

定形相变材料(SSPCM)墙板温度响应分析

史 巍,王传涛

(东北电力大学建筑工程学院,吉林 132012)

摘要: 基于传热学、相变储能理论以及 ANSYS 软件建立墙板数学模型,对墙板外侧施加周期性简谐波温度荷载,模拟分析定形相变材料 SSPCM 及其他热物性材料墙板内侧的温度响应,并比较了不同厚度、潜热以及内、外表面对流换热系数对 SSPCM 墙板内侧温度响应的影响。结果表明:在温度荷载作用,且内、外空气对流换热系数分别为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 条件下,SSPCM 墙板存在一段约 15.2 h 相变维持时间,延迟时间约为 0.52 h,衰减倍数约为 2.19。综合性能指标较好,可使室内环境具有更好的舒适性;增加板厚,相变维持时间增幅减缓、延迟时间增长、衰减倍数加大,板厚达 20 mm 左右时,材料性能的综合利用率最高;提高材料潜热,相变维持时间增长、衰减倍数加大,但延迟时间几乎不变,潜热为 75 kJ/kg 时,能比较充分地利用材料性能;提高内表面对流换热系数,相变维持时间和延迟时间均缩短、衰减倍数增大,有利于潜热存储;外表面对流换热系数对温度的综合影响很小,可不予考虑。

关键词: 定形相变材料; 潜热; 对流换热系数; 简谐波; 温度响应

中图分类号: TU55

文献标识码: A

文章编号: 1001-1625(2015)08-2298-06

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2015.08.042

Temperature Response Analysis of Shape-stabilized Phase Change Materials Wallboard

SHI Wei, WANG Chuan-tao

(School of Civil and Architectural Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Mathematical model based on heat transfer, phase change energy storage theory and ANSYS is set up. Temperature response is analyzed through imposing periodic simple harmonic wave on outside surface of shape-stabilized phase change materials (SSPCM) wallboard and other thermal physical properties material wallboards. The influence of temperature response on inner surface is dealt with through comparison of materials with different thickness, latent heat and inner or outside surface convective heat transfer coefficients. The results show that there is a long phase change duration of SSPCM wallboard which is about 15.2 h, and time lags is about 0.52 h, and decay rates is about 2.19 under temperature load, meantime, inner surface and out surface convective heat transfer coefficients are $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ and $19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ respectively. Comprehensive performance index of SSPCM is excellent. The indoor environment may become more comfortable using SSPCM. Growth rates of phase change duration is decreased, but time lags and decay rates are amplified with the increase of thickness. Comprehensive performance index of SSPCM has reached the highest level when thickness is about 20 mm. Phase change duration and decay rates are increased as latent heat value is raised, but time lags stays the same. Material properties can be made full used of when latent heat is 75 kJ/kg. Phase change

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208082); 吉林省自然科学基金项目(201215166)

作者简介: 史 巍(1973-)女,博士,教授,主要从事新型生态建筑材料方面的研究。

通讯作者: 王传涛,硕士研究生。

duration and time lags are shortened but decay rates is raised by increasing inner surface convective heat transfer coefficients which is beneficial to the storage of latent heat. Outside surface convective heat transfer coefficients has little impact on inner surface temperature so it can be ignored.

Key words: SSPCM; latent heat; convective heat transfer coefficients; simple harmonic wave; temperature response

1 引言

相变材料(phase change material, PCM), 又称为潜热储能材料(latent thermal energy storage, LTES), 是利用物质发生相变时需要吸收或放出大量热量的性质来储存或放出热能, 进而调整、控制工作源或材料周围的环境温度^[1]。通过将相变材料与建筑材料基体相复合, 可以制作成定形相变材料(Shape-stabilized phase change material, SSPCM)。若将其用于建筑围护结构可以大幅提高建筑的蓄热能力, 降低室内温度波动幅度。与显热式贮热相比, 潜热式贮热密度高, 而且其贮热、释热过程近似等温^[2]。

早期对于定形相变材料的研究多基于实验基础之上, 研究耗费时间很长且对人力、物力的投入均较大。随着理论研究的深入及计算机技术的发展, 许多实验问题可以利用计算机进行数值模拟。对于相变问题的分析主要考虑相变过程中伴随着潜热的吸收和释放, 是一种非线性的瞬态热分析问题。可利用计算机软件编程求解, 如 ANSYS 定义材料的焓(J/m^3), 采用密度与比热的乘积对温度区间的积分考虑材料潜热的方法, 简化计算过程^[3]。陈超等对复合相变墙体应用于被动式太阳房进行了 Matlab7.0 编程计算, 计算结果和实验值吻合较好^[4]。郭志强等用 ANSYS 对相变材料的相变过程进行计算机模拟分析, 通过与实验数据对比, 验证了计算机模拟结果的正确性^[5]。孙潇等则利用 ANSYS 模拟了有肋与无肋结构复合相变墙体相变温度变化过程, 指出肋片结构对强化热传导的重要性^[6]。

2 导热分析

建筑物室温影响因素可分为外界扰动和内界扰动。外界扰动包括室外温度、光照辐射强度、风速等; 内界扰动包括电器散热、人体散热等。两种扰动以对流和辐射的形式与房间进行热交换, 另外还受到围护结构材料热性能和通风换气的影响。当建筑所处地区、房屋结构类型、室内状况等条件确定后, 室内温度响应则只与材料的热物性有关。由于室外温度和太阳辐射强度等气象条件随昼夜和季节变化, 围护结构的热传递属于瞬态导热过程。而对于非理想相变材料所制作的围护结构, 随着相变过程的发生, 其等效比热会在相变温度范围内发生较大变化, 所以传热方程是非线性的, 其传热过程比普通建筑材料更为复杂。

3 数学模型

通常建筑物围护结构处于空气温度和太阳辐射的周期性交变热作用下, 围护结构外表面温度波亦呈周期性, 故可将相变材料墙板外扰边界条件用简谐波来描述波动特征^[7], 如公式(1)所示。

$$t = t_m \pm A_f \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right) \quad (1)$$

式中 t 为空气流体温度瞬时值, $^{\circ}C$; t_m 为空气流体温度平均值, $^{\circ}C$; A_f 为简谐波振幅, $^{\circ}C$; T 为波动周期, h ; τ 为时间。

模拟分析时选定地区环境温度波动特征为: 日最低温度 $12^{\circ}C$, 日最高温度 $28^{\circ}C$, 周期 $24 h$, 其简谐波函数如公式(2)所示。

$$t = 20 - 8 \cos\left(\frac{2\pi}{24}\tau\right) \quad (2)$$

3.1 传热控制方程

对非理想相变材料在传递分析时采用焓法^[8], 为简化计算, 做如下假定:

- (1) SSPCM 墙板比热在相变区按等效比热考虑,在固、液相区按常物性考虑;
- (2) 忽略相变材料在固、液相区密度和导热系数的变化,材料整体体积不变;
- (3) 不考虑相变储能墙体内部材料微元在融化状态时自然对流;
- (4) 热量只沿垂直墙面方向传递,传热按一维非线性传热控制方程计算^[9],如公式(3)所示。

$$\rho \frac{\partial H}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中 ρ 为密度 kg/m^3 ; H 为焓 J/kg ; k 为导热系数 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为温度 $^\circ\text{C}$; τ 为时间; x 为沿厚度方向坐标。

在计算机数值模拟中,将焓定义为密度与比热的乘积对温度区间的积分,来考虑材料的潜热随温度变化情况,焓函数计算公式^[9]如公式(4)所示。

$$H = \begin{cases} \int_{T_0}^T \rho c_{p,s} dt, & T \leq T_1 \\ \int_{T_0}^T \rho c_{p,s} dt + \int_{T_1}^T \rho c_{p,m} dt, & T_1 \leq T \leq T_2 \\ \int_{T_0}^T \rho c_{p,s} dt + \int_{T_1}^T \rho c_{p,m} dt + \int_{T_2}^T \rho c_{p,l} dt, & T_2 \leq T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $c_{p,s}$ 为固相比热 $\text{J}/(\text{kg}/^\circ\text{C})$; $c_{p,m}$ 为等效比热 $\text{J}/(\text{kg}/^\circ\text{C})$ $c_{p,m} = H_m/(T_2 - T_1)$, H_m 为相变潜热 J/m^3 ; $c_{p,l}$ 为液相比热 $\text{J}/(\text{kg}/^\circ\text{C})$; T_0 为焓值为零时的温度 $^\circ\text{C}$; T_1 为相变温度区间下限温度 $^\circ\text{C}$; T_2 为相变温度区间上限温度 $^\circ\text{C}$ 。

3.2 边界条件

墙板内、外环境界面均为第三类边界条件,即给定环境温度和空气对流换热系数^[10],如公式(5)及公式(6)所示。

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{r, \text{out}} + h_{w, \text{out}} (t_{\text{out}} - t_{w, \text{out}}) \quad (5)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{r, \text{in}} + h_{w, \text{in}} (t_{\text{in}} - t_{\text{init}}) \quad (6)$$

式中: $q_{r, \text{in}}$ —内表面热流 W/m^2 ; $q_{r, \text{out}}$ —外表面热流 W/m^2 ; $h_{w, \text{in}}$ —内表面对流换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $h_{w, \text{out}}$ —外表面对流换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; t_{in} —室内空气温度 $^\circ\text{C}$; t_{out} —室外空气温度 $^\circ\text{C}$; $t_{w, \text{in}}$ —墙板内表面温度 $^\circ\text{C}$; $t_{w, \text{out}}$ —墙板外表面温度 $^\circ\text{C}$; t_{init} —初始温度 $^\circ\text{C}$ 。

计算初始条件如公式(7)所示。

$$t(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = t_{\text{init}} \quad (7)$$

4 计算机数值模拟

采用 ANSYS 进行数值模拟,其对于相变分析的基本过程包括定义单元类型、建立有限元模型、划分网格、施加荷载、计算求解和后处理。模型单元采用低阶四节点平面体单元(plane55)。

4.1 不同热物性材料的影响

选取厚度为 20 mm 的 3 种常用墙体及 SSPCM 墙板进行数值模拟。SSPCM 墙板相变温度区间为 20 ~ 23 $^\circ\text{C}$ 在 0 $^\circ\text{C}$ 、20 $^\circ\text{C}$ 、23 $^\circ\text{C}$ 及 30 $^\circ\text{C}$ 的焓值依次为 0、 $2.465 \times 10^7 \text{ J}/\text{m}^3$ 、 $9.485 \times 10^7 \text{ J}/\text{m}^3$ 和 $10.632 \times 10^7 \text{ J}/\text{m}^3$,其他材料的热物性如表 1 所示。

对炉渣砖、加气混凝土、聚苯板和 SSPCM 四种材料墙板,施加相同的外部简谐波温度荷载,墙板外侧为自然通风换热条件,墙内侧为可控温环境,温度设定为 18 $^\circ\text{C}$,内、外空气对流换热系数分别为 5 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 和 19 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。墙板内侧温度响应曲线如图 1 所示。

表 1 材料热物性

Tab.1 Thermal physical properties of materials

Parameter	Cinder brick	Aerated concrete	SSPCM	Styrofoam(EPS)
Thermal conductivity $k/[W/(m \cdot ^\circ C)]$	0.81	0.22	0.21	0.042
Thermal diffusivity $a/[W \cdot m^2 \cdot J^{-1}]$	4.54×10^{-7}	2.99×10^{-7}	1.7×10^{-7}	10.1×10^{-7}
Dry density $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1700	700	780	30
Solid specific heat $c_{p,s}/[J/(kg \cdot K)]$	1050	1050	1580	1380
The equivalent specific heat $c_{p,m}[J/(kg \cdot ^\circ C)]$	-	-	30000	-
Liquid specific heat $c_{p,l}[J/(kg \cdot ^\circ C)]$	-	-	2100	-
Phase change temperature $T/^\circ C$	-	-	20-23	-
Latent heat $H_m/(kJ \cdot kg^{-1})$	-	-	90	-

图 1 中定义 f_{out} 、 f_{in} 分别为墙体外、内表面温度波幅, ν 为衰减倍数 $\nu = f_{out}/f_{in}$; ξ 为延迟时间, 即墙体内外表面温度波形图与室外温度波形图波峰(波谷)间的水平距离; Ψ 为相变维持时间, 即 SSPCM 墙板温度响应曲线图中近似平段区间的长度。

由图 1 可见, 炉渣砖、加气混凝土、聚苯板内表面温度响应曲线仍为简谐波形状, 而 SSPCM 内表面温度响应曲线则存在一段近似平段的区间, 各材料温度衰减倍数依次为 1.40、1.72、3.64 和 2.19。延迟时间依次为 0.50 h、0.29 h、0.02 h 和 0.52 h。结果表明: 随材料导热系数减小, 温度衰减倍数逐渐增大, 但是随导温系数减小, 延迟时间却逐渐减小, 这是因为导热系数表征材料在相同的时间内通过相同面积的热量, 其值越小, 衰减越大; 而导温系数则表征材料在加热或冷却时各部分温度趋于一致的能力, 其值越大, 温度变化越快。聚苯板温度衰减最大, 达到 3.64 倍, 但延迟时间最小, 仅有 0.02 h, 表明其对温度变化非常敏感; SSPCM 时间延迟最长, 为 0.52 h, 其温度衰减也达到 2.19 倍, 而且其温度响应曲线存在一段近似平段的水平相变区间 $\Psi = 15.2$ h, 当环境温度低于材料温度时, SSPCM 仍可控温约 4.5 h。这是因为当环境温度波向室内传播, 当温度达到相变温度区间附近时, 其内部微元熔化或凝固, 通过吸热或放热使得板内表面温度维持在相变温度区间附近直至相变结束。

SSPCM 墙板在 15.2 h 的时间内可将内表面温度控制在 $19.5 \sim 22^\circ C$, 对于日间用电负荷很高的时间段, 可很好的起到“削峰填谷”作用, 使得室内环境具有更好的舒适性。

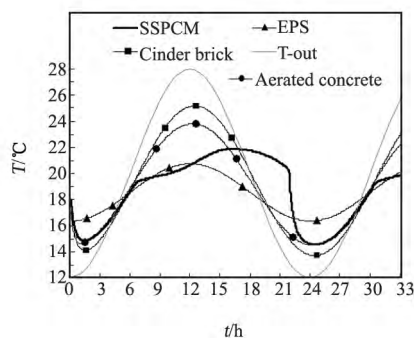


图 1 不同热物性材料墙板内表面温度响应

Fig.1 Inner surface temperature response of different thermal physical properties materials wallboard

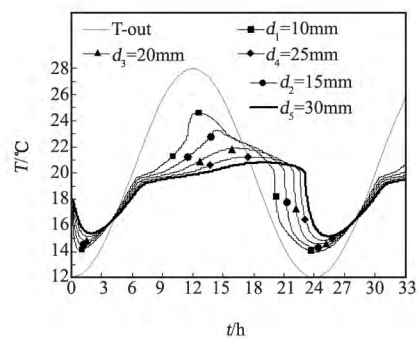


图 2 不同厚度 SSPCM 墙板内表面温度响应

Fig.2 Inner surface temperature response of SSPCM wallboard with different thickness

4.2 不同厚度的影响

选取潜热为 90 kJ/kg, 厚度为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和 30 mm 五种热物性相同的 SSPCM 墙板模拟分析, 模拟条件与 4.1 节相同, 其内侧温度响应曲线如图 2 所示。

由图 2 可见, 随板厚增加, 相变维持时间依次为 9.9 h、13.7 h、15.2 h、16.2 h 和 16.5 h; 延迟时间依次为 0.20 h、0.32 h、0.52 h、0.92 h 和 1.42 h; 衰减倍数依次为 1.51、1.78、2.19、2.50 和 2.84。相变维持时间、延

迟时间及衰减倍数均随板厚增加而增大,但相变维持时间增幅减缓。当板厚达 20 mm 左右时能比较充分利用材料的相变温度区。如果厚度过大,控温效果虽好,但材料性能的利用率会降低。

4.3 不同潜热的影响

选取 20 mm 厚,潜热为 30 kJ/kg、45 kJ/kg、60 kJ/kg、75 kJ/kg 和 90 kJ/kg 五种 SSPCM 墙板模拟分析,模拟条件与 4.1 节相同,墙板内侧温度响应曲线如图 3 所示。

由图 3 可见,随室外温度上升 5 种 SSPCM 墙板几乎同时发生相变,相变维持时间依次为 12.9 h、13.6 h、14.2 h、14.7 h 和 15.2 h;延迟时间均在 0.5 h 左右;衰减倍数依次为 1.77、1.83、1.98、2.10 和 2.19。结果表明潜热越大相变维持时间越长、衰减倍数越大,但延迟时间几乎不变;潜热越大,在相变维持时间内温度波动越小。在本文拟定的条件下,当潜热达 75 kJ/kg 左右时,能充分的利用材料的相变温度区。可见潜热也有一定限值,超过该限值后,材料的性能将不能充分发挥,应该在其限值内提高材料潜热以控制环境温度波动。

4.4 不同内、外对流换热系数的影响

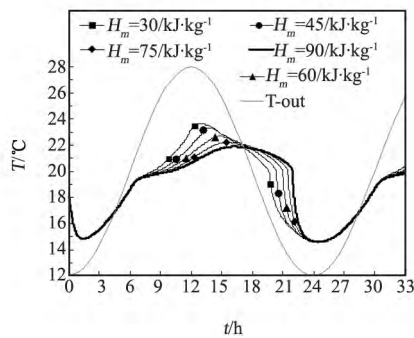


图 3 不同潜热的 SSPCM 墙板内表面温度响应
Fig. 3 Inner surface temperature response of SSPCM wallboard with different latent heat

选取厚 20 mm 的 SSPCM 墙板,当外表面对流换热系数为 $19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,变换内表面对流换热系数;当内表面对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,变换外表面对流换热系数,墙板内侧温度响应曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4 可见,随内表面对流换热系数增大,相变维持时间依次为 15.9 h、15.2 h、14.9 h、14.7 h;延迟时间依次为 0.82 h、0.52 h、0.42 h、0.39 h;衰减倍数依次为 1.80、2.19、2.58、2.81。结果表明提高内表面对流换热系数可增大衰减倍数,有利于潜热的存储和室内温度的平稳,但相变维持时间和延迟时间会略有缩短。因为内表面对流换热系数越大,墙板的温度与室内空气热交换效率越高。

由图 5 可见,随外表面对流换热系数大幅增大,相变维持时间基本一致,其值依次为 15.5 h、15.2 h、15.0 h、14.7 h;延迟时间略有缩短,其值依次为 0.96 h、0.52 h、0.38 h、0.37 h;衰减倍数略有减小,其值依次为 2.90、2.19、1.94、1.78。可见外表面对流换热系数对温度的综合影响很小,一般可不予考虑。

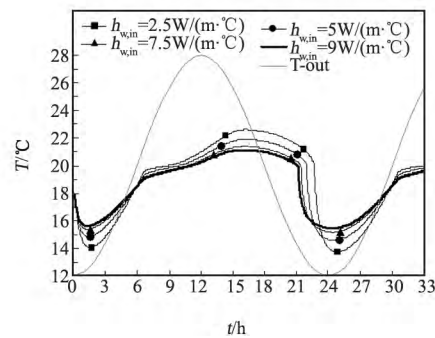


图 4 不同内表面换热系数 SSPCM 墙板内表面温度响应
Fig. 4 Inner surface temperature response of SSPCM wallboard with different inner surface convective heat transfer coefficients

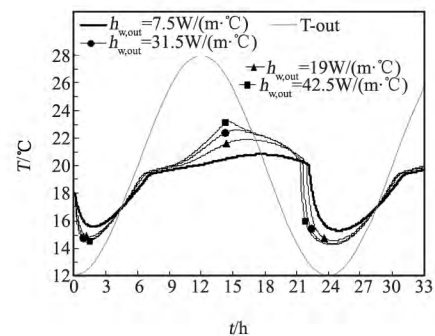


图 5 不同外表面换热系数 SSPCM 墙板内表面温度响应
Fig. 5 Inner surface temperature response of SSPCM wallboard with different surface convective heat transfer coefficients

5 结 论

(1) SSPCM 墙板传热过程存在很长一段相变维持时间,并且在环境温度低于墙体材料温度以后仍可持续控温数小时,可以很好的起到“削峰填谷”作用,使得室内环境具有更好的舒适性;

(2) 考虑到材料性能的利用程度,材料厚度及潜热的选取均有一定限值,在适当范围内加大板厚,并提高潜热值,不仅可以增强控温效果,而且不会对材料造成浪费,合理的增加板厚和材料潜热值是减小室内温度波动的有效手段;

(3) 加大内表面对流换热系数,相变维持时间及温度延迟时间均减小,波幅衰减倍数增大,有利于潜热的存储和室内温度的平稳,但相变维持时间和温度延迟时间会略有缩短。外表面对流换热系数对相变维持时间、温度衰减倍数和延迟时间影响很小,其对室温的影响一般可不予考虑。

参 考 文 献

- [1] 李继业,姚虹,晁灿.建筑节能工程材料[M].北京:化学工业出版社,2012:236.
- [2] 席国喜,路宽.硬脂酸/埃洛石插层复合相变材料的制备及其性能研究[J].硅酸盐通报,2011,30(5):1155-1159.
- [3] 张朝辉. ANSYS10.0 热分析教程与实例解析[M].北京:中国铁道出版社,2007:82-85.
- [4] 陈超,刘宇宁,国海凤,等.复合相变墙体应用于复合式太阳房的初步研究[J].建筑材料学报,2008,11(6):684-689.
- [5] 郭志强,吴文健,满亚辉,等.基于 ANSYS 有限元方法对相变材料相变过程的分析[J].新技术新工艺,2007,(11):87-89.
- [6] 孙潇,邹钺.相变墙体温度变化的计算机模拟[J].建筑节能,2010,38(9):58-65.
- [7] 赵镇南.传热学[M].北京:高等教育出版社,2008:142-143.
- [8] 李震,张寅平,江亿,等.非理想相变特性材料热性能简化分析方法及适用条件[J].太阳能学报,2002,23(1):27-31.
- [9] 周国兵.自然能源·相变储能·建筑节能[M].北京:中国建筑出版社,2013:26.
- [10] Zhang Y P, Lin K P, Zhang Q L, et al. Ideal thermophysical properties for free cooling(or heating) buildings with constant thermal physical property material[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(10):1164-1170.

· 信 息 ·

福建物构所等深紫外非线性光学晶体研究取得新进展

非线性光学(NLO)晶体可以有效扩展现有商用激光的波长范围,因而在现代激光科学与技术领域起着重要作用,其中的深紫外非线性光学晶体由于其在深紫外波段的重要应用是目前急需发展的一类非线性光学晶体材料。

中国科学院福建物质结构研究所中科院光电材料化学与物理重点实验室罗军华课题组在国家自然科学基金和副研究员赵三根主持的海西研究院“春苗”人才专项等项目资助下,对已知的磷酸盐深紫外 NLO 材料 $Ba_3P_3O_{10}X$ ($X = Cl, Br$) 进行合理的分子剪裁,成功获得了一种基于 $[P_3O_{10}]^{5-}$ 非线性基元的新型深紫外 NLO 材料 $Ba_5P_6O_{20}$ 。由于 $[P_3O_{10}]^{5-}$ 基元的结构容忍性,当卤素阴离子 X^- 和作为补偿电荷的 Ba^{2+} 从 $Ba_3P_3O_{10}X$ 晶体结构中移除后,所得到的 $Ba_5P_6O_{20}$ 空间群保持不变。但其紫外吸收边却从 $Ba_3P_3O_{10}Cl$ 的 180 nm 显著蓝移至 167 nm(目前磷酸盐 NLO 材料中最短的之一),这使得 $Ba_5P_6O_{20}$ 可能获得一些极为重要的深紫外 NLO 应用。此外,该课题组与中科院理化技术研究所研究员林哲帅合作对其光学性质作了第一性原理理论计算,证实了卤素阴离子 X^- 的移除是其吸收边蓝移的原因所在。有趣的是,该吸收边蓝移机制与深紫外 NLO 晶体 KBBF 中的情况刚好相反。

(来源:福建物质结构研究所)