

阻燃隔热防护面料的泡沫整理制备

李佳广^{1,2}, 巩继贤^{1,2}, 李秋瑾^{1,2}, 刘秀明^{1,2}

(1.天津工业大学 纺织科学与工程学院,天津 300387;

2.天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室,天津 300387)

摘要:开发成本低廉的阻燃隔热面料,替代价格昂贵的高性能纤维面料,对于家庭用消防装具的普及和降低消防服装成本有着积极意义。文中在对无机纳米颗粒材料进行表面结构调控和对玻璃纤维进行表面处理的基础上,由泡沫整理实现玻璃纤维织物上黏弹性材料的薄层涂敷,通过对氢氧化铝和玻纤维织物的表面处理,在玻纤维织物表面应用足量隔热材料时,保证氢氧化铝与有机聚合物材料在玻纤维织物表面的耐摩擦牢度和面料的阻燃性能及热防护性能达到要求。结果表明,制备得到的阻燃隔热防护面料,燃烧后碳长2.0 mm,阴燃及续燃时间为0,且没有溶滴产生;面料热防护性能为35.80 J/cm²·s,达到芳纶的热防护水平;面料功能层的干摩为4级,湿摩为3级。

关键词:阻燃;隔热;热防护;泡沫整理;玻璃纤维

中图分类号:TS 195

文献标志码:A

文章编号:1000-4033(2024)08-0036-06

Foam Finishing and Preparation of Flame Retardant and Heat Insulation Protective Fabric

Li Jiaguang^{1,2}, Gong Jixian^{1,2}, Li Qiujin^{1,2}, Liu Xiuming^{1,2}

(1.School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2.Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract:The development of low-cost flame retardant and thermal insulation fabrics to replace expensive high-performance fiber fabrics is of positive significance for the popularization of household fire-fighting equipment and reducing the cost of fire-fighting clothing. In this paper, on the basis of the regulation of the surface structure of inorganic nanoparticle materials and the surface treatment of glass fiber, the thin layer coating of viscoelastic material on glass fiber fabric is realized by foam finishing, and through the surface treatment of aluminum hydroxide and glass fiber fabric, it ensures that sufficient heat insulation materials are applied on the surface of glass fiber fabric, and the rubbing fastness of aluminum hydroxide and organic polymer on the surface of fiberglass fabric and the flame retardancy and thermal protection of the fabric are improved. As a result, the flame retardant and heat insulating protective fabric is prepared, the carbon length after combustion is 2.0 mm, the smoldering and reburning time is 0, and there are no solution droplets. The thermal protection property of the fabric is 35.80 J/cm²·s, which reaches the thermal protection level of aramid. In addition, the dry friction fastness of the functional layer of the fabric is grade 4, and the wet friction fastness is grade 3.

Key words:Flame Retardant; Thermal Insulation; Thermal Protection; Foam Finishing; Glass Fiber

火灾属于灾害事件^[1-3],在火场环境中,无论是消防人员的救援工作还是遇险人员的逃生自救,都离不开阻燃隔热防护制品^[4-5]。芳纶是制备阻燃隔热防护面料使用最多的纤维材料^[6-8],但是高昂的成本不利于其推广应用。因此,研究人员不断尝试从多个方面降低面料生产成本,如将芳纶与其他常规阻燃

基金项目:天津自然科学基金项目(18JCYBJC89600);新疆自治区重大科技专项(2016A03006-3);中国纺织工业联合会科技指导性项目(2017011)。

作者简介:李佳广(1996—),男,硕士研究生。主要从事纳米材料与功能纺织材料方面的研究。

通讯作者:巩继贤(1975—),男,教授,博士生导师。E-mail:gongjixian@126.com。

纤维混纺织造来降低成本^[9]。也有研究者通过涂层处理提升芳纶织物的性价比^[10],以减少芳纶纤维用量^[11-12]。

寻找芳纶织物的替代产品,也是近年来大家比较关注的思路^[13]。比如用喷涂法在棉织物上形成阻燃超疏水涂层,使其阻燃和隔热性能得以提升^[14];采用刮涂方法将有机硅树脂在玻纤织物形成涂层,不仅使玻纤织物具备了服用性能,还使该涂层织物具备良好的隔热防护性能^[15-16]。尽管这些研究降低了阻燃隔热防护面料的生产成本,但产品热防护功能仍有待提升。

本研究以玻纤织物为基布,以纳米氢氧化铝为阻燃隔热材料,以绿色环保的水性聚氨酯为黏合剂,采用泡沫整理方法,制备成本较低的阻燃隔热面料。由于玻纤织物光滑的表面及氢氧化铝易团聚的特点,直接进行涂层,材料间的摩擦系数小,结合不牢固,需要对玻纤织物以及氢氧化铝进行改性处理。酸碱刻蚀处理是通过酸或碱在玻纤纤维表面经过化学腐蚀在纤维表面形成凹陷或微孔^[17-18]。当玻璃纤维与树脂基体复合时,一些大分子结构的高聚物链段会进入到空穴中,起到类似于锚固作用,增加了玻纤与聚合物之间的界面结合力^[19]。利用氢氧化铝粒子及玻纤织物表面的活性基团比如羟基,通过特定的化学反应,在其表面引入偶联剂,有机小分子或高分子化合物,这些化合物通过共价键牢固地结合在无机纳米粒子表面^[20]。由此探究其氢氧化铝颗粒表面调控和玻纤织物表面处理对面料性能的影响。

1 试验

1.1 材料及设备

材料:玻纤织物(克质量为 168

g/m²,厚度 0.16 mm,中国巨石集团),芳纶(克质量 216 g/m²,江苏昆山保扬新型材料科技有限公司);水性聚氨酯(固含量 60%,东莞宝景化工有限公司),纳米级氢氧化铝(扬州帝蓝化工原料有限公司),纳米二氧化硅(SJ-40,山东潍坊三佳纳米有限公司);PST-Q02,南京保客特新材料有限公司),交联剂 BI201(上海俊彩材料科技公司),十二烷基硫酸钠(天津百伦斯生物技术公司),硅烷偶联剂 KH-550(江苏晨光公司),海藻酸钠(天津市科密欧化学试剂有限公司),去离子水(试验室自制)。

设备:LTE-S87609 涂层机(瑞士 Werner Mathis 公司),TPS2500S 热常数分析仪(德国 Hot Disk 公司),Phenom XL 飞纳台式扫描电镜(荷兰 Phenom-World 公司),Nicolet iS 50 傅立叶红外(美国 Thermo Fisher Scientific 公司),Y571B 摩擦牢度仪器(浙江温州方圆仪器有限公司),Litesizer 500 动态光散射(Anton Paar 公司),VFC 垂直燃烧测试仪(美国 LabsMate 公司)。

1.2 玻纤织物表面处理

碱刻蚀玻纤(JG):将裁定好尺寸的玻纤织物(GF)浸泡在浓度为 150 g/L 的氢氧化钠溶液中,并在 80 ℃下加热 40 min,对玻纤织物进行碱刻蚀,然后洗涤、干燥。

玻纤改性(KG)和碱刻蚀玻纤改性(JKG):将玻纤织物(GF)和经碱刻蚀后的玻纤(JG)平放在已水解的硅烷偶联剂溶液中浸泡 1 h,取出预制件在室温下自然晾干,再置于 100 ℃鼓风烘箱中干燥 3 h,使其在高温下与硅烷偶联剂反应完全,然后洗涤、干燥。

SiO₂负载玻纤(SJG 和 PSTG)^[21]:分别将适量纳米 SiO₂(SJ-40)和 SiO₂(PST-Q02)悬浮液置于搅拌器

搅拌 1 h 后,将玻纤织物在 SiO₂ 悬浮液中浸泡 30 min,并在 100 ℃下干燥 3 h 后,再将其浸入硅烷偶联剂 KH-550 溶液中 15 min,取出并再次烘干 1 h,洗涤、干燥。

1.3 氢氧化铝表面处理

硅烷偶联剂 KH-550 改性氢氧化铝:配制 Al(OH)₃ 含量为 20% 的浆料,滴加适量的水解硅烷偶联剂 KH-550 溶液(乙醇:水:硅烷偶联剂的质量比为 72:8:20),并搅拌加热至预设温度。搅拌一段时间后过滤、干燥,再用无水乙醇洗涤、干燥。

油酸改性氢氧化铝:称取了 Al(OH)₃ 质量浓度为 5% 的油酸,用适量乙醇稀释并与 Al(OH)₃ 充分混合,并搅拌加热至预设温度。继续搅拌一段时间后过滤、干燥,然后再用无水乙醇洗涤、干燥。

1.4 整理液配制

在十二烷基硫酸钠溶液中依次加入 Al(OH)₃、色膏溶液、水性聚氨酯、交联剂 BI201、海藻酸钠溶液,混合均匀后,提高搅拌器转速至 2 000 r/min,搅拌时间为 12 min,发泡比为 2~3,制得泡沫整理液。整理液处方见表 1。

表 1 工作液配方

试剂名称	浓度/(g·L ⁻¹)
十二烷基硫酸钠	6.0
海藻酸钠	4.0
色膏溶液	10.0
交联剂 BI201	2.5
水性聚氨酯	50.0
表面处理前后的氢氧化铝	100.0

1.5 面料制备

将上述配制的泡沫整理液使用 LTE-S87609 涂层机刮涂到经过乙醇洗涤处理后的玻纤织物上,涂层厚度为 1 mm。然后在 100 ℃下预烘 30 min,然后经 160 ℃焙烘处理,制得阻燃隔热防护的玻纤织

物。将 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层玻纤的面料命名为 ATB, KH-550 改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层玻纤的面料命名为 KATB, 油酸改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层玻纤的面料命名为 YATB。

1.6 性能测试

1.6.1 结构表征

采用 Nicolet iS 50 傅立叶红外表征 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 改性和玻纤织物表面改性; 采用 Litesizer 500 动态光散射表征 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 SiO_2 粒径分布; 采用 Phenom XL 飞纳台式扫描电镜观察玻纤织物及制备面料的表面形态。

1.6.2 面料热性能表征

阻燃性能: 参照 GB/T 5455—2014《纺织品 燃烧性能 垂直方向损毁长度、阴燃和续燃时间的测定》标准, 使用 VFC 垂直燃烧测试仪测试, 点火燃烧, 续燃和阴燃结束后, 记录损毁长度, 重复 3 次, 取平均值作为最终结果。

热导率: 使用 TPS2500S 热常数分析仪对整理后的织物进行热导率测试。

热防护性能: 试验使用 701-D-163-1 热防护性能仪, 参照 ISO 17492《隔热和防火服 暴露于火和辐射热时防护服的热传递的测定》标准测试。

1.6.3 结合牢度测试

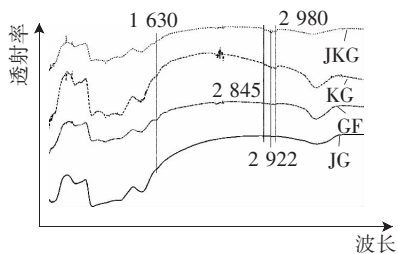
参照 ISO 105-X12:2001《纺织品 色牢度试验 第 X12 部分: 耐摩擦色牢度标准》, 使用 Y571B 摩擦牢度仪器进行测试。

2 结果与讨论

2.1 玻纤基材和功能材料的表面结构调控

2.1.1 玻纤表面处理

为研究表面处理后玻纤织物表面的化学结构变化情况, 做了如下红外测试, 测试结果如图 1 所示。



注: 图中数据单位为 cm^{-1} 。

图 1 红外光谱测试

由图 1 可知, 与 GF 相比, KG 和 JKG 发生明显的变化, 硅烷偶联剂 KH-550 改性玻纤后样品 (KG、JKG) 在 1630 cm^{-1} 处物理吸附水的红外吸收峰消失或减弱, 在 2930 cm^{-1} 与 2854 cm^{-1} 处 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2-$ 吸收峰增强, 在 2980 cm^{-1} 处出现了 NH_4^+ 的特征峰。这表明硅烷偶联剂在玻纤织物表面形成了化学键。由图 1 可知, JG 和 GF 红外曲线有明显的不同。JG 在 2980 、 2930 、 2854 、 1630 cm^{-1} 处的峰消失, 这表明未经过任何处理的玻纤 (GF) 表面含有杂质, 碱处理后可以去除这些杂质。

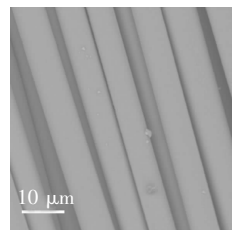
玻纤织物碱刻蚀和纳米粒子负载以及 KH-550 改性后织物形貌的测试结果如图 2 所示。

由图 2 可知, KH-550 改性玻纤 (KG) 和玻纤 (GF) 对比, 从形貌上未发生任何变化, 并且纤维表面是光滑的, 这样光滑的表面不利于和树脂的结合。碱刻蚀玻纤 (JG) 表面变得粗糙, SJG 和 PSTG 采用两种不同的纳米 SiO_2 对玻纤织物进行负载, 由电镜图可知, 纳米二氧化硅成功负载到玻纤织物上, 且负载后表面变粗糙。

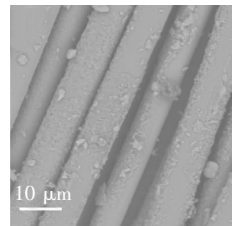
2.1.2 氢氧化铝表面处理

为了研究 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 表面处理后结构上的变化进行红外线测试, 测试结果如图 3 所示。

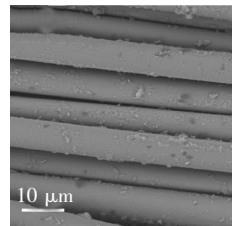
由图 3 可以看出, KH-550 改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在 $1300\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的峰, 这是 KH-550 中碳链



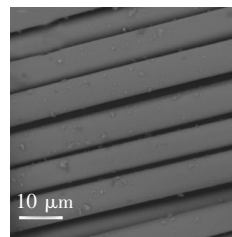
(a)KG



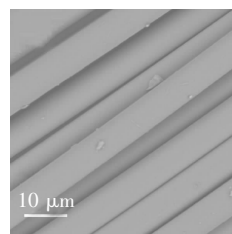
(b)JG



(c)SJG

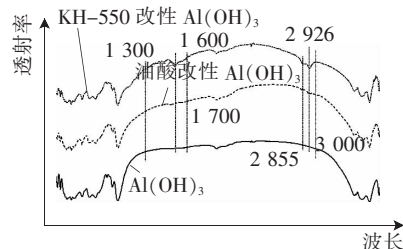


(d)PSTG



(e)GF

图 2 玻纤表面粗糙的形貌



注: 图中数据单位为 cm^{-1} 。

图 3 红外光谱测试

的特征吸收峰, 在 3000 cm^{-1} 附近也出现了 NH_4^+ 的特征峰^[22]。在油酸

改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 红外光谱中,明显在 $2\,926\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,855\text{ cm}^{-1}$ 两处出现了一 $(-\text{CH}_2-)_n$ 的不对称和对称振动峰,并且与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 相比,油酸改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在 $1\,600\text{ cm}^{-1}$ 左右出现的特征峰,这表明 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 表面 $-\text{COO}-\text{Al}^{3+}$ 的形成。上述特征峰的出现表明 KH-550 以及油酸对 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 表面结构成功地进行了调控。

2.2 面料的热防护性能

2.2.1 面料阻燃性能

探究分别采用 KH-550 和油酸改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层 GF 后,对制备面料燃烧性能的影响,测试结果见表 2。

由表 2 可知,经过油酸和 KH-550 改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层制备的面料阻燃性能符合 GA10—2014 标准要求,但是阻燃性能 $\text{YATB} > \text{ATB} > \text{KATB}$ 。分析原因氢氧化铝颗粒大小对其阻燃性影响较大,颗粒越大阻燃性越差^[23]。如图 4 所示,经过油酸改性的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的颗粒粒径最小,经过 KH-550 改性的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的粒径最大。

2.2.2 面料隔热性能

面料的隔热性能是由玻纤基材和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层共同影响的,探究了对玻纤基材和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的表面处理对隔热性能的影响,结果如图 5 所示。

玻纤织物表面处理前后对分析的热导率如图 5a 所示,玻纤织物经过处理后,热导率发生显著变化。热导率值由大到小比较为 $\text{GF} > \text{KG} > \text{PSTG} > \text{SJG} > \text{JG} > \text{JKG}$ 。分析 KG 热导率低于 GF 可能归因于玻纤表面包裹或者嫁接一层 KH-550 分子,削弱了热量的传递,PSTG、SJG 和 JG 热导率值降低的共同原因是玻纤织物表面粗糙,且粗糙程度 $\text{PSTG} < \text{SJG} < \text{JG}$,如图 2b、2c、2d

表 2 改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 面料的阻燃性能

面料	碳长/mm	续燃/s	阴燃/s	融滴
ATB	1.1	0	0	无
KATB	2.0	0	0	无
YATB	0.9	0	0	无
GA10—2014《消防员灭火防护服》	≤ 100.0	≤ 2	≤ 2	无

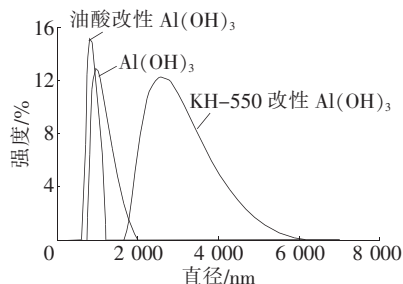
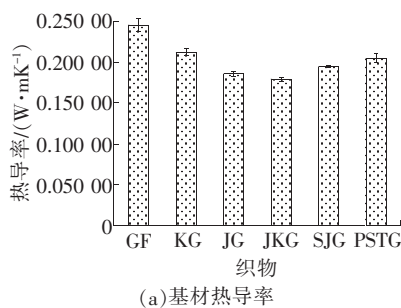


图 4 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粒径

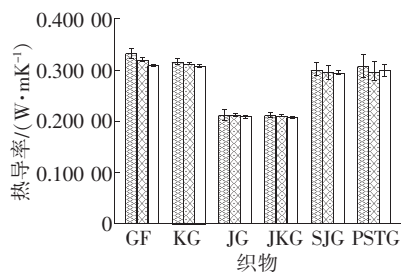
所示。JKG 是硅烷偶联剂 KH-550 对碱刻蚀玻纤织物(JG)进行表面改性,所以热导率最低。通过 JG、KG、GF 的热导率值对比以及 JKG、KG、GF 的热导率值对比,表明碱处理对玻纤基材(GF)的热导率影响高于硅烷偶联剂 KH-550 改性。SJG 的热导率值低于 PSTG,是由于 SJG 中 SiO_2 (SJ-40)粒子粒径低于 PSTG 中负载的 SiO_2 (PST-Q02)粒子,致使 SJG 中 SiO_2 粒子负载量高于 PSTG^[21],如图 2c、2d 所示, SiO_2 粒子粒径分布如图 6 所示。

面料热导率如图 5b 所示,经过碱处理后涂层织物的热导率最低。原因在于碱刻蚀玻纤是双面刻蚀的,而浆料泡沫涂层是单面涂层,所以碱刻蚀玻纤对涂层织物的热导率也具有重要影响。

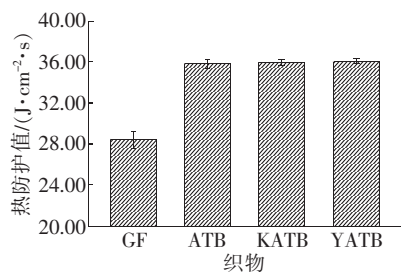
由图 5a 与图 5b 对比发现,GF 导热率为 $0.244\,53\text{ W/mK}$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层 GF 后热导率增大至 $0.331\,70\text{ W/mK}$,表明经 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层玻纤织物后导热性增强,隔热性变差。说明 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 具有很强的导热作用。虽然经过硅烷偶联剂 KH-550 和油酸改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 后,热导率值要比未改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 低,但是从成本等其他方面考虑可忽略其变化。改



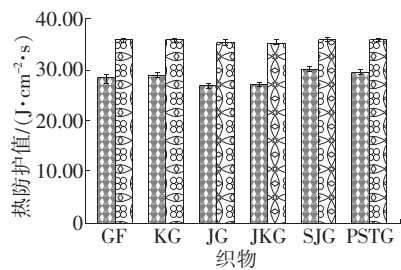
(a) 基材热导率



■ $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层;
▨ KH-550 改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层;
□ 油酸改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层。
(b) 面料热导率



(c) 改性 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层后热防护值



■ 不同表面处理的玻纤;▨ $\text{Al}(\text{OH})_3$ 涂层。
(d) 面料热防护值

图 5 隔热性能

性后的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在涂层玻纤后热导率产生细小变化的原因是涂层薄膜形成很多孔隙结构,其中油酸

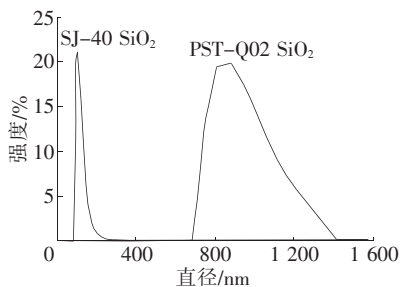
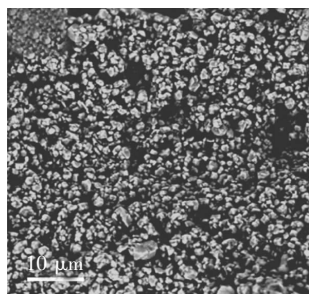
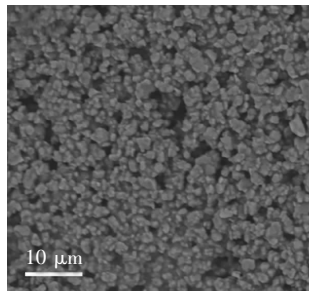


图6 SiO₂ 粒径分布

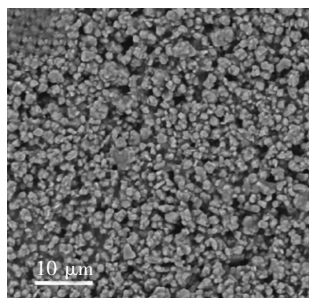
改性后的Al(OH)₃ 涂层玻纤后形成的孔隙结构更多,因此热导率相对于硅烷偶联剂 KH-550 改性Al(OH)₃ 后的热导率更低些。面料表面孔隙如图7所示。



(a) Al(OH)₃ 涂层



(b) 硅烷偶联剂 KH-550 改性Al(OH)₃ 涂层



(c) 油酸改性Al(OH)₃ 涂层

图7 涂层面料孔隙

由图5c可以得知,不同织物的热防护性能,其中GF最低为28.40 J/cm²·s,经过Al(OH)₃ 涂层后,织物的热防护性能得到较大提高,为35.80 J/cm²·s。原因为Al(OH)₃ 在

高温下,受热脱水,产生的水蒸气挥发,带走一大部分热量。受热分解产生的氧化铝薄膜阻止火焰直接接触到玻纤,使玻纤更好地阻挡热量的传递,因此Al(OH)₃ 涂层后织物的热防护性能得到较大提高。在图5c中可以发现,Al(OH)₃ 经过硅烷偶联剂KH-550 和油酸改性后,热防护性能未有变化,表明对Al(OH)₃ 的表面改性,对面料的热防护值没有影响。

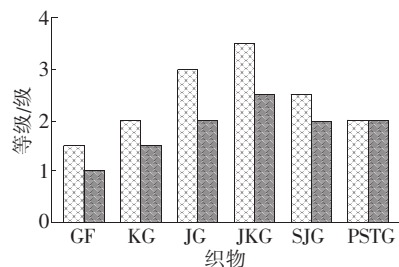
图5d为不同表面处理的玻纤及其Al(OH)₃ 涂层的热防护性能,其中玻纤进行不同表面处理后,热防护值变化较大。但是表面处理后的玻纤织物经过氢氧化铝涂层后热防护值趋于一致。

2.3 面料功能层的耐摩擦牢度

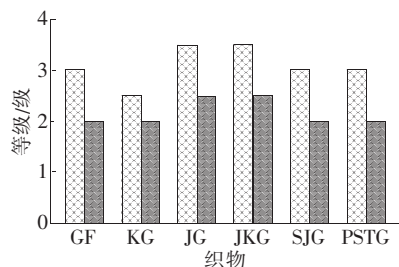
研究了改变玻纤织物的形貌增大接触面积以及嫁接基团等方式对整理后织物的摩擦牢度的影响,按ISO 105-X12:2001 标准规定的方法进行,结果如图8所示。

由图8a可知,Al(OH)₃ 涂层玻纤织物(GF)的干摩为1~2级,湿摩为1级;Al(OH)₃ 涂层JG制备的面料耐摩擦牢度最佳,其原因是玻纤织物经过碱处理后增大了与涂层的接触面积;通过对玻纤进行硅烷偶联剂KH-550 改性后,玻纤和水性聚氨酯更容易形成共价交联。并且从图8b、8c中可以得知,玻纤粗糙度的提升即碱处理玻纤和在玻纤上负载纳米SiO₂ 提高表面积,对摩擦牢度有极其重要的影响,即提升摩擦牢度。玻纤表面粗糙形貌如图2所示。

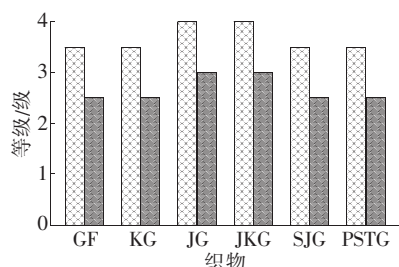
由图8可以看出,耐摩擦牢度为:油酸改性Al(OH)₃>硅烷偶联剂KH-550 改性Al(OH)₃>未改性Al(OH)₃。其中油酸改性Al(OH)₃ 涂层碱处理玻纤的耐摩擦牢度最佳,干摩为4级,湿摩为3级。而硅



(a) Al(OH)₃ 涂层



(b) KH-550 改性Al(OH)₃ 涂层



(c) 油酸改性Al(OH)₃ 涂层

□,干摩;■,湿摩。

图8 耐摩擦牢度

烷偶联剂KH-550 改性Al(OH)₃ 后,烷基链一端嫁接到Al(OH)₃ 颗粒上,另一端的氨基可以与水性聚氨酯共价交联,从而提高涂层的耐摩擦牢度;油酸改性Al(OH)₃ 后可以提高Al(OH)₃ 的分散性,并且由于油酸烷基链很长,在涂层膜中可以相互缠绕^[24],从而提高涂层的耐摩擦牢度。但是测试结果表明,油酸改性后的Al(OH)₃ 对涂层的摩擦牢度的提升高于硅烷偶联剂KH-550 改性后的Al(OH)₃。Al(OH)₃ 颗粒表面基团如图3所示。

3 结论

3.1 制备的阻燃隔热防护面料,燃烧后碳长2.0 mm,阴燃及续燃时间为0,且没有溶滴产生。以玻璃纤维织物为基础,以水性聚氨酯为黏弹性材料,选用添加型阻燃剂,用泡

沫整理方法制备的热防护功能面料,具有良好阻燃效果(碳长<10.0 mm),实现了低成本阻燃隔热面料制备。

3.2 面料的热防护性能为 35.80 J/cm²·s。采用硅烷偶联剂和油酸对作为阻燃隔热功能材料的纳米 Al(OH)₃ 进行表面结构调控处理,实现了纳米功能材料在玻璃纤维表面的均匀分布与牢固结合,由此保证作为阻燃隔热功能材料的无机纳米材料在织物泡沫整理中的足量添加,实现面料达到芳纶的热防护水平。

3.3 面料上功能层的干摩为 4 级,湿摩为 3 级。采用刻蚀法、偶联法和负载法对玻璃纤维进行表面处理,再进行泡沫整理后,阻燃隔热面料上功能层的耐摩擦牢度有显著改善。

参考文献

[1]徐爱玲,徐康景,王春梅.棉纤维阻燃整理技术的研究进展[J].棉纺织技术,2021,49(2):80-84.
[2]翟丽娜,李俊.服装热防护性能测评技术的发展过程及现状[J].纺织学报,2015,36(7):162-168.
[3]WANG Z, CHEN J, CHENG W, et al. Investigation into the tempo-spatial distribution of recent fire hazards in China[J].Natural Hazards,2018,92(3):1889-1907.
[4]BARR D, GREGSON W, REILLY T. The thermal ergonomics of firefighting reviewed[J].Applied Ergonomics,2010,41(1):161-172.
[5]王敏,李俊,李小辉.燃烧假人在火场热防护服装研究中的应用[J].纺织学报,2013,34(3):154-160.
[6]YAGI S, KOBAYASHI H. Fatigue and tensile properties of aramid fibers measured by single fiber mechanical tests[J].Journal of Macromolecular Science,Physics,2020,60(3):220-236.
[7]张增强,叶毓辉.芳纶 1313 阻燃织

物的加工技术及其展望[J].现代纺织技术,2008,16(2):57-60.

[8]王璐,丁笑君,夏馨,等.SiO₂ 气凝胶/芳纶非织造布复合织物的防护功能[J].纺织学报,2019,40(10):79-84.

[9]BARKER R L, LEE Y M. Analyzing the transient thermophysical properties of heat-resistant fabrics in TPP exposures[J].Textile Research Journal,1987,57(6):331-338.

[10]刘建麟,陈少东,黎明煌.高效保温隔热节能、防火阻燃聚氨酯材料的相关技术研究[J].企业科技与发展,2020(5):47-53.

[11]曹永强,柳素燕.新型消防员隔热防护服外层面料结构及加工[J].中国个体防护装备,2011(1):9-10.

[12]魏亮,刘介正,李肇魁,等.新型消防服外层镀铝阻燃隔热面料的研发及性能测试[J].产业用纺织品,2014(4):12-15.

[13]陈智杰,虞一浩,符晔,等.柔性阻燃聚酰胺湿法涂层织物的制备及其性能[J].纺织学报,2021,42(11):110-116.

[14]GUO W, WANG X, HUANG J, et al. Construction of durable flame-retardant and robust superhydrophobic coatings on cotton fabrics for water-oil separation application[J].Chemical Engineering Journal,2020,398:125661.

[15]郑振荣,张玉双,王红梅,等.低温固化有机硅耐高温涂层织物的制备[J].材料科学与工艺,2015,23(6):52-56.

[16]ZHENG Z, REN L, HUANG P,

et al. Preparation and properties of silicone coated glass fiber fabrics destined for firefighters' protective clothing[J].Pigment & Resin Technology,2020,50(6):508-514.

[17]王赫,刘亚青,张志毅,等.玻璃纤维表面处理技术的研究进展[J].绝缘材料,2007(5):35-37.

[18]FORNAINI C, POLI F, MERIGO E, et al. Nanosecond pulsed fiber laser irradiation for enhanced zirconia crown adhesion:morphological, chemical, thermal and mechanical analysis[J].Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology,2021,219:112189.

[19]王冬至.玻璃纤维浸润剂分子设计及其对复合材料界面性能的影响[D].济南:山东大学,2014.

[20]黄雅妮.氢氧化镁无机阻燃剂的改性研究进展[J].材料导报,2014,28(1):364-378.

[21]靳宇.纳米粒子修饰玻纤增强聚丙烯复合材料性能研究[D].北京:北京化工大学,2020.

[22]林红娇,晏泓,王元杰,等.硅烷偶联剂对金属氢氧化物粉体的机械球磨改性[J].中国粉体技术,2011,17(4):36-40.

[23]李冰.疏水性超细氢氧化铝的合成及其阻燃性能研究[D].长春:吉林大学,2013.

[24]陈炜.四硝基酞菁铁和四氨基酞菁铁的制备、性能及其在聚氨酯改性中的应用[D].上海:东华大学,2013.

收稿日期 2023年10月2日

《针织工业》以服务行业为己任,
传播、发表行业实用技术信息。

欢迎大家订阅!