

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180400506

防火服用蜂窝夹芯结构织物的热防护性能测评

杜菲菲¹, 李小辉^{1,2,3}, 张思严¹

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 同济大学 上海国际设计创新研究院, 上海 200080;
3. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

摘要 针对当前防火服普遍存在的笨重、闷热等问题, 提出采用隔热耐高温、吸湿透气的蜂窝夹芯结构来改善其功能防护与热湿舒适性能。通过对蜂窝结构内在传热机制的分析, 设计和制备了7种不同的蜂窝结构, 选取当前典型的各层面料作为实验试样, 综合考虑织物面密度、蜂窝夹芯结构种类设计了21种实验方案, 并利用热防护性能测试仪对其进行热防护性能测评; 进一步考察蜂窝结构的边长、壁厚、芯厚对防火服用织物热防护性能的影响规律。结果表明: 蜂窝夹芯结构质轻且能满足热防护性能的要求, 蜂窝结构的边长越小, 壁厚越大, 芯厚越大, 织物的热防护性能值(TPP)越大, 热防护性能越好。

关键词 防火服; 蜂窝夹芯结构; 热防护性能; 热湿舒适性

中图分类号: TS 941.73 文献标志码: A

Evaluation of thermal protection performance of honeycomb sandwich structure fabric for fireproof clothing

DU Feifei¹, LI Xiaohui^{1,2,3}, ZHANG Siyan¹

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Institute of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200080, China; 3. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract In view of the heaviness and stiffness of current fireproof clothing, a honeycomb sandwich structure with heat insulation, high temperature resistance, moisture absorption and ventilation was proposed to improve its performance of functional protection and heat and moisture comfort. By analyzing the inherent heat transfer mechanism of honeycomb sandwich structure, 7 different kinds of honeycomb sandwich structures were designed and fabricated. The current typical layers of fabrics were chosen as the experimental samples. Taking into account of the fabric weight and the sorts of honeycomb sandwich structure, 21 kinds of experimental schemes were designed. Thermal protection performance (TPP) tester was used to evaluate the thermal protection performance, and further the effect of side length, wall thickness and core thickness of honeycomb sandwich structure on thermal protection performance of fireproof clothing was investigated. Experimental results show that the honeycomb sandwich structure is light and can meet the requirements of thermal protection performance. The smaller the side length, the larger the wall thickness and the larger the core thickness, the larger the TPP value of the fabric and the better the thermal protection performance.

Keywords fireproof clothing; honeycomb sandwich structure; thermal protection performance; thermal-wet comfort

防火服是一种特殊的功能性服装,其作用是保护作业人员在特殊的工作环境中免受高温伤害^[1]。

目前,防火服一般采用4层结构,由外向内依次为阻燃外层、防水透汽层、隔热层与舒适内层^[2],每层都

收稿日期: 2018-04-02 修回日期: 2018-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51703026)

第一作者: 杜菲菲(1994—),女,硕士生。主要研究方向为功能防护服装。

通信作者: 李小辉(1982—),男,副教授,博士。主要研究方向为功能防护服装与结构设计。E-mail: lxh@dhu.edu.cn。

有其各自的功能,这种多层复合结构极大地提高了防火服的热防护性能。然而,正是这种阻燃、高热阻和防水性会降低防火服的透湿性能,阻碍汗水的排出和蒸发,限制人体出汗所释放的潜热^[3-4]。

为解决防火服功能防护与热湿舒适性的平衡关系,很多学者对热防护材料进行了研究。一些研究者提出利用相变材料来协调人体着装时的热平衡^[5-6]。相变材料虽然可以减少热应力,提高热湿舒适度,增强热防护性能,但是相变材料本身的相变温度、时间等会受火场环境下的暴露热流量以及热暴露时间的影响,同时研发也需要耗费昂贵的成本^[7],应用范围相对比较局限。此外,还有一些学者提出将三维阻燃间隔织物应用于隔热层^[8],虽然三维阻燃间隔织物具有较好的透气性,但由于它是经编双层结构,容易在层隙之间形成热循环,而且压缩性也不是很好,做成的衣服较厚,用于防火服的优势并不明显。另外有研究者研究了气凝胶热防护材料,由于质轻、热导率低,其性能非常适合作为隔热材料^[9],其缺点是成本高、容易碎^[10],织物透气性问题没有得到解决,因此,目前尚不能满足防火服热湿舒适性能的要求。

事实上,上述热防护材料都是通过隔绝热传递的方式来实现热防护,这导致水气无法透过隔热层到达防水透气层,造成内部闷热的问题,因此,热防护服要充分发挥多层结构的复合功能,必然要克服实心夹层结构自身的弊端,其结构应该在确保阻燃隔热性能的同时更轻便、透气透湿性能更好。而蜂窝结构具有抗疲劳性能好、热稳定性佳、质量轻、隔热隔音性能优良等优异功能,在航空航天、汽车、船舶、建筑等领域^[11-13]应用广泛。鉴于此,本文利用蜂窝结构的质轻、隔热耐高温等特性,提出用蜂窝夹芯中空结构来改善服装功能防护与人体热平衡之间的矛盾,实现热防护与热湿舒适性能的综合提升。

本文主要通过选取当前典型的热防护织物进行蜂窝夹芯结构的设计与制备,对织物组合热防护性能进行测评研究,进一步考察蜂窝边长、壁厚、芯厚等参数对其热防护性能的影响,以满足其在众多功能防护领域的应用需求。

1 实验部分

1.1 试样选取

本文选取了当前典型的各层面料作为实验材料:阻燃外面料为 A;防水透气层面料为 B;不同厚度的隔热层面料分别为 C1、C2、C3;舒适内层面料为 D。各层面料所对应的参数见表 1。

表 1 面料试样及其基本性能

Tab.1 Fabric samples and fundamental characteristics

面料编号	成分	颜色	面密度/ (g·m ⁻²)	厚度/ mm	透气率/ (L·m ⁻² ·s ⁻¹)
A	Nomex® IIIA	藏青色	211.6	0.65	206.57
B	I-70/聚四氟乙烯	浅黄+白色	106.1	0.66	0.84
C1	I-70 毡 Nomex®	浅黄	72.3	0.81	1 658.02
C2	I-120 毡 Nomex®	浅黄	128.4	1.28	1 087.65
C3	I-150 毡 Nomex®	浅灰	151.3	1.65	988.50
D	阻燃粘胶	浅灰	125.6	0.61	1 262.45

1.2 蜂窝孔形结构设计

蜂窝结构的产生源于仿生学对于蜜蜂筑建的六角形蜂巢的研究,同时六边形蜂窝结构的制备简单,用料最少,效率也高。本文主要采用图 1 所示的六边形蜂窝结构,其中边长、壁厚、芯厚为六边形蜂窝结构的主要几何参数。

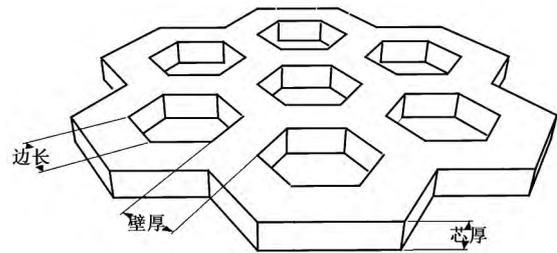


图 1 芯子层蜂窝结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of sandwich layer honeycomb structure

对蜂窝孔形的设计主要包括边长设计和壁厚设计,文献[14]指出:随着蜂窝壁厚的增加,其热导率也逐渐增大;随着蜂窝边长的增加,其热导率开始逐渐减小。综合考虑热导率和面料性能,设计出 6 种不同蜂窝孔形结构和 1 种不对隔热层进行切割的对照组,如表 2 所示。

表 2 蜂窝孔形结构参数

Tab.2 Parameters of honeycomb structure

蜂窝孔形结构编号	边长/ mm	壁厚/ mm	质量减轻 百分比/%
E1	实心	实心	0
E2	3	5.2	25.1
E3	3	2.6	44.2
E4	6	5.2	44.4
E5	6	2.6	64.2
E6	9	5.2	56.2
E7	9	7.8	44.4

1.3 实验方案设计

实验模拟防火服真实结构的多层织物组合,由外向内依次为阻燃外层、防水透气层、隔热层(蜂窝芯子层)和舒适内层,如表 3 所示。分别对不同厚度的隔热层 C1、C2、C3 按照表 2 设计出的 7 种蜂窝

孔形结构 E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7 进行切割,共制备得到 21 种蜂窝芯子层,切割后的隔热层厚度用蜂窝芯厚表示,分别为 0.81、1.28、1.65 mm。各层面料组合得到 21 组试样,其中第 1 组、第 8 组和第 15 组试样是实心结构。为提高实验的精确性,减小实验误差,拟对 21 组试样各做 3 次实验,取其平均值,共需 63 个实验组。

表 3 实验方案设计

Tab.3 Experimental scheme design

实验编号	外层	防水透气层	隔热层	舒适层	蜂窝孔形结构
1	A	B	C1	D	E1
2	A	B	C1	D	E2
3	A	B	C1	D	E3
4	A	B	C1	D	E4
5	A	B	C1	D	E5
6	A	B	C1	D	E6
7	A	B	C1	D	E7
8	A	B	C2	D	E1
9	A	B	C2	D	E2
10	A	B	C2	D	E3
11	A	B	C2	D	E4
12	A	B	C2	D	E5
13	A	B	C2	D	E6
14	A	B	C2	D	E7
15	A	B	C3	D	E1
16	A	B	C3	D	E2
17	A	B	C3	D	E3
18	A	B	C3	D	E4
19	A	B	C3	D	E5
20	A	B	C3	D	E6
21	A	B	C3	D	E7

1.4 织物热防护性能测试

目前,针对防火服的热防护性能主要是采用织物热防护性能值测评和燃烧假人系统测评。本文采用织物的热防护性能(TPP)实验方法,其测试原理是小规模模拟火灾现场,测定透过织物表面导致人体皮肤二度烧伤所需的热量,从而来评价织物热防护的相对能力。本文实验采用的仪器为如图 2 所示的美国 Custom Scientific Instrument 公司的 CSI-206 型热防护性能测试仪。

实验时将试样水平置于热源上面,在规定的 125 mm 距离内,接受热源为 50% 的热对流和 50% 的热辐射 2 种不同形式的传热,并达到标定值 (84±4) kW/m²。通过计算机程序控制窗口监控传感器的温度,当其温度达到(32.5±0.2)℃时,开始实验,试样的暴露时间为 25 s。置于试样背面的铜片热流计温度随热源作用时间而变化,从而计量出造成人体皮肤二度烧伤所需的时间,并计算此条件下的总热量 TPP 值:

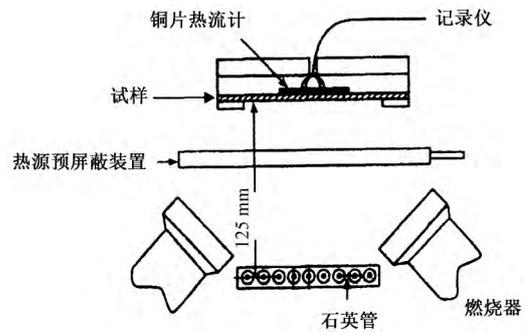


图 2 热防护性能测试仪示意图

Fig.2 Schematic diagram of thermal protection performance tester

$$TPP = t_2 \times q$$

式中: q 为规定距离内热源辐射或者对流的总热流量,其值为 (84±4) kW/m²; t_2 为引起二度烧伤所需要的时间 s 。TPP 的大小代表织物热防护性能的好坏,其值越大,织物热防护性能越好;反之,织物热防护性能越差。

2 结果与讨论

蜂窝芯子层的面密度见表 4。可看出:将不同厚度的隔热层按照 E2、E3、E4、E5、E6、E7 切割后的面密度都比按照 E1 未切割的面密度小,其中:按照 E2 切割后的面密度减小得最少(减小了 18.1~37.7 g/m²);按照 E5 切割后的面密度减小得最多(减小了 46.4~96.9 g/m²);并且按照 E3、E4、E7 切割后的芯子层面密度相等,在 3 种芯厚下其面密度分别是 40.2、71.2、84.0 g/m²。蜂窝夹芯结构对织物 TPP 值的影响将从蜂窝结构的边长、壁厚、芯厚这 3 个控制参数进行讨论。

表 4 蜂窝芯子层面密度

Tab.4 Areal density of honeycomb core layers

蜂窝孔形结构	g/m ²		
	C1	C2	C3
E1	72.3	128.0	151.0
E2	54.2	96.0	113.3
E3	40.2	71.2	84.0
E4	40.2	71.2	84.0
E5	25.9	45.8	54.1
E6	31.7	56.1	66.1
E7	40.2	71.2	84.0

2.1 边长对织物热防护性能的影响

控制蜂窝结构的壁厚和芯厚 2 个参数不变,研究边长变化对织物热防护性能的影响规律。当蜂窝壁厚为 2.6 mm 时,织物组合的 TPP 值随着蜂窝边长的增加而减小。

图 3 示出蜂窝壁厚为 5.2 mm 时不同蜂窝芯厚下其边长变化对织物热防护性能的影响。可以看出:对于芯厚 0.81 和 1.28 mm,蜂窝孔形结构 E2 的 TPP 值最高,E6 的 TPP 值次之,E4 的 TPP 值最低,其中 E4 和 E6 相差很小,不排除实验误差的影响;对于芯厚 1.65 mm,蜂窝孔形结构 E2 的 TPP 值最高,E4 的 TPP 值次之,E6 的 TPP 值最低,与壁厚为 2.6 mm 时的变化规律一致。

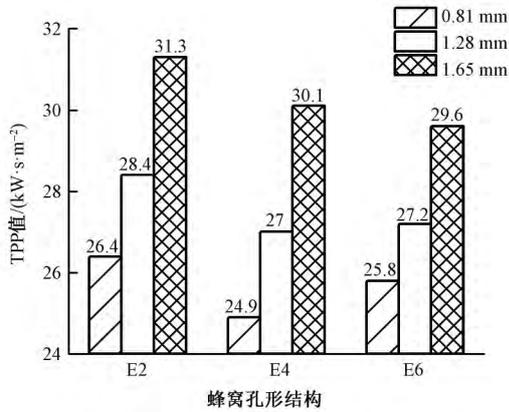


图 3 蜂窝边长对 TPP 的影响

Fig.3 Influence of honeycomb side length on TPP value

从图 3 还可看出,蜂窝结构边长从 3 mm 依次增加到 9 mm 时,其每个阶段 TPP 值变化范围也不一样。当边长从 3 mm 增加到 6 mm 时,其 TPP 值变化范围为 1.2~1.5,变化比较大;当边长从 6 mm 增加到 9 mm 时,其 TPP 值变化范围为 0.2~0.9,变化相对较小。这也说明了边长在不同的范围内变化时,对织物组合热防护性能的影响程度也是不同的。综上所述,蜂窝边长影响着织物组合的热防护性能,整体变化趋势是随着蜂窝边长的增大,织物组合的 TPP 值变小,其热防护性能减弱。

2.2 壁厚对织物热防护性能的影响

在芯厚和边长相同的情况下,其壁厚变化对织物热防护性能的影响规律都是一样的。图 4 示出蜂窝边长分别为 3、6、9 mm 时壁厚对热防护性能的影响。其中:图 4(a)表示蜂窝孔形结构为 E2(边长 3 mm,壁厚 5.2 mm),E3(边长 3 mm,壁厚 2.6 mm)的 TPP 值;图 4(b)表示蜂窝孔形结构为 E4(边长 6 mm,壁厚 5.2 mm),E5(边长 6 mm,壁厚 2.6 mm)的 TPP 值;图 4(c)表示蜂窝孔形结构为 E6(边长 9 mm,壁厚 5.2 mm),E7(边长 9 mm,壁厚 2.6 mm)的 TPP 值。

从图 4 看出,蜂窝壁厚越大,TPP 值越大,即热防护性能越好。另外,从图中也可观察到:当芯厚为 0.81、1.28 mm 时,TPP 的变化范围很小,在 0.2~0.8 之间;当芯厚为 1.65 mm 时,TPP 的变化范围较

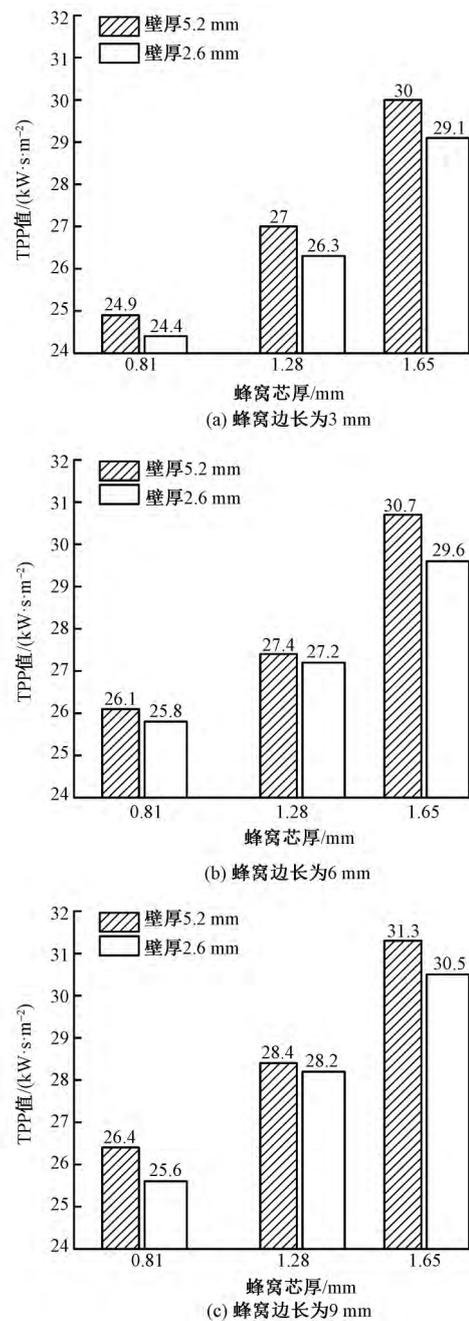


图 4 蜂窝壁厚对 TPP 值的影响

Fig.4 Influence of honeycomb wall thickness on TPP value. (a) Side length of honeycomb of 3 mm; (b) Side length of honeycomb of 6 mm; (c) Side length of honeycomb of 9 mm

大,在 0.8~1.1 之间。因此,壁厚在芯厚较小时对织物组合的热防护性能影响很小,在芯厚较大时对织物组合热防护性能的影响较为显著。

2.3 芯厚对织物热防护性能的影响

图 5 示出当外层面料为 Nomex® 时蜂窝芯厚对织物热防护性能的影响。可以看出:当芯厚为 1.65 mm 时,此时对应的种蜂窝孔形结构的 TPP 值最大;当芯厚为 0.81 mm 时,此时对应的 7 种蜂窝孔形结构的 TPP 最小。此规律与一些文献的研究

结果一致,例如,有学者通过实验发现,影响消防员防护服热防护性能的主要因素是隔热层的厚度,并证明 TPP 值随着厚度的增加而增加^[15]。这也说明了增加芯厚可以提高织物的热防护性能。

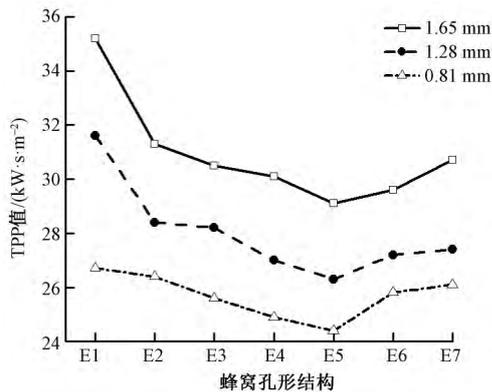


图5 蜂窝芯厚对 TPP 值的影响

Fig.5 Influence of honeycomb core thickness on TPP value

此外,在图5显示的7种蜂窝孔形结构中,实心结构E1的TPP值最大,其次是蜂窝孔形结构E2(边长3mm,壁厚5.2mm),而边长为6mm、壁厚为2.6mm的蜂窝孔形结构E5的TPP值最小,TPP值整体呈现先减小后增大的趋势。结果表明:当蜂窝边长在0~6mm的范围内变化时,边长对TPP值的影响较大;然而之后随着边长继续增加,边长的影响逐渐变小,此时壁厚对TPP值的影响变得较为显著。

3 结论

1) 蜂窝夹芯结构可减小多层织物组合的面密度,改善防护服存在的笨重问题。其中隔热层蜂窝结构切割的边长越大,面密度越小;切割的壁厚越小,面密度越小;且切割的边长与壁厚按相同比例变化,切割后的面密度相等。

2) 多层织物组合的闪火热防护性能受蜂窝结构的边长、壁厚、芯厚3个控制参数的影响,其中芯厚的影响最大。

3) 增大蜂窝结构的芯厚和壁厚,减小蜂窝边长有利于增大织物组合的热防护性能。 FZXB

参考文献:

- [1] 崔琳琳. 国内外灭火防护服发展现状及趋势[J]. 天津纺织科技, 2016(2): 3-5.
CUI Linlin. Development status and trend of fire fighting and fire-fighting clothing at home and abroad [J]. Tianjin Textile Science & Technology, 2016(2): 3-5.
- [2] HE H, YU Z C, SONG G. The effect of moisture and air

gap on the thermal protective performance of fabric assemblies used by wildland firefighters [J]. Journal of The Textile Institute, 2016, 7(8): 1030-1036.

- [3] ZHU F L, ZHANG W Y. Evaluation of thermal performance of flame-resistant fabrics considering thermal wave influence in human skin model [J]. Journal of Fire Sciences, 2006, 24: 465-485.
- [4] 漆政昆, 张和平, 黄冬梅, 等. 消防服用织物材料热湿舒适性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 132-138.
QI Zhengkun, ZHANG Heping, HUANG Dongmei, et al. Comprehensive evaluation of thermal and moisture comfortableness of fabric for firefighter protective clothing [J]. Journal of Chinese Safety Science, 2012, 22(4): 132-138.
- [5] LK McCarthy, MARZO M Di. The application of phase change material in fire fighter protective clothing [J]. Fire Technology, 2012, 48: 841-864.
- [6] 崔志英, 袁晓云, 马春杰. 附加相变材料的消防服多层织物性能研究[J]. 产业用纺织品, 2014(7): 10-13.
CUI Zhiying, YUAN Xiaoyun, MA Chunjie. Evaluation of the performance of firefighter protective clothing with the addition of phase change material [J]. Technical Textiles, 2014(7): 10-13.
- [7] 朱方龙, 樊建彬, 冯倩倩, 等. 相变材料在消防服中的应用及可行性分析[J]. 纺织学报, 2014, 35(8): 124-132.
ZHU Fanglong, FAN Jianbin, FENG Qianqian, et al. Application and feasibility analysis of phase change materials in fire-fighting suit [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(8): 124-132.
- [8] 李红燕, 张渭源. 消防服用织物的阻燃性能及其 TPP 值[J]. 纺织学报, 2008, 29(5): 84-88.
LI Hongyan, ZHANG Weiyuan. Flame retardancy and TPP value of fire-fighting wearable fabric [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(5): 84-88.
- [9] QI Zhengkun, HUANG Dongmei, HE Song, et al. Thermal protective performance of aerogel embedded firefighter's protective clothing [J]. Journal of Engineered Fibers & Fabrics, 2013, 8(2): 134-139.
- [10] 张志华, 王文琴, 祖国庆, 等. SiO₂ 气凝胶材料的制备、性能及其低温保温隔热应用[J]. 航空材料学报, 2015, 35(1): 87-96.
ZHANG Zhihua, WANG Wenqin, ZU Guoqing, et al. Silica aerogel materials: preparation, properties, and applications in low-temperature thermal insulation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(1): 87-96.
- [11] 曹喜川. 蜂窝结构等效分析及空间结构热控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 58-59.
CAO Xichuan. A study for honeycomb structure equivalent and thermal control of spatial structure [D].

- Xi'an: Xidian University, 2013: 58-59.
- [12] 吴林志, 泮世东. 夹心结构的设计及制备现状[J]. 中国材料进展, 2009, 28(4): 40-45.
WU Linzhi, PAN Shidong. Survey of design and manufacturing of sandwich structures [J]. Material Progress in China, 2009, 28(4): 40-45.
- [13] W Dafang, Z Liming, P Bing, et al. Thermal protection performance of metallic honeycomb core panel structures in non-steady thermal environments [J]. Experimental Heat Transfer, 2016, 29(1): 53-77.
- [14] 樊卓志, 孙勇, 段永华, 等. 金属蜂窝板参数对其传热性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(8): 147-151.
- FAN Zhuozhi, SUN Yong, DUAN Yonghua, et al. Influence of metallic honeycomb parameters on its heat transmission performance [J]. Materials Review, 2013, 27(8): 147-151.
- [15] 徐兰娣, 戴国定, 杨晓华, 等. 消防员防护装备用织物的热防护性能研究 [J]. 消防科学与技术, 2008(5): 339-343.
XU Landi, DAI Guoding, YANG Xiaohua, et al. Research on the thermal protective performance of the fabric materials used in fireman personal equipment [J]. Fire Science and Technology, 2008(5): 339-343.