

消防服热力学体系的传热机理分析

刘津池, 于淼*, 刘静, 王侠

(青岛大学 纺织服装学院, 山东 青岛 266071)

摘要:消防服有隔绝热源、保护消防员的作用,新角度下消防服热传递机理分析有助于改进设计和提升热防护性能。构建一个消防服系统与火场进行能量交换的热力学体系,探究了该系统中热微团的分子运动形式及粒子热动能输运模型;剖析了消防服作为高温火场与低温“消防服系统”界面时的传热模型;论述了火场环境中消防服的传热机理;从燃烧和热能输运角度分析了消防服阻燃机理,提出了一些初步的热力学阻燃体系构建思路。这为进一步的消防服传热机理研究奠定基础,也为热防护服的服装结构、面料、纤维等开发设计提供参考。

关键词:消防服系统;热力学系统;热能输运;阻燃机理

中图分类号:O 414.19;TS 941.731.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2021)01-0014-09

Heat Transfer and Flame Retardant Mechanism in the Thermal System of Firefighting Clothing

LIU Jinchí, YU Miao*, LIU Jìng, WANG Xiá

(College of Textiles and Clothing, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The important function of firefighting uniform was to isolate heat source and protect firefighter in fire. Appropriate analysis method of fire suit transmission mechanism could attribute to improve the design of firefighting clothing and its thermal protection performance. The thermodynamic system for the energy exchange of the fire suit system in fire was envisaged. Under the system, the molecular motion form of thermal micro-clusters and the particle thermal kinetic energy transfer model were explored in detail. The heat transport model of firefighter uniform as the interface between high-temperature fire scene and low-temperature "fire suit system". From the perspective of thermodynamics, the main factors that affect the heat transfer of fiber entered the fire environment, were discussed. The flame retardant mechanism of firefighting clothing was analyzed from the perspective of combustion and heat transfer, and some basic ideas for building flame retardant systems were proposed preliminarily. The foundation was laid for the further research on the heat transfer mechanism of thermal protective clothing. And the reference for the development and design of thermal protective clothing were provided, from the perspectives of clothing structure, fabric and fiber.

Key words: system of firefighting clothing, thermodynamic system, heat transport, flame retardant mechanism

消防服作为火场救援的重要防护装备,应具备较好的阻燃和热防护性能,能够在一定时间内阻止

高温侵害消防员,降低生命威胁,并保证其救援效率^[1-3]。火场中当消防员直接遭受火焰冲击或高温

收稿日期:2020-04-22; 修订日期:2020-07-07。

基金项目:教育部人文社会科学研究一般项目(17YJAZH131);山东省自然科学基金项目(ZR2019PEE022);中国纺织工业联合会科技指导性项目(2018078)。

作者简介:刘津池(1995—),男,硕士研究生。

*通信作者:于淼(1984—),女,讲师,硕士生导师。主要研究方向为服装舒适性与功能性。

Email:yumiao_qd@126.com

热辐射时,热量由消防服面料外部传向内侧人体皮肤处。各层面料在阻隔热伤害过程中发挥不同的作用:阻燃外层抵御火场高温和火焰冲击;防水透气层防御外界高温或有害液体侵害,促进内部水汽排出;隔热层有良好的隔热和防热辐射作用;舒适层有良好的接触舒适性和吸湿透气性^[4-6]。另外,由于纤维实体可以起到阻挡黑体辐射作用,加之组合面料各层之间空气层的存在,故每一层面料都能起到一定隔热作用^[7-9]。从传热学角度分析消防服在火场高温热辐射状态下发挥阻燃隔热功能的热力学机理,可以从微观粒子热输运层面充实消防服设计理论。

从传热学角度分析消防服在火场高温热辐射状态下发挥阻燃隔热功能的热力学机理:将穿着消防服进入火场的消防员视作一个局部环境,称之为“消防服系统”;将火场视作一个与外界独立的热力学体系;消防服则是火场体系与消防员的边界。环境作为一个较小的细部整体包含于火场这一热力学系统中,所以设想考察的是庞大的热力学系统对较小范围环境的热侵犯问题。在不考虑热蒸汽、热水流喷溅等因素的条件下,系统环境质量保持恒定不变,火场视作只与消防员产生能量交换而无质量交换的闭口系统。

文中将火场视为高温热源,火场中消防服系统视为受高温热源影响、并与之持续进行能量交换的低温环境,这两者共同构成一个热力学体系。从热力学角度探究该体系热动微团分子运动形式和粒子热动能输运模型,分析影响纤维热能输运的主要因素,从燃烧和热能输运角度解析消防服阻燃机理,提出了一些新的阻燃体系构建思路。

1 火场中消防服热力学体系

火场中的消防服热力学体系如图 1 所示。图 1 中身着消防服的消防员 A 进入火场 B,此时 A 部在空间上包含于 B 部。火场中高度活跃的气体分子受高温热源驱使向低温热源运动,剧烈的分子热运动促使热能由 B 部向 A 部传递。消防员进入火场后,消防服系统与火场之间始终处于状态参数实时变化的非平衡状态。将这一非平衡热力学系统视为连续介质,并将该介质视为微团集合体。当确定到某时间点且微团足够小时,每一个微团内部状态参数都处于稳定到可以描述的状态,因此可被视为平衡热力系统。于是,在不区分粒子间差异的前提下,用场的概念取得消防服某点的热力学参数。

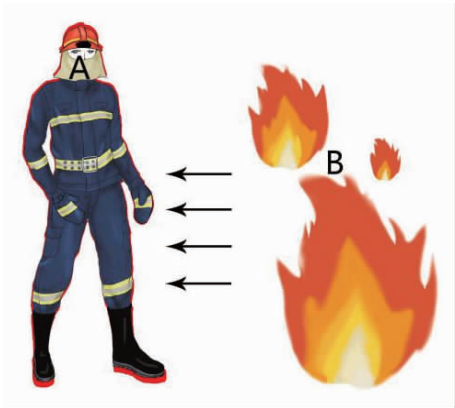


图 1 火场中消防服热力学体系

Fig.1 Thermal system of fire fighter suit in fire

1.1 热动微团气体分子运动

热动微团在体系中的实际运动路线是迂回曲折的,具体如图 2 所示。热动分子相互碰撞越频繁,其运动路线越曲折,从高温区向低温区转移所需时间越长,不同温度梯度层热动微团能量交换越缓慢,即传热效率越低。分子碰撞频繁程度直接决定了分子热输运能力,所以提高热动分子碰撞频率、增加分子运动总路程、延长单位距离分子转移时间是实现消防服系统阻燃隔热功能、延长消防员在火场中“安全时间”的根本途径。

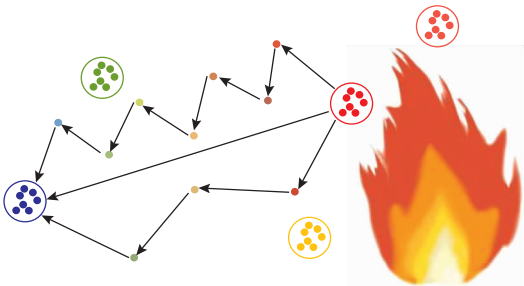


图 2 热动微团分子运动路径

Fig.2 Movement path of molecules in thermo-kinetic micromasses

1.2 粒子热能输运

纤维晶体的粒子热振动是消防服热力学体系的粒子热动能输运模型中能量输运的主要形式。在温度 T 和热平衡状态下分别解析粒子热动能输运模型,并探讨纤维热振动模型及导热系数。

1.2.1 热振动 分子力和分子热运动是决定物质热学性质的内因。当纤维处于平衡热力系统时,粒子间相互作用势能远大于平均热运动动能,因而绝大部分粒子只在平衡位置做微小振动(热振动)^[10]。热振动能量随温度的变化而改变,所以热振动能量直接决定了纤维热容^[11-12]。因此,可以利用纤维这一特性,通过实验寻找特定温度,在此温

度下热缺陷粒子脱离结点发生游离,形成空格点;在此基础上掺入阻燃微粒填补空格点,实现有效的阻燃整理。

1.2.2 纤维热振动模型 纤维热传导主要是由纤维晶体粒子热振动引起的,热振动是以波的形式在晶体中传播。根据量子理论,温度为 T 时,频率为 ν 的谐振子热振动平均能量

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}。$$

式中: h 为普朗克常量; ν 为某独立谐振子振动频率; k 为玻尔兹曼常数。

当 $kT \gg h\nu$ 时, $e^{\frac{h\nu}{kT}} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}$, 因而 $\bar{E} = kT$, \bar{E} 为晶

格振动总能量,即当且仅当 $T \gg \frac{hV}{k}$ 时,能量均分定理成立。

由于 1 mol 谐振子数量已知,因此温度为 T 时,可以求得频率为 ν 的谐振子热振动平均能量,亦可确定纤维受热至相变所需能量。消防服面料的纤维发生相变之后,物理性质会发生较大变化,防护性能极大下降。那么消防服系统最薄弱点从体温达到相变极限点温度所需能量,就是其所能承受的热侵害总能量。实际火场温度可根据火场空间分布、易燃物种类等推定,因此在消防员进入火场前可估算体温与实际火场温度之差,再结合纤维的热容得到该火场条件下消防服系统实现有效热防护的“安全时间”。

1.2.3 热平衡粒子热动能输运模型 当纤维某点处于热平衡状态时,该点绝大部分粒子始终围绕平衡位置进行热振动。室温下纤维中大多数粒子热振动振幅为 0.01 nm,不到粒子间平均距离(0.15~0.20 nm)的 1/10。由于纤维无定型区传热形式过于复杂,文中将纤维视作全结晶结构,因此 1 mol 纤维处于热平衡状态时,总热振动能为

$$U_0 = N_A \cdot 3kT = 3RT。$$

式中: U_0 为 1 mol 纤维处于热平衡状态时的总热振动能; N_A 为 1 mol 纤维晶体中粒子总数; kT 为每一振动自由度平均能量; R 为普适气体常量。

消防员进入火场后,高温火场热侵犯低温消防服系统,一部分热量经各类孔隙、面料向消防服系统内部传导,其余热量被系统界面反射。热量向人体传导过程中,受到空气、纤维、面料、服装等要素阻挡。 U_0 表示在热阻挡过程中,1 mol 纤维粒子的总热振动能量。这一参数也是纤维不发生剧烈性能变化所能够容纳的最大热能,即蓄热能力。 U_0 越大,纤维能吸收总的热容量越大,消防服系统能承

受热侵犯的时间越长,即消防服热防护能力越强。

2 消防服传热模型

消防服作为界面层,直接承受来自 B 部的热能侵袭,并起到阻挡 B 部热能向 A 部传导的作用。所以研究该状态下消防服热传递机理,实质上是构建火场消防服传热模型。

2.1 消防服热能输运模型

单根纤维热传递难以精确测量,所以探讨对象选定为纤维和空气的集合体(面料)。为简化表达,将纤维集合体视为连续均匀介质。采用傅里叶导热定律讨论其导热性,单位时间内消防服面料热输运效率为

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} \cdot t \cdot S。$$

式中: Q 表示单位时间内单位面积消防服面料输运的热量(J); λ 为导热系数 [$W/(m \cdot ^\circ C)$]; t 为热传导时间(s); S 为垂直于热流方向的传导截面积(m^2)。

单位时间传输到人体表面的热量 Q ,会直接对消防员造成热伤害。 Q 值越小,消防服阻挡热侵害的能力越强,单位时间传输到消防服系统内部的热能越少,因而消防员在火场中“安全时间”越长。

2.2 消防服导热系数

热力体系中分子总运动趋势是指向低温区的,但气体分子热运动是随机的、无规则的。因此一部分热动气体分子通过面料空隙和纤维孔隙直接进入消防服内部,直接对人体表面造成热伤害;另一部分高能气体分子通过撞击纤维,沿纤维径向传递能量。在此过程中,高能气体分子扰动纤维非晶区不规则分子,破坏晶区稳定的、规则的晶格结构,对消防服形态造成直接破坏。纤维内部热量传递是通过声子之间、声子与晶体晶界以及各种点阵缺陷和各种杂质等碰撞实现的^[13],并以非谐振动弹性波的形式表现。声子频率为 ω 时,用导热系数 λ_p 表征纤维内部热传递能力,即纤维材料的厚度为 1 m,两端温差为 1 $^\circ C$ 时,1 s 内通过 1 m^2 纤维材料的热量(J)^[14]:

$$\lambda_p = \frac{1}{3} \int C_{v_p}(\omega) \cdot \bar{v}_p \cdot \bar{l}_p(\omega) \cdot d\omega。$$

式中: λ_p 为导热系数 [$W/(m \cdot ^\circ C)$]; ω 为声子频率; $C_{v_p}(\omega)$ 为声子频率为 ω 时单位气体比热; \bar{v}_p 为声子平均运动速度; \bar{l}_p 为声子频率为 ω 时声子平均自由程。

根据消防服内外温差求得消防服面料热容,即热力体系界面在有效安全时间内热输运效率,进而计算二级烧伤时间,并推断消防员火场作战最大安全时长。

2.3 热平衡的维持及变化

纤维热稳定性由质量的稳定性、组成的稳定性、结构的稳定性、形态的稳定性等方面构成。纤维作为部分结晶高聚物,在热的作用下会发生许多变化:特定分子脱离稳定状态,分子联系紧密程度下降,晶区有序排列被打乱、晶格取向度下降;发生低分子雾化挥发,分子质量下降;分子运动平衡态被打破,纤维物理机械性质发生变化。若温度进一步升高,大分子将在最弱的键发生热裂解、化学裂解,宏观表现为纤维强度下降、发脆、变形甚至断裂。当分子热运动剧烈程度远超纤维分子结构力(热扰动+分子间斥力>>分子间引力)时,可能导致部分分子集群脱离整体,即宏观上表现为融滴。由于分子存在一定取向排列及内应力,在热扰动打破平衡状态时,纤维也可能发生热收缩。

3 消防服传热机理

服装结构、面料组织以及纤维等都会影响消防服整体热防护能力。消防服有效导热系数由固相导热因子(热载体为声子)、气相导热因子(分子)、气相对流导热因子(分子)、气孔辐射导热因子(光子)、相互作用导热因子等综合作用决定,并且不同导热因子在整体导热系数中所占权重也随火场变化而变化。

3.1 服装结构

服装结构层面,通过减少开口,加密缝合针脚,接口部位进行堆叠设计等形式,减小消防员与热流直接接触的可能性。消防服的多层结构、合理衣下空间厚度、特殊部位加厚设计亦可有效提升消防服热防护能力。在确保合理热防护能力时,综合考虑舒适性能、工效性能,提高消防员救援效率,缩短消防员身处火场的时间,也有利于减少总传热量。

3.2 面料组织

面料结构会影响消防服隔热能力。织物面密度确定时,面料结构越致密,面料空隙间气体流动越困难,对气动分子阻隔能力越强,气相对流导热占比越小,隔热能力越好;且多层面料结构对气动分子阻隔能力优于单层面料。

3.3 纤维

纤维实质上是纤维、空气和水的混合物,这三者导热系数不同,且其中任一物质状态变化都会影

响到纺织纤维的导热系数^[15-16]。单根纺织纤维是内部存在不规则细微空隙结构、体积极小的不透明固体,其传热形式以热传导为主^[17-18]。

面料中只有极少数固体物质,90%以上空间均是空气,因而可将纤维视作悬浮在空气中的二维粒子。空气是热射线透射性良好的透明体,纤维材料为半透明体。热射线从各个方向射向纤维,一部分被反射或散射,一部分被纤维吸收。纤维吸收热射线后,转变为热射线辐射体,并朝各个方向进行热辐射。

纤维的热辐射能传输如图3所示。图3中将纤维层面的热量传输分解为4个部分。热辐射以波的形式向纤维传导,一部分热量被纤维镜面反射,一部分被散射(实质上也是反射),另一部分则穿透纤维,这3部分热量均重新汇入其他纤维的入射热辐射中。除此之外,入射辐射中一部分被纤维所吸收,转化为内部分子动能,这一部分是整体辐射的实质损失。

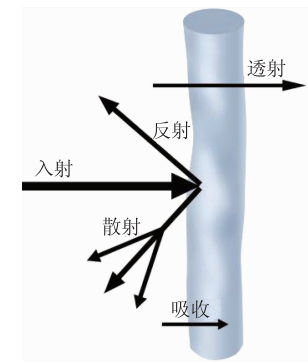


图3 纤维的热辐射能传输示意

Fig. 3 Transmission diagram of heat radiation

3.3.1 纤维晶体结构与排列 纤维导热系数与晶区结构及其空间排列有关^[19-20]。纤维中结晶区占比越小、缺陷越多、杂质越多、粒子排列越无序时,声子碰撞散射概率越大,声子自由程越小,纤维导热系数就越小。

纤维热传导存在各向异性。当纤维排列平行于热辐射方向时,纤维轴晶体结构越紧密、晶格排列越有序,纤维连续性越高,越有利于热振动的波状传递,导热系数就越大^[20]。当纤维垂直于热辐射方向时,热动分子间碰撞导致声子格波产生和晶面散射,使得横向相邻大分子链产生较大热阻,从而削减热振动波状传递,降低纤维导热系数。

3.3.2 纤维填充密度与细度 纤维中腔或空隙、隙中低气体流动性以及纤维的低填充密度等,会使导热系数降低。随着纤维填充密度 δ 增大,纤维导热系数先降低后提高:填充密度 δ 极小时,面料内部

空气过多,对流热传导作用增强,纤维导热系数较大;若纤维填充密度 δ 增大,则面料中空气比例下降,面料孔隙减少,对流传导减少,纤维导热系数下降; δ 过大时,面料纤维过于紧密,纤维热传导作用增大,纤维热导系数增大。研究表明,纤维在纤维集合体(面料) δ 为 $0.03 \sim 0.06 \text{ g/cm}^3$ 时导热系数最小^[21]。

纤维排列结构特征相同时,纤维细度越小,结构越致密,空隙内空气越难流动,同等填充密度下单位容量静止空气热对流和热辐射作用越弱,有效导热系数越小。随着温度升高,气体流动仍保持较低水平,热对流和热辐射作用进一步降低,导热系数亦随之减小。单根纤维体积越小,透明度越高,对热辐射阻隔作用越小,有效导热系数越大。当面料体积密度一定时,纤维直径越小,热辐射阻隔作用越大,有效导热系数越小。但纤维直径过小可能导致纤维深层吸收热辐射,使得消防服温度急剧上升,热防护能力下降,对消防员造成更大热伤害。降低纤维透明度,减小纤维直径,增大热射线反射效率,增加热动分子运动路程,削减热辐射;另外,也可以通过涂覆蛭石涂料等方式提升热防护性能。

3.3.3 纤维气孔率与纤维空腔 热量经由纤维壁进入纤维中空腔后,分两条路径传导:一部分热量由纤维腔壁传导,即仍是固相导热;另一部分热量则通过空腔传递。空腔传递的热量传导方式包括气体传导、对流传热和辐射传热。由于传导方式发生变化,热能传导路径大大延长,热阻增大,有效导热率降低,导热系数减小。纤维气孔率越高,固体导热因子贡献越小,静止空气越多,接触热阻越大,纤维集合体传热能力越弱,导热系数越小。若气孔率超出特定范围,气孔内气相传导导热因子、气相辐射导热因子、气相对流导热因子占比权重之和增长值超过固相导热权重,纤维有效导热系数开始逐渐增大。

高温侧较活跃的高速气体分子通过与低温侧低速气体分子的相互碰撞实现能量传递。空气中含量最高的氮气和氧气平均自由程为 70 nm ,若纤维中空腔设计在 50 nm 以下,气孔内空气分子就失去了自由流动的能力,附着在纤维中空腔内壁。此时气体空间营造热输运效果近似真空空间,能够最大程度降低气相导热因子,从而降低有效导热系数,且成本远低于构造真空气体空间。纤维中空腔过小时,固相导热因子权重过高,使中空腔气体绝热作用降到极小,增大纤维有效导热系数。通常情况下,温度越高微孔内温度梯度越陡,则阻断对流传热的临界

孔径就越小。纤维中空腔形貌几何形态也会直接影响整体导热系数。中空腔越接近圆形,比表面积越大,接触热阻越大,导热系数就越小。由于对流传热小,中空腔封闭的纤维导热系数小于中空腔开口的纤维。

如果作为气体屏障的纤维壁越薄,那么截断面积和接触面积就越小,固体传热系数越低,有效导热系数也就越低。消防服纤维设计中,在保证强度和细度基础上,将纤维气孔率控制在最佳范围内,合理设置中空腔体积,尽可能制造极薄纤维壁纤维,使理论热导率最小。

3.4 纤维含湿量

面料导热系数和热容量与其水分含量有关^[22],水的导热系数远大于干纤维和空气。消防服吸湿后,纤维间空隙与纤维中气孔等被水分占据,使其有效导热系数升高。在较低辐射热暴露下,纤维含水率增加会导致消防服热防护性能下降:当水与织物的质量比为 15% 时,导热系数最高,消防服热防护性能降到最低^[23];若含水率继续增加,水分的存在有助于提升单层湿态织物热防护值^[24-25],湿态消防服热防护性能缓慢增加,并在含水率近饱和状态时达到干态消防服同等热防护性能^[26-27]。消防员大量出汗时,消防服内部会通过水汽凝结和吸收形成阻碍外界热量进入的微气候,从而提升消防服系统热防护性能^[28];但在高辐射热暴露下,水分会增强织物热传递性能^[29-30],且织物中水相剧烈改变会导致消防员烫伤^[31]。温度直接影响消防服热输运能力,温度越高,可供传导的热能总量越多,热动分子运动效率越高,单位时间热输运能量越多,消防服导热系数越大。

4 燃烧与热输运视角下阻燃机理

纤维燃烧的实质是明火高温条件下的快速热降解和剧烈化学反应^[32]。纤维吸热裂解,生成大量可燃性气态产物,在空气中发生燃烧,燃烧产生的热量又促进了纤维的进一步裂解和燃烧,形成循环燃烧反应链^[33]。文中分别从阻断燃烧过程和降低热输运效率的角度分析消防服阻燃机理。

4.1 燃烧视角下阻燃机理

燃烧视角下的织物阻燃技术是指通过物理、化学方法赋予织物阻燃性能,降低材料可燃性,减缓火焰蔓延速度,其实质是破坏纤维燃烧过程^[34]。燃烧视角下燃烧行为影响因素及作用机理见表1。

通过吸热冷却、气相稀释、形成隔热层、终止自由基链反应等可使纤维终止燃烧^[35];或将阻燃结构或阻燃物质通过聚合、共混、复合纺丝、接枝改性等方法加入纤维;或用后整理方法将阻燃剂涂覆在纤维表面,可提高纤维阻燃性能^[36]。常见阻燃方法及其优缺点见表 2。

表 1 燃烧视角下燃烧行为影响因素及作用机理		
Tab.1 Influencing factors and mechanism of combustion behavior in burning perspective		
主要因素	因素构成	作用机理
化学组成	氢、氮以及阻燃元素含量等	氢含量越高→越易燃烧;含氮、其他阻燃元素越多→越难燃烧
纤维结构	纤维大分子结构与其聚集态结构等	构建刚性大分子链→提高热稳定性、减缓热裂解速度、降低可燃性
炭化倾向	化学组成、分子结构等	纤维高温裂解产生的可燃性气体越少→固体炭化残渣量越多→阻燃性越好
织物结构和质量	织物组织结构、质量、厚度等	纱线捻度越高、织物组织结构越紧密、同组织织物单位面积质量越大→燃烧速率越低
环境因素	空气、压强、温湿度、辐射等	空气压强增大、空气湿度提高、织物含水量提高→燃烧性能下降

表 2 常规阻燃方法及其优缺点			
Tab.2 Conventional flame retardation methods and their advantages / disadvantages			
阻燃方法	操作方式	优 点	缺 点
自体阻燃	纤维选择	由纤维自身特性决定。如海藻酸盐纤维具有高 LOI(≥34.4%)	可加工性差
共聚法	将阻燃元素引入纤维大分子链	阻燃效果持久	操作复杂、成本高、可能降低纤维性能
共混法	将阻燃剂、相变材料等加入纺丝溶体或浆液	工艺简单、对纤维自身性质影响小	阻燃效果耐久性差
皮芯复合纺丝法	阻燃高聚物为芯、普通聚合物为皮,复合纺丝	纤维稳定性好、强度高、均匀性好	成本高
接枝改性法	将阻燃元素接枝单体与普通纤维共聚	成本低、阻燃耐久性好	改性后纤维强度下降
后整理法	将阻燃剂涂覆纤维表面	操作简单、成本低	耐洗性差
织物结构设计	设置恰当织物结构阻挡热能	成本低、无毒无害	效果不明显

4.2 热输运视角下阻燃机理及阻燃方法

4.2.1 阻燃机理 消防服热力系统处于热稳定状态时,消防服外侧向内侧热输运功率基本保持恒定。等量热冲击下,提高外侧分子对热能冲击的耐受度,可降低其热振动幅度与频率。通过降低高能位分子活跃度,缩小分子间能位差,从而降低热量传递效率。高能位分子活跃度越低,与相邻内侧较低能位分子能位差就越小,内侧分子热运动活跃度下降,单位时间热通量降低,进而延长二级烧伤时间。

加大分子间碰撞频率,可使分子行进路线更加

曲折,从而延长分子转移时间,减缓分子动量输运过程。分子行进路线越曲折,热量进入消防服的缓冲时间越长。但曲折的行进路线会增大分子碰撞纤维的概率,加速纤维热消耗,缩短消防服系统有效防护时间。单位热容量一定时,密集的纤维可承受分子动能总量大,因此能够提升消防服热防护性能。更小的纤维空隙可抑制无规则运动分子朝高温热源溢散,并使之继续冲击纤维本身,加剧热消耗,降低热输送效率。

4.2.2 阻燃方法 在消防服热力学体系热输运视角下,可以从多方面考虑阻燃设计。服装结构方

面,把消防服与可穿戴设备结合,在消防服上附加能质转换结构,将热量转换成对消防服系统防护性能影响较小的机械能、电能等形式,储备备用或释放。如以消防服系统内外温差为驱动能量,产生温差电动势,驱使电荷流动产生电流^[37],进而驱动外附降温装置实现降温等。通常情况下,消防服面料组合层间空气层厚度远小于6.5 mm,故以辐射传热为主,而辐射传热介质光子和热传导介质声子谐振波^[38]均属电磁波。隐身飞机是通过设计合理的飞机外型、使用吸波材料、主被动对消等方式减弱雷达反射波、红外辐射等特征信息,用光学修饰的方式实现隐身^[39]。受此启发,对热力学系统与环境的边界——消防服进行包括服装、面料、纤维层次的热学修饰,使之达到形式上的热平衡。

纤维结构方面,设计“跷跷板”状纤维结构,具体如图4所示。假设同样受热面积接收到的热能扰动相等,受热流冲击时, CD 板以点 B 为支点,沿 BC 向热流方向运动, $\angle ABC$ 逐渐减小至 0° 。此时, x 值最小,热动分子难以通过纤维孔隙进入另一侧。火场温度越高,外侧热扰动越剧烈,两支撑板相交速度越快,热量越难以传导进入消防服系统内部,从而保证消防服内部热平衡。在主要纤维上增加附属结构,一方面得到更为致密的消防服面料结构,直接阻挡辐射热侵入消防服系统内部;另一方面可构造更多的极细纤维孔隙,产生更大的接触热阻。

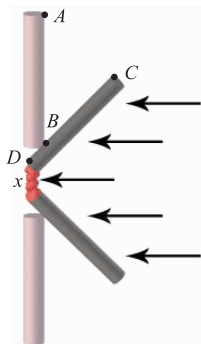
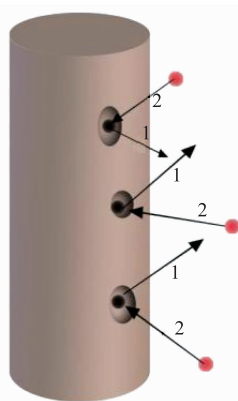


图4 跷跷板状的纤维结构

Fig.4 Fibrous structure like seesaw

纤维受热时,非晶区、杂质、缝隙等区域热扰动程度远大于晶区,热防护性能下降幅度也更大。纤维“热扩散”阻燃整理法如图5所示。对纤维做特定温度热处理,纤维晶区仍保持稳定状态,热缺陷区域达到较大热扰动幅度,热缺陷粒子1脱离结点发生游离,形成空格点。此时将阻燃粒子2通过“热扩散”法填充进空格点,补全纤维缺陷部位,提升面料热防护性能,优化阻燃剂抗洗涤性能。并且该整理方法的处理工艺、处理成本、环境友好程度均优于接枝改性、涂覆等整理方法。



注:1为热缺陷粒子;2为阻燃粒子。

图5 基于纤维的“热扩散”阻燃整理法

Fig.5 Fiber-based flame retardant finishing process by thermal diffusion

5 结 语

在消防服热力学体系视角下提出了几点阻燃思路:将热能转化为机械能或电能释放;对消防服进行热学修饰,使之达到形式上的热平衡,避免温差驱动热流,引起能量交换。设计“跷跷板”状纤维结构,减少进入消防服内部的热量。利用粒子热运动产生的缺陷,将阻燃粒子通过热扩散渗入实现阻燃加工。将火场中消防服热防护能力转化为热输运模型,从阻断或者降低不同导热因子主导的热量传递角度提出:消防服纤维设计应在保证强度和细度基础上,通过控制纤维最佳气孔率,设置合理中腔体积,制造极薄纤维壁纤维,降低纤维透明度,缩小纤维直径等方式,增加热动分子运动路程,延长分子运动时间阻隔热能输运,缩小总体有效热导率。

参考文献:

- [1] 邓梦,王云仪.低辐射热暴露下消防服热防护性能测评方法研究进展[J].纺织学报,2017,38(12):162-168,176.
DENG Meng, WANG Yunyi. Analysis of evaluation method of thermal protective performance of firefighter protective clothing exposure to low level radiation[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(12): 162-168, 176. (in Chinese)
- [2] 翟胜男,陈太球,蒋春燕,等.消防服外层织物热防护性与舒适性综合评价[J].纺织学报,2018,39(8):100-104.
ZHAI Shengnan, CHEN Taiqiu, JIANG Chunyan, et al. Comprehensive evaluation on thermal protection and comfort of outer fabrics of firefighter protective clothing [J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(8): 100-

104. (in Chinese)
- [3] 何华玲. 消防服用织物热防护性能及热湿舒适性能研究[D]. 天津:天津工业大学, 2017.
- [4] LI Weixian, SHI Yanming. Gambiered Guangdong silk craft-a venerable ecological coated technology [C]//The 5th China International Silk Conference. Suzhou: Soochow University, 2004:553-559.
- [5] 李向红, 马军. 消防员灭火防护服舒适层织物设计与性能测试[J]. 上海纺织科技, 2015, 43 (11): 9-11, 40.
- LI Xianghong, MA Jun. The design of lining fabric for firemen's fighting protective clothing and its property test [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2015, 43 (11): 9-11, 40. (in Chinese)
- [6] 刘林玉. 消防服多层织物热防护性研究及其舒适性综合评价[D]. 杭州:浙江理工大学, 2019.
- [7] 苏云, 王云仪, 李俊. 消防服衣下空气层热传递机制研究进展[J]. 纺织学报, 2016, 37(1): 167-172.
- SU Yun, WANG Yunyi, LI Jun. Research progress of heat transfer mechanism of air gap under firefighter protective clothing[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37 (1): 167-172. (in Chinese)
- [8] 张渭源. 服装舒适性与功能[M]. 2 版. 北京:中国纺织出版社, 2011: 44-46.
- [9] 黄勇, 陈长鹏, 何长英. 基于 LABVIEW 的虚拟实验仪器研究黑体辐射特性[J]. 大学物理实验, 2018, 31 (5): 104-107.
- HUANG Yong, CHEN Changpeng, HE Changying. Study of blackbody radiation character based on LABVIEW[J]. Physical Experiment of College, 2018, 31(5): 104-107. (in Chinese)
- [10] 张改青. 谈谈固体的热膨胀[J]. 物理教学, 1992(2): 10-11.
- ZHANG Gaiqing. Talk about the thermal expansion of solids [J]. Physics Teaching, 1992 (2): 10-11. (in Chinese)
- [11] 刘汝盟. 纳尺度碳材料结构热振动[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [12] 张洪亮, 雷海乐, 唐永建, 等. 纳米结构 Cu 固体材料的低温热容性能研究[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 471-475.
- ZHANG Hongliang, LEI Haile, TANG Yongjian, et al. Thermal capacity of nanocrystalline copper at low temperatures[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 471-475. (in Chinese)
- [13] 肖俐, 刘晓霞, 王婷婷, 等. 基于热线法的纺织材料导热系数测试研究[J]. 上海纺织科技, 2016, 44(10): 11-15.
- XIAO Li, LIU Xiaoxia, WANG Tingting, et al. Thermal conductivity measurement of textile materials with hot-wire method [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2016, 44(10): 11-15. (in Chinese)
- [14] 于伟东, 储才元. 纺织物理[M]. 2 版. 上海:东华大学出版社, 2009: 226-238.
- [15] 庞方丽, 刘星, 王瑞. 织物热传递性能的影响因素[J]. 轻纺工业与技术, 2013, 42(2): 21-24.
- PANG Fangli, LIU Xing, WANG Rui. Factors affecting the heat transfer properties of fabrics[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2013, 42 (2): 21-24. (in Chinese)
- [16] 王灿才. 数字喷墨印花技术及应用[J]. 丝网印刷, 2005(9): 34-36.
- WANG Cancan. Textile ink-jet printing technology and its application[J]. Screen Printing, 2005 (9): 34-36. (in Chinese)
- [17] 肖俐. 热线法测试纺织纤维导热系数的方法研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2016.
- [18] 石宏亮. 纺织品传热机理的理论探讨[J]. 南通工学院学报, 2001, 17(4): 44-47.
- SHI Hongliang. The review of heat transmission mechanism of the textiles [J]. Journal of Nantong Institute of Technology, 2001, 17(4): 44-47. (in Chinese)
- [19] 杨雨舟, 刘晓霞, 肖俐, 等. 纤维排列方向对热线法导热系数测试的影响[J]. 轻纺工业与技术, 2015(1): 23-25.
- YANG Yuzhou, LIU Xiaoxia, XIAO Li, et al. Effect of fiber alignment on thermal conductivity test by hot wire method [J]. Light and Textile Industry and Technology, 2015(1): 23-25. (in Chinese)
- [20] 魏玉娟, 王永宏. 纺织品数码喷墨印花研究现状[J]. 针织工业, 2006(5): 39-42, 72.
- WEI Yujuan, WANG Yonghong. The present research situation of digital ink jet printing technology of textiles [J]. Knitting Industries, 2006 (5): 39-42, 72. (in Chinese)
- [21] 于伟东. 纺织材料学[M]. 北京:中国纺织出版社, 2006: 143.
- [22] 陈萌. 辐射热暴露下湿态阻燃织物的热湿输运对其热防护性能的影响[D]. 郑州:中原工学院, 2018.
- [23] BARKER R L, GUERTH-SCHACHER C, GRIMES R V, et al. Effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing in low-level radiant heat exposures [J]. Textile Research Journal, 2006, 76(1): 27-31.
- [24] MAKINEN H, SMOLANDER J, VUORINEN H. Simulation of the effect of moisture content in underwear and on the skin surface on steam burns of fire fighters [M]//Performance of Protective Clothing: Second Symposium. West Conshohocken: ASTM International, 1988: 415-421.

- [25] 李红燕. 单层织物湿态热防护性能测试与分析[J]. 纺织学报, 2009, 30(12): 95-98.
- LI Hongyan. Testing and analysis on wet thermal protective performance of single layer fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(12): 95-98. (in Chinese)
- [26] SONG G W, CAO W, GHOLAMREZA F. Analyzing stored thermal energy and thermal protective performance of clothing [J]. Textile Research Journal, 2011, 81(11): 1124-1138.
- [27] BARKER R L, GUERTH-SCHACHER C, GRIMES R V, et al. Effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing in low-level radiant heat exposures [J]. Textile Research Journal, 2006, 76(1): 27-31.
- [28] FU M, WENG W G, HAN X F. Effects of moisture transfer and condensation in protective clothing based on thermal manikin experiment in fire environment [J]. Procedia Engineering, 2013, 62: 760-768.
- [29] LEE Y M, BARKER R L. Effect of moisture on the thermal protective performance of heat-resistant fabrics [J]. Journal of Fire Sciences, 1986, 4(5): 315-331.
- [30] ZHU F L, LI K J. Numerical modeling of heat and moisture through wet cotton fabric using the method of chemical thermodynamic law under simulated fire [J]. Fire Technology, 2011, 47(3): 801-819.
- [31] UDAYRAJ, TALUKDAR P, ALAGIRUSAMY R, et al. Heat transfer analysis and second degree burn prediction in human skin exposed to flame and radiant heat using dual phase lag phenomenon [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78: 1068-1079.
- [32] 江海红. 阻燃 PET 及其纤维的燃烧性能—燃烧机理—群子参数之间关系的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2000.
- [33] 韦节彬. 阻燃纤维性能及散纤维制条工艺探讨[J]. 毛纺科技, 2013, 41(6): 13-15.
- WEI Jiebin. Process discussion of flame-retardant fiber properties and loose fiber slivering [J]. Wool Textile Journal, 2013, 41(6): 13-15. (in Chinese)
- [34] 张洪昆. 纺织品阻燃综述[J]. 印染助剂, 2009, 26(2): 7-11, 15.
- ZHANG Hongkun. The review of flame retardancy on textiles [J]. Textile Auxiliaries, 2009, 26(2): 7-11, 15. (in Chinese)
- [35] 杨丽, 周逸潇, 韩新宇, 等. 阻燃剂阻燃机理的探讨[J]. 天津化工, 2010, 24(1): 1-4.
- YANG Li, ZHOU Yixiao, HAN Xinyu, et al. Discussion on the mechanism of flame retardants [J]. Tianjin Chemical Industry, 2010, 24(1): 1-4. (in Chinese)
- [36] 杨东昌, 齐鲁. 黏胶纤维阻燃改性方法[J]. 毛纺科技, 2016, 44(6): 54-57.
- YANG Dongchang, QI Lu. Method for flame retardant modification of viscose fiber [J]. Wool Textile Journal, 2016, 44(6): 54-57. (in Chinese)
- [37] 霍蒙, 吴舸, 袁宏, 等. 温差发电技术研究综述[J]. 科技与创新, 2020(10): 94-95, 97.
- HUO Meng, WU Ge, YUAN Hong, et al. Summary of thermoelectric technology research [J]. Science and Technology and Innovation, 2020(10): 94-95, 97. (in Chinese)
- [38] 刘廷贤. 隐形飞机隐身技术的基本原理[J]. 物理通报, 1998(1): 44-46.
- LIU Tingxian. The fundamentals of stealth aircraft stealth technology [J]. Physics Bulletin, 1998(1): 44-46. (in Chinese)
- [39] 曹泽阳, 高虹霓. 隐身飞机的发展及其防御技术[J]. 飞航导弹, 2001(9): 29-32.
- CAO Zeyang, GAO Hongni. The development of stealth aircraft and its defense technology [J]. Winged Missiles Journal, 2001(9): 29-32. (in Chinese)

(责任编辑: 邢宝妹)