

含铁剪切增稠流体含浸芳纶复合织物防刺 及电磁屏蔽性能研究

张霞云¹ 林佳弘^{1,2} 李婷婷^{1,3*} 姜 茜^{1,2} 彭浩凯^{1,4} 吴利伟¹ 王云龙¹ 黄惠怡¹

(1.天津工业大学纺织学院,智慧纺织与节能制品创新平台,天津 300387;

2.逢甲大学纤维与复合材料学系纤维应用与制造实验室,台中 40724;

3.福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室(闽江学院),福州 350108;

4.高技术有机纤维四川省重点实验室,成都 610041)

摘 要 为满足屏蔽电磁波干扰的防刺服需求,利用超声波振荡法将分散相粒径为 100nm 的 SiO_2 与聚乙二醇(PEG)200 配制成剪切增稠液体(STF),利用浸渍法制成 STF/芳纶复合织物。在 SiO_2 质量分数为 15% 的 STF 中加入平均粒径为 2.75 μm 的 Fe 粉,制成铁粉质量分数分别为 5%、10%、15% 和 18% 的 STF-Fe 非牛顿流体,研究了 SiO_2 含量以及 Fe 粉固含量对复合织物防刺性能以及 STF-Fe 分散体系对电磁屏蔽的影响。结果表明,复合织物的防刺效果随着 SiO_2 、Fe 含量的增加而增强。 SiO_2 质量分数大于 15% 时,复合织物的刀刺载荷明显提高。STF-Fe 分散体系可以显著提高芳纶织物的刀刺性能,但效果不如 STF。随着 SiO_2 含量的增加,STF/芳纶复合材料的防刺效果明显提高;在 SiO_2 质量分数为 15% 的条件下,随着 Fe 含量的增加,STF-Fe/芳纶复合织物的锥刺性能明显提高。当 STF-Fe 分散体系中 Fe 质量分数达到 40% 时,电磁屏蔽率可达到 90%~99.9%。

关键词 STF-Fe 剪切增稠流体,刀刺,锥刺,电磁屏蔽

Puncture resistance and electromagnetic shielding performance of aramid composite fabrics impregnated with STF-Fe

Zhang Xiayun¹ Lin Jiahong^{1,2} Li Tingting^{1,3} Jiang Qian^{1,2} Peng Haokai^{1,4}
Wu Liwei¹ Wang Yunlong¹ Huang Huiyi¹

(1.Innovation Platform of Intelligent and Energy-Saving Textiles,School of Textiles,
Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387;2.Laboratory of Fiber Application and
Manufacturing,Department of Fiber and Composite Materials,Feng Chia University,
Taichung 40724;3.Fujian Key Laboratory of Novel Functional Fibers and
Materials(Minjiang University),Fuzhou 350108;4.High-Tech Organic Fibers
Key Laboratory of Sichuan Province,Chengdu 610041)

Abstract In order to make puncture-resisting armor with electromagnetic shielding property, an ultrasonic vibration method was employed to disperse 100 nm SiO_2 and PEG 200 into shear thickening liquid (STF), and then fabricated into STF/aramid composite fabric using an impregnation method. 2.75 μm Fe was added into STF containing 15% SiO_2 , STF-Fe non-Newtonian fluid with different solid contents of Fe (5%, 10%, 15% and 18%) was formed. The effects of SiO_2 and Fe contents on puncture resistance as well as the effect of Fe content on electromagnetic shielding were studied. Research results showed that, puncture resistance increased obviously with increasing SiO_2 and Fe contents. When the content of SiO_2 was more than 15%, the knife resistance was improved more significantly. STF-Fe can obviously increased the knife resistance, but the enhancing effect was less than the same solid content of STF. Stab resistance of STF/aramid fabric was obviously enhanced with increasing SiO_2 content. When 15% SiO_2 contained in

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51503145,11702187,11502163);福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室(闽江学院)开放基金(FKLTFM 1704,FKLTFM 1722,FKLTFM 1718)

作者简介:张霞云(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为防刺复合材料结构设计及性能。

联系人:李婷婷(1985-),女,讲师,硕士生导师,主要研究方向为三维“自锁”柔性防刺复合材料的结构设计。

STF-Fe, the spike resistance received an obvious increment with increasing Fe content. When Fe content reached 40%, the electromagnetic shielding efficiency attained 90%~99.9%.

Key words STF-Fe shear thickening fluid, knife stab, spike stab, electromagnetic shielding

根据柔韧程度防刺服可以分为硬质、半硬质和软质防刺服。防刺服的主要作用是保护人体免受刺刀、匕首等尖锐物体的伤害,能良好地分散冲击能量^[1]。剪切增稠液体(STF)由分散相粒子和分散介质组成,是一种非牛顿力学行为的可逆流体,在平衡状态下,表现为分散胶体形式;在高速剪切力作用时,其黏度急剧增加表现出固体行为^[2]。利用 STF 的这种特性,将其用于浸渗高性能防护材料,在不改变材料防弹性能的前提下,可显著提高防护装甲的舒适性,进一步减轻装甲质量。刘君等^[3]研究了 Kevlar 平纹织物浸渍 STF 后对防刺性能的影响,结果表明浸渍后 Kevlar 布防刺力显著提高。Li 等^[4-10]对 Kevlar 非织复合材料及其织物层间增强复合材料的穿刺性能进行了研究,阐述了织物静态抗穿刺机理和动态抗穿刺机理。蒋玲玲等^[11]对玻璃纤维平纹织物及浸渍 STF 的相同织物进行穿刺试验,通过对比发现 STF 能显著地提高玻璃纤维织物的防刺性能。赵金华等^[12]研究了改变 STF 中分散相 SiO₂ 粒径对 STF/Kevlar 复合材料防刺性能的影响,结果表明在 SiO₂ 粒径为 160, 370, 600nm 的 STF 中,当 SiO₂ 粒径为 600nm 时,STF 可以显著提升复合材料的防刺性能。俞科静等^[13]研究了改变 STF 中分散介质—聚乙二醇(PEG)相对分子质量及不同相对分子质量 PEG 混配的质量比对 STF-非织布防刺性能的影响,指出复配型 STF 对提高织物防刺性能的作用更为显著。随着军事侦察技术的进步和各种电子产品带来的电磁波干扰,军事、医疗和电子等行业对屏蔽电磁波干扰的防护服需求日益增多,所以防电磁干扰的防护织物的研究具有一定的价值^[14]。而有关织物兼具防刺功能和静电屏蔽效果的研究很少, Li 等^[15-16]对含碳纤维与非织造复合电磁屏蔽材料的穿刺性能及电磁屏蔽性能也进行了研究。

本研究以 STF/芳纶复合材料研究为基础,通过加入平均粒径为 2.75μm 的 Fe 粉制成铁粉固含量不同的 STF-Fe 分散体系,研究了 SiO₂ 含量和 Fe 粉含量对复合材料防刺性能及电磁屏蔽性能的影响。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

纳米 SiO₂ 粉末,广东吉必盛有限公司;分散介

质 PEG200,天津市兴复精细化工研究所;芳纶平纹织物,中国石化仪征化纤有限责任公司。

电动搅拌机(DW-3 型),巩义市予华仪器有限公司;超声波清洗仪(XR-101 型),常州鑫仁超声波设备有限公司;流变仪(MCR301 型),英国马尔文仪器有限公司;万能强力机(INSTRON 3369),美国英斯特朗公司。

1.2 STF/PEG 及 STF-Fe 分散体系的制备

采用机械搅拌配合超声波振荡,将粒径为 100nm 的 SiO₂ 与 PEG200 配制成 SiO₂ 质量分数分别为 12%, 15%, 18%, 21% 的 STF/PEG 分散体系。在 SiO₂ 质量分数为 15% 的 STF/PEG 分散体系中加入平均粒径为 2.75μm 的 Fe 粉,制成 Fe 粉质量分数分别为 5%, 10%, 15%, 18% 的 STF-Fe 分散体系。

1.3 STF/芳纶及 STF-Fe/芳纶复合材料的制备

将经过干燥处理的芳纶织物(经密为 170 根/10cm,纬密为 160 根/10cm)裁成 150mm×150mm,然后分别浸渍在 SiO₂ 含量不同的 4 种 STF/PEG 分散体系以及 Fe 含量不同的 4 种 STF-Fe 分散体系中。超声波振荡 10min 后取出试样,把试样放置在 80℃ 的真空干燥箱中干燥 8h,制成 STF/芳纶复合材料和 STF-Fe/芳纶复合材料。

2 性能测试

2.1 质量测试

将未经处理的纯芳纶织物、STF/芳纶复合材料和 STF-Fe/芳纶复合材料均裁成 150mm×150mm,利用电子天平,在温度 20℃、湿度 65% 的环境下测试 3 种不同试样的质量。

2.2 STF/PEG 及 STF-Fe 分散体系的流变性能测试

采用 MCR301 型流变仪,在温度 25℃、剪切速率为 50s⁻¹ 的条件下,分别测试 STF/PEG 及 STF-Fe 分散体系中流体的剪切黏度。

2.3 织物防刺性能测试

防刺主要有刺破和切割两大类^[17]。依据 GA68—2008 测试标准,采用由 INSTRON 3369 万能强力机改装的防刺性能静态测试仪,将万能强力机上部分夹头换成自制的穿刺器具,穿刺刀具及锥子见图 1。将下方夹头换成自制的夹具,调试强力

机压缩速度为 200mm/min, 分别对单层纯芳纶织物、STF/芳纶复合材料和 STF-Fe/芳纶复合材料进行刀刺和锥刺实验, 对试样求取平均值得出最大压缩载荷和位移。

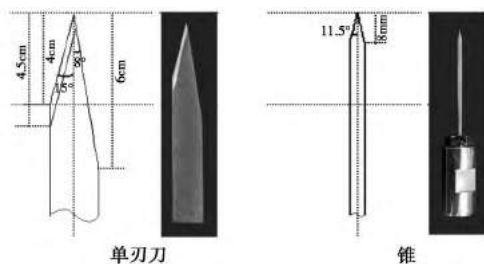


图 1 穿刺用刀与锥子的规格

2.4 电磁屏蔽测试

根据 ASTM-D4935 标准对纯芳纶平纹织物和 STF-Fe/芳纶复合材料的电磁屏蔽效果进行测试, 测试频率范围 300kHz~3.0GHz。

先将无任何屏蔽功能的空白试样[图 2(a)左]置于上下夹具间, 对网路矢量分析仪测试的电磁屏蔽值进行校正。然后再分别将纯芳纶平纹织物样品和 STF-Fe/芳纶复合材料样品[尺寸见图 2(a)右]放入夹具中[见图 2(b)], 测试试样的电磁屏蔽值^[18]。

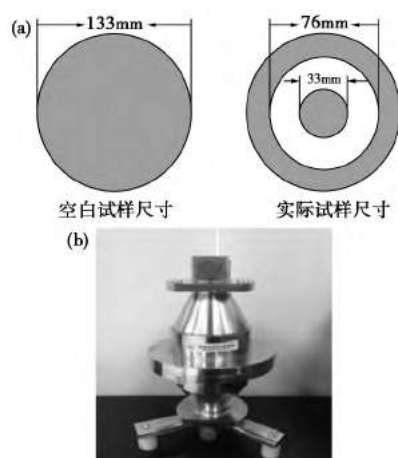


图 2 电磁屏蔽测试空白试样和实际样品尺寸(a)及测试夹具(b)

3 结果与讨论

3.1 质量测试

在 STF/PEG 分散体系中随着 SiO_2 含量的增加, 浸渍后织物的质量增加率也在提高。STF-Fe 分散体系中随着 Fe 粉含量的增加, 浸渍后织物的质量增加率也在提高, 大部分增重是因为 SiO_2 溶液渗入到芳纶长丝中, 从而增加了芳纶织物的质量。另外又有部分 Fe 粉附着在织物表面和渗入纤维内

部, 导致部分织物增重, 随着 Fe 粉含量的增加, 织物增重比例越高。从表 1 可以看出: STF/PEG 分散体系中 SiO_2 质量分数为 15% 时, 复合织物增重率为 50.01%; STF 中加入 Fe 粉后, 因 Fe 粉含量不同, 故复合织物增重也不同; 当 Fe 粉质量分数为 5% 和 10% 时, 复合织物增重率分别为 59.24% 和 61.22%; 而当 Fe 粉质量分数达到 15% 和 18% 时, 复合织物增重明显, 增重率分别为 81.89% 和 106.40%。考虑到织物增重较大, 为减轻负担, Fe 粉质量分数不宜大于 15%。

表 1 浸渍 STF-Fe 分散体系的芳纶织物的质量

样品	浸渍前/		浸渍后/		增重/	增重率/
	g	g	g	g		
纯芳纶织物	332.72	332.72	0	0		
12% SiO_2 STF/芳纶复合材料	333.52	496.24	162.72	48.79		
15% SiO_2 STF/芳纶复合材料	334.48	501.76	167.28	50.01		
18% SiO_2 STF/芳纶复合材料	335.28	521.92	186.64	55.67		
21% SiO_2 STF/芳纶复合材料	338.48	530.80	192.32	56.83		
15% SiO_2 +5% Fe/芳纶复合材料	347.76	553.76	206.00	59.24		
15% SiO_2 +10% Fe/芳纶复合材料	366.00	574.72	218.72	61.22		
15% SiO_2 +15% Fe/芳纶复合材料	366.32	666.32	300.00	81.89		
15% SiO_2 +18% Fe/芳纶复合材料	352.56	727.68	375.12	106.40		

3.2 流变性能测试

STF 是一种非牛顿流体, 牛顿流体的黏度随着剪切速率的变化而变化^[19]。剪切黏度计算公式见式(1):

$$\text{剪切黏度} = \text{剪切应力} / \text{剪切速率} \quad (1)$$

由测试结果可知, 随着 SiO_2 含量的增加, STF 的黏度随之增加(见图 3)。在 SiO_2 质量分数为 15% 的 STF-Fe 分散体系中, 随着 Fe 含量的增加, 体系的黏度逐渐增大。与 Fe 相比, SiO_2 含量对 STF 黏度的影响更大。

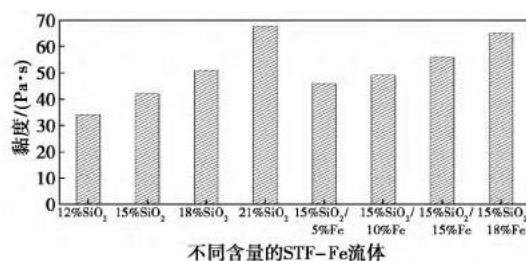


图 3 剪切速率固定时流体的黏度

3.3 刀刺性能测试

STF/PEG 分散体系中随着 SiO_2 含量的增加, STF/芳纶复合材料能承受的最大刀刺载荷逐渐增

加,刀刺实验结果见图 4。从图可以看出:SiO₂ (粒径 100nm)质量分数为 18%和 21%时,STF/芳纶复合材料承受的最大刀刺载荷明显高于纯芳纶织物;SiO₂ 质量分数为 18%时,复合材料承受的最大刀刺载荷比纯芳纶织物承受的载荷提高 22%;SiO₂ 质量分数为 21%时,复合材料承受的最大刀刺载荷比纯芳纶织物承受的载荷提高 34.5%。STF-Fe 分散体系中用 STF 处理过的芳纶织物在抗刀刺性能方面有所提高,但防刺效果不如 STF 液体处理的芳纶织物。

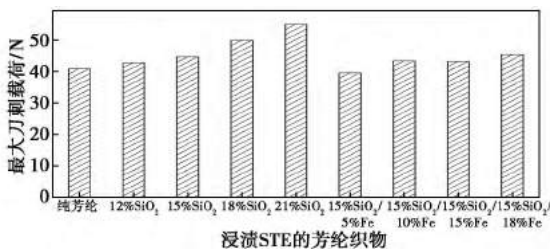


图 4 不同试样的刀刺结果

图 5 为典型的刀刺位移曲线。刀具刚接触织物时,由于芳纶织物具有良好的抗刀刺性能,因此织物出现弹性变形。随着刀刺位移的增加,纱线未断裂时压缩载荷不断增加,当达到纱线最大的压缩载荷时纱线断裂,此时压缩载荷迅速减小。当刀刺不断刺破纱线时,压缩载荷出现上下跳跃,力主要为垂直于织物表面的剪切力;当尖刺将要刺穿织物时,此时的压缩载荷最大。当尖刺冲击织物时,STF 受到外力的冲击由液态变成固态,剪切增稠限制了纤维束与纤维丝的移动,从而阻碍刺头从纤维束或纤维间隙进入织物,所以 STF/芳纶复合织物的最大压缩载荷大于纯芳纶织物。STF 中随着 SiO₂ 含量的增加,STF 的剪切增稠性能增强,其限制纤维束与纤维丝移动的作用也增强,所以 STF/芳纶复合织物的最大压缩载荷增加;达到最大压缩载荷之后,由于刀尖刺穿织物时,刀的另一面与织物发生剪切,不断剪切纱线,压缩载荷也出现变化,所以会出现后面的折线;当刀完全穿过织物时,压缩载荷则不再变化^[20]。

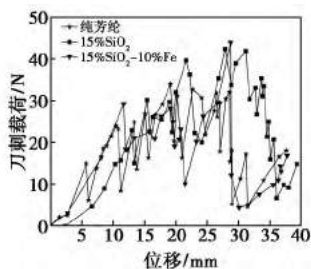


图 5 刀刺载荷与位移曲线图

图 6 为 STF 处理后的芳纶织物被刀刺破坏的情况。由图可以看出,纤维的断裂较为整齐,这是因为剪切增稠效果使得纤维束很好地结合,纤维束共同抵御外力,导致纤维全部从一个位置断裂^[21]。

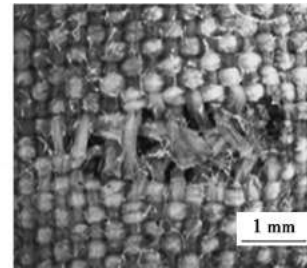


图 6 刀刺破坏后的芳纶织物图

3.4 锥刺性能测试

STF 可以提高芳纶的抗刺破能力。由图 7 可以看出,随着 STF/PEG 分散体系中 SiO₂ 含量的增加,用 STF 液体处理后的芳纶在锥刺时能承受的最大载荷上升,说明在一定的范围内增加 SiO₂ 含量有助于提高 STF/芳纶复合材料的抗锥刺性能。SiO₂ 质量分数为 15%时,STF/芳纶复合材料承受的最大锥刺载荷比纯芳纶织物提高了 26.41%;SiO₂ 质量分数为 18%时,复合材料承受的最大锥刺载荷比纯芳纶织物提高 37.53%;SiO₂ 质量分数为 21%时,复合材料承受的最大锥刺载荷比纯芳纶织物提高近 51.2%。

STF-Fe 分散体系中随着 Fe 粉含量的增加,STF-Fe/芳纶复合材料承受的锥刺载荷随之提高。Fe 粉质量分数为 15%和 18%时,复合材料承受的最大锥刺载荷相较于纯芳纶织物分别提高了 59.7%和 61.76%。STF-Fe/芳纶复合织物与 STF/芳纶复合织物承受的最大锥刺压缩载荷也明显不同。在 SiO₂ 质量分数为 15%,Fe 粉质量分数为 15%的条件下,STF-Fe/芳纶复合织物承受的最大锥刺压缩载荷明显高于不含 Fe 的 STF/芳纶复合织物,前者比后者高出 26.33%;在 SiO₂ 含量保持不变,Fe 粉质量分数为 18%时,STF-Fe/芳纶复合织物承受的最大锥刺压缩载荷比不含 Fe 的 STF/芳纶复合织物高 27.96%。

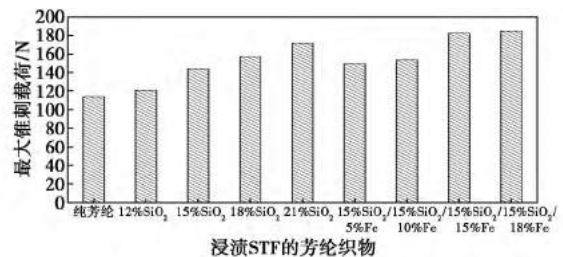


图 7 不同试样的锥刺结果

图 8 为典型的锥刺位移曲线。当锥体接触到织物但织物未被刺破时,锥体所受到的力随着压缩位移增速越来越快;当锥体刺断周围部分纱线时,受力急剧下降,再随着锥体慢慢深入,锥体周围的纤维束又慢慢增加;当再次拉断周围纤维束时,锥体的压缩载荷又迅速增加,如此反复直到整个锥体穿过织物^[5]。图中的试样分别为纯芳纶平纹织物、STF/芳纶复合织物和具有代表性的 STF-Fe/芳纶复合织物,从图可以看出,纯芳纶平纹织物的最大压缩载荷明显低于经过 STF 和 STF-Fe 处理的织物。

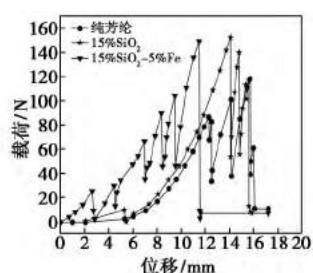


图 8 锥刺载荷与位移曲线图

由测试结果可知,STF/芳纶复合织物及 STF-Fe/芳纶复合织物的防锥刺性能明显优于纯芳纶织物。试样的破口分析结果见图 9。纯芳纶织物试样受锥体冲击破坏后,织物中纤维束发生了较大的位移和变形。锥体冲击作用处纤维束发生弯曲、退让,形成空位,使锥体从纤维束间通过,纤维本身未被破坏。锥体冲击后芳纶纤维织物的响应面积较小,主要是局部较小区域内少量纤维束的变形。

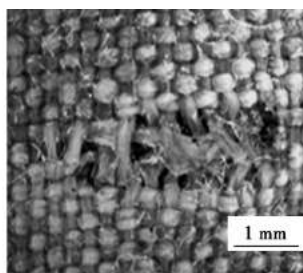


图 9 锥刺破坏的芳纶织物图

对芳纶平纹织物而言,抵抗锥体、针头等尖锐物冲击的主要耗能在于织物中纤维与锥体间的摩擦、纤维的抽动以及冲击能量沿纤维轴向的传播分散和消耗^[14]。锥刺时锥尖对织物施压,随后锥尖进入织物在织物内部滑动,进入纤维束间或纤维束内导致穿刺,接着锥体与纤维束摩擦。织物对锥体最大的阻碍就是锥体会与纤维丝或纤维束发生摩擦,阻止了锥尖进入织物,而经 STF 处理后的织物在受到穿刺力时,STF 的剪切增稠效应使得纱线中纤维集合

体紧密结合在一起,穿刺时所接触的纤维不会发生滑移并且全部用来抵御外力,因此经 STF 处理的芳纶织物防刺性能更好。

3.5 电磁屏蔽测试结果分析

对 Fe 粉含量不同的 STF-Fe/芳纶复合织物的电磁屏蔽性能进行测试,测试结果表明试样的电磁屏蔽功能较差。这是因为附着在织物表面的 Fe 粉,无法达到所要求的吸收电磁波的功能,另外可能由于织物上 Fe 粉分布不均匀导致电磁屏蔽效果较差,Fe 粉含量对电磁屏蔽效能也有影响。在 Fe 粉质量分数分别为 25%、30%和 40%的条件下,考察了 STF-Fe/芳纶复合织物的电磁屏蔽性能,实验结果如表 2 所示。由表 2 可知,Fe 粉质量分数大于 25%时,复合织物出现电磁屏蔽效果。从表 2 和图 10 还可以看出,Fe 粉含量增加时,复合织物的电磁屏蔽效果越好;Fe 粉质量分数为 40%时,复合织物的电磁屏蔽效果最好。从图 10 可以看出:Fe 粉质量分数为 18%及低于 18%时,复合织物没有明显的电磁屏蔽效果;当 Fe 粉质量分数大于 25%时,复合织物的电磁屏蔽效果显著,随着 Fe 粉含量的增加,复合织物的电磁屏蔽效果明显提高。

表 2 Fe 含量不同时 STF-Fe/芳纶复合织物的电磁屏蔽值

频率/ Hz	纯芳纶	5%Fe	10%Fe	15%Fe	18%Fe	25%Fe	30%Fe	40%Fe
1G	1.76	1.87	1.90	1.83	1.92	8.70	7.37	14.94
2G	2.58	2.66	2.72	2.67	2.76	6.11	9.99	12.97
3G	3.20	3.32	3.31	3.33	3.37	4.61	5.62	9.52

从图 10 还可以看出,当 Fe 粉质量分数大于 25%时,STF-Fe/芳纶复合织物表现出一定的电磁屏蔽效果;Fe 粉质量分数为 40%时,复合织物的电磁屏蔽效果最好,电磁屏蔽效率可达到 90%~99.9%。

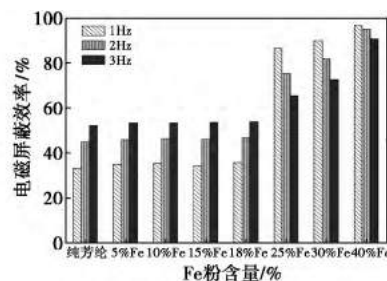


图 10 不同 Fe 含量的 STF-Fe/芳纶复合织物的电磁屏蔽效率

4 结论

(1)随着 STF/PEG 分散体系中 SiO₂ 含量的增

加,STF的起始黏度增加,临界剪切速率降低。STF-Fe分散体系中随Fe含量增加,STF的黏度增加,但增加效果不如含SiO₂的明显。

(2) STF处理过的芳纶织物防刺性能明显提高,尤其当SiO₂质量分数大于15%时效果较明显。刀刺测试结果表明:SiO₂质量分数为18%时,STF/芳纶复合织物承受的最大刀刺载荷比纯芳纶织物承受的载荷提高22%;SiO₂质量分数为21%时,复合织物承受的最大刀刺载荷比纯芳纶织物承受的载荷提高34.5%;用STF-Fe液体浸渍的芳纶织物承受的刀刺载荷不如STF处理的芳纶织物。经STF液体及STF-Fe液体处理过的芳纶织物承受锥刺载荷的能力明显提高。在SiO₂质量分数为15%,Fe粉质量分数为15%的条件下,STF-Fe/芳纶复合织物承受的锥刺最大压缩载荷比不含Fe的STF/芳纶复合织物高约26.33%;在SiO₂含量保持不变,Fe粉质量分数为18%时,STF-Fe/芳纶复合织物承受的锥刺最大压缩载荷比不含Fe的STF/芳纶复合织物高27.96%。但从织物增重方面考虑,Fe粉的质量分数不能超过15%。

(3) Fe粉质量分数小于18%时,STF-Fe/芳纶复合织物对电磁屏蔽没有显著作用。而Fe含量过高又会增加复合织物的质量,因此防刺及静电屏蔽材料仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 赵玉梅,俞建勇.柔性复合防刺服的研究[D].上海:东华大学,2005.
- [2] Maranzano B J, Wagner N J. The effects of interparticle interactions and particle size on reversible shear thickening; hard-sphere colloidal dispersions[J]. *J Rheol*, 2001, 45(5): 1205-1222.
- [3] 刘君,熊党生,熊华超.剪切增稠流体浸渍 Kevlar 复合材料的防刺性能[J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2010, 34(2): 271-274.
- [4] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Static and dynamic puncture behaviors of compound fabrics with recycled high-performance Kevlar fibers[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 59: 60-66.
- [5] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Inter-/intra-laminar reinforced hybrid fibre composites by needle punching and thermal bonding: evaluation of mechanical and static puncture properties[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2016, 4(118): 84-91.
- [6] Li T T, Lou C W, Lin J Y, et al. Static and dynamic puncture properties of intra-/inter-laminar reinforced multilayer compound fabrics by needle-punching and thermal bonding[J]. *Textile Research Journal*, 2016, 86(14): 1487-1497.
- [7] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Static and dynamic puncture failure behaviors of 3D needle-punched compound fabric based on Weibull distribution[J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(18): 1903-1914.
- [8] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Mechanical and physical properties of puncture-resistance plank made of recycled selvages[J]. *Fibers and Polymers*, 2013, 14(2): 258-265.
- [9] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Evaluation of high-modulus, puncture-resistance composite nonwoven fabrics by response surface methodology[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2013, 43(2): 247-263.
- [10] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Acoustic absorption evaluation of high-modulus puncture resistance composites made by recycled selvages[J]. *Textile Research Journal*, 2012, 82(15): 1597-1611.
- [11] 蒋玲玲,钱坤,俞科静,等.剪切增稠液体对织物防刺性能的影响[J]. *材料导报*, 2011(S1): 231-234.
- [12] 赵金华,曹海琳,李霞,等.SiO₂粉体粒径对STF/Kevlar复合材料防刺性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(1): 54-61.
- [13] 俞科静,沙晓菲,钱坤,等.复配型剪切增稠液体对非织造织物防刺性能的影响[J]. *功能材料*, 2012, 43(23): 3300-3303.
- [14] 李克兢,汪秀琛.电磁屏蔽服装的开发探讨[J]. *纺织学报*, 2005, 26(4): 148-150.
- [15] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Manufacture and effectiveness evaluations of high-modulus electromagnetic interference shielding/puncture resisting composites[J]. *Textile Research Journal*, 2013, 83(17): 1796-1807.
- [16] Li T T, Wang R, Lou C W, et al. Effects of needle-punching and thermo-bonding on mechanical and EMI shielding properties of puncture-resisting composites reinforced with fabrics[J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(2): 315-321.
- [17] 孙润军,来侃,张建春.服装用纺织品防电磁辐射测试方法的研讨[J]. *西安工程科技学院学报*, 2003, 17(2): 100-103.
- [18] Hassan T A, Rangari V K, Jeelani S. Sonochemical synthesis and rheological properties of shear thickening silica dispersions[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(5): 947-952.
- [19] 蒋玲玲,钱坤,俞科静,等.剪切增稠液体在防刺材料中的应用研究[J]. *化工新型材料*, 2011, 39(6): 121-124.
- [20] Zeng X S, Tan V BC, Shim V PW. Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 66(8): 1309-1330.
- [21] Termonia Y. Puncture resistance of fibrous structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(9): 1512-1520.

收稿日期:2017-03-07

修稿日期:2018-03-14