

A Novel Architectural Energy Saving Technology-the Research Status of Vacuum Insulation Panels

Chunguang Yang, Xia Gao, Lian Duan, Yajuan Li

Da Lian Ocean University, Dalian, China

Email: cgyang88@gmail.com

Abstract: Vacuum Insulation Panels (VIPs) have been regarded as a super thermal insulation material with a thermal resistance of about 5-10 times higher than that of equally thick conventional thermal insulating materials, and at present, it has been used in buildings with high energy efficiency in developed countries. During the Twelfth Five-Year Plan, the 65% energy saving standard will be implemented in China, which will pose strict requirements for the maintenance structures of buildings. VIPs will be a best choice to improve the energy saving ability of buildings. The core, barrier films and getters are three components of VIP. In the paper, the research status of the components were summarized comprehensively, and the factors influencing internal vacuum of VIP were discussed, following this, some relative research suggestions were presented.

Keywords: Vacuum Insulation Panel; energy saving buildings; research status

建筑节能新技术-真空绝热板的研究动态

杨春光, 高霞, 段炼, 李亚娟

大连海洋大学, 大连, 中国, 116023

Email: cgyang88@gmail.com

摘要: 真空绝热板 (Vacuum Insulation Panels, 简称 VIPs) 是一种高效绝热材料, 其热阻是传统绝热材料的 5 倍至 10 倍, 具有优良的绝热性能, 目前欧洲发达国家已经将其应用于高节能度建筑上。在十二五期间, 我国将全面推行 65% 的建筑节能标准, 建筑维护结构的节能幅度将大幅度提高, 真空绝热板技术将是非常好的选择。本文详细总结了构成 VIPs 的三大部件: 芯材、表面隔膜和吸气剂的相关研究动态, 探讨了影响 VIPs 内部真空的关键因素, 最后提出了今后的研究建议。

关键词: 真空绝热板; 建筑节能; 研究动态

1 引言

《联合国气候变化框架公约》缔约方第 15 次会议于 2009 年 12 月 19 日在丹麦哥本哈根落下帷幕, 面对全球变暖的严酷现实, 温家宝总理在大会上代表中国政府又一次庄严承诺: 到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放量比 2005 年下降 40%~45%。在这么短的时间内要实现上述目标需要付出艰苦卓绝的努力, 大幅度降低建筑行业能耗任务艰巨。目前我国建筑能耗约占社会终端总能耗 20.7% 左右 (仅指建造和使用过程中的能耗, 不包括建材生产过程中的能耗)^[1]。近年来, 建筑行业得到快速发展, 预计 2020 年前, 我国城镇每年新增建筑面积高达 10 亿 m^2 , 建筑能耗将持

本论文得到辽宁省自然科学基金资助, 项目名称“新一代聚氨酯泡沫低温下热质耦合的传热特性及模型研究”

续快速提高^[1]。届时我国建筑能耗将不可避免地大幅度刚性上升, 这对我国的节能减排目标将产生重大影响, 十二五期间, 我国政府正在考虑全面推行 65% 的建筑节能设计标准, 比原来强制性标准提高 15 个百分点^[2]。

要实现上述目标, 先进建筑维护结构的设计及高效隔热技术的应用必不可少, 目前我国性能较好的建筑维护结构采用热导率约为 30mW/mK 的泡沫类绝热材料, 由于生产绝热泡沫的发泡剂对臭氧层有破坏作用, CFC-11 已经被禁止使用, HCFC-141b 将于 2030 年完全废止。对于环境友好型发泡剂 HFC-245fa 以及环戊烷等, 一方面我国发泡剂替代技术还不成熟, 另一方面这种发泡剂本身的导热系数就比较高, 导致生产出来的聚氨酯泡沫热导率偏高, 虽然满足了环保的

要求但是在绝热应用时造成了较多的能源浪费^[3]。真空绝热板是近年来发展起来的一种高效绝热技术，是真空绝热和微孔绝热技术的结合体。常温下以开孔泡沫为芯材的 VIP 其热阻是目前普遍应用的聚氨酯泡沫的 5 倍左右。在冰箱、冷柜、冷库和冷藏集装箱等食品冷冻冷藏装置中应用以泡沫为芯材的 VIPs 时，与常用的硬质聚氨酯泡沫相比，节能高达 30% 之多，而且还扩大了冷冻室的有效容积^[4]。在欧洲发达国家如德国、瑞士等已经在高节能建筑中应用以纳米级 SiO_2 为芯材的 VIPs，其常温导热系数可达 4mW/mK ，节能大幅度提高^[5,6]。在我国，到目前为止，针对建筑用真空绝热板的深层次研究工作还未展开，还没有应用实例，无论在研究深度还是在应用层次上，与发达国家相比都存在着很大的差距。

VIPs 中高孔率、低孔径芯材的制作、内部真空度的保持、表面隔膜的抗气体及水蒸气的渗透性能、吸气剂的吸附性能以及热桥效应都会对其绝热性能和寿命产生重要影响。本文从 VIPs 的三大部件芯材、表面隔膜和吸气剂出发，系统地总结其最新研究动态，在此基础上指出真空绝热板这一高级绝热技术的研究方向，以推动我国建筑行业节能降耗目标的实现。

2 VIPs 的组成

VIPs 由三部分构成：芯材、表面隔膜和吸气剂。将多孔性芯材内部抽真空，加入吸气剂后，将其封装于具有较高抗气体渗透性的表面隔膜中，就形成了完整的一片 VIP，其外观示意图及截面图见图 1。芯材是多孔材料，而且其孔径非常小，一般为几十微米，当内部抽真空使得芯材最大孔径达到气体分子平均自由程的时候，气体导热和对流传热可以忽略不计，这样内部传热途径只有固体导热和辐射传热，这样导热系数相比处于大气环境中的芯材得到大幅度降低。同时要求芯材具备一定的强度，以起到支撑板壁面的作用。VIP 内部真空度非常重要，一般要求抽到 0.1 到 10Pa 左右。表面隔膜具有很强的抗气体渗透能力，阻止板外部气体和水蒸气在压力差和浓度差的作用下由外向内渗透而破坏 VIP 的真空，损害其绝热性能，降低其使用寿命。但在长时间使用过程中，建筑上要求 VIPs 有 25 年以上的使用寿命，气体和水蒸气会或多或少地透过表面隔膜和热封边缘向板内部缓慢渗透，另一方面，在真空环境中，芯材不可避免地存在放气

现象，所以必须在板内加入吸气剂和干燥剂以吸附板内部产生的气体，维持其真空环境。

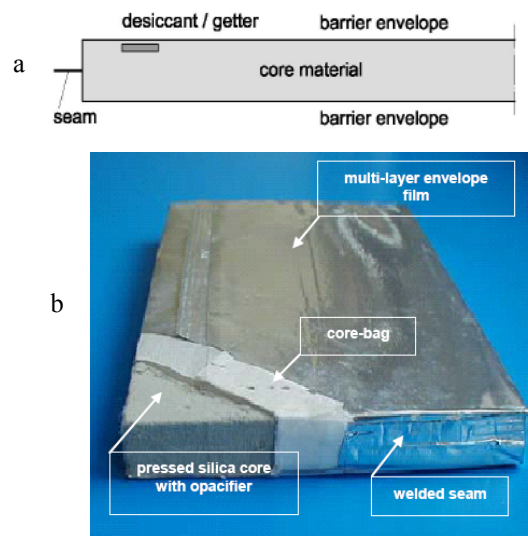


Figure 1 Vacuum Insulation Panels, a schematic view for cross section, b Outside view

图 1. 真空绝热板, a 外观图, b 截面图

3 芯材的研究动态

用于 VIPs 芯材孔径要足够小，最好达到纳米级别，最好要有 100% 的开孔率以便于抽真空和真空保持，要具备一定的压缩强度和抗辐射传热能力。目前主要材料有纳米级 SiO_2 粉末、玻纤、开孔聚苯乙烯泡沫以及开孔聚氨酯泡沫等，不同芯材的热导率随内部气体压力的变化趋势见图 2，由图中可见，对于气相法 SiO_2 芯材，内部压力达到 100mbar 时，其热导率仍然在 0.01W/mK 以下。

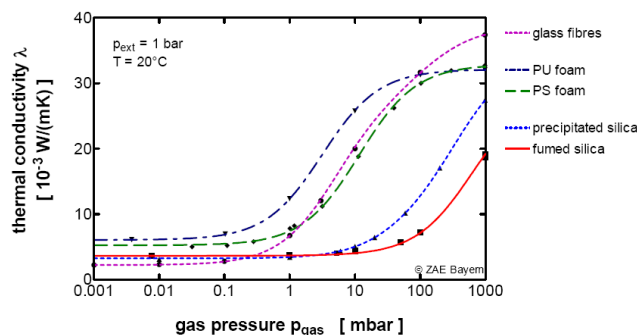


Figure 2. Thermal conductivity of fibers, powders and foams as a function of gas (air) pressure^[7]

图 2. 玻纤、粉末及泡沫材料的热导率随内部气体压力的变化
欧盟开发出一种 SiO_2 芯材用于制备建筑用 VIPs，密度为 191kg/m^3 ，固体基体密度 2578kg/m^3 ，空腔率

为 $93 \pm 1\%$, 比表面积约为 $213 \text{ m}^2/\text{g}$, 泡孔最大直径约为 300 nm , 在内部气体压力为 1.5 Pa 时, 其热导率为 4.4 mW/mK , 当压力增加至 11 kPa 时, 热导率仅仅增加到 9.4 mW/mK , 可见其具有优良的真空绝热性能^[8]。很多学者致力于此芯材的物理性能研究, 诸如比表面积和吸水率等等^[9-10]。此外热导率的研究一直是重点, 综合考虑辐射传热和固体导热, 提出了一个涉及罗斯兰消散系数、固体基体导热系数、分子平均自由程、密度等参数的热导率计算公式^[11,12]。

泡沫类 VIP 芯材属于微孔介质, 内部传热是当前热门研究方向之一。VIP 绝热的本质就是其多孔性芯材处于真空环境时的导热问题, Glicksmann^[13]团队奠定了绝热泡沫理论模型研究的基础, 在我国也不乏分形理论、低温下的分层描述、立方体模型等分析模型和数值模型^[14,15]。近年来随着人们对泡沫金属、泡沫陶瓷以及泡沫塑料等开孔型多孔材料研究的深入, 多孔材料的热导率成为一大研究热点。在所有的分析模型中, 均以多面体泡孔结构为基础, 假设泡孔是六面体、十二面体或十四面体, 泡孔骨架横截面为三角形或四边形且相互连接并呈周期性分布。虽然以前曾有学者^[16]着眼于大范围孔隙率分布, 采用任意形状的泡孔并考虑了辐射传热, 推导出了一个半经验公式, 但是公式中包含了一个叫做泡孔形状因子的未知参数, 对于低孔隙率材料, 这个参数可以通过复杂的实验确定, 但对于像 VIP 芯材的高孔隙率材料无法获得准确数值。

为了克服解析方法的不足, 在宽广的孔隙率范围内描述开孔材料的热导率, 学者们采用数值方法进行模拟分析, 在孔隙率从 0 到 1 的范围内计算了泡沫的有效热导率, 但采用了固定不变的泡孔结构, 这与泡沫中几种形状泡孔混合分布的实际不是很相符^[17]。最近也有学者摒弃了多面体泡孔结构这一微观基础, 而是基于统计学采用泡孔随机生成模型, 使用 LBM 数值方法对开孔泡沫的有效热导率进行了计算, 但基于统计学的泡孔随机生长理论还没有得到公认^[18]。

4 表面隔膜的气体渗透性研究

VIPs 内部真空是其绝热的关键, 对于由于气体和水蒸汽透过表面薄膜向板内部渗透引起的 VIP 热导率

增加, 世界能源组织 (IEA) 曾经组织德国、瑞士等国的相关研究机构, 从 2000 年至 2005 年进行了系统的研究^[5,6]。考察了 AF 及 MF (见图 3) 镀铝聚酯膜的空气渗透和水蒸汽渗透对 VIP 热导率的影响, 找到了渗透引起的热导率增加对温度、湿度及板尺寸等的依赖关系^[19]。结果表明对于在不同形式的表面隔膜、气

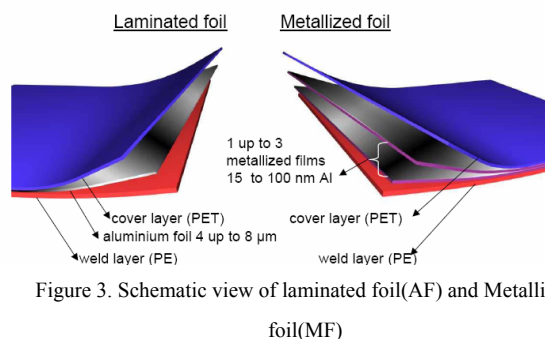


Figure 3. Schematic view of laminated foil(AF) and Metallized foil(MF)

图 3. AF 及 MF 表面隔膜结构示意图

候条件和板尺寸的条件下, 对于 AF 及 MF 类型 VIPs, 板内的压力变化范围在 $1\text{--}2 \text{ mbar/yr}$, AF 型吸水量在 0.1 mass\%/yr , 而 MF 类型的吸水量可达 1 mass\%/yr 。在典型的欧洲气候条件下, 水蒸汽重量每增加 1% , 将引起热导率增加 0.5 mW/mK , 至于气体可以按经典气体导热系数随压力变化的依赖方程估算^[20,21]。在实验分析的基础上, Schwab^[20]提出了一个计算 VIPs 热导率的公式如下

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{evac}} + \frac{\lambda_{\text{free air}}}{1 + p_{1/2, \text{air}} / p_{\text{air}}(t)} + b \cdot X_w(t)$$

式中 λ_{evac} 为初始真空状态下干燥芯材的热导率, $\lambda_{\text{free air}}$ 为自由空气的热导率, $p_{1/2, \text{air}}$ 为当气体导热系数为自由气体一半时的压力, $X_w(t)$ 为水蒸气含量。

关于建筑 VIPs 绝热性能及寿命的实验及理论分析, 不仅在实验室进行, 而且学者们将其应用于真正建筑物上进行内部压力监测和产品寿命评估^[22]。根据实测结果, 得到了 VIPs 内部压力和水蒸气量随时间变化的计算公式。Simmler 和 Brunner^[23]开发了一个模型, 并将其应用于位于瑞士一山坡的建筑物, 根据此模型, 考虑了芯材特点, 对气体渗透与温湿度的关系进行了数值模拟和实验研究。结果表明在建筑物上应用真空绝热板时, 采用 EPS 泡沫作为保护层, 同导热系数为 36 mW/mK 普通绝热材料相比, 厚度减小了 3.5 倍, 另一方面 EPS 泡沫的加入, 也在一定程度上缓解

了VIP的热桥现象。

5 VIP的热桥研究

由于目前被广泛应用的多层镀铝复合塑料膜含有几十至几百纳米的镀铝层,导热系数比整体VIP板要高很多,所以在应用时热量绕过板内真空而沿着薄膜经由板的边缘或板与板的搭界处由热端向冷端传递,产生热桥现象,如图4所示。当应用金属膜时,含有

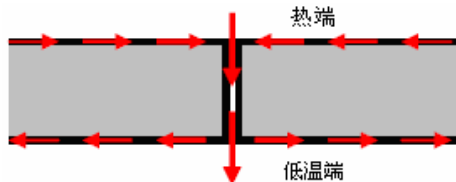


Figure 4. Schematic view of thermal bridge in VIPs

图4. VIP中的热桥效应示意

几甚至十几微米的铝膜,这时热桥效应更加显著^[8]。对于热桥效应,一些学者对此进行了计算机模拟,探讨其影响程度,在模型中将多层镀铝复合膜看做一层具有平均导热系数的均匀材料,或看做是多层结构,每一层有特定的导热系数^[24]。Tenpierik^[25]等拓展了研究范围,以模拟手段通过对线性热透射率的研究,考察了VIP边缘热封结构对热桥效应的影响。推导出一个可以近似模拟以高阻隔复合薄膜作为表面隔膜的真空气绝热板热桥传热的数学分析模型。至于针对热桥效应研究热导率的实验性报道很是少见,仅先后有Ghazi^[24]和Schwab^[26]等分别考察了两块板对接和VIP应用于建筑系统时与其他支撑机构接触产生的热桥效应,并都采用平板热导仪以冷水为冷源进行了实验测试。

5 展望与建议

为了保证VIPs的使用寿命和绝热性能,吸气剂是真空气绝热板中不可缺少的部件,以吸收从表面隔膜和热封边缘处缓慢渗透进来的气体和水蒸气,也可以吸收内部芯材在真空环境中释放出来的气体。如果不加吸气剂,一块以泡沫为芯材,尺寸为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.02\text{m}$ 的VIP在20年后其内部压力要增加 250Pa ^[27],还未将水蒸气的影响计算在内,将极大影响其绝热性能。传统吸气剂有蒸发式和非蒸发式,如Ba、Ni合金和Zr、Ti合金等,但需要高温激活^[28]。意大利SAES集团成功开发出商品名为COMBOGETTER的吸气剂,此吸气剂基于钡锂合金,原子比例为1:4^[27],在应用于泡沫类芯材的VIP时表现了良好的吸附特性。

6 展望与建议

VIPs技术自从德国1999年生产了100片应用于建筑维护结构,已经过去了10余年,在政府的财政补贴下,目前此技术已经在欧洲发达国家的高节能度建筑、及旧建筑节能改造中得到了推广应用。与传统绝热材料相比,其厚度缩小了5到10倍就可以达到传统绝热材料的传热系数,可以说此技术在未来建筑节能领域有广阔的应用前景。但目前也存在一些问题。

(1) 在建筑物中真实应用的细致研究有待加强

不同地区的气候条件不一样,在我国应用时要注意加强在本地气候条件下的性能测试。建筑物中的应用环境与实验室会有差别,VIPs在屋顶、地板及墙壁中只是其中的一层,另外还有防水层及保护层等,这些都会对VIPs的老化性能产生影响。另外在应用时,VIPs表面一般会有应力,这也同样影响其绝热性能及表面隔膜的抗渗透性能。另外,在将泡沫和玻纤芯材应用于冷冻冷藏装置时,一般会在缝隙处喷注聚氨酯泡沫,温度较高,也会影响其老化性能。

(2) 成本居高不下

目前VIP的成本很高,材料成本(包括芯材、隔膜和吸气剂)在总成本中占有很大的比重,在加上昂贵的人工制作成本,这极大地限制了其大规模应用。人工成本可以通过提高制作过程的自动化程度降低。政府应该加大科研投入,以尽快研制出低成本的VIPs,使纳米芯材、高效率表面隔膜和吸气剂尽快国产化。政府应该提供一定的补贴,以帮助用户降低成本,这样可以推动VIP这一高级绝热技术的推广,以降低建筑的总碳排放量。

(3) 放宽热桥效应的研究温区

尽管已经证明了常温下热桥对热导率的影响比较显著,也提及了温差对热桥有一定的影响,但是没有进行量化。在低温绝热时,冷热壁面之间的大温差究竟会对VIP的热导率构成多大的影响,如何建立其评价指标有待于进一步研究。

(4) VIP相关标准有待尽快建立

同传统绝热材料相比,目前还没有正式的关于VIP生产、性能指标测定、质量控制等国家标准,希望能尽快制定相关标准以规范VIP的生产和销售。

References (参考文献)

- [1] <http://gu.cic.tsinghua.edu.cn/article3057.shtml>
- [2] Kang Yanbing, Zhang Yang, Han Fengqin. Fiscal Incentive

- Policy Recommendations to Promote Energy Efficient Buildings[J], *Energy of China*, 2009, 31(11), P36-39(Ch)
康艳兵, 张杨, 韩凤琴, 关于鼓励节能建筑的财税政策建议[J], *中国能源*, 2009, 31(11), P36-39
- [3] Fu Yongbin, Sector Plan for ODS Phase Out at Polyurethane Sector of China and Its Execution, Proceedings of ODS Phase Out at Polyurethane Sector of China, 2003, P50-60
- [4] Chang, W.R., Chang, C.H., Chung, H.D. and Lin, J.Y. Energy Efficient Potential for Household Refrigerators/Freezers with High Efficiency Compressor and Vacuum Insulation Panels, VIA 2002 Symposium, Atlanta (USA), May 22-23.
- [5] IEA/ECBCS Annex 39, Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), 2005
- [6] IEA/ECBCS Annex 39, "Vacuum Insulation in the Building Sector Systems and Applications (Subtask B)", 2005
- [7] Ulrich Heinemann, Influence of Water on the Total Heat Transfer in evacuated insulations, 7th International Vacuum Insulation Symposium, Zurich, Switzerland, 2005, P23-34
- [8] IEA/ECBCS Annex 39, "Vacuum Insulation in the Building Sector Systems and Applications (Subtask A)", 2005
- [9] B. Morel, D. Autissier, L. Autissier, Modifications of pyrogenic silica exposed to moist air, Proceedings of the 8th International Vacuum Insulation Symposium, ZAE Bayern, September 18 - 19, 2007, P1 - 8.
- [10] H. Schwab, Vakuumsisolationspaneele - Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchteun Warmetransport, PhD thesis, Bayerischen Julius-Maximilians-Universitat Wurzburg, Wurzburg, 2004
- [11] R. Caps, J. Fricke, Thermal conductivity of opacified powder filler materials for vacuum insulation[J], *International Journal of Thermophysics*, 2000, 21 (2), P445 - 452.
- [12] M. Reim, W. Korner, J. Manara, S. Korder, M. Arduini-Schuster, H.-P. Ebert, J. Fricke, Silica aerogel granulate material for highly thermal insulation and daylighting[J], *Solar Energy*, 2005, 79, P131-139.
- [13] L. R. Glicksmann, M. A. Schuetz; in Low Density Cellul. Plastics, Chapman and Hall, London 1994, pp. 104-152
- [14] Shi Mingheng, Li Xiaochuan, Chen Yongping, Determination of the effect thermal conductivity of polyurethane foams through fractal method[J], *Science in China SER. E*, 2006, 36(5), P560-568
施明恒, 李小川, 陈永平, 利用分形方法确定聚氨酯泡沫塑料的有效导热系数, *中国科学 E 辑*, 2006, 36(5): 560-568
- [15] Zhang Jianke, Ji Yongfu, Model of Heat Insulation Layers and Mechanism Analysis of Polyurethane Foam for Cryogenic Insulation Container[J], *Cryogenics*, 1995, 84(2): 25-29
- 张建可, 冀勇夫, 低温储箱聚氨酯泡沫塑料分层绝热模型与机理分析, *低温工程*, 1995, 84(2): 25-29
- [16] Bauer, T.H., A General Analytical Approach Toward the Thermal Conductivity of Porous Media, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(17): 4181 - 4191.
- [17] M. Druma, M. K., Alam, C. Druma, Finite Element Model of Thermal Transport in Carbon Foams *Int. J. Thermal Sci.* 2004, 43, 689.
- [18] Moran Wang, Ning Pan, Modeling and prediction of the effective thermal conductivity of random open-cell porous foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 1325-1331
- [19] Schwab H, Heinemann U, Beck A, Ebert H-P, Fricke J, Permeation of Different Gases Through Foils used as Envelopes for Vacuum Insulation Panels[J], *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 2005, 28(4), P293-317.
- [20] Schwab, H., Heinemann, U., Ebert, H.-P. and Fricke, J, Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover[J], *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 2005, 28(4): 357-374.
- [21] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application Basic properties, aging mechanisms and service life[J], *Energy and Buildings*, 2005, 37: 1122-1131
- [22] Schwab, U., Heinemann, J., Wachtel, H.-P., Fricke, Ebert J., Predictions for the Increase in Pressure and Water Content of Vacuum Insulation Panels (VIP) Integrated into Building Constructions using Model Calculations[J], *Thermal Envelope and Building Science*, 2005, 28(4), P327-344.
- [23] H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application Basic properties, aging mechanisms and service life, *Energy and Buildings*, 2005, 37, P1122-1131.
- [24] Ghazi, W.K., Bundi, R. and Binder, B., Effective Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels, *Building Research and Information*, 2004, 32 (4), P293-299.
- [25] MARTIN TENPIERIK, HANS CAUBERG, Analytical Models for Calculating Thermal Bridge Effects Caused by Thin High Barrier Envelopes around Vacuum Insulation Panels, *Journal of BUILDING PHYSICS*, 2007, 30(3), P185-215
- [26] Schwab, H., Stark, C., Wachtel, J., Ebert, H.-P. and Fricke, J., Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Facades, *J. of Thermal Env. and Bldg. Sci.*, 2005, 28(4), P345-355.
- [27] Paolo Manini, Recent developments in the open cell foam-filled Vacuum insulated Panels for appliances applications[J], *Journal of Cellular Plastics*, 1999, 35, P403-421.
- [28] Stefano Tominetti, Marco Amiotti, Getters for flat-panel displays, *Pro. of the IEEE*, , 2002, 90(4), P540-558