

安全鞋用软质防刺中底研究概况

夏蕊¹ 王丽果² 吴婷² 陈红霞¹ 曹海建¹

1. 南通大学 纺织服装学院, 江苏南通 226019;
2. 际华三五五皮革皮鞋有限公司, 河南漯河 462000

摘要:总结了安全鞋用防刺中底的研究现状,重点介绍了安全鞋用防刺中底的材质,以及安全鞋用软质防刺中底的纤维种类、织物形式等,探究了其防刺机理。分析了安全鞋用软质防刺中底的发展趋势,为安全鞋用防刺中底的进一步研究开发提供参考。

关键词:安全鞋;防刺中底;防穿刺性能;织物形式

中图分类号:TS 106

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)02-0001-06

Research situation on soft stab-proof midsole for safety shoes

Xia Rui¹, Wang Ligu², Wu Ting², Cheng Hongxia¹, Cao Haijian¹

1. College of Textile and Garment, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China;
2. Jihua 3515 Leather Shoes Co., Ltd., Luohe 462000, Henan, China

Abstract: The research status of stab-proof midsole for safety shoes was summarized, the material of stab-proof midsole for safety shoes, the fiber types, fabric forms and mechanism of soft stab-proof midsole for safety shoes were introduced emphatically. The development trend of soft stab-proof midsole for safety shoes was analyzed, which provided reference for further research and development of stab-proof midsole for safety shoes.

Keywords: safety shoe; stab-proof midsole; stab-proof property; fabric form

近年来,随着劳动保护与自我保护意识的增强,对脚部的保护逐渐受到人们的重视。脚被称为人体的“第二心脏”。脚部的穴位很多,并且含有成千上万条末梢神经,与人体各脏器的健康密切相关^[1]。基于此,人们对鞋类产品的要求也不再仅局限于简单的穿着舒适方面,安全鞋应运而生。作为建筑、采矿、制造及公共安全等特殊领域从业人员用来保护足部的安全防护装备,安全鞋的市场需求量逐年增

长^[2]。国外自 20 世纪 40 年代起就提出将安全鞋用于军事作战领域。作为安全鞋最主要的防刺部位,防刺中底进入大众视野。随着高新技术和材料的发展,防刺中底的内衬材料经历了由钢板、金属片向金属复合材料的演变,其对人体足部的保护作用逐渐增强。尽管防刺技术和防刺材料性能随科技的发展不断提升,但安全鞋防刺性能的提升仍存在很大的上升空间。

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0810300);国家级大学生创新训练项目(202210304037Z)

收稿日期:2023-10-11

作者简介:夏蕊,女,1999年生,在读硕士研究生,研究方向为安全鞋用防刺材料,1252597406@qq.com

通信作者:曹海建,教授,主要从事防弹防刺材料的研发,caohaijian@ntu.edu.cn

1 安全鞋用防刺中底的材质

安全鞋除了需确保穿着者行动自如外,还应能够有效防止长钉、重物以及坚硬有棱角的物品对其产生损伤,防刺中底是安全鞋中发挥这一作用的主要部件,防刺中底的防刺性能直接反映安全鞋的防刺能力。根据材质的不同,现有安全鞋用防刺中底可分为硬质、半硬质和软质防刺中底3种^[3-4]。

1.1 硬质防刺中底

硬质防刺中底的内衬防刺材料通常为由特种钢或铝合金等金属按一定的弯曲形态加工而成的防刺插板^[5]。当前的硬质防刺中底多采用轻质高强度合金(如铝合金、不锈钢、钛合金等)制作而成。硬质防刺中底的防刺性能强,但柔韧性不足,无法兼顾柔韧性与防刺性能^[6]。

硬质防刺中底经历了较长的发展时期。早在20世纪40年代,防刺中底内衬钢板和复合金属片就被美军用于军队作战中,以增强军事鞋底的防刺性能,避免长钉等锋利物体穿透鞋底而伤及足部。20世纪70年代,国内研发出一款安全鞋,用于行军和军事作战,防止尖锐的物体及崎岖的道路对足底产生伤害。这种安全鞋的中底内衬1块钢板,以提高防刺性能,但钢板既厚重又难以弯曲,会导致穿着后行走非常困难^[7]。在需求的刺激下,一款新的安全鞋(沙漠作战靴)应运而生,并于1991年底开始列装美军。这款作战靴的中底不再采用普通钢板,而是改用轻质铝合金材料,并通过冲压成型,形成正六边形的蜂窝状结构,再被制成防刺中底,这既提高了产品强度,又增强了安全鞋对足底的防护作用^[8]。

1.2 半硬质防刺中底

半硬质防刺中底是指采用金属丝或钢丝作为纱线,经针织或机织加工而成的中底。与硬质防刺中底相比,半硬质防刺中底在保证了一定防刺性能的前提下,具有较高的灵活性^[9]。当前,国内外关于半硬质防刺中底的研究大多集中在柔性、高性能纤维材料与金属丝复合产品方面^[10]。硬质、半硬质防刺中底因质量大、舒适性差及使用时效短等缺点,正逐渐没落于防刺品市场^[11]。

1.3 软质防刺中底

软质防刺中底具有质轻、柔软舒适等优点。自杜邦公司的芳纶问世后,性能优异的合成纤维迎来百花齐放的局面,相关企业和学者也将目光投向高性能纤维。随科学技术的快速发展,为满足不同场合安全鞋的防刺强度需求,人们尝试研制了各种软质防刺中底。费锐等^[12]以高强纤维聚合片、玻璃纤维机织物及芳纶机织物为原料,通过黏合剂黏合的方式,制得一种强度较高的防刺中底。梁高勇等^[13]将不同线密度的高强、低伸长率化纤长丝与短纤非织造布黏结制成防刺中底,并与添加防刺金属板的硬质防刺中底相比,发现这种复合材料防刺中底的柔软性和弯曲性大幅提高^[14]。

随着研究的深入,人们发现,单纯使用各种性能的纤维及其聚集结构,无法生产出令人满意的防刺中底,满足人们对安全鞋的使用要求。伴随着材料科学与技术的发展,由树脂与高性能纤维聚合体制成的防刺复合材料日益受到人们的重视。

2 软质防刺中底用纤维类型

用于制备安全鞋软质防刺中底的纤维材料,应具有高强、高模、抗冲击、抗剪切等特性。目前,安全鞋用软质防刺中底常用的高性能纤维主要有芳纶、超高相对分子质量聚乙烯(UHMWPE)纤维、高强聚酯纤维等。

2.1 芳纶

芳纶又分为对位芳纶和间位芳纶,目前防护产品中使用的多为对位芳纶(Kelvar纤维)。Kevlar纤维的种类取决于其本身的取向度和结晶度。Kelvar纤维的最大特点是强度和模量高,热稳定性和柔韧性良好,因此它的可纺性好。Kelvar纤维的强度比钢丝高3倍,比高强度聚酯工业丝高4倍,而且它还具有良好的化学稳定性,但在高浓度的强碱或强酸作用下,Kelvar纤维的性能会受到损害^[15]。此外,Kelvar纤维的抗紫外线辐射性也较差。但Kelvar纤维用于制作安全鞋防刺中底,既能发挥它柔软、高强和耐磨的优势,又可避免其缺点对织物性能的影响。不足之处是,Kelvar纤维防刺材料的成本过高,无法大规模市场化。

2.2 UHMWPE 纤维

UHMWPE 是一种相对分子质量为 1 000 000~8 000 000 的聚乙烯 (PE), 具有质轻, 结晶度和强度高, 力学性能好等特点。由于 UHMWPE 的分子结构中不含羟基和氨基, 因此它具有很好的耐酸碱性能和耐有机溶剂腐蚀性能。此外, UHMWPE 纤维的分子链上无不饱和基团, 因此它具有极好的耐光性和抗热老化性能^[16]。然而, UHMWPE 纤维的熔点较低, 耐热性差, 长时间的高温作用会使其性能下降。UHMWPE 纤维用于安全鞋领域最大的缺点是其织物的黏附性较差, 这导致安全鞋含 UHMWPE 织物的防刺部件很容易与鞋底其他部件分层脱黏, 从而缩短了安全鞋的使用寿命。

2.3 高强聚酯纤维

聚酯纤维是由美国杜邦公司于 1953 年推出的。聚酯纤维的力学性能优良、尺寸稳定性好、耐化学腐蚀且价格较低, 因此备受青睐。聚酯工业丝是一种强度很高的粗旦工业用长丝, 它的线密度约为 550 dtex。按性能划分, 聚酯工业丝可分为高强丝、高强低伸长丝、高强低收缩丝、高模低收缩丝、耐磨长丝等类型^[17-18]。近年来, 高强聚酯纤维在我国的发展迅猛。高强聚酯纤维是一种重要的工业用纺织材料, 其在强度、初始模量、延伸率、耐热性及蠕变性能等方面均具有显著的优势, 价格也相对较低, 适用于制备安全鞋用防刺中底。

3 软质防刺中底的织物形式

安全鞋用软质防刺中底被刺破或受损伤的主要原因通常是硬质物体的刺入使织物结构变得疏松或纱线被抽拔拉出。因此, 织物结构对防刺性能有很大的影响。用于制备安全鞋用软质防刺中底的常见织物形式有机织物、非织造布及复合防刺布等。

3.1 软质防刺中底用机织物

机织物是经纬纱相互垂直排列形成的柔性制品, 其结构紧密, 具有二维、三维等多种结构。织物的结构、密度, 以及纱线种类等会对织物的防刺性能产生影响。

用于制作安全鞋防刺中底的机织物多采用平纹组织, 这是因为与其他组织相比, 平纹组织中纱线间的抱合力大。杨沙沙^[19]以纤维为原料, 织制了平

纹、斜纹、缎纹和三层角连锁机织物, 并对织物的防刺性能进行测试分析。结果表明, 平纹织物的刺破强力最大, 斜纹织物次之, 三层角连锁织物再之, 缎纹织物最小。Wang 等^[20]采用成本较低的聚酯材料制备了不同组织结构的防刺织物, 并对织物进行了防刺性能测试。结果表明, 结构紧密的平纹织物的防刺效果比缎纹织物和斜纹织物的好。邹画眉等^[21]制作了 12 组不同尺寸的织物试样, 测定其准静态抗刺破性能, 探讨织物组织、刺入角度等因素对防刺性能的影响。结果显示: 平纹组织织物的防刺性能最好; 相同紧度条件下, 纱线线密度对织物的防刺性能有显著的影响; 随着织物经纬纱线密度的增大, 其防刺性能先上升后降低; 相比于 45° 斜向刺入, 平纹织物经向和纬向的防刺性能更好。张肖^[22]以 UHMWPE 纤维为原料, 分别制备厚 7.58 mm 的单经双纬锁心三维织物和厚 8.34 mm 的双经双纬锁心三维织物, 并测试 2 种三维织物及其复合材料的静态、动态防刺效果。试验结果表明, 单经双纬织物的防刺效果更佳, 且织物密度影响其防刺效果。杜邦公司在专利 WO97/49849 中提出的高密度芳纶机织物可以有效防护尖锐物体的刺伤。这种芳纶机织物的织造紧度高、密度较大且单丝强度高, 因而具有很好的防刺性能。

3.2 软质防刺中底用非织造布

非织造布的成形包括纤维梳理成网和纤维固结两道工序。喂入速度、针刺密度、针刺深度等工艺参数会对非织造布的力学性能产生一定的影响^[23]。非织造布的生产工艺较多, 有纺黏法、熔喷法、热轧法、针刺法、化学黏合法和纺黏熔喷复合法 (SMS) 等。不同非织造布生产工艺的工艺条件不同, 影响产品性能的因素也不尽相同, 如采用热黏合工艺加工的非织造布, 热压时间和温度对其性能影响很大^[24]。随着非织造材料的快速发展, 越来越多的研究者和企业尝试将其用于制作安全鞋用防刺中底。

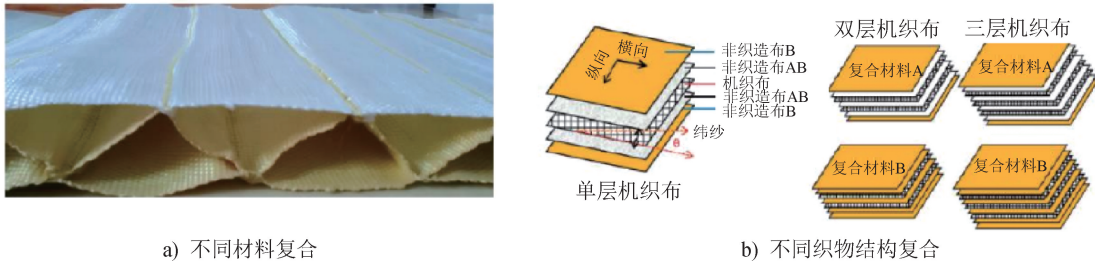
张恒等^[25]将针刺与水刺工艺结合, 制备出以 UHMWPE 纤维为基体的超细纤维非织造布。研究结果显示, UHMWPE 防刺材料具有良好的防刺性能。孙菲等^[26]以低熔点聚酯短纤维为主体材料, 混入玄武岩纤维制得非织造布。因玄武岩纤维的增强作用, 以及热黏合技术的加固作用, 所得材料的防刺性能提升, 同时防刺性能的稳定性提高, 制得的安全

鞋用防刺中底基材具有柔韧性佳、易加工和易弯曲等优点。

3.3 软质防刺中底用复合防刺布

单一结构的织物虽具备一定的防刺效果,但不能非常有效地保护脚底使其免受伤害,需在单一结

构防刺织物的基础上进行防刺效果的改善与提升。基于此,多层织物堆叠形成的复合织物,以及织物与其他材料(如树脂等)复合制成的复合防刺布应运而生。复合织物按其形成方式可分为材料复合和结构复合两种,如图1所示。



a) 不同材料复合

b) 不同织物结构复合

图1 复合织物结构

Fig. 1 Structure of composite fabrics

将同一结构、不同原料的织物复合在一起,可以发挥不同原料的性能优势,提升复合材料的性能。Li等^[27]以芳纶、玻璃纤维、聚氨酯纤维及低熔点聚丙烯纤维为原料,制备出复合防刺布。研究表明,所得复合防刺布的防刺效果受纤维原料组分的影响,提高芳纶用量可提升织物的防刺效果。Lin等^[28]采用高强聚酯短纤维和高强聚酯长丝制备夹层结构的复合材料。研究表明,以聚酯短纤维为中间层的短纤维夹层复合材料,在穿刺能量吸收方面优于以聚酯长丝为中间层的长丝夹层复合材料。

不同织物结构的防刺机理不同,可实现不同的防刺效果。将不同结构的织物复合在一起,复合后织物同时具备各复合层的优点,从而防刺性能得以提升^[29]。吴道正^[30]对非织造布、机织物及由这2种织物结构组合形成的复合材料进行防刺性能测试,结果表明,复合结构织物相较于单一结构织物,防刺性能明显提升。

以织物为增强体的树脂复合材料,提高了织物的性能,可实现防刺效果。选择合适的复合工艺,通过调节复合工艺参数使树脂均匀渗入织物表面,并填入织物交织点的间隙中,可制得复合防刺布^[31]。这种方法制得的复合材料可使织物的韧性增加,锐性利器刺入后,需要更多的能量分离和切割纤维、纱线,进而对材料产生损伤,因此防刺性能得以提升。Wang等^[32]将钢纤维添加至采用线密度为66.7 tex(600 D)的UHMWPE纤维织制

的平纹织物中,然后对织物进行树脂整理,并对整理前后的UHMWPE平纹织物进行防刺试验。动态防刺试验结果显示,采用热固性树脂浸渍的UHMWPE平纹织物的防刺效果更佳。晏义伍等^[33]以热塑性树脂Surlyn作为基体、芳纶平纹织物作为增强体,经热压成型后制备出一种复合防刺布。其通过树脂将芳纶纤维牢牢固着在一起,可避免织物受到硬物或钉尖穿刺时纱线滑移。此外,纤维与树脂基体的脱黏过程中,也有一定的吸能作用。因此,所得复合防刺布的防刺性能优于纯芳纶织物。

4 软质防刺中底的防刺机理

目前,安全鞋已被用于建筑业、采矿业、制造业及公共安全等特殊职业领域,用于保护相关从业人员的脚部安全。安全鞋最主要的性能指标之一是防刺性能。研究防刺材料的防刺性能,对防刺机理的分析必不可少。深入探究材料的防刺机理,可以为材料防刺性能的提高提供理论依据。

不同材质的防刺材料,防刺机理也不同。硬质防刺材料的防穿刺机理主要为利用金属的高硬度,使穿刺物尖端钝化,降低硬物或钉尖的贯穿力,并借助材质的形变吸收能量,从而防止硬物或钉的刺入。相较于硬质防刺材料,软质防刺材料的防刺机理更为复杂。

徐素鹏等^[34]和Termonia等^[35]通过试验观测与

计算机仿真,将织物材料被穿刺的过程分为若干阶段,如图 2 所示。

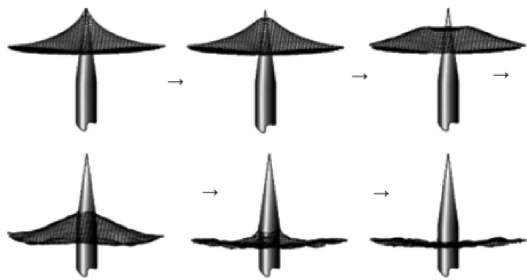


图 2 长钉穿刺平纹 Kevlar 织物的过程示意图
Fig. 2 Schematic illustration of the process of puncturing plain Kevlar fabric with spikes

穿刺物扎入织物内侧的过程中,与织物产生摩擦或剪切作用,此时纱线的滑移决定着穿刺物的刺入。据此可知,长钉穿刺过程中,由于覆盖因子或纤维含量偏低,即织物紧密程度不足,纱线产生滑移,这是织物被刺破的重要原因。通过柔性树脂涂层复合的方法,可在一定程度上限制纱线之间的相对滑移,从而最大化利用纱线的抗拉伸和抗剪切性能,提高复合材料的防刺性能^[36-37]。

5 结束语

随着社会的发展,人们对安全的认识不断提高,个体防护用品的使用不再局限于某些特定的行业,公众对日常生活中的个人安全防护也愈加关注。基于此,人们对防刺装备也提出了更高的性能要求,不仅要求其性能达标,而且要求其兼具舒适性和灵活性。满足防刺性能要求,同时兼具轻质、柔软和穿着舒适性的软质防刺中底,是安全鞋用防刺中底未来主要的发展方向。但目前对安全鞋用软质防刺中底的研究还不够深入,在原料、结构和性能等方面都存在一定的上升空间。此外,在确保安全鞋用软质防刺中底防刺性能的基础上,研发提升鞋大底的防刺性能,可在缓解中底防刺压力的同时,进一步提升安全鞋的防刺性能。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 徐明,罗穆夏,刘宏娟. 中国足部保护装备研究现状及发展趋势[J]. 中国皮革,2022,51(11): 89-94.
- [2] 李增录,周素静. 安全防护鞋靴研究现状及发展趋势[J]. 中外鞋业,2018(3): 17-21.
- [3] 张莉,李美真. 软质防刺材料的现状与发展[J]. 纺织科技进展,2015(7): 14-16.
- [4] 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.
- [5] 沈雪石. 美军新式武器装备一瞥[J]. 国防科技,2001(9): 38-39.
- [6] 王妮,赵玉梅,俞建勇,等. 防刺服装的开发与研究[J]. 上海纺织科技,2005,33(12): 22-24.
- [7] 魏笑笑. 高强涤纶柔性防刺复合材料的制备及性能研究[D]. 西安:西安工程大学,2018.
- [8] 李亿光. 防刺穿鞋的现状和研制构想[J]. 中国个体防护装备,2006(4): 5-7.
- [9] 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.
- [10] 董云兴. 防刃手套:CN02274043. 0[P]. 2003-05-28.
- [11] 乔咏梅. 织物特性对材料防刺性能的影响[J]. 纤维复合材料,2005(4): 10-12.
- [12] 费锐,倪济云,王修行,等. 作训鞋靴用复合抗刺穿中底的开发和应用[J]. 中国个体防护装备,2010(4): 28-30.
- [13] 梁高勇,陈绮梅,张富松. 织物/非织造布复合成型抗刺穿中底研究[J]. 中国个体防护装备,2009(3): 12-13.
- [14] LI C S, HUANG X C, LI Y, et al. Stab resistance of UHMWPE fiber composites impregnated with thermoplastics[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2015, 25(9): 1014-1019.
- [15] 周美进,邓飞. 对位芳纶复合材料的研究进展[J]. 合成技术及应用,2016,31(4): 22-27.
- [16] 牛艳丰,于敏. 超高分子量聚乙烯纤维在民用领域的应用进展[J]. 纺织导报,2016(10): 94-95.
- [17] 蔡晓娇. 3万吨/年高强涤纶工业丝基础理论研究及工厂设计[D]. 大连:大连工业大学,2013.
- [18] 薛元,汤成坦,颜志勇. 工业用涤纶长丝的结构与性能[J]. 纺织学报,2009,30(11): 33-36.
- [19] 杨沙沙. 防刺鞋的整体结构设计与性能表征[D]. 上海:东华大学,2014.
- [20] WANG Q S, SUN R J, TIAN X, et al. Quasi-static puncture resistance behaviors of high-strength polyester

- fabric for soft body armor [J]. *Results in Physics*, 2016, 6: 554-560.
- [21] 邹画眉,刘新金,谢春萍,等. 超高分子量聚乙烯平纹织物的穿刺冲击模拟与响应分析[J]. *丝绸*,2019,56(6):46-51.
- [22] 张肖. UHMWPE 纤维双纬锁心三维机织物研发 [D]. 天津:天津工业大学,2018.
- [23] WANG R, LI T T, LOU C W, et al. Effect of process parameters on puncture resistance of composites by needle punching and thermal bonding techniques [J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2013, 28 (9): 1029-1035.
- [24] LIN J H, LIN C C, CHEN J M, et al. Study on the processing technology and mechanical properties of nonwoven fabric composited by recycled PP selvages [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 287 (6): 85-90.
- [25] 张恒,甄琪,钱晓明,等. 仿生树型超高分子量聚乙烯柔性防刺复合材料制备及其透湿性能[J]. *纺织学报*,2018,39(4):63-68.
- [26] 孙菲,李婷婷,林佳弘,等. 玄武岩机织增强热黏合抗穿刺鞋中底基材的力学性能[J]. *纺织学报*,2019,40(3):54-58.
- [27] LI T, WANG R, LOU C W. Static and dynamic puncture behaviors of compound fabrics with recycled high-performance Kevlar fibers [J]. *Composites: Part B*, 2014, 59: 60-66.
- [28] LIN T R, LIN T G, LIN M C, et al. Impact resistance of fiber reinforced sandwich-structured nonwoven composites: reinforcing effect of different fiber length [J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101345.
- [29] 关福旺,李佳霜,李丹,等. 机织物/非织造布叠层复合织物的防刺性能分析 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2022, 48(3): 28-32.
- [30] 吴道正. 柔性复合防刺材料的研制 [J]. *合成纤维*, 2011,40(8):32-34.
- [31] 左向春,张艳鹏,刘长顺,等. 个体防刺材料现状及发展趋势 [J]. *合成纤维*,2010,39(2):15-17.
- [32] WANG D N, LI J L, JIAO Y N. Stab resistance of thermoset-impregnated UHMWPE fabrics [J]. *Advanced Materials Research*,2010,139/140/141:133-136.
- [33] 晏义伍,曹海琳,赵金华. 纳米混杂 Kevlar/Surlyn 复合材料的制备与防刺性能研究 [J]. *中国个体防护装备*,2012(3):5-9.
- [34] 徐素鹏,张玉芳. STF/UHMWPE 织物复合材料防刺性能的研究 [J]. *西安工程大学学报*,2012,26(3):285-288.
- [35] TERMONIA Y. Puncture resistance of fibrous structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*,2006,32(9):1512-1520.
- [36] MAYO J B, WETZEL E D, HOSUR M V, et al. Stab and puncture characterization of thermoplastic impregnated aramid fabrics [J]. *International Journal of Impact Engineering*,2009,36(9):1095-1105.
- [37] 刘娟,王新厚. 树脂成型柔性防刺材料空隙率对防刺性能的影响 [J]. *产业用纺织品*,2015,33(5):7-10.

