

基于高光谱技术建筑反射隔热涂料厚度检测技术的研究

李笑芳¹, 王延仓^{2,3*}, 顾晓鹤⁴, 王丽玫¹, 李晓鹏¹, 冯 华², 陈亭宇²

1. 廊坊师范学院, 河北 廊坊 065000
2. 北华航天工业学院, 河北 廊坊 065000
3. 石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄 050043
4. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097

摘 要 作为一类新型建筑涂料, 反射隔热涂料凭借其节能、环保等优势已广泛应用于建筑的施工建设; 建筑反射隔热涂料性能的高、低直接影响建筑节能、环保性能的优劣, 且对建筑室内环境具有较大影响。建筑反射隔热涂料主要通过太阳辐射(可见光-近红外)与建筑辐射(热红外)的反射、吸收等作用实现其节能、环保作用。对于特定建筑反射隔热涂料, 其与光的相互作用主要取决于涂料的施工参量, 如涂料施工厚度。利用高光谱技术定量分析建筑反射隔热涂料的反射、吸收特性, 研究涂料施工参量(厚度)对建筑反射隔热涂料性能的影响规律, 为涂料施工检测提供科学技术支撑。研究借助高光谱技术, 测定涂料不同施工厚度的光谱数据, 分析涂料光谱特征随施工厚度增加的演变规律, 研究可表征涂料施工厚度的涂料指数, 并将涂料光谱数据及由其构建的涂料指数分别与涂料厚度进行相关性分析, 提取并筛选对涂料施工厚度敏感的指标, 构建涂料施工厚度检测模型, 探寻适用于涂料施工厚度检测的方法。研究表明: (1)位于 420~1 070 nm 区间的光谱数据对 0.1~2.5 mm 的涂料厚度较为敏感且其与涂料施工厚度的相关系数 r 均较高且相对稳定, 表明该光谱区间对涂料厚度的敏感性较好, 可用于涂料厚度的检测; (2)与原始光谱相比, 涂料指数可有效提升光谱对涂料厚度的敏感性, 在 5 类涂料指数中由 484 和 479 nm 构建的 RCI 指数是表征涂料厚度的最佳参量; (3)在 5 类涂料指数中, 基于 RCI 指数构建的涂料厚度检测模型的精度最高, 为最优模型, 其 $R^2 = 0.973$, $RMSE = 0.185$, $RPD = 4.018$ 。

关键词 高光谱; 反射隔热涂料; 涂料指数; 吸收峰深度

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2552-06

引 言

太阳辐射对建筑反射隔热涂料具有一定的透射作用, 且该作用在涂料厚度参量上具有临界特征, 临界内, 反射隔热涂料的反射隔热性能受厚度参量的影响较大, 涂料施工厚度偏小易造成涂料性能的减损; 临界外, 则易产生资源浪费, 降低涂料施工质量, 缩减涂料寿命, 因而涂料厚度是反映建筑反射隔热性能的重要参量, 开展涂料施工厚度无损、高精度检测技术的研究具有重要的现实与理论意义^[1-3]。

近年来, 高光谱技术得到了迅猛发展, 其凭借超高的光

谱分辨率及非接触、快速、精准等优点已逐步应用于建筑涂料参量的检测、评估^[4-5]。反射隔热涂料的光谱特征主要决定于其视域内建筑反射隔热涂料的理化组分、结构等理化参量, 更改涂料的理化组分构成、占比、结构均会对其反射、吸收特征产生影响^[6-7], 从而影响涂料的反射隔热性能。截至目前, 虽然国内外学者针对涂料理化特征对其反射、隔热性能的影响进行了大量研究工作且已取得较大进展^[8-10], 但在涂料施工质量监管方面的研究却相对匮乏。在特定涂料理化特性下, 涂料厚度是影响反射隔热涂料的反射、隔热性能与施工质量的重要参量之一, 且已有研究表明在限度内涂料厚度的增加有利于提升反射隔热涂料性能, 增强反射隔

收稿日期: 2019-07-11, **修订日期:** 2019-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300609), 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20170705), 河北省建设厅科技项目(2017-2096), 河北省教育厅青年基金项目(QN2019213), 河北省青年科学基金项目(D2017409021), 廊坊市科技支撑项目(2019013100), 廊坊师范学院项目(LSLQ201701)资助

作者简介: 李笑芳, 女, 1988年生, 廊坊师范学院讲师 e-mail: lixiaofang@lfnu.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: yancangwang@163.com

热涂料节能作用,因此反射隔热涂料厚度的快速、精准检测是监管涂料施工质量与提升节能作用的关键基础技术。然而截至目前,少见针对建筑反射隔热涂料施工厚度精准检测技术的研究,而该研究可有效弥补反射隔热涂料施工厚度监管匮乏的不足,对保障建筑反射隔热涂料施工质量具有较大现实与理论意义。

为研究无损、快速、精准检测建筑反射涂料厚度的技术,本工作借助高光谱技术,通过将反射隔热涂料的光谱数据与相应厚度进行相关性分析,构造可表征涂料厚度的新型指数,筛选敏感特征因子,建立反射隔热涂料厚度诊断模型,从而为定量分析、评估建筑反射隔热涂料施工厚度质量提供基础技术支持。

1 实验部分

1.1 试验设计

为开展反射隔热涂料施工厚度检测技术的研究,在 0.1~2.5 mm 厚度区间内制作了 21 个不同涂料厚度的样本,其中样本底材采用水泥板,底漆为广州美涂士建材股份有限公司研制的外墙保抗碱底漆,选用广州富美奥涂料有限公司研制的建筑反射隔热涂料。涂料样本制作流程与常规施工大致相同,先采用砂纸将板面打磨平整,然后涂一层底漆,并将其置于干燥、通风处,待自然风干后再涂一层底漆,并采用同样方法进行风干,待底漆风干后采用砂纸再打磨一遍,然后利用调试涂膜器制作实验样本。

1.2 涂料光谱数据测量与处理

由于地物光谱特征随光照角度、强度等因素的变化而变化,考虑到建筑反射隔热涂料在可见光区域的反射率较高,为获取同一环境条件下各涂料样本光谱数据,采用室内光谱测量方法获取涂料光谱数据,其光谱采集方法如图 1 所示。实验仪器选用美国 ASD 公司研制的 FieldSpec4 进行光谱采集,测定 350~2 500 nm 的光谱数据,光谱分辨率为 1 nm。建筑反射隔热涂料光谱采集于 2019 年 03 月 17 日在实验室开展,以光谱仪自带卤光灯为光源,每个样本光谱测定前均利用标准白板进行矫正,然后将光谱仪垂直置于被测样本上,每个涂料样本测定 10 条光谱取其平均值作为最终光谱。

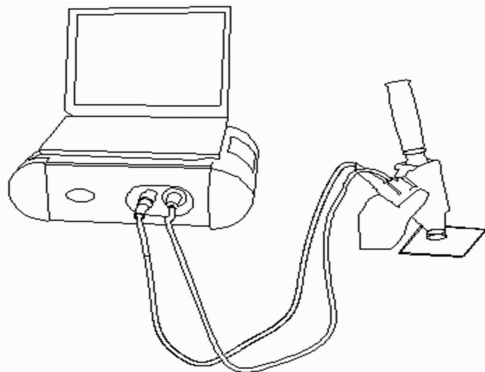


图 1 反射隔热涂料光谱测量示意图

Fig. 1 The spectroscopic measurement of reflective thermal insulation coatings

1.3 涂料指数构建

为快速、精准获取涂料施工厚度,通过构建 5 类涂料指数,以提取可有效表征涂料施工厚度的参量:修正涂料指数 (adjustment of coating index, ACI), 差值涂料指数 (difference coating index, DCI), 新型涂料指数 (new coating index, NCI), 归一化涂料指数 (normalized difference coating index, NDCI), 比值涂料指数 (ratio coating index, RCI), 其计算方法如式(1)~式(5)所示

$$ACI = \frac{1.5(R_i - R_j)}{(R_i + R_j + 15)} \quad (1)$$

$$DCI = R_i - R_j \quad (2)$$

$$NDCI = \frac{(R_i - R_j)}{(R_i + R_j)} \quad (3)$$

$$NCI = \frac{(R_i - R_j)}{R_i} \quad (4)$$

$$RCI = \frac{R_i}{R_j} \quad (5)$$

式中: R_i 是位于 i 波段处的反射率。

1.4 模型精度检验

利用涂料光谱数据构建 5 类涂料指数,并采用线性回归算法构建建筑反射隔热涂料施工厚度的检测模型。为客观、综合评价涂料指数对涂料施工厚度的检测精度,利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、模型预测偏差(RPD)三项指标对模型进行综合评价,其具体计算方法见参考文献[11-12]。

2 结果与讨论

2.1 涂料光谱分析

图 2 为不同厚度的反射隔热涂料光谱(a)及其吸收峰深度(b)。由图 2(a)可知:反射隔热涂料光谱整体平滑,且在 A (350~420 nm), B(420~1 070 nm), C(1 070~1 305 nm), D(1 305~1 570 nm), E(1 570~1 682 nm), F(1 682~2 076 nm), G(2 076~2 202 nm), H(2 202~2 406 nm), I(2 406~2 500 nm)等波段区间内均存在较强的吸收特征,其中 A 处的吸收特征最为突出;在 B 区间内的光谱变化平缓,无明显吸收或反射特征;在 C—I 区间的光谱由谷-峰交替相连而成,且随着波长增加,光谱中的吸收谷(反射峰)整体呈阶梯式降低的趋势;随反射隔热涂料厚度增加,位于 B, C, D 区间的光谱反射率整体呈逐渐增加的趋势,其在厚度 1.2 mm 时呈现饱和状态;位于 E, F, G, H 和 I 区间的光谱反射率整体呈先增加后减小的趋势。由图 2(b)可知,位于 A 处的吸收峰深度最大(约为 0.631),其次为 H 处;C—I 区间光谱吸收峰深度随涂料厚度增加呈先增加后降低的趋势,其在 1.8 mm 时达到最大值。综上可知,随涂料厚度的增加,光谱在各区间的变化存在较大差异,其中位于 B, C 和 D 区间的光谱对涂料厚度具有较好的响应;在吸收峰深度曲线上,各区间对涂料厚度的响应特征相对一致,但对 2.4 mm 以上的涂料厚度的响应异常,分析认为与 1.8 mm 相比,2.4 mm 厚度涂料对光反射强度的增加高于对光吸收强度。

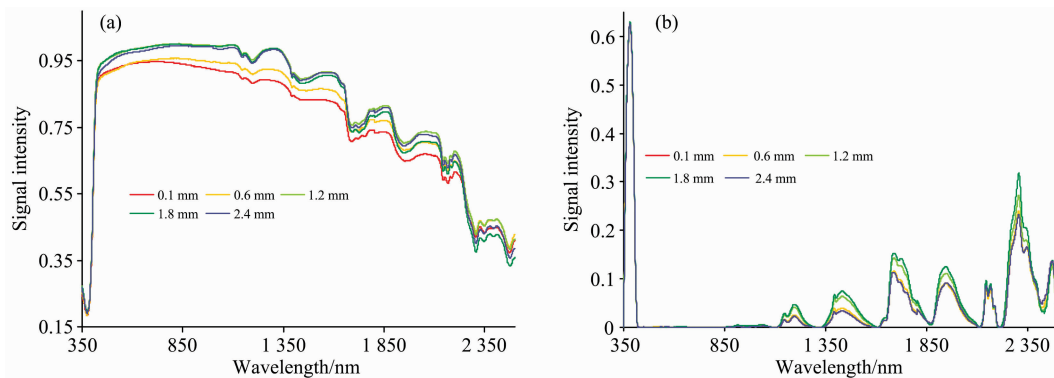


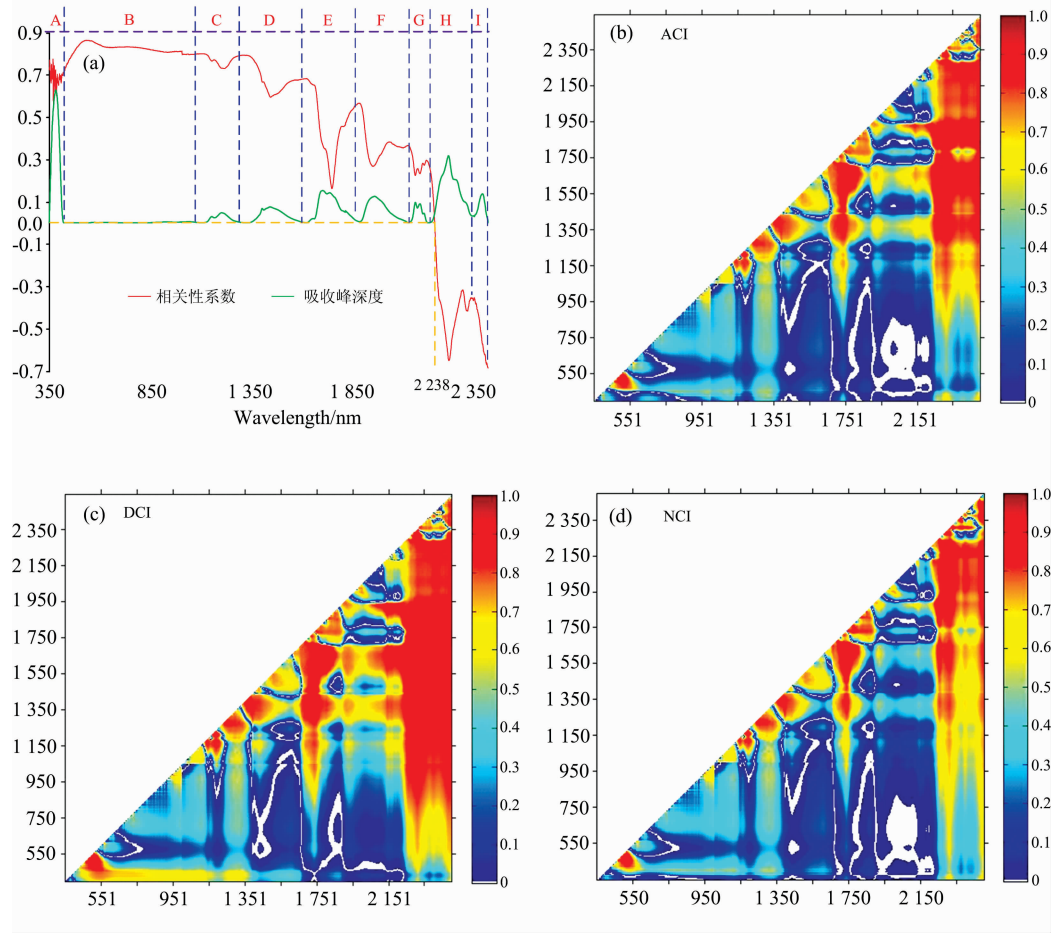
图 2 反射隔热涂料光谱 (a) 及其吸收峰深度 (b)

Fig. 2 The spectrum (a) and absorption peak depth (b) of reflective heat insulation coatings

2.2 相关性分析

为分析光谱对涂料厚度敏感特征, 提取可表征涂料厚度的敏感参量, 将原始光谱数据与构建的 5 类涂料指数分别与涂料厚度进行相关性分析, 其结果如图 3 所示, 其中 (a) 为原始光谱, (b) 为修正涂料指数 (adjustment of coating index, ACI), (c) 为差值涂料指数 (difference coating index, DCI), (d) 为新型涂料指数 (new coating index, NCI), (e) 为归一化涂料指数 (normalized difference coating index, 简称 NDCI), (f) 为比值涂料指数 (ratio coating index, RCI)。

由图 3(a) 可知, 光谱对涂料厚度的敏感性较好, B—I 区域光谱对涂料厚度的敏感性整体呈先降后升的趋势; 位于 350~2 238 nm 区间的光谱与涂料厚度的相关系数大于 0 (即呈正相关), 2 238~2 500 nm 波段区间的光谱与涂料厚度的相关系数小于 0 (即呈负相关), 这表明涂料反射、隔热性能与厚度呈正相关; 除 A 区外, 其他光谱区间的相关系数曲线均较为光滑, 其中位于 B 区间的相关系数曲线较为平缓且相关系数值 R 均较高 (R 值为 0.7~0.86), 这表明位于 B 区内的光谱对涂料厚度较为敏感且相对稳定, 可用于涂料厚度的



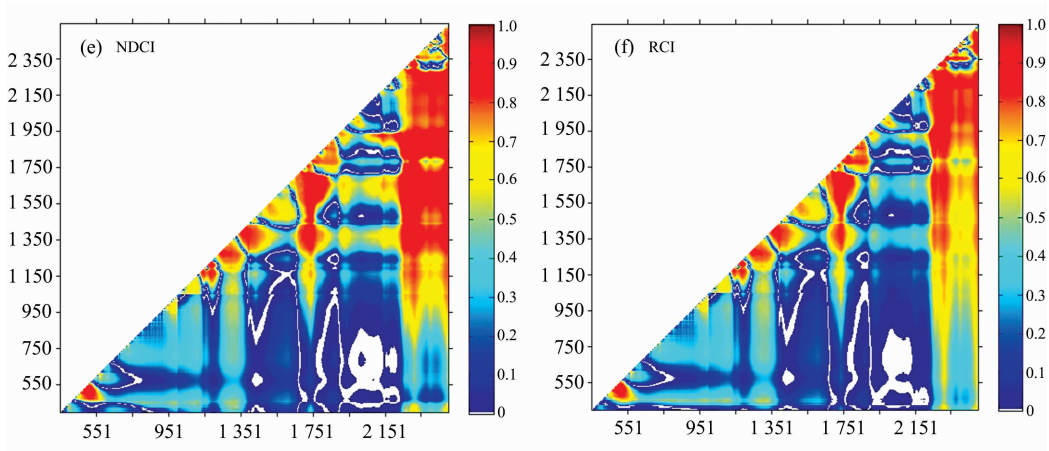


图 3 原始光谱、指数与反射隔热涂料厚度相关性分析

- (a): 原始光谱的吸收峰深度与相关系数; (b): 修正涂料指数与涂料厚度的相关系数矩阵;
- (c): 差值涂料指数与涂料厚度的相关系数矩阵; (d): 新型涂料指数与涂料厚度的相关系数矩阵;
- (e): 归一化涂料指数与涂料厚度的相关系数矩阵; (f): 比值涂料指数与涂料厚度的相关系数矩阵

Fig. 3 The correlation analysis of original spectrum, index and thickness of reflective heat insulation coatings

(a): The absorption peak depth and correlation coefficient of the original spectrum; (b): The correlation coefficient matrix of the coating index and the coating thickness; (c): The correlation coefficient matrix of the difference coating index and the coating thickness; (d): The correlation coefficient matrix of the new coating index and the coating thickness; (e): The correlation coefficient matrix of the normalized coating index and the coating thickness; (f): The correlation coefficient matrix of radio coating index and coating thickness

检测。由图 3(b—f)为 350~2 500 nm 内任意 2 个光谱波段所构建的涂料指数与涂料厚度的相关性分析图,由图可知,各指数与涂料厚度相关性强度的分布相对一致,多分布在由近红外波段构建的涂料指数区域内,而在可见光波段区间仅一个稳定区域;在 5 类涂料指数中,以 DCI 最优,其次为 ACI。由图 3(a)与图 3(b—f)对比分析可知,涂料指数有效提升了光谱对涂料厚度的敏感性,其 R^2 最高为 0.933。

2.3 建模分析

表 1 为基于涂料指数构建的建筑反射隔热涂料施工厚度预测模型。由表 1 可知,基于涂料指数构建的诊断模型精度

均明显高于原始光谱数据,且不同指数模型间相差不大,这表明涂料指数均能增强光谱对涂料厚度的敏感度,进而提高涂料厚度监测精度。各指数模型的 RPD 均大于 2,表明指数模型在检测涂料施工厚度方面切实可行,其中以 RCI 模型的 RPD 最高达 4.018。在指数模型中,以 RCI 构建的模型精度最高,为最优模型,其 $R^2 = 0.973$, $RMSE = 0.185$, $RPD = 4.018$ (散点图如图 4 菱形点、三角点所示),这表明差值涂料指数可用于涂料厚度的检测精度。从指数波段构建可知,全部涂料指数均由 484 和 479 nm 的光谱构建,这表明 484 和 479 nm 是涂料厚度的敏感因子。

表 1 基于涂料指数构建的反射隔热涂料施工厚度预测模型

Table 1 The construction thickness prediction model of reflective thermal insulation coatings based on coating index

变换形式	波段	模型	建模		验证		
			R^2	RMSE	R^2	RMSE	RPD
R	533	$Y = 29.223X - 26.612$	0.767	0.377	0.687	0.396	1.565
ACI	484, 479	$Y = 2.527.9X_{ACI} - 0.602$	0.930	0.210	0.974	0.200	3.696
DCI	484, 479	$Y = 1.096.2X_{DCI} - 0.567$	0.930	0.209	0.976	0.194	3.784
NCI	484, 479	$Y = 1.072.5X_{NCI} - 0.631$	0.929	0.211	0.973	0.206	3.616
NDCI	484, 479	$Y = 2.148.5X_{NDCI} - 0.632$	0.929	0.298	0.973	0.205	3.616
RCI	484, 479	$Y = 1.072.5X_{RCI} - 1.073.1$	0.929	0.213	0.973	0.185	4.018

在反射隔热涂理化参量固定不变的条件下,涂料施工厚度是影响涂料反射、隔热性能的重要参量,涂料施工厚度的高、低对有效发挥涂料反射、隔热作用具有重要影响,因而本研究以高光谱技术为主要手段,通过深入分析涂料厚度与光谱信息间的关联及演化规律,提取可表征涂料厚度的光谱参量,探寻涂料施工厚度的精准检测方法。通过研究分析

发现涂料在 420~1 070 nm 区间具有强反射且该区域对涂料施工厚度具有较强的敏感性,但当厚度达到一定程度时,反射隔热涂料对该区域光谱的反射明显存在饱和度问题,进而导致其对施工厚度过高的检测存在较大误差;各涂料指数均对涂料施工厚度较为敏感且相差不大,其中基于 484 和 479 nm 构建的涂料指数对涂料施工厚度的指示作用最佳,但涂

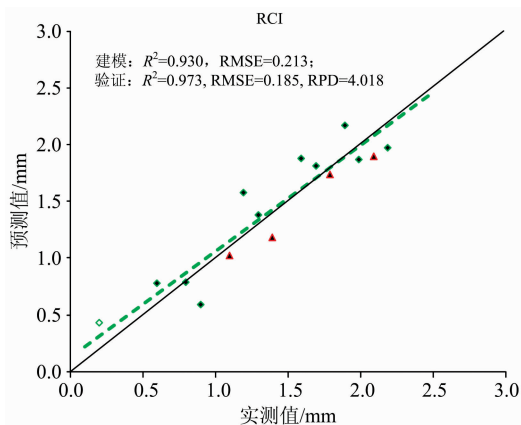


图 4 实测值与预测值的散点图

Fig. 4 The scatter plots of measured and predicted values

料指数对涂料施工厚度的指示作用明显受限。

尽管本研究利用高光谱技术开展了涂料厚度检测方法的研究,并取得较为理想的结果,但该研究仍存在一定不足,具体如下:

(1)涂料底层材质对涂料光谱特征的影响未纳入分析:位于可见光-近红外的光谱对涂料具有一定的透射作用,且该透射作用随涂料施工厚度的增加而逐渐减弱,直至消失。但在透射临界厚度内,涂料底层材质对涂料的光谱具有一定

的贡献,而该贡献部分未被分析,因而有必要开展相关实验研究分析涂料底层对涂料光谱特征的作用规律。

(2)饱和点的位移规律需进一步深入研究:涂理化组分、结构的更改会直接影响其反射、隔热性能,进而致使检测饱和点产生不同程度的位移,但饱和点的位移规律仍需开展相关实验分析进行验证。

3 结 论

以反射隔热涂料高光谱数据为数据源,通过构建 5 类涂料指数,将其与涂料厚度开展相关性分析,并构建涂料厚度检测模型,以探寻反射隔热涂料施工厚度检测方法,得出如下结论:

(1)位于 420~1 070 nm 区间的光谱波段与 0.1~2.5 mm 涂料厚度的相关性均较高且稳定,这表明该光谱区间对涂料厚度的敏感性较好,可用于涂料厚度的检测。

(2)与原始光谱相比,涂料指数可有效提升光谱对涂料厚度的敏感性,在 5 类涂料指数中由 484 和 479 nm 构建的 RCI 指数是表征涂料厚度的最佳参量。

(3)在 5 类涂料指数中,基于 RCI 指数构建的涂料厚度检测模型的精度最高,为最优模型,其 $R^2=0.973$, $RMSE=0.185$, $RPD=4.018$ 。

References

- [1] Kaynakli O. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 415.
- [2] Shi H, Zou X, Wang X. Physics of Plasmas, 2017, 24(7): 5063.
- [3] Modeste Kameni Nematchoua, Chrysostôme R R, Raminosa, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 1192.
- [4] TANG Wan-ping, DING Jing-jie, LI Gong-ping, et al(唐万平,丁晶洁,李公平,等). Paint & Coatings Industry(涂料工业), 2018, 48(12): 47.
- [5] BAO Chu-cai, LIU Fu-jian, LIU Qiong, et al(包楚才,刘付建,刘琼,等). Physical Testing and Chemical Analysis • Part B: Chemical Analysis(理化检验·化学分册), 2016, 52(10): 1178.
- [6] HE Yan, ZHANG Xiong, GUAN Jian(何燕,张雄,管建). Journal of Building Materials(建筑材料学报), 2015, 18(5): 784.
- [7] MA Yi-ping, LI Kui, WANG Cui, et al(马一平,李奎,王翠,等). Journal of Tongji University • Natural Science(同济大学学报·自然科学版), 2017, 45(2): 249.
- [8] YANG Guang, DENG An-zhong(杨光,邓安仲). Surface Technology(表面技术), 2017, 46(11): 260.
- [9] Yuan L, Han A, Ye M, et al. Solar Energy, 2018, 163: 453.
- [10] LIN Mei(林美). Polymer Materials Science & Engineering(高分子材料科学与工程), 2017, 33(3): 168.
- [11] WANG Yan-cang, JIN Yong-tao, WANG Xiao-ning(王延仓,金永涛,王晓宁). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(8): 2571.
- [12] Liu F, Rossiter D C, Song X D, et al. Geoderma, 2016, 263: 254.

The Study on Thickness Detection Technology of Reflective Thermal Insulation Coatings for Buildings Based on Hyperspectral Technology

LI Xiao-fang¹, WANG Yan-cang^{2, 3*}, GU Xiao-he⁴, WANG Li-mei¹, LI Xiao-peng¹, FENG Hua², CHEN Ting-yu²

1. Langfang Normal University, Langfang 065000, China

2. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China

3. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

4. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

Abstract As a new type of building coatings, reflective heat insulation coatings have been widely used in building construction by virtue of its advantages of energy saving and environmental protection. The high and low performance of reflective heat insulation coatings directly affects the performance of building energy saving and environmental protection, and has a great impact on the indoor environment of buildings. Reflective thermal insulation coatings for buildings mainly achieve energy saving and environmental protection by reflecting and absorbing solar radiation (visible-near infrared) and building radiation (thermal infrared). For specific building reflective heat insulation coatings, the interaction between them and light mainly depends on the construction parameters, such as coating thickness. Therefore, hyperspectral technology is used to quantitatively analyze the reflection and absorption characteristics of building reflective heat insulation coatings, and to study the influence of coating construction parameters (thickness) on the performance of building reflective heat insulation coatings, so as to provide scientific and technological support for coating construction detection. With the help of hyperspectral technology, this study measured the spectral data of different coatings thickness, analyzed the evolution law of the spectral characteristics of coatings with the increase of the thickness of coatings, studied the coatings index which can characterize the thickness of coatings construction, and analyzed the correlation between the spectral data of coatings and the coatings index constructed by them and the thickness of coatings respectively. Selecting and screening the sensitive indicators of coatings construction thickness, building the thickness detection model of coatings construction, and searching for the method suitable for the thickness detection of coatings construction. The results show that: (1) the spectral data located in the 420~1 070 nm range are sensitive to the thickness of coatings 0.1~2.5 mm, and the correlation coefficient r with the thickness of coatings construction is high and phase-wise. For stability, it shows that the spectral range is sensitive to the thickness of coatings and can be used to detect the thickness of coatings; (2) Compared with the original spectrum, the coating index can effectively enhance the sensitivity of the spectrum to the thickness of coatings, and the RCI index constructed from 484 and 479 nm is the best parameter to characterize the thickness of coatings in the five categories of coatings index; (3) Among the five kinds of coatings indices, the model based on RCI index has the highest accuracy and is the best one, and its $R^2=0.973$, $RMSE=0.185$, $RPD=4.018$.

Keywords Hyperspectral; Reflective thermal insulation coatings; Coating index; Absorption peak depth

(Received Jul. 11, 2019; accepted Nov. 18, 2019)

* Corresponding author