

针刺工艺对 UHMWPE 非织造材料 防刺性能的影响

甄琪^{1a}, 张恒^{1b, 2}, 张一风^{1a}, 钱晓明³, 刘让同^{1b}

(1. 中原工学院 a. 服装学院; b. 纺织学院, 郑州 451191; 2. 武汉纺织大学 纺织纤维及制品教育部重点实验室, 武汉 430073;
3. 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387)

摘要: 为了研究超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)针刺非织造材料的结构特征与防刺性的关系, 制备了多组不同针刺工艺的样品; 测试并分析了样品的孔隙率、纵横向拉伸强度和静态防刺性能, 并对孔隙率与静态防刺力进行了回归分析。研究表明, UHMWPE 针刺非织造材料的孔隙率受针刺深度和针刺密度的影响, 并表现出随着针刺深度和针刺密度的增加而逐渐降低; 样品在针刺深度 5.16 ~ 11.17 mm 和针刺密度 521.91 ~ 1012.63 刺/cm² 的工艺范围内, 防刺能力随着针刺密度和针刺深度的增大而增大。二次方回归方程置信度较高, 可用于 UHMWPE 针刺非织造材料的静态防刺力与平方米质量、孔隙率的关系研究。

关键词: 超高分子量聚乙烯纤维; 非织造布; 防刺性能; 针刺; 回归分析

中图分类号: TS176.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2018)05-0024-07

引用页码: 051105

Effect of needle punching process on stab resistance property for UHMWPE nonwovens

ZHEN Qi^{1a}, ZHANG Heng^{1b, 2}, ZHANG Yifeng^{1a}, QIAN Xiaoming³, LIU Rangtong^{1b}

(1a. School of Clothing; 1b. School of Textiles, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China;

2. Key Laboratory of Textile Fiber & Product, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China;

3. College of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The samples of the ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) needle punching nonwovens were prepared for the purpose of researching the relationship between the structure characteristics and the stab resistance property. The porosity, tensile strength and static stab resistance property of the samples were tested and analyzed, and the regression analysis of porosity and static stab resistance property was carried out. The results show that, the porosity of UHMWPE nonwovens is significantly affected by needling depth and needling density, and the porosity of the samples decreases with the increase of needling depth and needling density. The stab resistance property of the samples increases with the increase of needling density and needling depth within the range of 5.16–11.17 mm and 521.91–1012.63 n/cm², respectively. Furthermore, the quadratic regression equation has high confidence level, which means that it can be used to study the relationship between the static stab resistance, and porosity and weight per square meter of UHMWPE nonwovens.

Key words: UHMWPE; nonwovens; stab resistance; needle punching; regression analysis

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2018-03-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0309100); 纺织纤维及制品教育部重点实验室(武汉纺织大学)资助项目(FZXW2017005); 纺织服装产业河南省协同创新中心资助项目(2017CY005); 河南省科技攻关计划资助项目(182102210518); 新乡市技术与开发经费支持项目(2016PYG15)

作者简介: 甄琪(1989—),女,助理实验师,主要从事纤维材料的功能性结构调控的研究。通信作者: 张恒,讲师, m-esp@163.com。

近年来,各种暴恐伤害事件、利器穿刺等安全事故的频发,使得防刺材料的研究变得尤为重要。而基于高性能纤维的针刺非织造材料由于独特的三维立体网状结构^[1-2],对尖锐物体的穿刺力具有很好的传递、分散和抗剪切能力,同时其较好的柔性,又使其具有更广的适用性、隐蔽性和可日常穿着等优点。目前用于柔性防刺材料的高性能纤维主要有聚对苯二甲酰对苯二胺纤维(poly-p-phenylene terephthamide),

PPTA)、超高分子量聚乙烯纤维(ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE)和聚对苯撑苯并双噁纤维(poly-phenylene benzo oxazole, PBO)等^[3-4]。其中, UHMWPE 纤维是由相对分子量在 100 万~500 万的聚乙烯纺制而成的纤维,该纤维的比强度是相同线密度钢丝绳的 10 倍以上,还具有高比能量吸收性、优良的耐冲击和抗切割性能,并且是目前所有高强高模纤维中密度最小的纤维, UHMWPE 纤维的密度为 0.97~0.98 g/cm³^[5-6]。因此,使用该纤维制造的材料具有轻质、高强和耐冲击的特性,是理想的柔性防刺用纤维。

在过去十多年中有许多文献指出, UHMWPE 针刺非织造材料可以用于柔性防刺领域^[7-8]。张玉芳等^[9]对 UHMWPE 针刺非织造材料的撕破强力、顶破强力和多层样品的抗刺穿能力进行了研究,认为 UHMWPE 针刺非织造材料的抗穿刺能力与平方米质量和纤维强度成正比例关系。但有学者认为,非织造材料属于面内各向同性的材料,对锥子等尖锐武器具有很好的防护作用,但是其面内纤维的排列比较疏松,抱合力差,所以抗刀刃切割的能力比较差^[10]。因此学者将 UHMWPE 非织造材料的研究转向通过多种结构、多种固网方式和多种纤维复合的研究方式提高防刺性;如,张月庆^[11]和邢京京等^[12]均将 UHMWPE 机织布与 UHMWPE 非织造纤维网通过针刺的方法进行复合,通过非织造纤维网与机织布的缠结和多层叠加来提高防刺效果。上述的研究都证实了致密的结构可以提高防刺性,但是都没有明确其致密程度与纤维防刺性能的关系。据此,本文将对 UHMWPE 针刺非织造材料的结构特征和防刺性能进行分析,为防刺性能的优化提供基础。

1 实验

1.1 材料和仪器

材料:超高分子量聚乙烯(北京同益中特种纤维技术开发有限公司)纤维长度 51 mm,细度 3.3 tex,强度 2.7 GPa。

仪器:干法针刺实验线(常熟万龙机械有限公司),台式扫描电子显微镜 TM3030(日本株式会社日立制作所),Instron3369 型万能电子强力仪(美国英斯特朗公司)和标准刀具, YG141LA 数字式织物厚度仪(常州第二纺织机械厂)。

1.2 实验和方法

制备:采用干法梳理—交叉铺网—针刺法非织

造技术将 UHMWPE 短纤制成柔性防刺材料,针刺深度 5.16、9.84、11.17 mm,对应有刺针进齿数分别为 2、4、5 个。预针刺植针密度 1 750 枚/m,主刺机植针密度 3 665 枚/m。

测试:对 UHMWPE 针刺非织造材料的力学性能、防刺性能和结构特征进行了研究。通过台式扫描电子显微镜 TM3030 分析材料的结构和纤维的截面形态。参考 ASTM Standard F1790-05 和 ISO Standard 13997 进行力学性能和静态穿刺力测试,刀具刺入速率为 5 mm/min。厚度依据 GBT 24218.2—2009《纺织品 非织造布试验方法 第 2 部分:厚度的测定》进行,压脚面积 1 000 mm²。平方米质量依据 GBT 24218.1—2009《纺织品 非织造布试验方法 第 1 部分:单位面积质量的测定》进行。拉伸断裂强力依据 GBT 24218.3—2010《纺织品 非织造布试验方法 第 3 部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》进行测试。表 1 所示为试样的特征参数,孔隙率依据下式获得:

表 1 样品的特征参数

Tab. 1 The characteristic parameters of samples

编号	平方米质量/ (g·m ⁻²)	厚度/ mm	孔隙率/ %	针刺深度/ mm	针刺密度/ (刺·cm ⁻²)
1 [#]		0.85	86.68	9.84	521.91
2 [#]		0.80	85.96	9.84	767.27
3 [#]	109.9 ± 5.6	0.76	85.57	9.84	1 012.63
4 [#]		0.93	86.72	5.16	767.27
5 [#]		0.79	85.63	11.17	767.27
6 [#]		1.08	85.37	9.84	521.91
7 [#]		1.02	84.15	9.84	767.27
8 [#]	159.4 ± 7.1	0.93	83.03	9.84	1 012.63
9 [#]		1.10	84.56	5.16	767.27
10 [#]		0.98	83.69	11.17	767.27
11 [#]		1.19	83.33	9.84	521.91
12 [#]		1.15	83.21	9.84	767.27
13 [#]	183.37 ± 6.3	1.10	82.86	9.84	1 012.63
14 [#]		1.20	83.60	5.16	767.27
15 [#]		1.10	83.09	11.17	767.27
16 [#]		1.33	82.96	9.84	521.91
17 [#]		1.29	82.94	9.84	767.27
18 [#]	206.56 ± 6.4	1.21	82.15	9.84	1 012.63
19 [#]		1.29	83.17	5.16	767.27
20 [#]		1.28	82.76	11.17	767.27
21 [#]		1.65	82.58	9.84	521.91
22 [#]		1.57	82.07	9.84	767.27
23 [#]	270.76 ± 5.8	1.42	81.18	9.84	1 012.63
24 [#]		1.62	82.48	5.16	767.27
25 [#]		1.47	81.18	11.17	767.27

$$p = 1 - (m/\rho\delta) \quad (1)$$

式中: p 为孔隙率, %; m 为平方米质量, g/m^2 ; δ 为厚度, m ; ρ 为纤维密度, g/m^3 。

2 结果与分析

2.1 工艺对样品结构特征影响

图1为样品18#的表面及截面形态电镜图。首先,从图1可以看出样品内部的纤维在水平面上呈现出杂乱分布,这种杂乱分布对于有效抵抗来自未知角度的穿刺有着有利的一面;其次,还可以从截面电镜图看出,样品的厚度方向上存在多层平行排列的纤维层,也就是存在清晰的层次结构。另外,结合表面电镜和截面电镜可以看出,UHMWPE纤维在针

刺的作用下,形成在厚度方向上的相互穿插和缠结,表明厚度方向上多层平行排列的纤维层之间的结合通过厚度方向上相互穿插的UHMWPE纤维实现。综上可知,梳理-针刺工艺方法制备的UHMWPE纤维非织造材料的某些结构特性可能受针刺工艺影响较大。

图2为样品的孔隙率随针刺密度(a)和针刺深度(b)的变化曲线。首先,从图3可以看出,针刺深度和针刺密度对不同平方米质量的UHMWPE针刺非织造材料孔隙率均有影响;其次,样品的孔隙率在5.16~11.17 mm的针刺深度内随着针刺深度的增加而逐渐降低,样品的孔隙率在针刺密度521.91~1012.63刺/cm²内随着针刺密度的增大而降低。这可能是由于随着针刺深度和针刺密度的增加,纤维的缠结更加紧密^[13-14]。

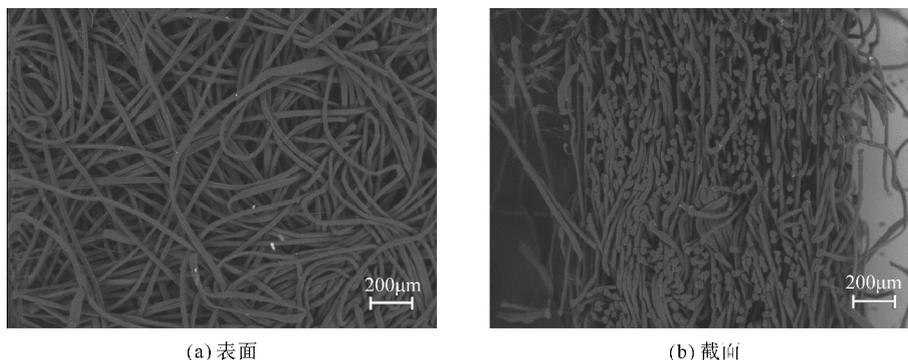


图1 样品的结构 SEM 图

Fig. 1 SEM images of sample structure

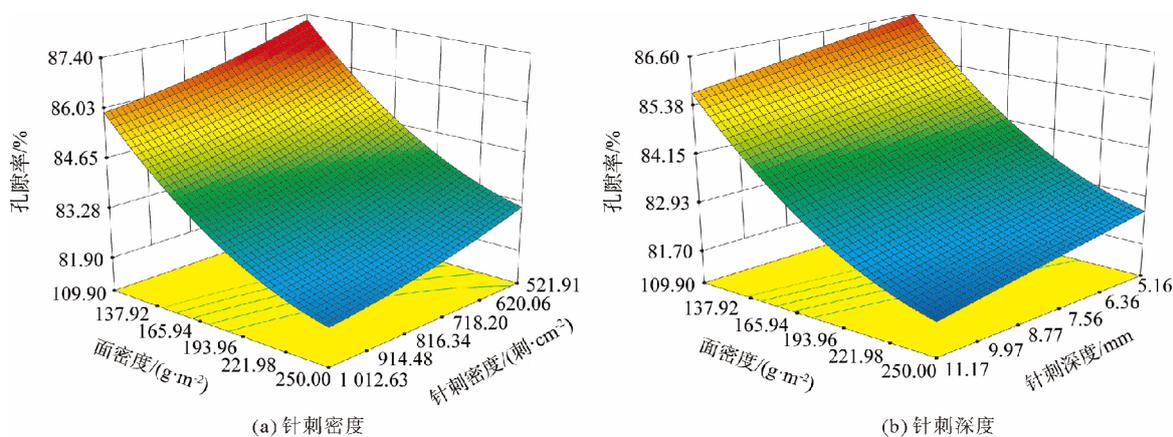


图2 孔隙率随针刺工艺的变化曲线

Fig. 2 Porosity varying with needling process

2.2 工艺对力学性能的影响

材料的抗拉伸强度反应的是材料抵抗外力的能力。理论上讲,拉伸强度越高的材料其吸收能量的潜

力也就越大,也就是纤维间通过固网作用形成缠结点的“结”越多^[15]。图3和图4是样品的纵横向拉伸力和纵横向拉伸强度随针刺密度和针刺深度的变化。

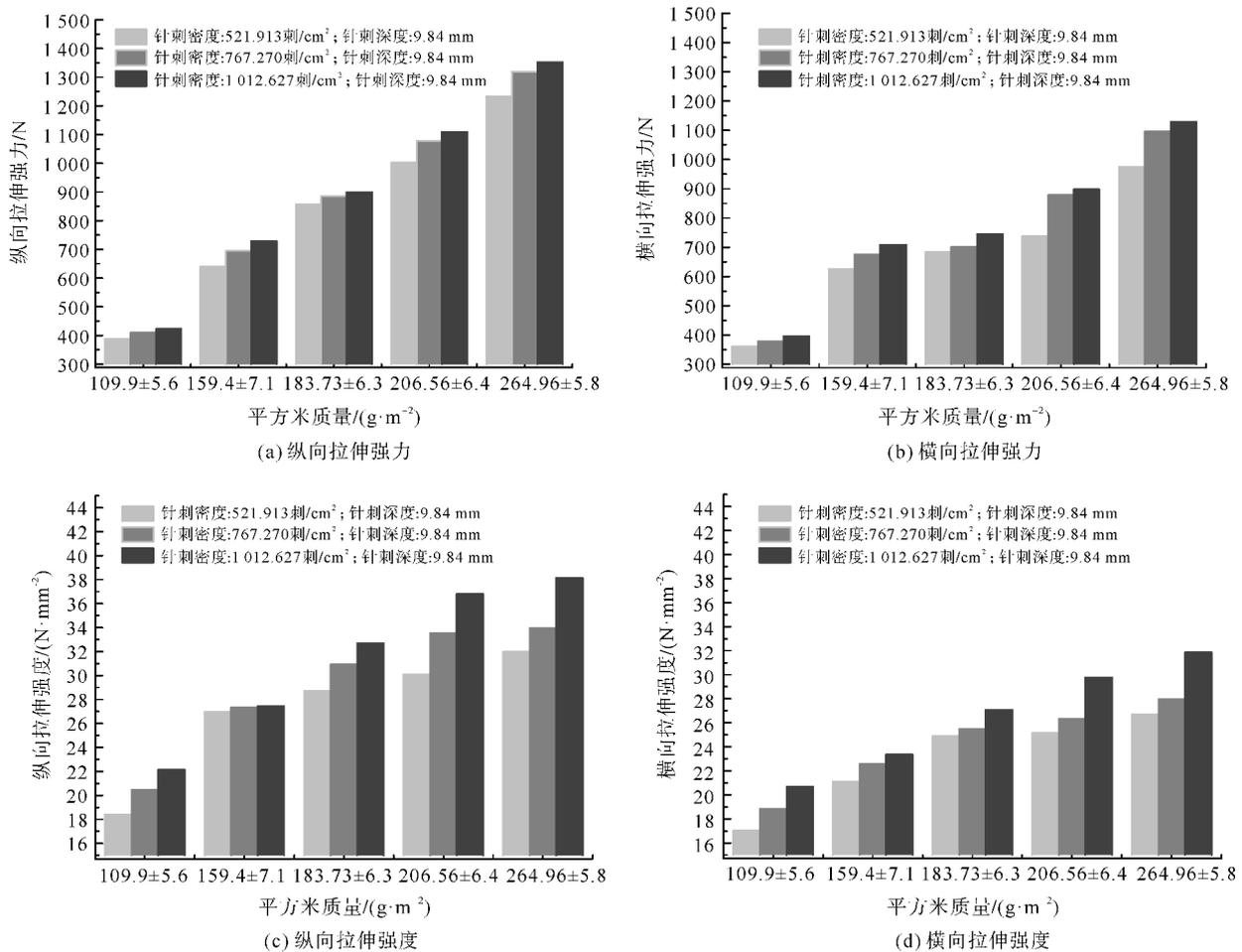


图 3 样品的力学性能随针刺密度变化

Fig. 3 Change of mechanical property of the samples with the needling density

从图 3 可以看出,样品的纵横向拉伸强力和拉伸强度均随着针刺密度(521.91~1012.63 刺/cm²)的增加而增加,这主要是因为随着针刺密度的增加,样品单位面积上所受到的针刺数增加,纤维之间在各个方向上的缠结与束缚加强,因而拉伸强力和强度均增大。拉伸强力和强度在针刺密度为1012.63 刺/cm²时达到最大,强度在此时的增长趋势也最大。这可能是因为随着针刺密度的增加,纤维内部所形成的贯穿纤维簇增多,过高的针刺密度造成部分纤维的断裂,所以样品的拉伸强力随针刺密度的增长而增长的趋势减低。

从图 4 可以看出,随着针刺深度(5.16~11.17 mm)的增加,样品的纵向拉伸强力和强度均增大。这是因为在针刺过程中,刺针上的刺钩带动纤网表面及次表面的纤维在纤网垂直方向运动,针刺深度越大,参与针刺过程中带动纤维运动的刺钩数量越多,因而产生上下位移的纤维也就越多。刺针回升后,产

生移位的纤维脱离刺钩而以几近垂直的状态留在纤网中,从而有效地阻止水平纤维在拉应力下的滑脱,所以拉伸强力和强度均增大。在针刺深度为5.16 mm时,样品的拉伸强力和强度最小,这可能是因为针刺深度较小时,刺针并不能彻底贯穿材料,刺针上前面的刺钩对表层的纤维进行抓取,并将纤维转移到材料下表面,而刺针上后面的刺钩抓取纤维后,却不能很好地将其转移。这主要是因为针刺过程所形成的垂直纤维簇是纤网加固的主要形式,而较低的针刺深度形成的纤维簇贯穿较小,所以纤维的相对缠结较少,样品强力较低。但是对于同一种平方米质量的材料来说,在针刺深度为9.84 mm和11.17 mm时,材料的强力增加不大,这可能是因为针刺深度从9.84 mm增加到11.17 mm时,刺针上的刺钩将纤维带到底层的伸长量超过纤维本身负荷,其中的一部分纤维达到滑移极限,从而造成部分纤维的断裂,影响纤维强力。

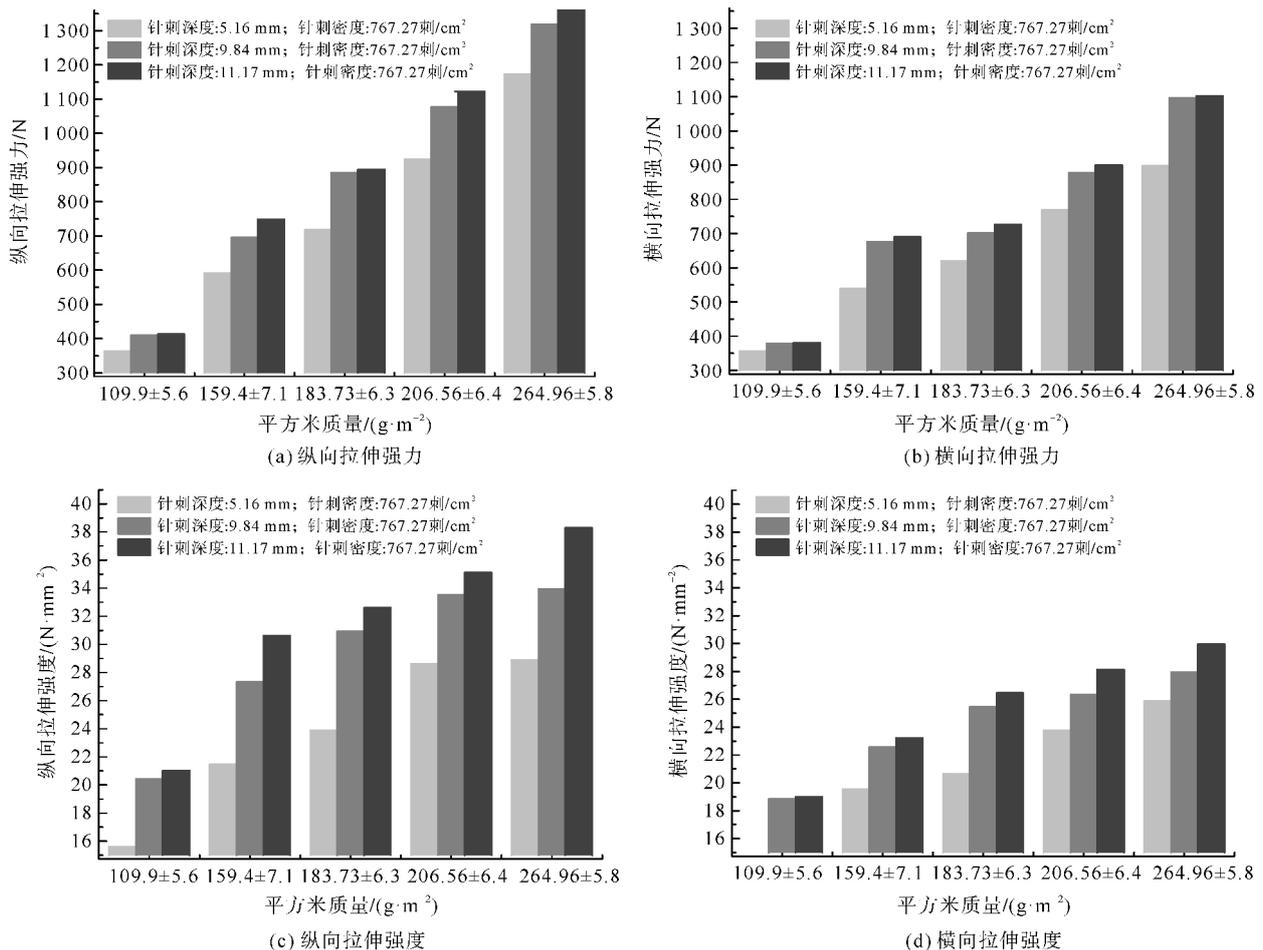


图4 样品的力学性能随针刺深度变化

Fig. 4 Change of mechanical property of the samples with the needling depth

2.3 工艺对防刺性能的影响

图5为不同平方米质量样品的静态防刺力随针刺密度和针刺深度的变化规律。首先,从图5可以看出,静态刺破力随样品平方米质量变化而变化,并

且表现为随着平方米质量的增大而增大的趋势。这主要是因为样品抵抗刀具穿刺主要依靠UHMWPE纤维所具有的高强度和耐切割性,而样品平方米质量的增加就是通过增加样品的厚度而获得刀具同时切

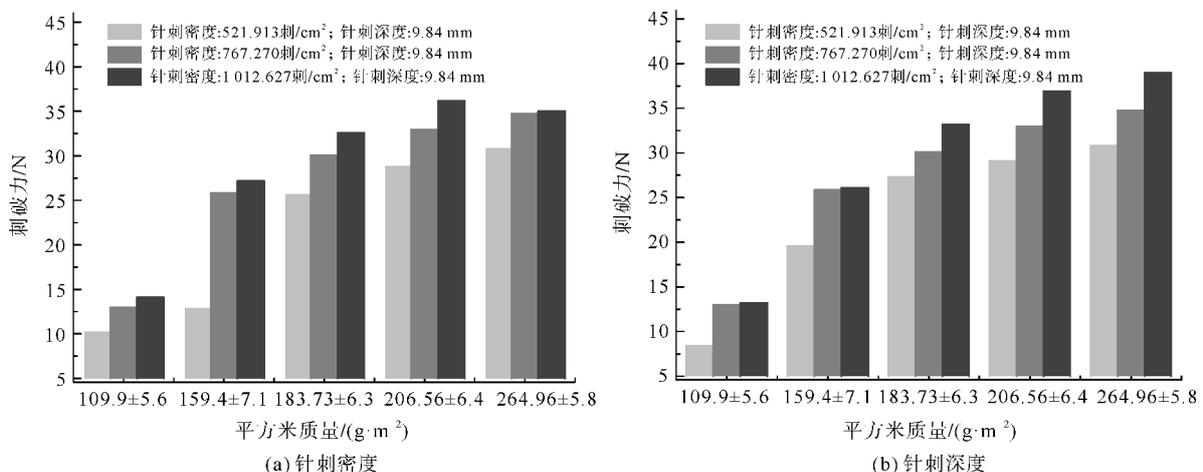


图5 静态穿刺力随针刺工艺的变化

Fig. 5 Change of static puncture force with needling process

割 UHMWPE 纤维的数量,进而样品平方米质量的提高会引起静态穿刺力的增大。其次,对于不同平方米质量的样品,在针刺深度 5.16 ~ 11.17 mm 和针刺密度 521.91 ~ 1 012.63 刺/cm² 内的防刺能力均随着针刺密度和针刺深度的增大而增大。这可能是由于在一定程度上针刺深度和针刺密度的增大使得样品的孔隙率降低,也就是单位体积内的 UHMWPE 纤维根数的增多,也就意味着刀具穿刺样品的过程中要经受更多的纤维摩擦力,进而提高样品的静态防刺力。

通过上述分析可知,UHMWPE 针刺非织造材料的厚度和孔隙率对静态防刺力有显著的影响,因此,本文以静态防刺力为响应指标进行二次多元回归拟合,得到厚度和孔隙率对静态防刺力的二次多项回归方程(防刺 = 1 163.07 - 26.76 × 孔隙率 + 0.65 × 单面面积质量 - 0.001 63 × 孔隙率 × 单面面积质量 + 0.15 × 孔隙率 × 孔隙率 - 0.001 09 × 单面面积质量 × 单面面积质量)。回归分析表明:静态防刺力的二次多项回归方程决定系数 R² = 0.955 2。这表明二次多项回归方程的拟合度和可信度均较高,可用于分析 UHMWPE 针刺非织造材料的厚度和孔隙率对静态防刺力的理论关系。图 6 为厚度和孔隙率与 UHMWPE 针刺非织造材料静态穿刺力的相应曲面。从图 6 可看出,其他工艺不变的情况下,对于平方米质量为 109.9 ~ 230 g/m² 的样品,其静态穿刺力在 81.18% ~ 86.69% 内随着孔隙率的增大而逐渐增大,这与实验值相符。

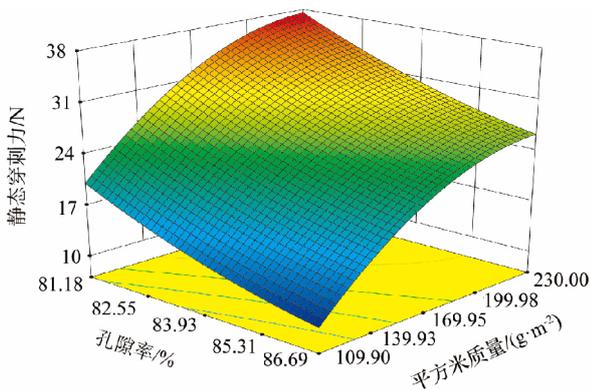


图 6 静态穿刺力与平方米质量和孔隙率的响应曲面

Fig. 6 Response surface between static puncture force, and weight per square meter and porosity

3 结 论

1) 以 UHMWPE 纤维为原料,采用梳理—交叉铺网—针刺的加工工艺制备的柔性非织造材料,在厚度方面上存在清晰的层次结构,并且纤维间相互穿

插、结合紧密,可以用于柔性防刺材料。

2) 针刺深度和针刺密度对样品的孔隙率有显著的影响,其特征为孔隙率随针刺深度和针刺密度的增加而逐渐降低,同时针刺深度和针刺密度对样品的纵横向拉伸强度和拉伸强力也有显著的影响。

3) 所建立的二次方模型的置信度高 (R² = 0.955 2) 在一定的针刺工艺条件下,UHMWPE 针刺非织造材料的厚度和孔隙率对静态防刺力有显著的影响。

4) 对 UHMWPE 针刺非织造材料的孔隙率与防刺的研究对柔性防刺材料的结构调控有一定的指导意义,但研究稍显单一,原料的孔径特性和舒适性还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] LI Rong, PANG Lijun, MA Hongjun, et al. Optimization of molar content of amidoxime and acrylic acid in UHMWPE fibers for improvement of seawater uranium adsorption capacity [J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, 2016: 1-9.
- [2] QIN Jianbin, ZHANG Guangcheng, ZHOU Lisheng, et al. Dynamic/quasi-static stab-resistance and mechanical properties of soft body armour composites constructed from Kevlar fabrics and shear thickening fluids [J]. RSC Advances, 2017, 7(63): 39803-39813.
- [3] GONG X, XU Y, ZHU W, et al. Study of the knife stab and puncture-resistant performance for shear thickening fluid enhanced fabric [J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(6): 641-657.
- [4] BAO Limin, SATO Shunsuke, MORIOKA Hideaki, et al. Improving stab-resistant textile materials with a non-woven fabric structure [J]. Journal of Textile Engineering, 2016, 62(3): 37-42.
- [5] MESSIRY M E, ELTAHAN E. Stab resistance of triaxial woven fabrics for soft body armor [J]. Journal of Industrial Textiles, 2016, 45(5): 1062-1082.
- [6] ZHU Deju, SZEWEIWA L, FRANCK V, et al. Puncture resistance of the scaled skin from striped bass: collective mechanisms and inspiration for new flexible armor designs [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2013, 24(25): 30-40.
- [7] 甄琪, 钱晓明, 张恒. 防刺材料的研究现状及展望 [J]. 棉纺织技术, 2014, 42(10): 77-81. ZHEN Qi, QIAN Xiaoming, ZHANG Heng. Research situation and prospect of stab-resistant materials [J]. Cotton Textile Technology, 2014, 42(10): 77-81.
- [8] 甄琪, 钱晓明, 张恒. 柔性防刺材料的研究进展 [J]. 上海纺织科技, 2015, 43(1): 4-7. ZHEN Qi, QIAN Xiaoming, ZHANG Heng. Study progress

- of soft-stab-resistant materials [J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2015, 43(1): 4-7.
- [9] 张玉芳, 朱牡, 庞雅莉. 用于个体防刺服的 UHMWPE 纤维针刺毡的性能研究 [J]. *产业用纺织品*, 2008(2): 24-27.
ZHANG Yufang, ZHU Mu, PANG Yali. Studies on the performance of UHMWPE needle felt for stab-resistant garment [J]. *Technical Textiles*, 2008(2): 24-27.
- [10] KANG T J, HONG K H, MI R Y. Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material [J]. *Fibers & Polymers*, 2010, 11(5): 719-724.
- [11] 张月庆. 高强聚乙烯柔性防刺服的研制与性能测试 [D]. 天津: 天津工业大学, 2012.
ZHANG Yueqing. Development and Test of Flexible Stab Clothing of UHMWPE [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2012.
- [12] 邢京京, 钱晓明, 黄顺伟, 等. UHMWPE 长丝加筋非织造布的制备及性能 [J]. *丝绸*, 2017, 54(4): 5-10.
XING Jingjing, QIAN Xiaoming, HUANG Shunwei, et al. The preparation and performance of the UHMWPE filament reinforced nonwoven [J]. *Journal of Silk*, 2017, 54(4): 5-10.
- [13] 黄魁, 靳向煜. 基于三叶形截面刺针的针刺工艺对 PTFE 滤料性能的影响 [J]. *产业用纺织品*, 2013(5): 10-14.
HUANG Kui, JIN Xiangyu. Effect of based trefoil needle technique on PTFE filter media performance [J]. *Technical Textiles*, 2013(5): 10-14.
- [14] 张恒, 甄琪, 王俊南, 等. 梯度结构耐高温纤维过滤材料的结构与性能 [J]. *纺织学报*, 2016, 37(5): 17-22.
ZHANG Heng, ZHEN Qi, WANG Junnan, et al. Structure and performance of high temperature resistant fibrous filters with gradient structure [J]. *Journal of Textile Research*, 2016, 37(5): 17-22.
- [15] KUO C F J, SU T L, TSAI C P. Optimization of the needle punching process for the nonwoven fabrics with multiple quality characteristics by grey-based taguchi method [J]. *Fibers & Polymers*, 2007, 8(6): 654-664.