

文章编号: 0253-9721(2014)01-0095-07

闪火中防护服装的形变及其影响因素

李俊^{1,2,3}, 翟丽娜^{1,2}, 王敏^{1,2,3}, 李小辉^{1,2,3}

(1. 东华大学 服装·艺术设计学院, 上海 200051; 2. 东华大学 功能防护服装研究中心, 上海 200051;
3. 现代服装设计与技术教育部重点实验室(东华大学), 上海 200051)

摘要 防火服在火焰中的收缩形变会影响其热防护性能并制约人体的肢体运动。为此, 提出用捺印的方法, 通过燃烧假人闪火燃烧试验, 研究防火服各部位形变量的分布规律, 探究形变差异的原因及影响因素, 对比分析服装形变与假人皮肤表面烧伤程度的关系。结果显示, 燃烧试验后防火服在四肢和背部发生了显著收缩形变, 热流量、衣下空气层等是主要影响因素。着装姿势越复杂、闪火持续时间越长, 服装越宽松, 服装面料的面密度越大, 服装形变越显著, 服装形变显著的对应部位衣下皮肤的烧伤也越严重。

关键词 闪火; 防火服; 燃烧假人; 收缩; 衣下空气层

中图分类号: TS 941.73 文献标志码: A

Shrinkage of fire-fighting suit during flash fire exposure

LI Jun^{1,2,3}, ZHAI Li'na^{1,2}, WANG Min^{1,2,3}, LI Xiaohui^{1,2,3}

(1. Fashion · Art Design Institute, Donghua University, Shanghai 200051, China;
2. Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 3. Key Laboratory of Clothing Design & Technology (Donghua University), Ministry of Education, Shanghai 200051, China)

Abstract The shrinkage of fire-fighting suit in the flame may affect its thermal protective performance and constrain body's movement. By using an instrumented mannequin, flame-test for complete garments is applied to simulate the fire situation. Seals marked on the garment are used to measure the shrinkage distribution of the garments during flash fire exposure. The reasons for the shrinkage and its factors are studied. The relationship between shrinkage and the burn injury of manikin skin is preliminarily analyzed. Results show that the sleeves, trousers and the back of the clothing shrink significantly. The variation of the shrinkage results from the heat flux, air gap and other factors. The shrinkage extent is influenced by wearing posture, fire duration, construction size, and fabric areal density. As a whole, burn injury will be more serious where the shrink is more significant.

Key words flash fire; fire-fighting suit; flame manikin; shrinkage; air gap

防火服是为了防止火灾中烈火或高温环境中潜在明火对人体造成伤害的服装。在火场中防护服的物理化学性质会发生改变, 有研究表明 Nomex 织物的平均收缩率达到 10% ~ 15%^[1], 这是由于火焰的持续燃烧使得面料内部分子键扭转变形^[2], 在宏观上织物表现出不同方向不同程度的收缩等形

变, 这使得原本合体并适于肢体活动的服装尺寸发生改变。这种改变, 一方面造成防火服的衣下空气层减小, 服装的热防护性能受到影响; 另一方面, 收缩形变后的服装面料贴近皮肤表面, 对着装者造成更加直接的灼烧伤害。Torvi 等^[3]发现, 当空气层厚度小于等于 6.4 mm 时, 从面料到皮肤的热量传递主

收稿日期: 2013-01-11 修回日期: 2013-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106022); 上海市教委科研创新项目(12ZZ068); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0321); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(11D10715)

作者简介: 李俊(1970—), 男, 教授, 博士。研究方向为功能防护服装。E-mail: lijun@dhu.edu.cn

要通过传导和辐射的方式,而当空气层厚度增大时,就会发生热对流,因此,对服装各部位收缩形变的研究是揭示衣下空气层中热量传递方式的重要途径,也是研究服装整体热防护性能的重要方面。

目前国内外关于防火服形变的研究非常少。文献[4]通过测试 TPP(热防护性能,thermal protective performance)研究阻燃面料的物理化学性能,对不同面料是否发生收缩变形等现象进行了记录,但并没有定量研究。E M Crown 等^[5]通过 TPP 试验和圆筒仪测试对比了热防护性能的 3 个测试标准,从而将面料收缩的动态影响考虑在内,选择最优测试标准,但是此研究仅将收缩变形作为评定手段,并没有针对收缩变形进行定量分析。文献[6-7]研究了假人体表不同收缩部位的不同烧伤程度。通过假人燃烧前后三维人体扫描图像的对比处理,得到不同部位的收缩率。但是从三维扫描数据推算出的只是衣下空气层的减小,这种表征方法并不能替代服装具体各部位面积收缩变形的实际测量。

总结国内外的研究可发现:TPP 试验等只能表征面料特征;依靠三维人体扫描技术并不能真正得到服装的收缩形变量。本文利用东华燃烧假人系统^[8]进行燃烧试验,提出并使用捺印法针对防火服各部位的形变进行实际定量测量,研究闪火中防火服的形变规律;通过三维人体扫描技术获取防护服各部位衣下空气层厚度,分析热流量、衣下空气层与收缩形变的关系,并探索服装形变的其他影响因素,为防火服装材料的研发与构成设计等提供基础数据及参考。

1 试验部分

1.1 试验服装

选取面密度分别为 150、175、210 g/m² 的 3 种 Nomex III A 织物^[9],制成 A、B、C 3 种尺寸大小的 10 件连体防火服,服装面料、尺寸及对应试验服装的件数如表 1 所示。

表 1 试验服装分类

Tab. 1 List of garment specimen

服装类 型代号	织物面密度/ (g·m ⁻²)	尺寸类 型代号	件数
G1	210	B	5
G2	150	B	2
G3	175	B	1
G4	210	A	1
G5	210	C	1

表中服装 A、B、C 号代表围度方向尺寸的依次增大:胸围分别为 108、112、116 cm;腰围分别为 88、92、96 cm;臀围分别为 104、108、112 cm;衣长、袖长、裤内长分别为 162、64、74 cm。

1.2 试验方法

1.2.1 捺印法

本文提出使用捺印法作为燃烧前后防火服形变量的实际测量与表征的方法。捺印法的实施步骤:首先,将防火服穿着在燃烧假人身上,假人皮肤表面分布的 135 个传感器中有 118 个被服装覆盖。将传感器对应部位用打线钉的方法在防火服上标记;然后将防火服从燃烧假人身上取下,在服装背面以每个打线钉的部位为中心用红色印章进行捺印;最终得到服装表面均匀分布的 118 个印章,捺印后的防火服如图 1 所示。将燃烧前印章的直径记为 D₁,燃烧后取印章横、竖、左斜、右斜 4 个方向直径的平均值记为 D₂,则收缩率 S 的计算公式为

$$S = (D_1 - D_2) / D_1 \times 100\%$$

当 S 为负数时,表明此部位发生了伸长变形。



图 1 捺印后的防火服

Fig. 1 Seals on garment specimen

1.2.2 三维人体扫描

为分析收缩形变与衣下空气层的关系,燃烧试验前利用三维人体扫描技术采集服装各个部位的衣下空气层厚度。首先扫描裸体的燃烧假人和穿着防火服的着装假人;然后通过人体点云数据优化,多边形转化分别得到裸体和着装模型;最后通过模型对齐和色谱偏差分析,得到燃烧假人穿着 A、B、C 3 种类型服装时不同部位的衣下空气层厚度^[10]。

1.2.3 燃烧试验

将完成捺印标记和三维扫描的防火服进行燃烧

试验。燃烧试验参照 ISO 13506—2008《隔热和阻燃防护服 完整服装试验方法》的相关要求。试验所用服装和条件设计如表 2 所示,试验设计的对照组如表 3 所示。燃烧试验参数为:额定平均热流量 (84 ± 4) kW/m^2 ;数据采集时间 0.25 s;实验室环境温度 (20 ± 3) $^{\circ}\text{C}$;实验室环境相对湿度 $65\% \pm 5\%$ 。

表 2 10 次燃烧试验的设计方案列表

Tab. 2 Design list of flame exposure tests

实验序号	服装类型代号	闪火时间/s	假人姿势	假人状态
T1	G1	4	直立	静态
T2	G1	3	直立	静态
T3	G1	5	直立	静态
T4	G2	4	直立	静态
T5	G3	4	直立	静态
T6	G4	4	直立	静态
T7	G5	4	直立	静态
T8	G1	4	下蹲	静态
T9	G1	4	跑步	静态
T10	G2	4	直立	旋转

表 3 控制变量对比试验组

Tab. 3 Comparison tests

组代号	控制变量	实验序号
C1	面密度	T1、T4、T5
C2	服装大小	T1、T6、T7
C3	闪火时间	T1、T2、T3
C4	假人姿势	T1、T8、T9
C5	假人状态	T4、T10

2 结果与讨论

2.1 服装尺寸形变分析

2.1.1 服装整体的尺寸形变

服装重要部位尺寸的收缩量测量结果如表 4 所示。从表中数据可知,在围度方向上,胸围的收缩最大,其次是臀围和腰围,领围无明显收缩。把服装尺寸与燃烧假人尺寸进行对比可以发现,腰围和臀围处服装已经严重制约人体的活动。在长度方向上,总衣长平均收缩了 14.4 cm,其中裤外长和袖外长发生了较大的收缩。

表 4 重要部位尺寸收缩量

Tab. 4 Shrinkage of key measurements

cm

实验序号	总衣长	胸围	腰围	臀围	领围	裤外长	袖外长
T1	16.0	13.0	6.0	14.0	0.0	14.0	6.5
T2	9.0	5.0	3.0	8.0	0.0	5.0	3.5
T3	17.0	15.0	8.0	11.0	0.0	16.5	9.0
T4	15.0	13.0	7.0	15.0	0.0	16.5	8.5
T5	15.5	16.0	4.0	6.8	0.0	15.0	7.5
T6	11.0	13.0	3.0	7.0	0.0	13.5	8.5
T7	17.0	10.0	8.0	16.0	0.0	17.0	5.0
T8	10.5	18.0	9.0	8.6	0.0	12.3	9.5
T9	15.5	14.0	3.0	6.0	0.0	13.5	6.5
T10	17.5	18.0	8.0	12.0	0.0	14.5	9.5
均值	14.4	13.6	6.0	10.4	0.0	13.8	7.4

2.1.2 服装局部的尺寸形变

燃烧试验后,防护服不同部位发生了不同程度的收缩形变。图 2 示出 T1 防护服燃烧前后服装与印章细节对比。

为了更好地表征防护服的形变程度,并将收缩程度与燃烧后烧伤预测进行对比研究,本文参考了 K 均值聚类和系统聚类的分析结果,并根据收缩的实际物理意义,将试验服装 118 个部位不同的收缩形变程度分成 4 档进行分类讨论,结果如表 5 所示。对于每件防护服,统计其 118 个部位收缩率落在 4 个档中的部位个数,并计算每个档中部位个数占 118 个部位的比例,绘制成柱状图,如图 3 所示。

由图 3 可看到,10 件防护服在燃烧试验后发生形变的总体趋势,除了 T2 防护服外,其他防护服的收缩面积均大于 75%。为了更直观地呈现防护服各部位收缩率的大小,用不同灰度表示收缩程度的不同,绘制了防护服的收缩形变分布图。图 4 示出 T1、T8、T9 防护服各部位的收缩形变分布图。通过对比 10 件防护服各部位收缩形变分布图,可以总结如下规律:在直立状态下,包括静态和旋转状态,收缩最大的部位集中在服装的四肢部位;且对于手臂和腿部,收缩程度由上到下逐渐变大,颈部和肩部无明显收缩,服装的背部臀部收缩大于服装正面的胸部腹部收缩。但是假人处于下蹲姿势(见图 4(b))和跑步姿

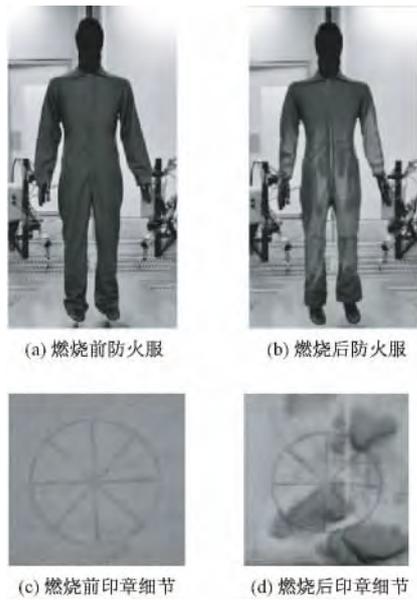


图 2 燃烧试验前后防火服及印章细节对比
Fig. 2 Garment before (a) and after (b) flame test and seal detail before (c) and after (d) flame test

势(见图 4(c))时防火服的形变与直立状态下有较大差异。图 5 示出 T1、T6、T7 防火服的平均收缩形变分布。灰度越大表示收缩程度越大。

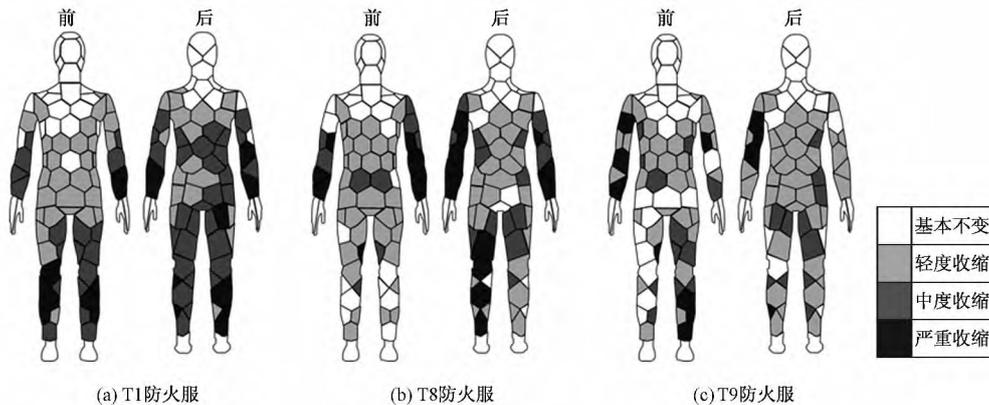


图 4 T1、T8、T9 防火服各部位收缩分布图
Fig. 4 Shrinkage distribution of T1 (a) / T8 (b) / T9 (c) garment

2.2 服装形变差异分析

2.2.1 同一试验条件下的形变差异分析

1) 热流量与衣下空气层厚度。闪火中,火焰直接接触防火服的面料,火焰通过面料将热量传递给衣下空气层,然后作用于模拟的皮肤层,因此服装各部位热流量和衣下空气层厚度的差异会导致防火服各部位的收缩形变的差异。

通过燃烧,假人表面的热流量传感器可以采集服装各个部位瞬时的热流量值,用裸体燃烧试验中瞬时热流量的均值标定各部位的热流量。通过

表 5 收缩形变的程度

形变程度	收缩幅度(SR)
基本不变	$SR \leq 3\%$
轻度收缩	$3\% < SR \leq 11\%$
中度收缩	$11\% < SR \leq 19\%$
严重收缩	$SR > 19\%$

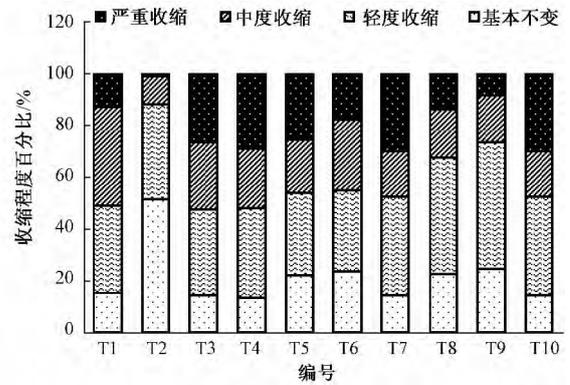


图 3 不同形变程度占总体比例
Fig. 3 Ratio of shrinkage degree

IBM SPSS Statistics 19.0 软件,对 10 件防火服各部位的热流量与收缩率进行 Spearman 相关分析;另外,对三维人体扫描得到的衣下空气层厚度与收缩率进行 Spearman 相关分析。每次试验的收缩率均值、热流量均值、衣下空气层厚度的均值如表 6 所示,相关分析结果的相关系数如表 7 所示。

从表 7 可看出,热收缩率与热流量和衣下空气层厚度正相关,且具有统计学意义($p < 0.05$)。整体来看,热流量和收缩率的相关性较强($p < 0.01$),而衣下空气层和热收缩率的相关程度不及热流量。

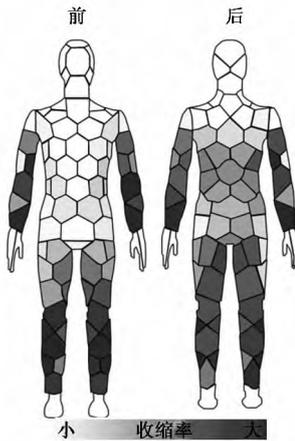


图 5 T1/T6/T7 平均收缩分布图

Fig. 5 Distribution of average shrinkage of T1/T6/T7

表 6 变量均值

Tab. 6 Mean value of variables

实验序号	收缩率/ %	热流量/ (kW·m ⁻²)	衣下空气层 厚度/mm
T1	10.54	85.11	11.68
T2	4.50	85.11	11.68
T3	12.38	85.11	11.68
T4	12.57	86.24	11.68
T5	11.18	85.11	9.49
T6	10.25	86.24	13.90
T7	12.41	86.24	10.82
T8	9.04	83.72	7.10
T9	7.92	83.10	11.68
T10	12.72	85.88	11.68

表 7 Spearman 相关系数

Tab. 7 Spearman correlation coefficients

实验序号	收缩率 & 热流量	收缩率 & 衣下空气层
T1	0.679**	0.385**
T2	0.593**	0.320**
T3	0.552**	0.394**
T4	0.533**	0.501**
T5	0.534**	0.488**
T6	0.605**	0.375**
T7	0.697**	0.277*
T8	0.527**	0.231*
T9	0.584**	0.246*
T10	0.435**	0.461**

注: 相关分析中置信区间为 95% 并进行双峰检验, * 表示显著性水平 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$ 。

2) 火场模拟及其他因素。从防火服各部位形变分布图可看到, 袖口和脚口部位附近的收缩比袖

山和大腿根部部位显著, 即离地面更近的部位收缩形变更显著。这与燃烧假人试验中燃烧模拟环境实验室的 12 支喷火器分布位置有关。喷火器接近手部、腿部等身体区段, 同时火焰热源由下往上, 影响了身体各部位的收缩。

另外, 试验发现处于服装接缝处的部位收缩形变不显著, 这是由于面料缝合处的双层面料可以有效阻挡热量传递。

2.2.2 不同试验条件下的形变差异分析

将假人身体表面分成前胸 T、后背 B、手臂 A、腿部 L 4 个区域, 对防火服 4 个区域中各个部位收缩率取平均值, 可以得到各区域平均收缩率。对比每个试验组(见表 3) 中防火服各区域平均收缩率, 结果如表 8 ~ 12 所示, 其中 S_T 、 S_B 、 S_A 、 S_L 分别表示前胸、后背、手臂、腿部 4 个部位的平均收缩率。

表 8 面密度对收缩形变的影响

Tab. 8 Influence of areal density on shrinkage

面密度/(g·m ⁻²)	S_T /%	S_B /%	S_A /%	S_L /%
150 (T4)	4.7	8.0	18.9	17.0
175 (T5)	3.4	8.9	17.2	14.9
210 (T1)	4.8	9.0	13.7	13.7

表 9 服装大小对收缩形变的影响

Tab. 9 Influence of garment size on shrinkage

服装大小	S_T /%	S_B /%	S_A /%	S_L /%
A (T6)	3.5	7.5	14.8	13.9
B (T1)	4.8	9.0	13.7	13.7
C (T7)	5.6	10.0	14.9	16.9

表 10 闪火时间对收缩形变的影响

Tab. 10 Influence of flash test time on shrinkage

闪火时间/s	S_T /%	S_B /%	S_A /%	S_L /%
3 (T2)	1.9	3.6	6.6	5.7
4 (T1)	4.8	9.0	13.7	13.7
5 (T3)	4.9	8.9	18.1	16.4

表 11 假人状态对收缩形变的影响

Tab. 11 Influence of manikin state on shrinkage

假人状态	S_T /%	S_B /%	S_A /%	S_L /%
静态 (T4)	4.7	8.0	18.9	17.0
旋转 (T10)	5.2	7.6	13.9	17.6

表 12 假人姿势对收缩形变的影响

Tab. 12 Influence of manikin posture on shrinkage

假人姿势	S_T /%	S_B /%	S_A /%	S_L /%
直立 (T1)	4.8	9.0	13.7	13.7
下蹲 (T8)	4.8	7.1	17.3	9.2
跑步 (T9)	5.1	6.1	11.7	8.9

从表 8 ~ 12 可发现: 针对 C1 组试验服装(见表 8), 织物面密度与服装的收缩呈负相关, 因为面

密度在本质上表现为面料厚度和面料密度,因此面料厚度和面料密度越大,面料越不易发生收缩。

针对 C2 组试验服装(见表 9),服装大小与服装的收缩也有一定相关性。服装越宽松,服装衣下空气层则越大,服装形变的空间越大,因此收缩越显著。

针对 C3 组试验服装(见表 10),闪火时间与服装的收缩呈正相关。且在 3~4 s 的过程中服装显著收缩,4~5 s 的过程中服装继续收缩,但是幅度较 3~4 s 过程小。

针对 C4 组试验服装(见表 11),燃烧过程中,假人旋转与否对收缩形变几乎没有影响。

针对 C5 组试验服装(见表 12),假人姿势对服装形变的影响最为显著,因此下蹲姿势和跑步姿势各部位形变的结果和直立状态下的规律并不一致。

2.3 收缩形变与皮肤烧伤的对比分析

T1 防火服各部位收缩分布和假人皮肤烧伤预测分布如图 6 所示。

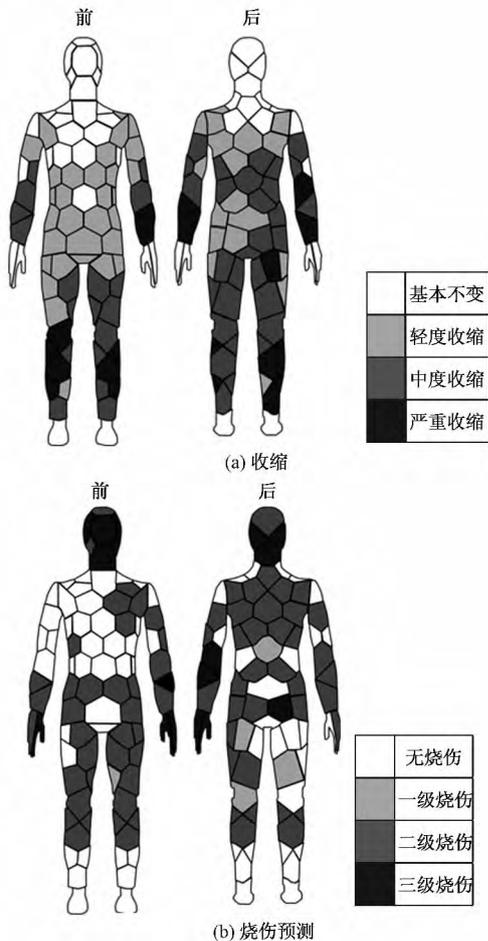


图 6 收缩与烧伤预测分布对比图

Fig. 6 Contrast between distribution of shrinkage (a) and predicted burn injury (b)

从图 6 可看出,整体上来看,皮肤烧伤较重的部位集中在手臂、腿部和背部,这与收缩形变的分布是一致的。从防火服重要部位尺寸收缩的结果可知,燃烧试验后防火服在胸部和臀部已经严重制约人体。这表现在皮肤烧伤预测中假人背部和臀部均发生了一级和二级烧伤,甚至在臀部发生了三级烧伤。另外服装在袖长和裤长均发生了较大收缩,燃烧假人手腕处发生了二级甚至三级烧伤,但是脚踝处却没有烧伤,这是由于此系列服装在版型设计中已经考虑到了收缩因素,在合体的服装基础上增加了裤长。

3 结 论

针对防火服装在燃烧试验中发生的形变,本文提出捺印法作为测评研究方法。研究发现单层芳纶织物防火服在闪火时间达到 4 s 时,平均收缩率在 8%~13% 之间,收缩最大的部位达到了 34%,集中在服装的四肢部位。且对于手臂和腿部,收缩程度由上到下逐渐变大,服装的背部及臀部收缩大于服装正面的胸部及腹部收缩。

服装各部位的热流量、衣下空气层厚度与各部位的收缩率呈正相关,且热流量是影响收缩率的主要因素。试验环境及服装的工艺特征也会影响收缩率。

假人姿势对服装形变有显著影响。闪火时间越长,服装越宽松,面料密度越小,则防火服收缩形变越明显。

防火服收缩显著的区域,皮肤易发生烧伤。因此,合理调整胸围、臀围以及袖长、裤长的尺寸结构,开发热尺寸稳定性好的耐高温阻燃面料,并对手臂和腿部进行重点防护,将成为提高防火服热防护性能的有效途径。 FZXB

参考文献:

[1] SHALEV I , BARKER R L . Predicting the thermal protective performance of heat-protective fabrics from basic properties [C] // Performance of Protective Clothing: ASTM STP 900. Philadelphia: American Society for Testing and Materials , 1986: 358 - 375.

[2] 王丽丽,陈蕾,胡盼盼,等. 芳纶 1313 纤维的研制[J]. 上海纺织科技 2005(1) : 12 - 14.

WANG Lili , CHEN Lei , HU Panpan , et al . A summarization on PMIA [J] . Shanghai Textile Science & Technology , 2005(1) : 12 - 14.

- [3] TORVI D A , DALE J D , FAULKNER B. Influence of air gaps on bench top test results of flame resistant fabrics [J]. *Journal of Fire Protection Engineering* , 1999 ,10(1) : 1 - 12.
- [4] 宗艺晶 张向辉 李俊 等. 消防服用外层织物的热防护性能研究[J]. *产业用纺织品* ,2009(6) :17 - 20.
ZONG Yijing , ZHANG Xianghui , LI Jun , et al. Study on thermal protective performance of outer fabrics in firefighter clothing [J]. *Technical Textiles* ,2009(6) : 17 - 20.
- [5] CROWN E M , DALE J D. BITNER A E. Comparative analysis of protocols for measuring heat transmission through flame resistant materials: capturing the effects of thermal shrinkage [J]. *Fire Mater* , 2002(26) : 207 - 213.
- [6] SONG G W. Modeling thermal protection outfits for fire exposures [D]. Raleigh , North Carolina: North Carolina State University ,2002: 21 - 26.
- [7] SONG Guowen. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment [J]. *Journal of Industrial Textiles* , 2007 , 36(3) : 193 - 205.
- [8] 王敏 李小辉. 我国建成国际领先的服装燃烧假人系统“东华火人” [J]. *中国个体防护装备* ,2011(5) : 54 - 55.
WANG Min , LI Xiaohui. The latest flame test manikin system developed in China [J]. *China Personal Protective Equipment* 2011(5) : 54 - 55.
- [9] 张建春 赵艳志. 耐高温阻燃防护织物 Nomex III A 及其性能测试研究 [J]. *中国劳动防护用品* ,2000(4) : 36 - 39.
ZHANG Jianchun , ZHAO Yanzhi. The study of flame-resistant fibers Nomex III A and its performance [J]. *China Personal Protective Equipment* ,2000(4) : 36 - 39.
- [10] 王云仪 张雪 李小辉 等. 基于 Geomagic 软件的燃烧假人衣下空气层特征提取 [J]. *纺织学报* ,2012 , 33(11) :102 - 106.
WANG Yunyi , ZHANG Xue , LI Xiaohui , et al. Geomagic-based characteristic extraction of air gap under clothing [J]. *Journal of Textile Research* , 2012 , 33(11) :102 - 106.