

摘要

在运输和储存的过程中,保温不当将导致温度敏感性产品破损失效问题的发生。将温度敏感性产品控制在一个适宜的温度范围内,并对其进行保温隔热包装就显得非常重要。目前的隔热材料通常采用聚合物泡沫塑料,而泡沫塑料的大量使用会对环境造成严重污染。纸蜂窝具备优异的力学和热学性能,使其有望成为一种兼具承载和隔热功能一体化的包装材料。同时,泡沫塑料具有优异的保温隔热性能,如果能重新利用废弃泡沫塑料并将其作为纸蜂窝芯层中的填充材料,则可以进一步降低纸蜂窝的有效导热系数。鉴于此,基于纸蜂窝和废弃泡沫塑料,制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构包装箱,对温度敏感性产品的包装设计具有实践指导意义。为了评估回收泡沫-纸蜂窝复合结构包装箱在隔热包装中应用的可能性,以纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构为研究对象,开展传热性能的研究。研究内容主要包括:

(1) 建立纸蜂窝典型单元的物理模型,分析纸蜂窝中可能存在的传热方式与传热特点,给出了热传导、辐射换热和对流换热有效导热系数的理论公式,并利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟验证纸蜂窝内的空气对流。通过稳态传热试验测定纸蜂窝的有效导热系数,定性考察纸蜂窝在上热下冷和上冷下热工况下的传热性能及其影响机理。拟合试验结果得到预测纸蜂窝有效导热系数的理论模型,并在此基础上,考察对流换热对纸蜂窝有效导热系数的影响。

(2) 从理论层面分析颗粒堆积结构中的传热特点,给出颗粒堆积结构中不同传热路径有效导热系数的理论模型。选用 EPS 颗粒作为纸蜂窝芯层的填充材料,制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构板,给出制作流程,用孔隙率描述其典型单元的结构特征。通过稳态传热试验测定回收泡沫-纸蜂窝复合结构板的有效导热系数,拟合试验结果得到预测回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的理论模型,进一步考察孔隙通道中对流换热对回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的影响。

(3) 基于试验结果和理论结果,探讨传热方向、纸蜂窝单元结构几何参数、颗粒粒径和颗粒导热系数对纸蜂窝传热性能的影响,并定量考察热传导、辐射换热和对流换热对纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的贡献。

(4) 利用纸蜂窝和 EPS 颗粒设计制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱,分析包装箱的传热过程,并研究包装箱尺寸和蓄冷剂质量对回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱保温时间的影响。

本文研究拓展了纸蜂窝和回收泡沫的应用领域,丰富了包装材料体系,建立了纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构为隔热层制备包装材料的工艺方法和理论,研究结果在隔热包装中具有一定的理论意义和工程应用价值。

关键词: 纸蜂窝; EPS 颗粒; 理论模型; 对流换热; 有效导热系数

Abstract

During transportation and storage, improper thermal insulation will lead to damage and failure of temperature sensitive products. It is very important to control the temperature sensitive products within an appropriate temperature range and pack the temperature sensitive products with thermal insulation. At present, polymer foamed plastics are usually used as thermal insulation materials, and the massive use of foamed plastics will cause serious environmental pollution. With excellent mechanical and thermal properties, paper honeycomb is expected to be a packaging material with both load bearing and thermal insulation functions. At the same time, foam plastic has excellent thermal insulation performance. If the waste foamed plastic can be used as the core filling material in the paper honeycomb, the effective thermal conductivity can be further reduced. Based on paper honeycomb and waste foam plastic, the preparation of new packaging box will have practical guiding significance for packaging design of temperature sensitive products. In order to evaluate the possibility of the application of new packaging box in thermal insulation packaging, the paper honeycomb and paper honeycomb filled with recycled foam were taken as the research objects, and the heat transfer performance was studied. The research contents mainly include:

(1) According to the physical model of typical cell of paper honeycomb, the possible heat transfer modes and characteristics of paper honeycomb were analyzed, and the theoretical formulas of effective thermal conductivity of heat conduction, radiative heat transfer and convective heat transfer were provided. Furthermore, COMSOL Multiphysics was used to simulate and verify the air convection in paper honeycomb. Base on the measurement of the effective thermal conductivity of paper honeycomb under different conditions by steady-state heat transfer experiment, theoretical models for predicting the effective thermal conductivity of paper honeycomb were obtained by fitting experimental results. Then, the influence of air convection on the effective thermal conductivity of paper honeycomb was investigated.

(2) The characteristics of heat transfer in granular packing structure were analyzed theoretically, and the theoretical models of effective thermal conductivity of different heat transfer paths in granular packing structure were given. EPS particles were selected as the filling material of paper honeycomb, and the paper honeycomb filled with recycled foam was prepared. The manufacturing process was given, and the structural characteristics of its typical units were described by porosity. The effective thermal conductivity of paper honeycomb filled with recycled foam was measured by steady-state heat transfer experiment, and the theoretical models for predicting the paper honeycomb filled with recycled foam composite structure were obtained by fitting the experimental results. The influence of natural convection on the effective thermal conductivity of paper honeycomb filled with recycled foam was further investigated.

(3) Based on experimental and theoretical results, the influence mechanism of different factors on the heat performance of paper honeycomb were discussed, such as the heat transfer direction, the geometric parameters of paper honeycomb cell, particle size and particle thermal conductivity. The contributions of heat conduction, radiative heat transfer and convective heat transfer to the effective thermal conductivity of paper honeycomb and paper honeycomb filled with recycled foam were quantitatively investigated.

(4) The new insulation packing box was designed and prepared by using paper honeycomb and EPS particles. The heat transfer process of the box was analyzed. The thermal insulation mechanism of the box was revealed. And the effects of box size and cold storage agent quality on the heat preservation time of new insulation packing box were studied.

This paper expands the application field of paper honeycomb and recycled foam, enriches the packaging material system, and establishes the technological method and theory of preparing packaging materials with paper honeycomb and paper honeycomb filled with recycled foam as thermal insulation layer. Therefore, the research results have certain theoretical significance and engineering application value in thermal insulation packaging.

Keywords: Paper honeycomb; EPS particles; Theoretical model; Convective heat transfer; Effective thermal conductivity

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究目的及意义.....	1
1.2 蜂窝夹层结构传热性能研究进展	2
1.2.1 蜂窝板传热性能研究.....	2
1.2.2 蜂窝复合结构传热性能研究.....	3
1.3 纸蜂窝夹层结构材料在包装中的应用	3
1.4 主要研究内容.....	4
第二章 纸蜂窝的传热模型研究	6
2.1 纸蜂窝的传热分析.....	6
2.1.1 纸蜂窝结构.....	6
2.1.2 纸蜂窝的传热特性.....	7
2.1.3 自然对流的有限元分析.....	8
2.2 纸蜂窝传热的理论模型.....	11
2.2.1 热传导模型.....	11
2.2.2 辐射换热模型.....	13
2.2.3 对流换热模型.....	14
2.2.4 纸蜂窝有效导热系数的理论模型.....	15
2.3 理论模型验证.....	15
2.3.1 试验材料.....	15
2.3.2 传热试验.....	16
2.3.3 上热下冷工况下纸蜂窝有效导热系数的计算	17
2.3.4 上冷下热工况下纸蜂窝有效导热系数的计算	18
2.4 本章小结.....	19
第三章 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热模型研究.....	20
3.1 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热分析	20
3.1.1 试验材料.....	20
3.1.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构板的制备	20
3.1.3 回收泡沫-纸蜂窝复合结构	21
3.1.4 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热特性	22
3.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热的理论模型	23
3.2.1 辐射换热模型.....	23
3.2.2 对流换热模型.....	23
3.2.3 颗粒堆积的热渗模型.....	23
3.2.4 回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的理论模型	25

3.3 理论模型的验证.....	26
3.3.1 传热试验.....	26
3.3.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构孔隙率的计算.....	26
3.3.3 上热下冷工况下回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的 计算.....	28
3.3.4 上冷下热工况下回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的 计算.....	29
3.4 本章小结.....	30
第四章 纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热性能研究.....	31
4.1 纸蜂窝的传热性能分析.....	31
4.1.1 传热方向对纸蜂窝传热的影响.....	31
4.1.2 面纸厚度对纸蜂窝传热性能的影响分析.....	31
4.1.3 蜂窝芯层高度对纸蜂窝传热性能的影响分析.....	32
4.1.4 蜂窝边长对纸蜂窝传热性能的影响分析.....	33
4.1.5 不同传热路径对纸蜂窝传热的影响.....	34
4.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热性能分析.....	35
4.2.1 传热方向对回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热的影响.....	35
4.2.2 纸蜂窝几何尺寸对回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热的影响.....	36
4.2.3 不同传热路径对回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热的影响.....	37
4.3 纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热性能对比分析.....	38
4.3.1 EPS 颗粒对纸蜂窝传热性能的影响.....	38
4.3.2 颗粒导热系数对纸蜂窝传热性能的影响.....	38
4.3.3 颗粒粒径对纸蜂窝传热性能的影响.....	39
4.4 本章小结.....	40
第五章 回收泡沫-纸蜂窝复合结构在典型隔热包装中的应用研究.....	42
5.1 回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱.....	42
5.1.1 回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱的制备.....	42
5.1.2 隔热包装箱对热量的阻隔作用.....	43
5.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱控温试验.....	44
5.2.1 试验材料.....	44
5.2.2 试验仪器.....	44
5.2.3 试验步骤.....	44
5.3 回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱隔热性能分析.....	45
5.3.1 包装箱的尺寸对包装箱保温时长的影响.....	45
5.3.2 蓄冷剂的质量对包装箱保温时长的影响.....	46
5.4 本章小结.....	46
第六章 总结与展望.....	48
6.1 主要结论.....	48

6.2 创新点.....	49
6.3 展望.....	49
参考文献.....	50

第一章 绪论

1.1 研究目的及意义

2020年1月19日,国家发展改革委和生态环境部联合发布了《关于进一步加强塑料污染治理的意见》,明确提出了增加绿色产品供给,推进塑料废弃物规范回收和处置等系统性措施,并要求在2025年底实现替代产品开发应用水平的进一步提升等多个目标。随着经济社会的发展,电子、医药、食品等行业对包装提出了更多的要求^[1-3]。传统保温隔热材料如发泡聚氨酯、发泡聚苯乙烯以及其他高分子材料都具有良好的保温隔热性能、机械性能和生产成本低等特点,已经被广泛应用在电子器件的减震包装和农产品的保鲜包装等领域^[4,5]。然而,泡沫塑料表面不宜印刷,且大量使用会造成环境污染,难以满足社会可持续发展的要求^[6-8]。因此,集轻量、隔热承载和环境友好等多功能一体化的保温隔热材料的发展将能逐步解决包装领域目前存在的这些问题。

党的十九届五中全会指出,推动绿色发展,促进人与自然和谐共生。坚持绿水青山就是金山银山理念,坚持尊重自然、顺应自然、保护自然,坚持节约为先、保护为先、自然恢复为主,将有利于建设生态文明社会,实现经济社会发展全面绿色转型。因此,为了促进可回收性和绿色环保的材料在包装中的使用,天然纤维由于内部的结构特点引发了越来越多的关注,并被广泛用于生产纸和纸板^[9-11]。在这些以天然纤维为主要原料的材料中,纸蜂窝因具有较高的比强度和比刚度、良好的缓冲性能和生产成本低等特点,逐渐成为了运输包装中的主力^[12,13]。同时,纸蜂窝中的空气夹层使其有望具有优良的保温隔热性能^[14]。但是,纸蜂窝往往需要通过调节单元结构的几何尺寸来实现特定的功能,而这导致其保温隔热性能在批量生产中的放大能力有限^[15]。在这种情况下,高需求工业产品回收产生的材料往往比天然材料更容易获得,同时具有更好的保温隔热效果,且成本更低^[16,17]。此外,通过回收利用废弃物来减少生产新原材料的需要,利用废弃物的潜力产生环境效益,否则这些废弃物可能会被填埋而污染环境^[18,19]。伴随着中国电商行业的快速发展,快递包裹的数量在不断的增加,从而产生了大量的包装垃圾^[20]。相比于纸基包装材料易于回收,泡沫塑料包装通常在使用一次后即被丢弃,混合在城市垃圾中被焚烧或填埋,浪费了可回收资源,增加了废弃物管理的成本,甚至泄露到生态环境中后将会对其造成巨大的损害^[21,22]。因此,对泡沫塑料进行资源化再利用成为促进经济社会全面可持续发展中的重要一环。

鉴于上述性能优势,将粉碎或机械回收的泡沫塑料作为纸蜂窝芯层中的填充材料,在纸蜂窝的基础上研发制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构板。围绕纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构板在不同工况下的传热性能开展研究,揭示其传热机理,并使其达到或接近隔热材料的标准,从而能够进一步满足隔热包装箱的实际工程应用。这不仅可以解决泡沫塑料对环境造成的污染等问题,还能降低回收过程中的技术和经济要求,具有重要工程意义和理论研究价值。

1.2 蜂窝夹层结构传热性能研究进展

1.2.1 蜂窝板传热性能研究

针对航天航空、工业机械等领域中出现的蜂窝夹层结构的传热问题,许多学者于上世纪便开始了对其传热性能的研究,至今已经得到了充分的发展,研究方法涵盖了试验研究、理论分析、数值计算和建立经验公式等多种途径。从蜂窝空腔形状上讲,主要包括菱形、圆形、六边形等,其中正六边形蜂窝结构因结构效率高的优势而应用范围最广^[23]。

1961年,在忽略面层对蜂窝传热贡献的前提下,Swann和Pittman^[24]将蜂窝单元等效成圆柱体,并模拟计算蜂窝内表面间的辐射换热和通过蜂窝壁的热传导,再通过建立一维有限差分传热模型,给出了预测蜂窝结构有效导热系数的Swann-Pittman半经验关系式,并成为了分析蜂窝板传热特性的经典理论模型。为了获得蜂窝板有效导热系数更精确的计算结果,Daryabeigi^[25]通过考虑面层和芯层的粘结来修正Swann-Pittman半经验关系式,利用有限差分法完善了计算蜂窝板内辐射和热传导耦合后的有效导热系数的数学模型。结合不同面板和蜂窝发射率,Fatemi^[26]提出了一种基于六边形单元内辐射交换因子的替代方法,然后利用有效连续介质特性和经典层合板理论,构造等效层合板结构替代蜂窝夹层板,进一步计算蜂窝板的有效导热系数,该方法适用于由不同材料制成的蜂窝夹层结构。另外,假设温度沿蜂窝厚度方向为一维线性均匀分布,郭振胜^[27]给出一种计算蜂窝空腔内辐射换热有效导热系数的方法,从而进一步计算了纸蜂窝在忽略对流换热时的有效导热系数。考虑到蜂窝空腔内表面间的辐射换热对有效导热系数的影响,Magoda等人^[28]提出了一种基于傅里叶定律的一维数学模型,该模型考虑了面层与外界环境的辐射换热和对流换热,忽略了蜂窝空腔内的辐射换热和对流换热,得到蜂窝复合材料面板整体的有效导热系数,在此基础上,通过红外热像仪和常规温度测量技术收集数据,从而验证了理论模型的正确性。

Zheng等人^[29]采用有限元软件对高温条件下金属蜂窝板的传热特性进行数值模拟,数值模拟中考虑了蜂窝空腔内的辐射换热、通过金属蜂窝板的固体热传导和蜂窝空腔内空气的热传导,得出辐射换热是高温条件下金属蜂窝板主要传热方式的结论,并给出降低金属蜂窝板有效导热系数的建议,如减小蜂窝空腔内表面发射率或在蜂窝空腔内填充绝缘材料。Yuan等人^[30]设计了一种测量金属蜂窝夹层结构有效导热系数的试验装置,并对100℃~400℃温度下的金属蜂窝夹层结构进行了试验测试,试验结果与有限元数值模拟结果和Swann-Pitman模型的计算结果接近,验证了试验方法的可信性,为评价金属蜂窝夹层结构有效导热系数提供了一种简单实用的测量方法。李玮等人^[31]利用有限元软件模拟分析了铝合金蜂窝单元面外方向的传热,证明了在0℃以下时,辐射换热对铝合金蜂窝有效导热系数的影响可以忽略。李义强等人^[32]对具有漫灰体内壁的金属蜂窝夹芯面板,只考虑蜂窝结构的热传导和热辐射,基于蜂窝单元的温度场分布数据以及傅里叶定律得到蜂窝结构的有效导热系数。李东辉等人^[33]和吴一昊等人^[34]分别建立了金属蜂窝单元传热的有限元模型,并提出了计算其有效导热系数的数值计算方法,同时分析了

金属蜂窝夹芯结构的传热方式和机制。樊卓志^[35]通过与试验对比,证明了利用 ANSYS 有限元软件模拟金属蜂窝结构传热性能的可靠性,进一步提出在高温条件下金属蜂窝结构存在着辐射导热耦合换热。同样的,孙明明^[36]也使用 ANSYS 仿真模拟法对忽略蜂窝空腔中空气对流的聚丙烯蜂窝板的传热性能进行了研究。此外,这些研究还考察了蜂窝单元结构参数和不同材料属性等因素对蜂窝结构传热性能的影响。

1.2.2 蜂窝复合结构传热性能研究

到目前为止,蜂窝结构的传热性能得到了广泛的开发和研究。当减小蜂窝空腔中辐射和对流的空间时可以有效阻止辐射换热和对流换热,而蜂窝夹层与绝缘材料的结合将是提高蜂窝夹层结构隔热性能的有效途径。

大多数金属蜂窝复合结构通常设计为在蜂窝空腔内填充一种单一的均匀绝缘材料。典型的基于气凝胶填充 C/SiC 波纹夹层板的集成式热防护系统是由 Ma^[37]和 Wei^[38]提出的。杜柯等人^[39]研制了一种气凝胶蜂窝板,与相同尺寸的挤塑聚苯乙烯泡沫塑料板相比,其有效导热系数减小了 19.6%~27.6%,并基于串并联模型建立了计算气凝胶蜂窝板有效导热系数的简化模型。文彦臻等人^[40]通过加热试验验证了有限元方法模拟气凝胶填充铝合金蜂窝传热的可靠性,进一步分析了几何参数对气凝胶填充铝合金蜂窝夹层结构传热性能的影响。相比之下,Wang 等人^[41]设计制备的集成式热防护系统则采用了分级保温材料 and 多层陶瓷基复合蜂窝夹层板,与填充均匀保温材料夹层板相比,既提高了保温效果,又提高了温度分布均匀性。Vitale 等人^[42]采用真空辅助树脂转移模塑技术制造了几种由玻璃纤维和植物纤维复合材料面板和不同玻璃纤维聚酯复合材料芯层制成的蜂窝夹层板,以评估其热性能。孙菽等人^[15]设计制备了纸蜂窝两侧复合气凝胶的夹层板,得出了一定几何尺寸的气凝胶纸蜂窝夹层板可以替代聚氨酯泡沫保温层的结论。郭振胜^[27]通过分别测定自然填充秸秆、玻化微珠和聚苯乙烯泡沫颗粒的蜂窝节能板的有效导热系数,分析了不同蜂窝节能板的传热性能及其影响机理,进而从理论层面得出分区局域辐射是决定蜂窝节能板有效导热系数根本原因的结论。Kim 等人^[43]则采用酚醛泡沫填充芳纶蜂窝芯层来降低夹层结构的有效导热系数。

1.3 纸蜂窝夹层结构材料在包装中的应用

19 世纪 60 年代,随着制造业技术的发展,纸质蜂窝板材料在发达国家中被生产,我国则在 90 年代末开始逐渐研究和制造纸蜂窝。纸蜂窝作为传统包装材料,具备绿色环保、重量轻、强度高、缓冲性能好、吸音隔热、印刷性能好、成本低的特点。随着纸蜂窝制造工艺趋于成熟,纸蜂窝材料在包装领域得到了广泛应用,如纸蜂窝箱、纸蜂窝缓冲衬垫和纸蜂窝托盘等,并显现出一定程度的优越性和良好的发展前景。

目前,更多的是采用糊箱法、框架法等手工成箱工艺来制备纸蜂窝箱,其质量差、成本高、生产效率低,严重地制约了纸蜂窝箱的应用。李清等人^[44]研究发现纸蜂窝被压溃的地方可用于折弯,从而提出了纸蜂窝的压痕和弯折理论,这些理论依据成为了纸蜂窝模压成箱工艺流程中的关键技术和工艺原理。张新昌等人^[45]设计了折叠型纸蜂窝箱的

压痕试验装置,并通过纸蜂窝箱的成型及压缩试验验证了纸蜂窝压痕折叠成型工艺的可行性。张媛^[46,47]利用有限元软件 ANSYS 对纸蜂窝箱进行静态压缩和角跌落的模拟,分别在纸蜂窝箱底部的中央位置和包装箱与地面接触位置的铅锤方向上产生了最大的应力和变形,这为纸蜂窝箱的优化设计提供了参考依据。为了选择出合适的包装组合以提升松茸的保鲜品质,高艳飞^[48]通过 16 种松茸采后包装方式开展试验,其中纸蜂窝外包装箱中松茸的各项指标均优于其他外包装箱的包装方式,这进一步说明了纸蜂窝的散热性能及抗冲击性能优于瓦楞纸板和木板箱,使得在模拟运输的过程中可以较好的保护产品。赵红^[49]利用 SiO_2 气凝胶和纸蜂窝等材料制备出 SiO_2 气凝胶/纤维复合隔热包装箱,与多层瓦楞包装箱相比, SiO_2 气凝胶/纤维复合隔热包装箱具有良好的抗冲击性能、抗压强度和保温隔热性能。孙杰华等人^[50]以空投系统中的托盘为对象,选择纸蜂窝作为缓冲垫平铺于托盘面板上,这为空投系统中的托盘提供了更好的缓冲包装设计方法。在“碳达峰、碳中和”的目标远景下,储能电池行业迎来了新的发展机遇,沈旭培等人^[51]和彭真等人^[52]对电池的运输包装设计时,在电池层与层之间铺设纸蜂窝进行分层,有效防止电池因受外力碰撞而损伤。张晶等人^[53]将蜂窝纸板与瓦楞纸板复合后进行包装箱结构的设计,可以综合发挥出各纸板的性能优势,满足对伐木包装箱承载能力的要求,同时实现纸箱的快速成型与组装。

1.4 主要研究内容

为了评估回收泡沫-纸蜂窝复合结构在隔热包装中应用的可能性,本文将研究纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热性能。鉴于有效导热系数是评价多孔材料保温隔热性能的重要指标,且传热方向能显著影响空腔中的空气对流,因此建立预测不同工况下纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的理论模型,并通过稳态传热试验结果验证其可靠性。然后,基于试验结果和理论模型,考察不同因素对纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热性能的影响机理。根据上述研究思路,本文具体开展如下研究:

(1) 考察纸蜂窝中可能存在的传热方式与传热特点,并利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟验证纸蜂窝内的空气对流,分析纸蜂窝在上热下冷和上冷下热工况下形成空气对流的原因。建立考虑对流换热的理论模型,通过稳态传热试验测定不同工况下纸蜂窝的有效导热系数并验证理论模型的正确性。在此基础上,对比忽略对流换热的理论模型,考察对流换热对纸蜂窝传热性能的影响。

(2) 为了考察填充泡沫对纸蜂窝传热性能的影响,选用 EPS 颗粒作为纸蜂窝芯层的填充材料,制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构板,并从理论层面分析颗粒堆积结构中的传热特点。建立回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的理论模型,通过对其有效导热系数和孔隙率的测定,并对比试验结果和忽略对流换热的理论模型,进一步考察孔隙通道中对流换热对回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热性能的影响。

(3) 基于测定纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的试验结果,以及通过理论模型计算分析等方法,分析纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热机理,探讨传热方向、纸蜂窝单元结构几何参数、颗粒粒径和颗粒导热系数对纸蜂窝传热性能

的影响，并定量考察热传导、辐射换热和对流换热对纸蜂窝和回收泡沫-纸蜂窝复合结构有效导热系数的贡献。

(4) 利用纸蜂窝和 EPS 颗粒设计制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱，对包装箱进行结构设计和传热过程的分析，揭示包装箱的隔热机理。开展试验进一步研究包装箱尺寸和蓄冷剂质量对回收泡沫-纸蜂窝复合结构隔热包装箱保温时间的影响。

第二章 纸蜂窝的传热模型研究

目前的隔热材料通常采用聚合物泡沫塑料，而泡沫塑料的大量使用会对环境造成严重污染。为了最大限度的减少泡沫塑料在隔热包装中的使用，需要一种绿色环保的材料来代替泡沫塑料在隔热保温包装中的作用。由于纸蜂窝具备优良的力学和热学性能，使其有望成为一种兼具承载和隔热功能一体化的包装材料。因此，为了评估纸蜂窝在隔热包装中应用的可能性，本章对纸蜂窝在不同工况下的传热模型进行了研究。不仅为下一步研究纸蜂窝的传热性能提供了理论基础，也为研发兼具承载和隔热功能一体化的绿色环保的隔热包装材料开辟了新的视角。

2.1 纸蜂窝的传热分析

2.1.1 纸蜂窝结构

纸蜂窝具有便捷的可设计性，通过改变蜂窝形状、蜂窝芯层高度和蜂窝边长可以制备能满足不同需求下物品的包装。如图 2-1 所示，纸蜂窝具有轻质、高比强度和多功能一体化的特点，被广泛应用于电子、食品、医药等包装。由于蜂窝空腔形状多种多样，其中正六边形纸蜂窝的力学性能较好，经常被用在隔热包装系统中，而其保温隔热性能往往被忽略，因此，纸蜂窝（以下均指正六边形纸蜂窝）的传热性能将是研究的重点。



图 2-1 纸蜂窝在包装中的工程应用

Fig. 2-1 Packaging engineering application of paper honeycomb

纸蜂窝作为典型的空腔夹芯结构，由上层面纸、蜂窝芯层和下层面纸组成，如图 2-2 (a) 所示。根据纸蜂窝的成型工艺，纸蜂窝单元是对称的，如图 2-2 (b) 所示。其中，一个纸蜂窝单元两侧的壁厚是其他四个侧壁厚度的两倍。为了使计算推导过程相对简单，将这种壁厚不相等的蜂窝单元结构等效为相等壁厚的结构，如图 2-2 (c) 所示。因此，本章中研究的纸蜂窝材料可看作是由厚度为 H_u 的上层面纸，高度为 H_{hc} 的蜂窝芯层，厚度为 H_l 的下层面纸，内侧长度为 l_{in} 和外侧长度为 l_{out} 的蜂窝边长，厚度为 t 的蜂窝壁的蜂

窝单元组成，其内切圆的直径为 W_{hc} ，如图 2-2 (a)、2-2 (c) 和 2-2 (d) 所示。

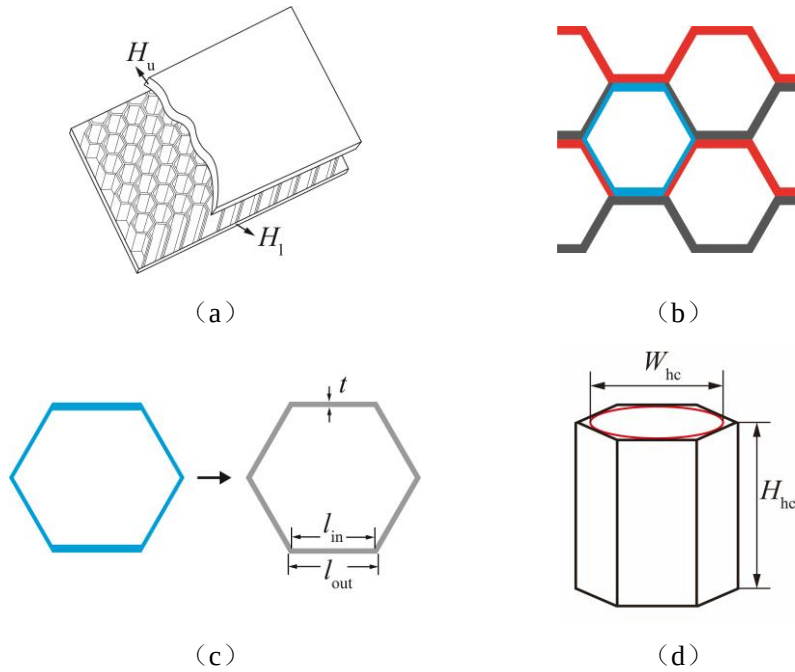


图 2-2 纸蜂窝结构示意图：(a) 纸蜂窝；(b) 纸蜂窝芯层截面；(c) 纸蜂窝单元截面；(d) 蜂窝芯层单元

Fig. 2-2 Schematic diagram of paper honeycomb structure: (a) paper honeycomb; (b) section of paper honeycomb core layer; (c) section of paper honeycomb cell; (d) honeycomb core layer cell

2.1.2 纸蜂窝的传热特性

传热是温度差驱动的由高温向低温方向传递能量的过程，通常包含热传导、辐射换热和对流换热中的一种或几种。热传导是依靠相邻粒子间的碰撞而发生的能量传播过程。辐射换热是物体内部微观粒子运动状态的改变而产生的电磁波传递能量的现象。凡是温度高于 0 K 的物体都可以进行辐射换热，且能量传递过程中不需要通过其它介质。对流换热是指在一个具有一定流速流动的流体内，能量通过流动或输运进行传递。其中，因流体冷热各部分的密度不同所引起的运动称为自然对流。有效导热系数作为表征多孔材料传热性能的一种热物理性参数，其单位为 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。热传导、辐射换热和对流换热之间一般存在相互耦合作用，而建立相关热量传递的理论模型并获得严格准确的解析解是极其困难的。因此，采用有效导热系数来评价纸蜂窝在稳态条件下的传热特性，有效导热系数越低，保温隔热性能越好。

由于纸蜂窝内部单元具有周期性排列的特点，因此，选取一个纸蜂窝单元作为其传热性能的研究对象，蜂窝壁可看作与外界没有热交换。根据包装箱实际应用的环境条件，纸蜂窝单元的传热分析可以看作是一个典型的第一类边界条件的稳态热传导问题，从而在热边界条件分析中将三维传热简化为一维传热，其一维传热模型如图 2-3 所示。图 2-3 (a) 和 2-3 (b) 分别给出了上热下冷工况和上冷下热工况下纸蜂窝单元的热边界条件。其中，在上热下冷工况条件下，蜂窝单元的上层面纸和下层面纸温度分别保持为 T_h 和 T_c ；

在上冷下热工况条件下，蜂窝单元的上层面纸和下层面纸温度分别保持为 T_c 和 T_h 。

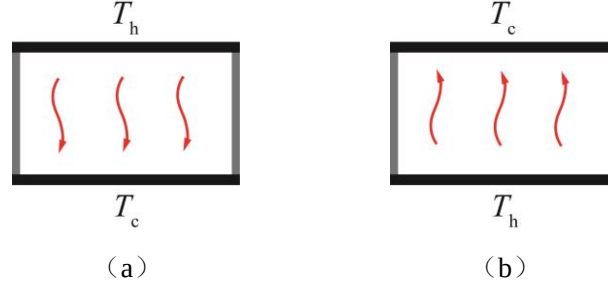


图 2-3 蜂窝单元的热边界条件：(a) 上热下冷工况；(b) 上冷下热工况

Fig. 2-3 The heat boundary conditions of honeycomb cells: (a) hot-above and cold-below condition; (b) cold-above and hot-below condition

热量通过蜂窝壁和蜂窝腔中的空气将热量从高温侧传递给低温侧。只要存在温差，就会发生辐射传热和热传导。辐射传热在纸蜂窝中非常重要，而对流传热也可能很重要，其重要性可由瑞利数 Ra 通过式 (2.1) 和式 (2.2) 计算确定。对于夹层结构，当 Ra 小于 1000 时，Gray-Stuart 等人认为对流传热可以忽略^[54]。

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2.1)$$

$$Gr = \frac{g \alpha_v (T_h - T_c) L^3}{\nu^2} \quad (2.2)$$

式中， Gr 是格拉晓夫数； Pr 是普朗特数； g 是重力加速度； α_v 是体胀系数； ν 是空气的粘度系数； L 是空腔结构的特征长度。

2.1.3 自然对流的有限元分析

不考虑空气的对流换热时，学者们已经提出了一些理论模型来计算金属夹层结构的有效导热系数^[24-26]。然而，纸蜂窝中的对流换热被证明是显著的^[27]，因此这些忽略对流换热的理论模型并不适用于纸蜂窝材料。此外，文献^[55,56]的研究得出结论：通过从上方加热施加稳定的温度梯度时，可以形成自然对流，甚至扩展到没有侧壁温差的极端情况。Kimura^[57]认为即使垂直稳定梯度大于不稳定水平梯度，水平梯度驱动的自然对流也不会完全消失。因此，有必要利用有限元软件模拟验证常温下纸蜂窝中的空气对流。

COMSOL Multiphysics 常被用于解决一些物理和工程应用。首先，在 COMSOL 中使用层流状态下的流体和固体的传热。然后，根据表 2-1 中样品 1 的几何尺寸建立纸蜂窝代表性单元的有限元模型，其中边长是指蜂窝内侧的边长。为模拟上热下冷的工况条件，将上层面纸温度设置为 35°C ，下层面纸温度设置为 15°C ；为了模拟上冷下热的工况条件，将上层面纸温度设置为 15°C ，下层面纸温度设置为 35°C 。同时，将蜂窝壁的热边界条件设置为绝热，与外界没有热量交换。由于材料的导热系数和辐射发射率在一定程度上与其温度有关，因此，取上层面纸和下层面纸温度的平均值 25°C 作为定性温度。根据文献^[27,58]，空气的导热系数设置为 $0.0263 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，纸的导热系数设置为 $0.09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，纸蜂窝的表面发射率设置为 0.90。为进一步证明网格尺寸的无关性，

使用四种不同的网格尺寸进行验证，分别为细化、常规、粗化和较粗化的网格。通过网格敏感性测试，发现对流的发生与网格的大小无关。因此，考虑到结果的准确性和计算时间，在本小节数值研究中选择了较粗的网格尺寸。完成上述步骤后，进行传热分析，并在后处理过程中得到纸蜂窝单元内温度分布和空气流动的特点。

表 2-1 纸蜂窝单元的几何尺寸（单位：mm）

Tab. 2-1 Geometric dimensions of paper honeycomb cells (Unit: mm)

样品	面纸厚度	芯纸厚度	芯层高度	边长
样品 1	0.25	0.20	14.5	8
样品 2	0.25	0.20	19.5	6
样品 3	0.25	0.20	29.5	6
样品 4	0.25	0.20	29.5	8

图 2-4（a）给出了上热下冷工况下纸蜂窝单元垂直侧壁表面温度分布的有限元计算结果。同时，图 2-4（b）和 2-4（c）分别给出了蜂窝单元水平切面和垂直切面上温度分布的有限元计算结果。

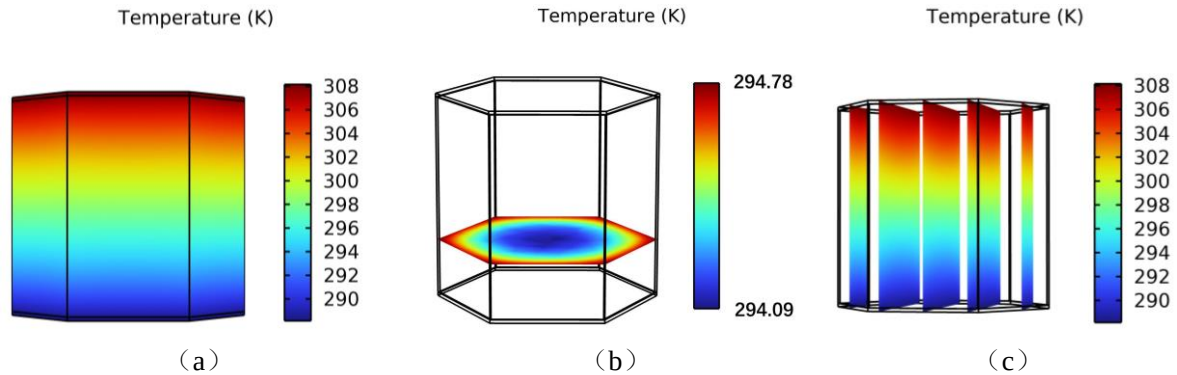


图 2-4 上热下冷工况下温度的三维示意图：（a）蜂窝壁；（b）水平切面；（c）垂直切面

Fig. 2-4 Tridimensional representation of temperature distribution under hot-above and cold-below condition: (a) honeycomb walls; (b) horizontal plane; (c) vertical planes

从图 2-5（a）和 2-5（b）可以看出，空气在上热下冷工况下的流动是分层的，箭头表示空气流动的方向。在蜂窝腔的上部，空气在中心形成上升流，使空气在垂直方向上从中心向蜂窝壁流动，并沿着蜂窝壁向下流动，然后在水平方向上返回中心。在蜂窝腔的下部，空气在中心形成下降流，使空气在垂直方向上从中心向蜂窝壁流动，沿着蜂窝壁向上流动，并在水平方向上返回中心。

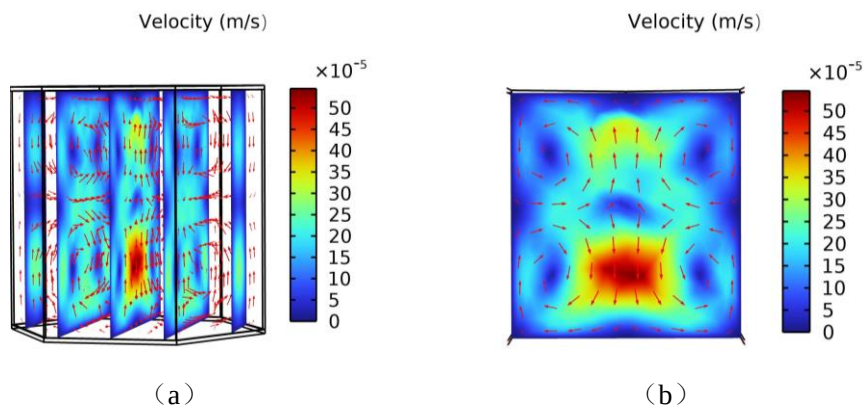


图 2-5 上热下冷工况下空气对流的三维示意图：(a) 纸蜂窝单元；(b) 垂直切面

Fig. 2-5 Tridimensional representation of air convection under hot-above and cold-below condition: (a) honeycomb paperboard cell; (b) vertical plane

上冷下热工况下纸蜂窝单元垂直侧壁表面的温度分布如图 2-6 (a) 所示。同时，纸蜂窝单元的水平切面和垂直切面上的温度分布见图 2-6 (b) 和 2-6 (c)。

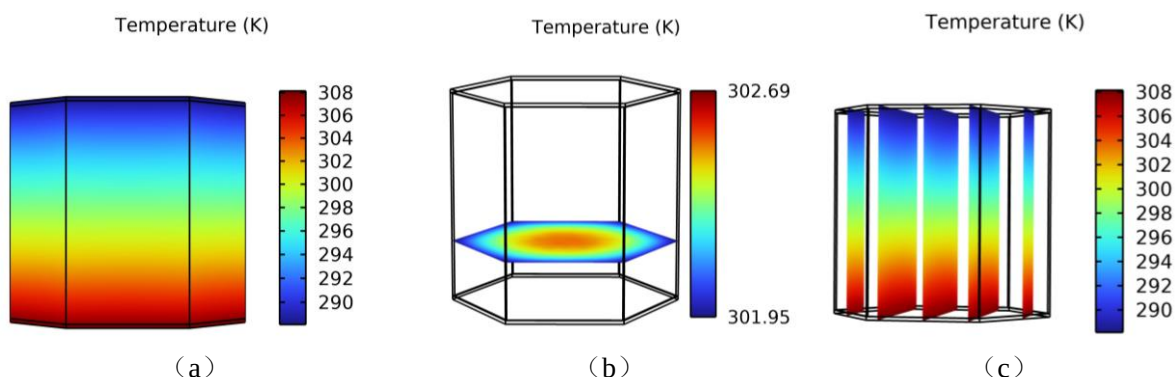


图 2-6 上冷下热工况下温度的三维示意图：(a) 蜂窝壁；(b) 水平切面；(c) 垂直切面

Fig. 2-6 Tridimensional representation of temperature distribution under cold-above and hot-below condition: (a) honeycomb walls; (b) horizontal plane; (c) vertical planes

图 2-7 (a) 和 2-7 (b) 给出了上冷下热条件下的流线，箭头表示空气流动的方向。在上冷下热工况下，空气分别在蜂窝空腔上部分和下部分各形成了一个流动单元，而空气流动的方向与上热下冷工况下空气流动的方向相反。在蜂窝腔的上部，空气从顶壁的中心下降，沿着蜂窝壁向上流动，并在水平方向上返回中心。在蜂窝腔的下部，空气从底壁的中心上升，沿着蜂窝壁向下流动，并在水平方向上返回中心。

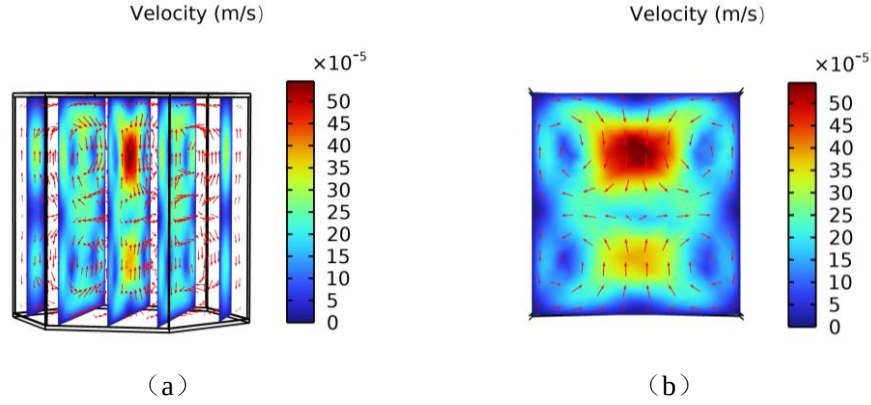


图 2-7 上冷下热工况下空气对流的三维示意图：(a) 纸蜂窝单元；(b) 垂直切面

Fig. 2-7 Tridimensional representation of air convection under cold-above and hot-below condition: (a) honeycomb paperboard cell; (b) vertical plane

在浮力驱动下，热的空气密度小，向上流动；冷的空气密度大，向下流动，从而产生空气对流，而引起空气对流的浮力实际上来自重力差。在上冷下热工况下，空气容易上升和下落，从而形成对流。在上热下冷工况下，有两个因素对纸蜂窝内的空气对流有显著影响：(1) 蜂窝壁与空气之间存在横向的温度梯度；(2) 通过蜂窝壁与空气层中的热流密度不同。当固体的导热系数与流体的导热系数具有相同数量级时，固体与流体之间的温差不可忽视^[59]。纸的导热系数 ($0.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 与空气的导热系数 ($0.0263 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 具有相同的数量级，且蜂窝壁的导热系数大于空气的导热系数。这导致了蜂窝壁与空气之间形成了不稳定的横向温度梯度，如图 2-4 (b) 所示。因此，蜂窝腔内的空气将蜂窝壁视为热板或冷板，这就导致蜂窝腔内的空气形成了对流。此外，侧壁热流密度对流动强度、流动方向和波数有较强的控制作用^[55]。由于蜂窝壁的导热系数大于空气的导热系数，所以通过空气层中的热流密度与通过蜂窝壁中的热流密度截然不同。因此，即使在上热下冷的情况下，纸蜂窝也会发生空气对流。

2.2 纸蜂窝传热的理论模型

2.2.1 热传导模型

蜂窝壁和蜂窝芯层中的空气可以简化为并联连接。蜂窝芯层中空气的体积占蜂窝芯层体积的体积分数可由蜂窝芯层中空气的体积与蜂窝芯的体积之比表示为：

$$v_a = \frac{V_a}{V_{hc}} \quad (2.3)$$

式中， v_a 是蜂窝芯层中空气的体积占蜂窝芯层体积的体积分数； V_a 是蜂窝芯层中空气的体积； V_{hc} 是蜂窝芯层的体积， $V_{hc} = V_w + V_a$ ； V_w 是蜂窝壁的体积。

根据纸蜂窝单元的结构特点，蜂窝芯层的体积和蜂窝芯层中空气的体积则可以分别表示为：

$$V_{hc} = A_{hc} \cdot H_{hc} \quad (2.4)$$

$$V_a = A_a \cdot H_{hc} \quad (2.5)$$

式中, A_{hc} 是纸蜂窝单元芯层的横截面积, $A_{hc} = 3\sqrt{3}l_{out}^2/2$; l_{out} 是蜂窝壁外侧的边长; A_a 是纸蜂窝单元芯层中空气部分的横截面积, $A_a = 3\sqrt{3}l_{in}^2/2$; l_{in} 是蜂窝壁内侧的边长; H_{hc} 是蜂窝芯层的高度。

对于简化后壁厚相等的纸蜂窝单元, 其横截面如图 2-8 所示, 蜂窝壁外侧边长与内侧边长的关系可以表达为:

$$l_{out} = l_{in} + 2l \quad (2.6)$$

式中, l 是蜂窝壁外侧边长比内侧边长多出长度的二分之一, $l = \sqrt{3}t/3$; t 是蜂窝壁的厚度。

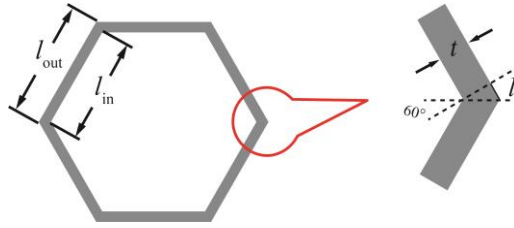


图 2-8 纸蜂窝单元的边长

Fig. 2-8 Side length of paper honeycomb cell

根据式 (2.3), 蜂窝壁体积占蜂窝芯层体积的体积分数则可以表达为:

$$v_w = 1 - \frac{V_a}{V_{hc}} \quad (2.7)$$

因此, 根据表 2-2 中的并联模型, 结合蜂窝芯层中的空气和蜂窝壁的体积分数, 蜂窝芯层的有效导热系数可通过式 (2.8) 计算。

$$\lambda_{hc} = v_w \cdot \lambda_w + v_a \cdot \lambda_a \quad (2.8)$$

式中, λ_w 为蜂窝壁的导热系数; λ_a 是空气的导热系数。

当蜂窝芯层中只考虑蜂窝壁的热传导时, 则蜂窝芯层的有效导热系数可以表示为:

$$\lambda_{hc} = v_w \cdot \lambda_w \quad (2.9)$$

将式 (2.7) 代入式 (2.9) 中, 式 (2.9) 可表示为:

$$\lambda_{hc} = \left(1 - \frac{V_a}{V_{hc}}\right) \cdot \lambda_w \quad (2.10)$$

如果忽略蜂窝空腔内空气的传热, 根据纸蜂窝的结构特点, 纸蜂窝单元可看作由上层面纸、蜂窝芯层和下层面纸的串联连接。根据表 2-2 中的串联模型, 通过纸蜂窝固体热传导的有效导热系数可表示为:

$$\lambda_s = \left(\frac{v_u}{\lambda_u} + \frac{v_{hc}}{\lambda_{hc}} + \frac{v_l}{\lambda_l} \right)^{-1} \quad (2.11)$$

式中, λ_u 是上层面纸的导热系数; λ_l 是下层面纸的导热系数; v_u , v_{hc} 和 v_l 分别是上层面

纸体积、蜂窝芯层体积、下层面纸体积占蜂窝单元体积的体积分数， $v_u = V_u / (V_u + V_{hc} + V_l)$ ， $v_{hc} = V_{hc} / (V_u + V_{hc} + V_l)$ ， $v_l = V_l / (V_u + V_{hc} + V_l)$ ； V_u ， V_{hc} 和 V_l 分别是上层面纸、蜂窝芯层、下层面纸的体积。

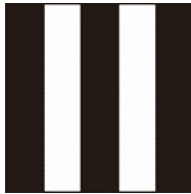
由于纸蜂窝单元中的上层面纸、蜂窝芯层和下层面纸的体积是其横截面积与其高度或厚度的乘积，又因为其中的上层面纸、蜂窝芯层和下层面纸的横截面积相等，所以，上层面纸体积、蜂窝芯层体积、下层面纸体积占蜂窝单元体积的体积分数可以分别简化为： $v_u = H_u / (H_u + H_{hc} + H_l)$ ， $v_{hc} = H_{hc} / (H_u + H_{hc} + H_l)$ ， $v_l = H_l / (H_u + H_{hc} + H_l)$ 。

通过化简，式（2.11）可以表示为：

$$\lambda_s = \frac{H_u + H_{hc} + H_l}{\frac{H_u}{\lambda_u} + \frac{H_{hc}}{\lambda_{hc}} + \frac{H_l}{\lambda_l}} \quad (2.12)$$

表 2-2 有效导热系数模型^[60]

Tab. 2-2 Effective thermal conductivity models^[60]

模型	结构示意图	方程
并联模型		$\lambda = (1 - v_2) \lambda_1 + v_2 \lambda_2$
串联模型		$\lambda = \frac{1}{\frac{1 - v_2}{\lambda_1} + \frac{v_2}{\lambda_2}}$

2.2.2 辐射换热模型

Swann 和 Pittman^[24]提出了蜂窝夹层结构的经典理论模型来计算其有效导热系数。为了便于理解，结合纸蜂窝单元的结构特点和传热机理，Swann-Pittman 理论模型在本章中应用在纸蜂窝单元时可以表达为：

$$\lambda_e = v_w \cdot \lambda_w + (1 - v_w) \cdot \lambda_a + (1 - v_w) \cdot \lambda_R \quad (2.13)$$

式中， λ_e 是蜂窝夹层结构的有效导热系数； λ_R 是辐射换热的有效导热系数。

在式（2.13）中，Swann 和 Pittman 忽略了通过表面层热传导的贡献，并建立了一个模拟蜂窝芯辐射的经验关系，辐射换热模型可用于计算蜂窝内表面之间辐射换热的有效导热系数。因此，结合纸蜂窝单元的结构特点和传热机理，辐射换热有效导热系数的理论模型可以表达为：

$$\lambda_R = \frac{0.664 \left(\frac{H_{hc}}{W_{hc}} + 0.3 \right)^{-0.69} \varepsilon_R^{1.63 \left(\frac{H_{hc}}{W_{hc}} + 1 \right)^{-0.89}} \sigma H_{hc} (T_h + T_c) (T_h^2 + T_c^2)}{1 - v_w} \quad (2.14)$$

式中, σ 是斯蒂芬-波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$; H_{hc} 是蜂窝芯层的高度; W_{hc} 是蜂窝内切圆的直径, $W_{hc} = \sqrt{3}l_{in}$; ε_R 是蜂窝壁的表面发射率。

2.2.3 对流换热模型

影响空气自然对流的因素很多, 空气所接触固体的几何形状、尺寸以及相对位置等因素都能致使封闭空间的自然对流呈现出不同的流动特点, 从而影响传热性能。为了归纳试验结果和方便讨论, 米海耶夫^[61]引入有效导热系数的概念将水平夹层中空气的热传导和对流换热归纳在一起考虑, 即对流换热的有效导热系数包含空气传热的静态热传导部分和对流部分。因此, 对流换热的有效导热系数可通过下式进行计算:

$$\lambda_c = \frac{q_c H}{T_h - T_c} \quad (2.15)$$

根据牛顿定律, 热流密度 q_c 可通过下式计算:

$$q_c = h_c (T_h - T_c) \quad (2.16)$$

对流换热系数 h_c 可以表达为:

$$h_c = \frac{\lambda_a Nu}{H} \quad (2.17)$$

将式 (2.16) 和式 (2.17) 代入式 (2.15) 中, 式 (2.15) 可以表达为:

$$\lambda_c = Nu \cdot \lambda_a \quad (2.18)$$

式中, Nu 是努塞尔数。

努塞尔数能直观明确的显示传热过程中各影响因素的综合作用, 是传热领域中非常重要的一种理论形式。通常, 努塞尔数中所涉及到的无量纲准则是不确定的, 根据热边界条件、流体流态等因素的特点在形式上会有相应的变化或取舍。描述水平放置的夹层结构中的自然对流传热的努塞尔准则关联式为^[61-63]:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n \left(\frac{H}{W} \right)^m \quad (2.19)$$

式中, C 、 n 和 m 是经验常数, 根据具体物理过程的特点有所变化; W 是封闭空腔结构的宽度; H 是封闭空腔结构的高度。

根据纸蜂窝单元的结构特点, 将纸蜂窝单元的几何参数代入式 (2.19) 中, 同时用蜂窝芯层高度作为式 (2.19) 中 Gr 的特征长度。因此, 关于纸蜂窝空腔中自然对流的 Nu 和 Gr 可以分别表达为:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n \left(\frac{H_{hc}}{W_{hc}} \right)^m \quad (2.20)$$

$$Gr = \frac{g\alpha_v(T_h - T_c)H_{hc}^3}{\nu^2} \quad (2.21)$$

2.2.4 纸蜂窝有效导热系数的理论模型

纸蜂窝的传热可以看作是串联-并联模型。其中，蜂窝芯层中的辐射换热、空气的传热和蜂窝壁的热传导通过并联连接构成蜂窝芯层的传热。因此，纸蜂窝芯层有效导热系数的计算类似于 Swann-Pittman 模型，即：

$$\lambda_{hc} = (1 - v_a) \cdot \lambda_w + v_a \cdot \lambda_A + v_a \cdot \lambda_R \quad (2.22)$$

式中， λ_{hc} 是纸蜂窝芯层的有效导热系数； λ_A 是空气传热的有效导热系数。当只考虑空气的静态热传导时， $Nu=1$ ，则 $\lambda_A = \lambda_a$ ；当考虑空气的对流换热时， $Nu>1$ ，则 $\lambda_A = \lambda_c$ 。

将式 (2.3) 和式 (2.7) 代入式 (2.22) 中，式 (2.22) 可以表达为：

$$\lambda_{hc} = \left(1 - \frac{V_a}{V_{hc}}\right) \cdot \lambda_w + \frac{V_a}{V_{hc}} \cdot \lambda_A + \frac{V_a}{V_{hc}} \cdot \lambda_R \quad (2.23)$$

将蜂窝芯层中的辐射换热、空气的传热和蜂窝壁的热传导看作一个整体时，纸蜂窝可被视为包括上层面纸、蜂窝芯层和下层面纸的串联连接。根据表 2-2 中给出的串联模型，纸蜂窝的有效导热系数可通过式 (2.24) 计算。

$$\lambda_{HP} = \left(\frac{v_u}{\lambda_u} + \frac{v_{hc}}{\lambda_{hc}} + \frac{v_l}{\lambda_l} \right)^{-1} \quad (2.24)$$

因此，式 (2.24) 化简后得：

$$\lambda_{HP} = \frac{H_u + H_{hc} + H_l}{\frac{H_u}{\lambda_u} + \frac{H_{hc}}{\left(1 - \frac{V_a}{V_{hc}}\right) \cdot \lambda_w + \frac{V_a}{V_{hc}} \cdot \lambda_A + \frac{V_a}{V_{hc}} \cdot \lambda_R} + \frac{H_l}{\lambda_l}} \quad (2.25)$$

2.3 理论模型验证

基于理论层面的分析和有限元软件的模拟验证，在传热过程中，即使在常温下，无论是上热下冷的工况，还是上冷下热的工况，纸蜂窝单元内的空气都可以形成对流。为了证明本章中建立的理论模型的正确性，并证明对流换热对纸蜂窝传热性能的影响不可忽略，进而选择试验方法进行验证。

2.3.1 试验材料

试验采用由上海恒绚实业有限公司提供的 4 种不同规格的纸蜂窝，其平面尺寸均为 200 mm×200 mm，如图 2-9 所示。每个纸蜂窝都由面层和芯层组成，其面密度分别为 220 g/m² 和 110 g/m²，测量厚度分别为 0.25 mm 和 0.20 mm，面层和芯层由粘合剂粘结。纸蜂窝单元结构的几何尺寸参见表 2-1。为了减小温湿度对测试结果的影响，将样品放置在温度为 20℃和相对湿度为 65%的恒温恒湿箱（上海右一仪器有限公司，RQH-250）中

保持 24 小时^[27]。



图 2-9 纸蜂窝样品

Fig. 2-9 Sample of paper honeycomb

2.3.2 传热试验

根据 ASTM C518-17^[64]的热流法，测定纸蜂窝有效导热系数的稳态传热试验采用由德国耐驰公司生产的热流法导热仪 HFM 446 Lambda，测量范围在 $0.007\text{--}2.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 之间，如图 2-10 所示。根据 ASTM C117^[65]，热流法导热仪 HFM 446 上下面板温差设置为 20 K。热流法导热仪 HFM 446 Lambda 可用于直接测量纸板、真空绝热板和泡沫塑料等材料的导热系数，具有方便操作、精确、快速等特点。



图 2-10 热流法导热仪 HFM 446 Lambda

Fig. 2-10 Heat flow method heat conduction instrument HFM 446 Lambda

打开水浴的主机开关和制冷开关，等待仪器操作面板上的显示屏亮。将样品放入热流法导热仪 HFM 446 Lambda 中，然后在 Smart Mode Measurement 软件中输入样品的厚度、深度、宽度等信息。同时，为了更好地模拟工程实际中的环境条件，将上面板温度设置为 35°C ，下面板温度设置为 15°C ；或者上面板温度设置为 15°C ，下面板温度设置为 35°C 。运行电脑进行测定，在试验过程中观察电脑显示屏上的实测热流变化，当热流变化达到稳定状态时，试验可以停止。通常完成一个样品导热系数的测试，热流变化达到稳定状态需要 60 分钟左右。对每种规格的纸蜂窝进行三次相同的测试，并从这些测定的试验结果中计算出平均值作为纸蜂窝的有效导热系数，保留小数点后 5 位小数，试验结果如表 2-3 所示。

表 2-3 不同工况下纸蜂窝有效导热系数的试验结果（单位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）

Tab. 2-3 Experiment results of the effective thermal conductivity of paper honeycomb under different conditions (Unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

工况条件	样品 1	样品 2	样品 3	样品 4
上热下冷	0.07828	0.08242	0.09354	0.09862
上冷下热	0.07872	0.08408	0.09645	0.10635

2.3.3 上热下冷工况下纸蜂窝有效导热系数的计算

表 2-4 给出了上热下冷工况下忽略对流换热的理论模型、Swann-Pittman 模型和试验结果的比较。理论值与试验结果之间的相对误差可按式 (2.26) 计算。

$$\delta_{\lambda} = \frac{|\lambda - \lambda_{\text{E}}|}{\lambda} \times 100\% \quad (2.26)$$

式中, δ_{λ} 是有效导热系数的理论值与试验结果之间的相对误差; λ 是有效导热系数的试验结果; λ_{E} 是有效导热系数的理论值。

表 2-4 上热下冷工况下纸蜂窝有效导热系数的理论值与试验结果 (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

Tab. 2-4 Theoretical and experimental results of the effective thermal conductivity of paper honeycomb under hot-above and cold-below condition (Unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

工况条件	试验结果	Swann-Pittman 理论值	忽略对流的理论值	考虑对流的理论值
样品 1	0.07828	0.07177	0.07226	0.07800
样品 2	0.08242	0.07205	0.07241	0.08247
样品 3	0.09354	0.08028	0.08043	0.09311
样品 4	0.09862	0.08873	0.08875	0.09856

从表 2-4 中可以看出, 本章中所建立的忽略对流换热理论模型的计算结果与 Swann-Pittman 模型的计算结果高度一致。然而, 忽略对流换热的理论值小于试验结果, 相对误差由式 (2.26) 计算。如表 2-4 所示, 当忽略对流换热时, 样品 1 的理论值比试验结果大 7.7%, 这种差异可能是正常的试验误差引起的。而对于样品 2、样品 3 和样品 4, 忽略对流换热的理论值与试验结果之间的相对误差分别为 12.1%、14.0% 和 10.0%。这种现象将归因于纸蜂窝中发生了空气对流的事实。因此, 在上热下冷工况条件下, 认为空气对流对纸蜂窝传热性能的影响不能忽略。

根据试验条件, 取热流法导热仪上面板和下面板的平均温度作为热物理性质的定性温度。在 25°C 时, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $Pr=0.702$, $\nu=15.53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_v=3.35 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。式 (2.20) 中的常数 C 、 n 和 m 通过拟合试验结果得到, 为了方便理解, 图 2-11 给出了常数 C 、 n 和 m 的计算流程图。

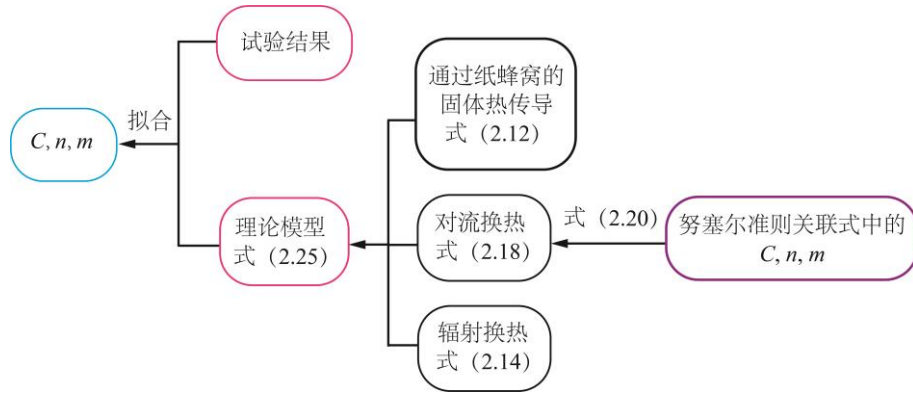


图 2-11 计算流程图

Fig. 2-11 Flowchart of the calculation

因此，在上热下冷工况下，纸蜂窝中对流换热的努塞尔数为：

$$Nu = 1.69(Gr \cdot Pr)^{-0.038} \left(\frac{H_{hc}}{W_{hc}} \right)^{0.289} \quad 5.83 \times 10^3 \leq Gr \cdot Pr \leq 4.91 \times 10^4 \quad (2.27)$$

将式 (2.27) 代入式 (2.25) 中，利用考虑对流换热的理论模型计算上热下冷工况下纸蜂窝的有效导热系数。表 2-4 给出了上热下冷工况下考虑对流换热的理论值和试验结果。考虑对流换热时，理论值与试验结果非常一致，四组的平均相对误差通过式 (2.28) 计算后仅为 0.8%。这使得上热下冷工况下考虑对流换热的理论模型的正确性得到了验证，还进一步印证了对流换热对纸蜂窝传热性能的影响不可忽略的结论。

$$\overline{\delta_\lambda} = \frac{1}{n} \sum \frac{|\lambda - \lambda_E|}{\lambda} \times 100\% \quad (2.28)$$

式中， $\overline{\delta_\lambda}$ 是有效导热系数的理论值与试验结果之间的平均相对误差。

2.3.4 上冷下热工况下纸蜂窝有效导热系数的计算

在上冷下热工况下，表 2-5 中给出了本章中所建立的忽略对流换热理论模型的计算结果和试验结果。可以看出，忽略对流换热的理论值与试验结果之间存在较大误差，相对误差分别为 8.2%、13.9%、16.6% 和 16.5%。因此，与上热下冷工况相比，上冷下热工况下的对流换热对纸蜂窝传热性能的影响更显著。同时，在认为蜂窝壁绝热时，对于空气在竖夹层内的自然对流换热，可按照文献^[58]中推荐的努塞尔准则关系式计算纸蜂窝的有效导热系数。如表 2-5 所示，蜂窝壁绝热时的理论值远大于试验结果，这是因为在上热下冷的工况下，蜂窝壁中的热传导可以降低对流换热的速率^[63]。

表 2-5 上冷下热工况下纸蜂窝有效导热系数的理论值与试验结果（单位：W·m⁻¹·K⁻¹）

Tab. 2-5 Theoretical and experimental results of the effective thermal conductivity of paper honeycomb under cold-above and hot-below condition (Unit: W·m⁻¹·K⁻¹)

工况条件	试验结果	忽略对流的理论值	忽略蜂窝壁的理论值	考虑对流的理论值
样品 1	0.07872	0.07226	0.09424	0.07937

样品 2	0.08408	0.07241	0.10447	0.08317
样品 3	0.09645	0.08043	0.13310	0.09732
样品 4	0.10635	0.08875	0.14191	0.10593

鉴于上述讨论,在上冷下热工况下,纸蜂窝空腔内的空气对流不仅受温度差驱动的影响,还受蜂窝壁热传导的影响。因此,根据图 2-11 中给出的计算流程,通过拟合试验结果得到上冷下热工况下纸蜂窝内空气对流的努塞尔数:

$$Nu = 0.41(Gr \cdot Pr)^{0.132} \left(\frac{H_{hc}}{W_{hc}} \right)^{-0.011} \quad 5.83 \times 10^3 \leq Gr \cdot Pr \leq 4.91 \times 10^4 \quad (2.29)$$

将式 (2.29) 代入式 (2.25) 中,利用考虑对流换热的理论模型计算上冷下热工况下纸蜂窝的有效导热系数。表 2-5 给出了上冷下热工况下考虑对流换热的理论值和试验结果的比较。考虑对流换热时,理论值与试验结果非常一致,四组的平均相对误差仅为 1.2%。这使得上冷下热工况下考虑对流换热的理论模型的正确性得到了验证,也印证了对流换热对纸蜂窝传热性能的影响不可忽略的结论。

2.4 本章小结

本章通过建立纸蜂窝有效导热系数的理论模型,并与试验结果进行比较,得到了以下结论:

(1) 建立纸蜂窝典型单元的物理模型,分析纸蜂窝中可能存在的传热方式与传热特点,并利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟验证了纸蜂窝内可以形成空气对流。

(2) 通过稳态传热试验测定上热下冷工况和上冷下热工况下纸蜂窝的有效导热系数,利用理论模型拟合试验结果得到了上热下冷工况和上冷下热工况下纸蜂窝空腔内空气对流的努塞尔准则关联式。

(3) 利用理论模型计算纸蜂窝的有效导热系数,与试验结果对比表明:忽略对流换热的理论值与试验结果之间存在较大误差,而考虑对流换热的理论值与试验结果吻合度高。这使得考虑对流换热的理论模型的正确性得到了验证,也证明了对流换热对纸蜂窝传热性能的影响不可忽略。

建立纸蜂窝有效导热系数的理论模型为纸蜂窝的设计及性能优化提供了依据,从而可以有目的的设计满足一定保温隔热性能的纸蜂窝。这不仅为下一步考察几何参数对纸蜂窝传热性能的影响规律提供了理论模型,还对于深入了解纸蜂窝中的传热机理具有重要的意义。

第三章 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热模型研究

对于纸蜂窝传热模型的研究,正如第二章中所述,纸蜂窝的有效导热系数因不同的工况条件而异。鉴于纸蜂窝具有高强度、轻质、绿色环保的特点,而且在运输包装领域已经被广泛应用的现状,本章选用 EPS 颗粒作为纸蜂窝的填充材料,制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构板,并对其传热模型进行研究。不仅为开发结构与功能隔热一体化的复合结构板奠定了理论基础,还为废弃泡沫塑料能重新利用于隔热包装开辟了新途径。

3.1 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热分析

3.1.1 试验材料

纸蜂窝:选用 3 种尺寸规格的纸蜂窝(上海恒绅实业有限公司),平面尺寸均为 200 mm×200 mm,芯纸和面纸的面密度分别为 110 g/cm² 和 220 g/cm²。纸蜂窝单元结构的几何尺寸参见表 2-1 中的样品 2、样品 3 和样品 4。

粘合剂:选用聚乙酸乙烯酯乳液(恩特新材料有限公司)。

回收泡沫:选用平均粒径分别为 4 mm 和 0.75 mm 的 EPS 颗粒(苏州伟鸿塑胶制品有限公司),其密度分别为 15.7278 kg/m³ 和 33.6076 kg/m³。

EPS 颗粒作为回收泡沫-纸蜂窝复合结构的填充材料,其导热系数是否易于测量,是回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热模型是否实用的关键。国外学者通过大量的试验整理出了 EPS 的导热系数与密度的关系,因此,本章借鉴前人的研究成果,确定了不同密度 EPS 颗粒的导热系数^[66],如表 3-1 所示。

表 3-1 EPS 颗粒的参数
Tab. 3-1 Parameters of EPS particles

粒径 (mm)	密度 (kg/m ³)	导热系数 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
4	15.7278	0.04014
0.75	33.6076	0.03518

3.1.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构板的制备

以纸蜂窝的生产工艺为基础,根据其结构特点,制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构板。以粒径为 0.75 mm 的 EPS 颗粒填充表 2-1 中几何尺寸为样品 3 时的纸蜂窝为例,简述制备回收泡沫-纸蜂窝复合结构板的具体步骤:

(1) 将纸蜂窝分切成适合热流法导热仪测定的 200 mm×200 mm 的标准样品,并将与面纸相同的纸裁剪成合适宽度的长条,在其一面上胶,最后通过手工包边将其贴在纸蜂窝的侧面,使纸蜂窝边缘的蜂窝单元封闭,防止边缘蜂窝单元因不能填充 EPS 颗粒而在蜂窝空腔中产生热辐射与热对流,影响测量精度,如图 3-1 (a) 所示。

(2) 在无压实的条件下填充 EPS 颗粒,控制填充量,使其达到蜂窝壁的顶部,如图 3-1 (b) 所示。

(3)为进一步减少 EPS 颗粒的干扰,采用上层面纸上胶的方式将面纸与填充好 EPS 颗粒的纸蜂窝粘合在一起。为防止多次粘结而导致 EPS 颗粒粘附在上层面纸上而降低面纸与芯层之间的粘合效果,上层面纸的平面尺寸应大于 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,并在上层施加重物,以保证一次性粘合,如图 3-1 (c) 所示。

(4)通过压实、修剪过程来完成回收泡沫-纸蜂窝复合结构板的制作,如图 3-1 (d) 所示。

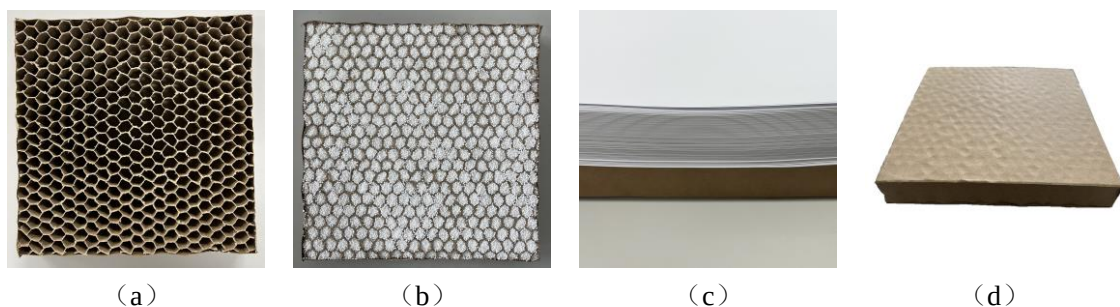


图 3-1 回收泡沫-纸蜂窝复合结构板的制备过程: (a) 包边; (b) 填充 EPS 颗粒; (c) 上层面纸粘贴及压实; (d) 修整后成型

Fig. 3-1 Preparation process of paper honeycomb filled with recycled foam: (a) hemming process; (b) filling EPS particles; (c) compaction and curing after pasting the upper surface; (d) molding after trimming

3.1.3 回收泡沫-纸蜂窝复合结构

由于纸蜂窝具有单元性和周期性的特点,因此,以一个填充 EPS 颗粒的纸蜂窝单元作为考察回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热性能的研究对象。图 3-2 (a) 给出了蜂窝空腔内填充 EPS 颗粒的简易模型示意图。图 3-2 (b) 为 EPS 颗粒在玻璃杯内分布的照片。从图中可以看出,在无压实自然填充的条件下,颗粒之间、壁和颗粒之间均有较多的孔隙结构,这些孔隙结构形成了复杂的孔隙通道。

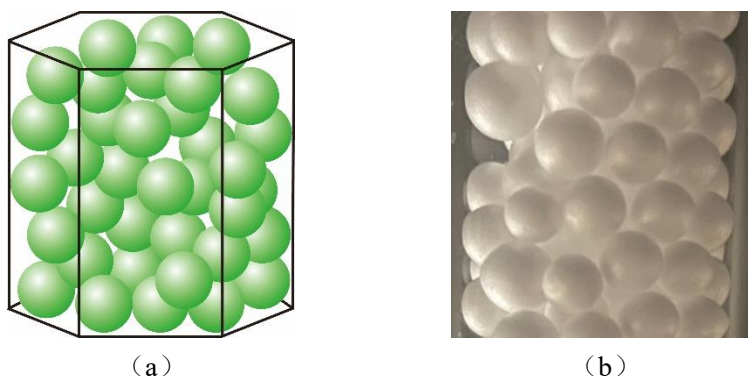


图 3-2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构示意图: (a) 典型单元; (b) EPS 颗粒的空间分布

Fig. 3-2 Schematic diagram of paper honeycomb filled with recycled foam: (a) typical cell; (b) spatial distributions of EPS particles

在无压实自然填充的条件下, EPS 颗粒之间、壁与 EPS 颗粒之间形成了各种形状的孔隙,孔隙和 EPS 颗粒的分布相对杂乱,且存在局部大孔隙。研究表明,在具有较小管径-粒径比的颗粒堆积结构中,会发生显著的壁面效应^[67]。壁面效应之所以能够对填充通道中的传热产生影响,是因为受到壁面的作用,使得靠近壁的孔隙比内部空间中的孔隙大,造成填充通道内部孔隙的不均匀,从而影响填充通道孔隙的大小。壁面效应会使

得颗粒堆积形成的孔隙内的温度不均匀，而较大的孔隙率会造成显著的空气对流现象。

当管径不变时，随着填充颗粒粒径的减小，壁面效应会逐渐减弱，使得孔隙的尺寸也会逐渐减小。1973 年, Beavers 等人^[67]通过研究玻璃珠随机填充的矩形多孔介质发现，当填充通道管径的特征长度与颗粒粒径之比大于 15 时，可以忽略壁面对填充通道孔隙率的影响，并且总结得到了孔隙率变化规律的试验关联式：

$$P = P_1 \left[1 + 2 \frac{d}{D} \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \right] \quad (3.1)$$

式中, P 是填充通道的孔隙率; d 是颗粒的粒径; D 是填充通道管径的特征长度; $P_1=0.368$, $P_2=0.476$ 。

3.1.4 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热特性

图 3-3 (a) 和 3-3 (b) 分别给出了上热下冷工况和上冷下热工况下回收泡沫-纸蜂窝复合结构的一维传热示意图。回收泡沫-纸蜂窝复合结构是固、气两相的传热，而 EPS 颗粒在纸蜂窝空腔内的分布状态将会对回收泡沫-纸蜂窝复合结构的传热性能产生影响。由于颗粒堆积而出现了大量不均匀的孔隙，孔隙之间则形成了断断续续的通道。在边界存在热扰动的条件下，颗粒堆积结构中的传热过程显然更复杂。为了简化分析，对于回收泡沫-纸蜂窝复合结构，将传热路径粗分为孔隙中空气的传热、孔隙中的辐射换热和 EPS 颗粒的热传导。

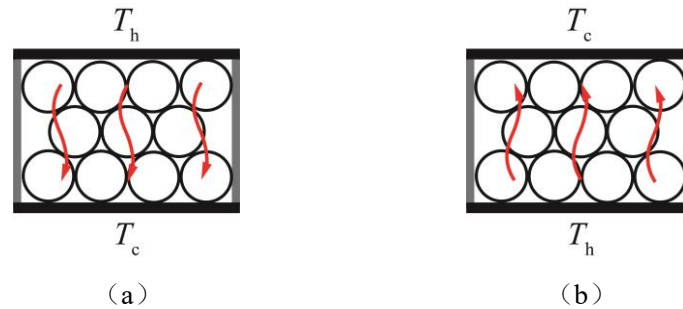


图 3-3 回收泡沫-纸蜂窝复合结构的热边界条件：(a) 上热下冷工况；(b) 上冷下热工况

Fig. 3-3 The heat boundary conditions of paper honeycomb filled with recycled foam: (a) hot-above and cold-below condition; (b) cold-above and hot-below condition

颗粒堆积结构的有效导热系数受多种因素的影响，如粒径、固体的导热系数等。由于 EPS 颗粒与空气的导热系数具有相同的数量级，而在第二章中对纸蜂窝传热模型的研究证明，当固体与空气的导热系数具有相同的数量级时，即使虚弱的自然对流也能造成强烈的影响。回收泡沫-纸蜂窝复合结构中存在大量充满气体分子的孔隙，相邻颗粒壁面温度的各向异性导致孔隙中的空气不均匀性密度梯度的出现，由此产生的浮力将有可能驱动空气形成自然对流。同时，第二章的研究中也发现辐射换热在常温下对纸蜂窝传热的贡献占主导作用。由于点接触使得存在较大的接触热阻，抑制了热量在颗粒间的传递，同时使得相邻颗粒间形成了温度梯度。因此，有必要重新考虑不同传热路径对回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热性能的影响。

3.2 回收泡沫-纸蜂窝复合结构传热的理论模型

3.2.1 辐射换热模型

假设辐射只发生在回收泡沫-纸蜂窝复合结构的孔隙中，孔隙表面是灰体，孔隙中的空气不参与辐射换热。根据文献^[68]中对颗粒堆积结构孔隙中辐射换热的研究，采用式(3.2)计算孔隙中辐射的有效导热系数：

$$\lambda_r = 4L\epsilon_r\sigma\bar{T}^3 \quad (3.2)$$

式中， λ_r 是辐射换热的有效导热系数； L 是孔隙的特征长度； ϵ_r 是孔隙表面的辐射率，0.90； σ 是斯蒂芬-波尔兹曼常数， $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ； $\bar{T}$ 是平均温度。

按照文献^[69]中的方法，孔隙的特征长度可以表达为：

$$L = 0.46d \quad (3.3)$$

式中， d 是颗粒的粒径。

3.2.2 对流换热模型

目前针对颗粒堆积结构中自然对流的研究较少，对于其影响规律也不清楚，没有统一成形的理论，也没有可信度较高的试验关联式可以参考。Yovanovich^[70]给出了球体周围空气自然对流努塞尔数的经典假设形式：

$$Nu = B + C(Gr \cdot Pr)^n \quad (3.4)$$

$$Gr = \frac{g\alpha_v(T_h - T_c)d^3}{\nu^2} \quad (3.5)$$

式中， B 、 C 和 n 是经验常数； g 是重力加速度； α_v 是体胀系数； ν 是空气的粘度系数； d 是颗粒的粒径长度。

由于填充通道的纵横比对颗粒堆积结构中自然对流的影响不可忽略，因此，类比纸蜂窝对流换热有效导热系数理论模型，回收泡沫-纸蜂窝复合结构孔隙中空气自然对流换热的努塞尔数可表达为：

$$Nu = B + C(Gr \cdot Pr)^n \left(\frac{H_{hc}}{W_{hc}} \right)^m \quad (3.6)$$

式中， m 是经验常数； H_{hc} 是蜂窝芯层的高度； W_{hc} 是蜂窝内切圆的直径。

因此，回收泡沫-纸蜂窝复合结构中对流换热的有效导热系数可通过式(3.7)计算：

$$\lambda_c = Nu \cdot \lambda_a \quad (3.7)$$

式中， λ_c 是对流换热的有效导热系数； λ_a 是空气的导热系数。

3.2.3 颗粒堆积的热渗模型

由于颗粒堆积结构内部空间分布较为复杂，计算有效导热系数对理解其中的传热机理至关重要。迄今为止，学者们对颗粒堆积结构的传热特性开展了大量的试验和理论研究，并提出了多种计算颗粒堆积结构有效导热系数的理论模型，如串联模型、并联模型、

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/435043011041011114>