

PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的热防护性能

刘亚光 汤爱华 牟建奎
上海伊贝纳纺织品有限公司, 上海 201514

摘要:设计制备了3组不同混纺比的聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布隔热层面料,PBO纤维与间位芳纶的质量比分别为10/90、20/80和30/70。将制备的PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布与市售常规芳纶隔热水刺非织造布(对位芳纶与间位芳纶质量比为20/80)进行性能测试对比,探究不同混纺比PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的热防护性能和应用潜力。研究表明:3组PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布均表现出优异的热防护效果,没有因PBO纤维的高导热率而降低灭火服组合的热防护性能,其中,PBO纤维与间位芳纶混纺比为20/80时,混纺水刺非织造布的热防护性能最佳。

关键词:聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维;水刺非织造布;热防护性能

中图分类号:TS 941.73

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)04-0042-06

Thermal protection performance of PBO fiber/ Meta-aramid blended spunlace felt

Liu Yaguang, Tang Aihua, Mu Jiankui

IBENA Shanghai Technical Textiles Co., Ltd., Shanghai 201514, China

Abstract: Three groups of poly(*p*-phenyl benzoxazole)(PBO) fiber/Meta-aramid blended spunlaced felts were designed and prepared as thermal insulation fabrics. The mass ratios of PBO fiber to Meta-aramid were 10/90, 20/80 and 30/70, respectively. The performance of the prepared PBO fiber/Meta-aramid blended spunlaced felts was tested and compared with commercially available conventional aramid thermal insulation spunlaced felts (mass ratio of Para-aramid to Meta-aramid was 20/80). The thermal protection performance and practical potential of PBO fiber/Meta-aramid blended spunlaced felts with different blending ratios were investigated. The results indicated that the three groups of PBO fiber/Meta-aramid blended spunlaced felts showed excellent thermal protection effect, and the high thermal conductivity of PBO fiber did not reduce the thermal protection performance of the combination of fire fighting suits. Among them, blended spunlace felts with the mass ratio of PBO fiber to Meta-aramid of 20/80 showed the best thermal protection performance.

Keywords: poly(*p*-phenyl benzoxazole) (PBO) fiber; spunlace felt; thermal protection performance

收稿日期:2024-01-03

作者简介:刘亚光,男,1985年生,工程师,主要从事于消防、工业阻燃防护面料的研究开发,1527802971@qq.com

隔热层面料是消防员灭火防护服、隔热防护服等防护服组合产品中提供隔热保护的材料层,通常要求具有阻燃、耐高温、高隔热等功能特点^[1-3]。防护服隔热层面料多采用阻燃、耐高温的高性能纤维制备,目前市场上的隔热层面料主要为间位芳纶和对位芳纶混纺水刺非织造布。聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维因具有阻燃、耐高温、高强、高模等优异特性,已成为潜在的开发隔热层面料的材料。目前,PBO 纤维已在一些国家的防护服外层面料中得以开发应用,如日本小林防火服公司开发了基于 PBO 纤维的更轻薄的防灾服基布^[4];韩国 Shinkey 公司制备的 PBO 消防服也已在市场上销售使用。我国 PBO 纤维也已完成了产业化开发,并实现了部分产品的产业化应用,但尚未出现在消防隔热层面料和消防服装领域的相关应用。基于此,本文进行 PBO/间位芳纶混纺水刺非织造布产品的开发试验,并对制备的用作隔热层面料的 PBO/间位芳纶混纺水刺非织造布进行性能测试与分析,以期探究 PBO 纤维在隔热层面料开发中的应用潜力。

1 材料性能

PBO 纤维是一种具有高力学性能和耐热性能的纤维材料,其极限氧指数(LOI)高达 68%,在火焰中表现出如金属般无燃烧、无熔缩特性,属于不燃的有机纤维。PBO 纤维在空气中的耐热分解温度高达 650 ℃,其在 500 ℃及以上温度下的热失重率明显低于其他高性能有机纤维。此外,PBO 纤维的热传导率高,达 53 W/(m·K),是铁热传导率的 5 倍,其断裂强度高达 37.0 cN/dtex,接近对位芳纶强度的 2 倍。PBO 的化学结构式见图 1。

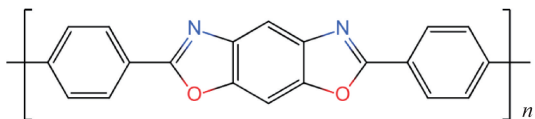


图 1 PBO 的化学结构式
Fig. 1 Chemical structure formula of PBO

芳纶的综合性能优异,是高性能有机纤维领域市场应用最广泛的纤维品种。芳纶又分为间位芳纶(聚间苯二甲酰对苯二胺纤维,又称芳纶 1313)和对位芳纶(聚对苯二甲酰对苯二胺纤维,又称芳纶 1414)2 种。间位芳纶的 LOI 为 28%,其在闪火下具

有缩胀碳化特性,因而具有优异的热阻隔性能,且耐高温性能优良,热分解温度达 400 ℃。对位芳纶的 LOI 为 29%,具有优良的耐火性能,其在火焰中不收缩或产生极小的收缩,热分解温度高达 550 ℃。芳纶纺织品的综合性能优异,在军警用和工业用阻燃热防护服领域被广泛应用。

PBO 纤维与芳纶的物理性能对比如表 1 所示。

表 1 PBO 纤维与芳纶的物理性能对比

Tab. 1 Comparison of physical properties of PBO fiber and Aramid fiber

指标	PBO 纤维	对位芳纶	间位芳纶
密度/(g·cm ⁻³)	1.54	1.45	1.38
断裂强度/(cN·dtex ⁻¹)	37.0	19.0	4.5
断裂模量/(cN·dtex ⁻¹)	1 150	850	140
断裂伸长率/%	3.5	2.4	22.0
回潮率/%	2.0	4.5	4.5
热分解温度/℃	650	550	400
LOI/%	68	29	28

2 产品设计及试验方案

目前,市场上常用的隔热层面料多为对位芳纶/间位芳纶混纺水刺非织造布(对位芳纶与间位芳纶质量比为 20/80),采用这类隔热层面料制备的防护服能够基本满足消防标准的性能要求。与对位芳纶相比,PBO 纤维的主要物理性能更优(表 1)。为探究 PBO 纤维在隔热层面料开发中的性能表现,本文设计制备了 3 组不同混纺比的 PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布,再将其分别作为灭火服组合的隔热层面料,制备不同的灭火服组合。PBO 纤维与间位芳纶的质量比分别为 10/90、20/80 和 30/70,设计面密度均为(50±5)g/m²。试验用 PBO 纤维采用 Toyobo MC 公司的 Zylon AS 品牌纤维。

对制备好的 PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布及其作为隔热层面料制备的灭火服组合进行热力学性能测试,并与市售常规芳纶隔热水刺非织造布(对位芳纶与间位芳纶质量比为 20/80)及其作为隔热层面料制备的灭火服组合进行性能对比。按照 XF 10—2014《消防员灭火防护服》标准^[5]要求,分别进行单层非织造布和灭火服组合性能测试,以探究不同混纺比 PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的性能和应用潜力。

2.1 热稳定性能

采用 XF 10—2014《消防员灭火防护服》标准中规定的热稳定性能试验方法,按附录 B 分别在

(260±5)℃和(300±5)℃的温度条件下,测试 PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布和市售常规芳纶水刺非织造布试样的热稳定性能,测试结果如表 2 所示。

表 2 不同水刺非织造布试样的热稳定性能测试结果

Tab. 2 Thermal stability test results of different spunlaced felt samples

试样	(260±5)℃		(300±5)℃	
	尺寸变化率/%	外观	尺寸变化率/%	外观
PBO 纤维/间位芳纶(10/90)	-0.58~0.79	无明显变化	-1.14~1.46	无明显变化
PBO 纤维/间位芳纶(20/80)	-0.55~0.33	无明显变化	-1.11~1.47	无明显变化
PBO 纤维/间位芳纶(30/70)	-0.38~0.39	无明显变化	-1.03~1.21	无明显变化
对位芳纶/间位芳纶(20/80)	-1.03~0.70	无明显变化	-1.13~2.20	无明显变化

由表 2 可以看出,PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布和市售常规芳纶水刺非织造布试样受热后的尺寸变化率相差不大,均具有较好的热稳定性能。

2.2 阻燃性能

采用 XF 10—2014《消防员灭火防护服》标准中

规定的阻燃试验方法,根据 GB/T 5455—1997^[6]进行 PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布和市售常规芳纶水刺非织造布试样的阻燃性能测试,测试结果如表 3 所示。

表 3 不同水刺非织造布试样的阻燃性能测试结果

Tab. 3 Flame retardancy test results of different spunlaced felt samples

试样	续燃时间/s		阴燃时间/s		损毁长度/mm		特性
	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	
PBO 纤维/间位芳纶(10/90)	0	0	0	0	18~21	18~21	遇火产生较大的收缩,经火焰灼烧后,过火区域仍具有较高的强度
PBO 纤维/间位芳纶(20/80)	0	0	0	0	11~13	15~18	遇火收缩较小,经火焰灼烧后,过火区域仍具有较高的强度
PBO 纤维/间位芳纶(30/70)	0	0	0	0	5~8	5~8	遇火无明显收缩,经火焰灼烧后,过火区域仍具有较高的强度
对位芳纶/间位芳纶(20/80)	0	0	3	3	48~53	52~61	遇火较小收缩,经火焰灼烧后,过火区域强度损失严重

由表 3 可以看出,PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布和市售常规芳纶水刺非织造布试样的续燃时间均为 0 s,市售常规芳纶水刺非织造布因含有 20%的对位芳纶而具有 3 s 的阴燃时间。损毁长度方面,PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的损毁长度与市售常规芳纶水刺非织造布的相比明显减小,这是因为 PBO 纤维具有耐火灼烧特性,燃烧 12 s 后,仍然保持较高的强度。

2.3 热防护性能

为探究 3 组不同混纺比 PBO 纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的热防护性能,用其作为隔热层面料,制作了 8 种不同的灭火服组合,测试和评价每种灭火服组合的热防护性能(thermal protective performance,

TPP)值和热防护性能评估(thermal performance estimate,TPE)值。本文采用图 1 所示的 2 种不同的材料排列方式,制作了 4 组共 8 种灭火服组合。所得 8 种不同灭火服组合的结构组成及规格参数如表 4 所示。

2.3.1 TPP 值

XF 10—2014《消防员灭火服防护服》采用 TPP 值作为防护服装热防护性能的评价指标。TPP 值测试方法:将待测灭火服组合暴露在总热通量 F 为 (84 ± 2) kW/m² 的对流热源和辐射热源下,测定引起皮肤二度灼伤的时间 t ,TPP 值为 F 与 t 的乘积。灭火服组合的 TPP 值越高,热防护性能越好^[7]。

8 种不同灭火服组合的 TPP 值测试结果如图 3 所示。

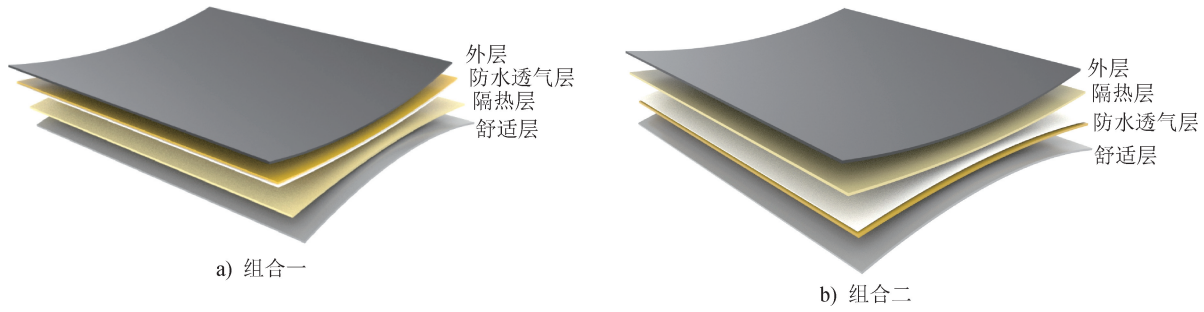


图 2 2 种不同的材料排列方式

Fig. 2 Arrangement of materials for two different combinations

表 4 8 种不同灭火服组合的结构组成及规格参数

Tab. 4 Structure composition and specification parameters of 8 different combinations of fire fighting suits

编号	结构组成	原料及其质量比	面密度/(g·m ⁻²)	组合面密度/(g·m ⁻²)	材料排列方式
A	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	528	组合一
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	隔热层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)	71		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
a	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	528	组合二
	隔热层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)	71		
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
B	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	507	组合一
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	隔热层	PBO 纤维/间位芳纶(10/90)	50		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
b	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	507	组合二
	隔热层	PBO 纤维/间位芳纶(10/90)	50		
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
C	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	510	组合一
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	隔热层	PBO 纤维/间位芳纶(20/80)	53		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
c	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	510	组合二
	隔热层	PBO 纤维/间位芳纶(20/80)	50		
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
D	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	509	组合一
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	隔热层	PBO 纤维/间位芳纶(30/70)	51		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		
d	外层	间位芳纶/对位芳纶(95/5)	203	509	组合二
	隔热层	PBO 纤维/间位芳纶(30/70)	51		
	防水透气层	对位芳纶/间位芳纶(20/80)+PTFE	132		
	舒适层	间位芳纶/阻燃黏胶(50/50)	122		

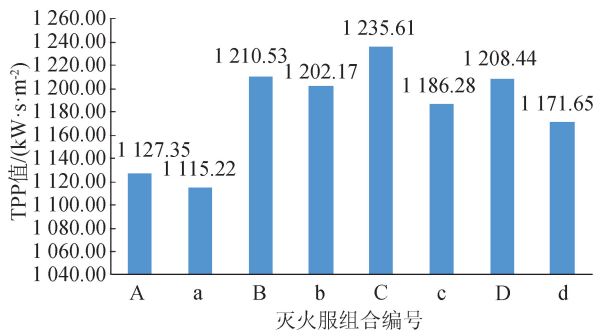


图3 8种不同灭火服组合的TPP值
Fig. 3 TPP values for 8 different combinations of fire fighting suits

由图3可以看出,相对于组合二,组合一结构灭火服组合的TPP值更大,表明将隔热层面料放置于灭火服组合的第三层,对应试样的热防护性能更好;其他条件相同的情况下,含PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的灭火服组合(组合B、b、C、c、D和d)的TPP值均大于含常规芳纶水刺非织造布的灭火服组合(组合A和a),且组合C的TPP值最大,热防护性能最好。

2.3.2 TPE值

热防护性能评估是基于TPP值测试演进而来的热防护评价方法。测试灭火服组合热防护性能的过程中,聚集在材料内外层之间的大量热量会向内层和外层两个方向传递(图4)。从本质上而言,TPP值反映的是材料的传热性能,其未考虑热暴露后试样中蓄积的热量会向内层继续传递给穿着者。若此时未能及时脱掉防护服,很可能造成人体快速灼伤。TPE值则考虑了热暴露后试样中蓄积的热能,预测造成二度烧伤的能量。TPE值测试方法:将试样水平放置并暴露于总热通量为(84±2) kW/m²的对流辐射组合热源下,使用铜量热传感器测量并记录试样温度随时间的变化情况,结合铜的热学性能参数将温度变化情况换算为透过试样传递的热能,得到热能随时间变化的传热反应曲线。TPE值用铜量热传感器在移除规定的对流辐射热后记录的传热反应曲线与Stoll曲线相切(或近似相切)时的暴露时间与总热通量的乘积表示,用于反映灭火服的实际热防护时间。

8种不同灭火服组合的TPE值测试结果如图5所示。

由图5可以看出,相对于组合二,组合一结构灭

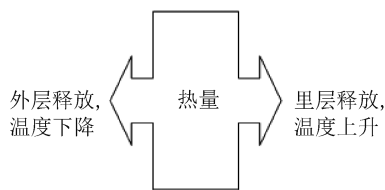


图4 灭火服内热量传递示意图
Fig. 4 Diagram of heat transfer in fire suit

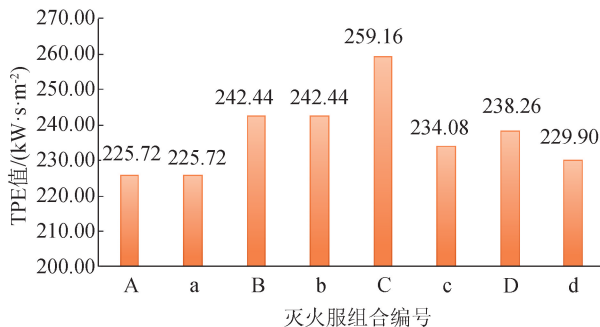


图5 8种不同灭火服组合的TPE值
Fig. 5 TPE values for 8 different combinations of fire fighting suits

服组合的TPE值更大,表明将隔热层面料放置于灭火服组合的第三层,对应试样的热防护性能更好;含PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布的灭火服组合(组合B、b、C、c、D和d)的TPE值均大于含常规芳纶水刺非织造布的灭火服组合(组合A和a),且组合C的TPE值最大,热防护性能最好。该测试结果与TPP值的测试结果一致。

3 结论

(1)热稳定性测试结果显示,PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织布具有与对位芳纶/间位芳纶混纺水刺非织布相当的耐高温特性,经热稳定性测试后,其尺寸变化率小,外观无明显变化,这是由于对位芳纶和PBO纤维的热稳定性均非常好所致。

(2)阻燃性能测试结果表明,PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布具有更好的阻燃性能,且随着PBO纤维质量分数的提高,非织造布的损毁长度明显减小。火焰灼烧后,PBO混纺水刺非织造布的过火区域仍具有较高的强度,这是由于PBO纤维具有优异的力学性能和耐火烧特性所致。

(3)热防护性能测试结果表明,以PBO纤维/间位芳纶混纺水刺非织造布作为隔热层面料的灭火服组合表现出良好的热防护效果,其TPP值和TPE值

均高于以常规芳纶水刺非织造布作为隔热层面料的灭火服组合,没有因 PBO 纤维的高导热率而降低灭火服组合的热防护性能,且 PBO 纤维与间位芳纶质量比为 20/80 的水刺非织造布的热防护性能最佳。PBO 纤维与间位芳纶质量比为 30/70 的水刺非织造布的热防护性能下降,可能是 PBO 纤维导热率高导致的。

添加一定比例的 PBO 纤维制备 PBO 纤维混纺水刺非织造布,将其用作灭火服的隔热层,能够有效促进防护服整体热防护性能的提升。与此同时,PBO 纤维优异的耐热性能和力学性能可赋予面料独特的耐火烧蚀和力学防护特性。基于此,PBO 纤维在高性能灭火防护服的开发应用领域具有良好的前景。然而,PBO 纤维也面临着价格高昂,耐光老化性差等问题,故后续产品在设计开发中需重点考量这方面问题。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 张慧,刘献飞,燕红雁,等. 消防服用蓄热调温热防护材料的研究 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41 (6): 17-24.
- [2] 任铃俐,阮航,王维超,等. 高性能、低成本灭火防护服隔热毡用水刺非织造材料的制备及性能研究 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40 (9): 14-21.
- [3] 代宏宇,周梦娟,张军英,等. 阻燃黏胶/腈氯纶服用织物的制备与性能 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48 (1): 17-24.
- [4] 滨竹. 日本制服中心提出 21 世纪消防防灾制服的提案 [J]. 高科技纤维与应用, 1999, 24(1): 45-46.
- [5] 全国消防标准化技术委员会消防员防护装备分技术委员会. 消防员灭火防护服: XF 10—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [6] 全国个体防护装备标准化技术委员会. 防护服装热防护性能测试方法: GB/T 38302—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [7] 刘亚光. 消防员灭火防护服减层结构及其热防护性能评价 [J]. 产业用纺织品, 2024, 42 (3): 44-49.
- [3] 胡顺强. 化学防护服的规范使用 [J]. 化学工程与装备, 2022(6): 248-249.
- [4] 田苗,王云仪,张向辉,等. 高温防护服的舒适工效性能评价与优化对策 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39 (6): 754-759.
- [5] 郭晶,李丽,樊争科,等. 个体安全防护用纺织品研究 [J]. 针织工业, 2022(12): 1-5.
- [6] 吕凯敏,戴宏钦. 化学防护服的研究进展 [J]. 纺织学报, 2020, 41(5): 191-196.
- [7] 吴红,李丽,樊争科,等. 化学防护服的研究现状与发展趋势 [J]. 合成纤维, 2021, 50(12): 27-35.
- [8] OSVALDOVÁ M L, KUBÁS J, HOLLÁ K, et al. The influence of mechanical, physical and chemical influences on protective clothing [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (16): 9123.
- [9] WANG C L, WANG X. Monitoring muscle fatigue based on characteristics of muscle thickness measured by fabric strain sensors [J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2024, 41(1): 15-20.
- [10] 李小银. 透气式防毒服的研究与发展 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40 (11): 1-8.
- [11] MUNEVAR-ORTIZ L, NYCHKA A J, DOLEZ I P. Trapezoidal tearing behavior of laminated fabrics used in firefighters' protective clothing [J]. Polymer Composites, 2024, 45 (2): 1128-1138.
- [12] 卢聪,王怀璋,李贺希,等. 化学防护服及材料研究进展 [J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(2): 86-92.
- [13] GUO Q, HUANG Y, XU M D, et al. PTFE porous membrane technology: a comprehensive review [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 664: 121115.
- [14] 马艳丽,杨琳,邵亚文,等. 医用一次性防护服热湿舒适性研究现状 [J]. 山东纺织科技, 2023, 64 (5): 51-53.
- [15] 龚竹云,朱思悦,刘翠娥,等. 医用一次性防护服使用现状调查及改进需求分析 [J]. 医疗卫生装备, 2023, 44 (6): 84-87.
- [16] FENG S, ZHONG Z, WANG Y, et al. Progress and perspectives in PTFE membrane: preparation, modification, and applications [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 549: 332-349.

(上接第 32 页)