样品, 测量并计算样品的颜色平均值, 作为批次目标颜色。其他批次的颜色平均值与批次目标颜色的色差即为对应的批间色差。

(17) 雾度 (haze): 透过试样而偏离入射光方向的散射光通量与透射光通量之比, 用百分数表示。

1.2.2 热工参数

(1) 太阳能总透射比 (total solar energy transmittance): 太阳光直接透射