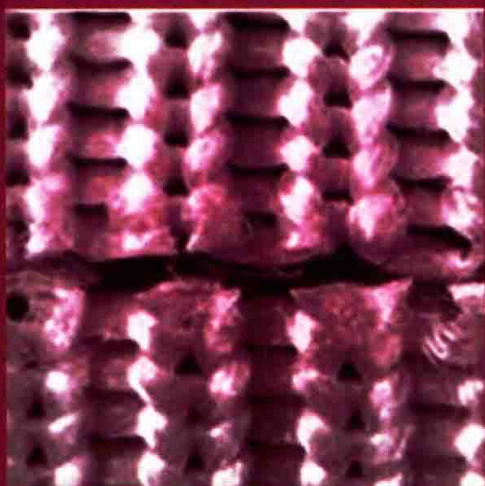



高新纺织材料研究与应用丛书



纺织结构 柔性防护材料的 防刺割性能研究

FANGZHI JIEGOU
ROUXING FANGHU
CAILIAO DE FANGCIGE
XINGNENG YANJIU

王丽娟 ◎ 著

 中国纺织出版社有限公司

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

高新纺织材料研究与应用丛书

纺织结构柔性防护材料的 防刺割性能研究

王丽娟 著

 中国纺织出版社有限公司

内 容 提 要

本书重点介绍了剪切增稠液/高性能纤维织物柔性复合材料的防刺割性能及其在个体机械防护领域的应用。主要内容包括剪切增稠液的制备及其力学性能研究、高性能纤维纱线的抗切割性能、高性能纤维织物的防刺割性能、剪切增稠液/高性能纤维织物柔性复合材料的制备及防刺割性能、剪切增稠液增强高性能纤维织物防刺割性能及其作用机理。本书内容反映了该领域的研究前沿及发展趋势,可为个体柔性机械防护装备的开发提供理论支持与技术参考。

本书可供材料工程、纺织工程、服装设计与工程等相关领域科研人员、技术人员借鉴,也可供材料、纺织、服装等相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

纺织结构柔性防护材料的防刺割性能研究 / 王丽娟
著. -- 北京: 中国纺织出版社有限公司, 2022.11
(高新纺织材料研究与应用丛书)
ISBN 978-7-5180-9882-8

I. ①纺… II. ①王… III. ①纺织纤维—柔性材料—
复合材料—功能材料—研究 IV. ①TS102.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第181496号

责任编辑: 沈 靖 责任校对: 楼旭红 责任印制: 王艳丽

中国纺织出版社有限公司出版发行

地址: 北京市朝阳区百子湾东里A407号楼 邮政编码: 100124

销售电话: 010—67004422 传真: 010—87155801

http: //www.c-textilep.com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 http: //weibo.com/2119887771

三河市宏盛印务有限公司印刷 各地新华书店经销

2022年11月第1版第1次印刷

开本: 710×1000 1/16 印张: 13.5

字数: 210千字 定价: 88.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社图书营销中心调换

前 言

安全防护是军队或生产生活中常见的问题之一，开发轻便灵活、柔软舒适的个体安全防护装备具有重要的研究意义。近年来，由纳米颗粒制备的剪切增稠液（STF）和高性能纤维织物浸渍复合而制备成的柔性复合材料广泛应用于个体机械防护领域。剪切增稠液是一种类似胶状的高浓度纳米颗粒悬浮液，其流变性能表明，稳定状态下，呈流体状态，一旦受到外界剪切载荷扰动，剪切增稠液受力点周围呈现液—固转化即剪切增稠现象，且这种现象是可逆的、可重复的。与其他柔性防护材料相比，剪切增稠液/高性能纤维织物柔性复合材料具有以下优点：质轻、柔韧性好、体积小，可以形成整体性很好的防护材料，进而对身体的各个部位进行有效的保护。

作者一直从事于轻量型纺织复合材料的机械防护性能研究，尤其是在剪切增稠液/纺织结构复合材料的机械防护性能方面进行了较深入的研究，建立了较为完整的剪切增稠液及剪切增稠液/纺织结构复合材料制备方法和测试技术，积累了扎实的试验经验和理论基础。现将相关的研究成果加以梳理总结，撰写此书，希望对从事相关研究的同行们具有一定的借鉴作用。

本书主要介绍了剪切增稠液的制备、力学性能及其在个体安全防护装备领域的应用。第1章为绪论部分，主要概述研究背景及意义、柔性机械防护材料的发展、防刺割性能的研究现状及主要研究内容；第2~第5章分别介绍了剪切增稠液的力学性能、高性能纤维纱线的防切割性能、高性能纤维织物的防刺割性能及剪切增稠液/高性能纤维织物复合材料的防刺割性能。

感谢安徽省高校自然科学基金项目（KJ2020A0109）、安徽农业大学人才引进项目（rc362003）、安徽省优秀青年人才支持计划项目（K2136005）对本书的资助。全书编写过程中得到了江南大学钱坤教授、俞科静教授、张典堂副研究员等，安徽农业大学杜兆芳教授、王健副教授、何银地、刘娜、张慧娟等，安徽工程大学杨莉、王竹君等，盐城工业职业技术学院周红涛，安徽科学技术出版社王秀才的帮助，另外，安徽农业大学硕士研究生申军、赵祺，本科生符文涛、邵林怡、孙乐也为本书的编写做了许多基础性工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏与不妥之处，恳请广大读者不吝赐教，容后修改。

作者
2022年7月

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 柔性防护材料防刺割性研究背景及意义	001
1.2 柔性机械防护材料的发展概述	003
1.2.1 柔性机械防护材料	003
1.2.2 柔性机械防护用纤维集合体	006
1.2.3 柔性防护用基体材料	018
1.3 防刺割性能的研究现状	026
1.3.1 相关理论基础	026
1.3.2 防刺割测试标准及方法	030
1.3.3 防刺割性能国内外研究现状及存在问题	041
1.4 本书主要研究内容	045
第 2 章 STF 的力学性能研究	048
2.1 引言	048
2.2 STF 的制备及流变性能	048
2.2.1 试验原料及设备	049
2.2.2 STF 的制备步骤	049
2.2.3 流变性能测试	050
2.3 STF 挤压和抽拔模式下的力学性能研究	052
2.3.1 STF 挤压和抽拔力学试验	052
2.3.2 试验参数对 STF 挤压模式下力学性能的影响	055
2.3.3 抽拔速度对 STF 抽拔力学性能的影响	060
2.4 挤压和抽拔力学行为下 STF 的增稠机理	062
2.4.1 Jamming 现象	063

2.4.2	Jamming 动态前延模型	065
2.5	本章小结	067
第 3 章	UHMWPE 纱线的抗切割性能研究	069
3.1	引言	069
3.2	UHMWPE 纱线抗切割性能的试验研究	070
3.2.1	试验设计	070
3.2.2	切割特征曲线分析	075
3.2.3	结果与讨论	077
3.3	UHMWPE 纱线切割性能的理论分析	085
3.3.1	UHMWPE 纱线切割过程受力分析	085
3.3.2	UHMWPE 纱线切割断裂过程	087
3.3.3	UHMWPE 纱线切割破坏机理分析	094
3.4	本章小结	097
第 4 章	UHMWPE 纬编针织物的防刺割性能研究	098
4.1	引言	098
4.2	UHMWPE 纬编针织物的刺割试验	099
4.2.1	水平切割试验	099
4.2.2	垂直刺割试验	101
4.2.3	测试结果与讨论	103
4.2.4	总结	112
4.3	UHMWPE 纬编针织物的刺割过程	113
4.3.1	刺割过程分析	113
4.3.2	纬编针织物刺割过程的摩擦力研究	118
4.3.3	纬编针织物刺割过程的织物形变研究	132
4.4	UHMWPE 纬编针织物的防刺割机理	142
4.4.1	断裂力学理论	142
4.4.2	纬编针织物刺割断裂理论	145
4.4.3	刺割过程能量守恒	150
4.5	本章小结	153

第 5 章	STF/UHMWPE 纬编针织物柔性防护材料的防刺割性能研究	155
5.1	STF/UHMWPE 复合纱线切割性能研究	156
5.1.1	STF/UHMWPE 复合纱线的制备	156
5.1.2	切割测试设备与方法	157
5.1.3	结果与讨论	157
5.2	STF/UHMWPE 纬编针织物柔性防护材料的制备	160
5.2.1	试验材料和设备	160
5.2.2	制备工艺	161
5.3	STF/UHMWPE 纬编针织物柔性防护材料的防刺割性能	163
5.3.1	STF/UHMWPE 纬编针织物柔性防护材料的刺割测试	163
5.3.2	测试结果与讨论	164
5.4	STF 增稠现象和 STF 复合织物防刺割性能的协同效应	170
5.4.1	刺割速度相关的协同性分析	170
5.4.2	摩擦效应的协同性分析	173
5.4.3	刺割断口形貌分析	177
5.5	本章小结	179
第 6 章	主要结论与展望	182
6.1	主要结论	182
6.2	展望	187
参考文献		189

第1章 绪论

1.1 柔性防护材料防刺割性研究背景及意义

在日常生活及工业生产中，人们会受到刀具及尖锐器物的伤害，防护产品不管在军用还是民用方面的需求都在日益增长。国外把这类产品统称为个人防护装备（personal protective equipment, PPE），即为人体添加额外保护而产生的一种很广泛的产品设计项目。

个人防护装备主要分为两大类：生化防护装备和机械防护装备。生化防护装备主要抵御来自外界的毒气、核磁辐射、电流、热、火、噪声等，而机械防护装备是指为防御子弹、爆炸弹片、刀具、锥子、高空物体等对人体产生的伤害而研制的防护装备，常见的有防护头盔、防弹衣、防刺服、防割服及手套等^[1]。常见个体机械防护装备如图1.1所示。

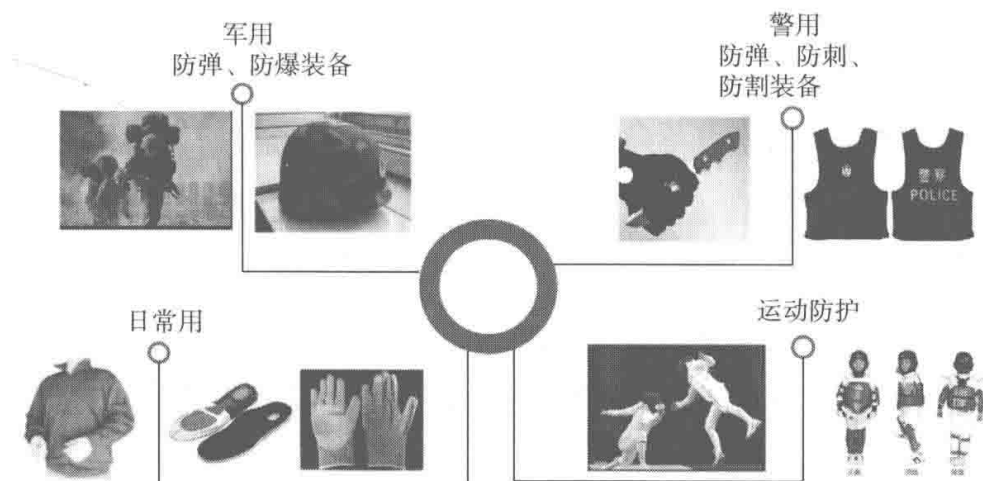


图 1.1 个体机械防护装备

从主体材料的灵活度和柔韧度两方面评判,个体机械防护装备材料可分成硬质体、半硬质体及软质三种类型^[2]。硬质体有防护装甲,一般是由金属材料及陶瓷材料制成插板而成,具有很高的防护性能,但是灵活性、柔韧性及舒适性差,限制了穿着者的使用积极性^[3]。半硬质防护材料主要有两种类型:一类是金属片、金属圈与高性能纤维材料复合而成;另一类是经过树脂浸渍高性能纤维织物。与硬质防护装甲相比,半硬质防护材料使穿着者在活动灵活性和使用舒适性等方面均有所提高。但半硬质防护材料仍然较笨重,配备人员的行动仍受到约束^[4]。软质机械防护材料主要有三种形式:一是高性能纤维织物和韧性聚合物基体的复合;二是涂层结构即将微纳米硬质颗粒涂覆在高性能纤维织物上;三是不同织物结构的叠层设计^[5]。

软质机械防护装备的出现可以追溯到冷兵器时代,人类用兽皮类材料设计盔甲来保护自己。第一次世界大战期间,较轻的铝、钛金属合金装甲被士兵们用于人体防护。20世纪30年代初期,美国杜邦公司首次提出纤维装甲的概念,接着杜邦公司研发的尼龙材料被成功生产,并在第二次世界大战时期用于个体防护装甲。20世纪70年代初期,美国杜邦公司开发的芳纶有机高性能纤维的问世是装甲材料由硬质向软质转变的转折点。超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)是20世纪80年代初由荷兰DSM公司以高密度的聚乙烯为溶质,以十氢萘为溶剂,采用凝胶纺丝法,通过热拉伸工艺制成的。它是目前所有合成纤维中比强度最高的纤维之一^[6-8]。高性能纤维的出现,结合生物科技、纳米科技的综合应用,这些都为个体机械防护装备的发展带来了前所未有革命性突破。个体防护装备材料如图1.2所示。

美国司法学会曾在《国家防刺服标准》中指出防刺服的设计理念应为“可穿戴性+适当防护=挽救生命”。防刺服在达到防护性能要求后,要求避免由于防刺服的穿着频率低下造成紧急情况下人员不能及时穿着而处于危险境地的状况。所以个体防护装备除了满足优良的机械防护性能外,在功能性和舒适性方面也要满足人体—装备—环境三者空间转换,以适应现代化军用和民用防护的需求。

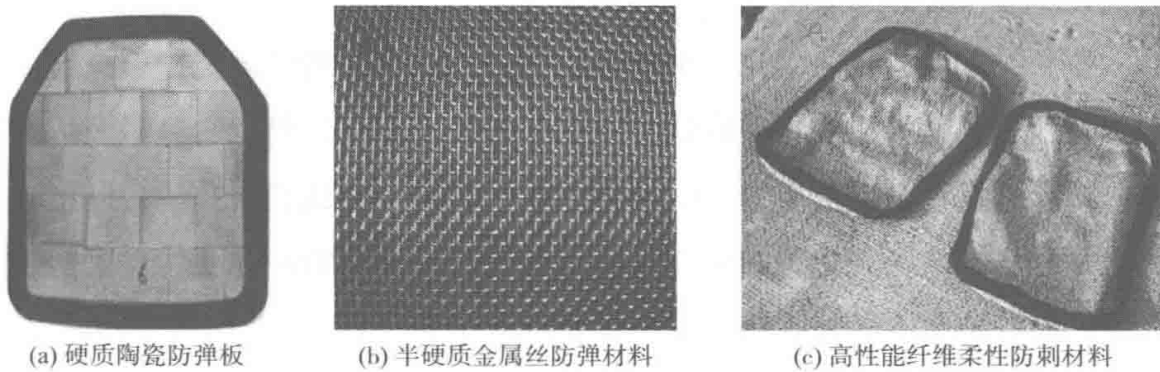


图 1.2 个体防护装备材料

1.2 柔性机械防护材料的发展概述

1.2.1 柔性机械防护材料

高性能纤维织物增强的柔性复合材料因其广泛的应用领域而成为近年来的研究热点，如用于军用装备、航天航空、交通、运动、土木及个体防护装备等领域。柔性复合材料在加工和使用过程有一定的韧性，可以适应环境的变形要求，使其保持良好的力学性能^[9]。柔性机械防护材料属于柔性复合材料的一类，其主要应用于军用或民用个体防护领域，如防弹、防刺、防砍、防割及抗冲击等。

柔性机械防护材料的主要组成包括纤维增强材料和基体，纤维以有机高性能纤维为主，如芳纶、超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维、聚对亚苯基-苯并二噁唑（PBO）纤维等，也可以通过纤维混合纺纱，如在纺纱时使用有机高性能纤维、无机高性能纤维及天然纤维经包缠技术形成包缠纱，既能提高纱线的力学性能，又能改善纱线的舒适性。常用的基体材料有热塑性树脂、橡胶及剪切增稠材料等^[10]。

柔性机械防护材料的主要结构形式有纤维织物的叠层结构、硬质粒子和纤维织物的涂层结构、基体和纤维织物的复合结构等^[11]。

1.2.1.1 纤维织物的叠层结构

叠层结构是指两种及以上的织物通过自由叠放或者稀疏缝合形式组合在一起。织物结构常用的有单向结构(UD布)、机织、针织、非织及编织等,或者是两种及以上组合。Chen等通过数值模拟和试验研究了12层不同织物复合材料的层间抗弹响应,研究发现,叠层织物的迎弹面主要是剪切破坏,而被弹面主要是拉伸破坏,利用超高分子量聚乙烯机织布和UD布的力学性能以1:3的层数比例优化设计出防弹叠层织物^[12]。陈晓等也对叠层织物从选材、叠层顺序、层数、加工工艺等方面,利用有限元软件仿真几种复合材料防弹靶板的抗弹道侵彻过程,为军盔、防弹衣等防护装备提高防弹性能提供了帮助^[13]。顾伯洪等采用弹道贯穿方法,测试高性能纤维叠层织物(芳纶织物、高强维纶织物、高强聚乙烯织物、高强聚乙烯UD布)对子弹动能的吸收,研究叠层织物弹道极限 V_{50} [指针对一定质量的弹头在该速度下(入射方向不变)穿透给定系统靶板的概率为50%]与面密度的关系,并在不同面密度和不同织物类型之间做出比较,对影响叠层织物防弹性能的因素作出探讨^[14]。王颖研究了超高分子量聚乙烯平纹布和黏胶非织造布叠层织物的抗穿刺性能,试验表明每层超高分子量聚乙烯织物之间存在一定的摩擦力,增强了织物的抗刺破性能;加入黏胶非织造布以提高织物的穿着舒适性,黏胶非织造布为复合织物在被刺破过程中提供了一定的缓冲作用,在一定程度提高了复合织物的抗刺破性能^[15]。

1.2.1.2 硬质粒子和纤维织物的涂层结构

涂层结构即利用粒径在20~200 μm 的硬质颗粒(如氧化硅、金刚砂、氧化铝、石英砂等)涂覆在织物表面来增强织物的机械防护性能^[16]。Labarre等探讨了碳纳米管涂覆Kevlar织物的纱线间摩擦性能。试验表明,碳纳米管处理的Kevlar织物通过织物内纤维间及纱线间摩擦力的提高而抗冲击性能提高^[17]。赵玉梅研究了硬质金属粒子涂层织物的防刺性能,通过对不同硬质粒子涂层材料(如氧化铝、碳化硅)和不同的黏合剂(如透明聚烯烃胶、PUA复合乳液、101胶黏剂),结合涂层厚度和胶粒比重等因素,开发了一种防刺性能优良且对穿着舒适性影响最小的涂层复合材料^[18]。

1.2.1.3 基体和纤维织物的复合结构

复合结构常见的有以下三种类型。

一是高强度耐冲击的热塑性树脂，它们以浸渍和薄膜热压的形式与织物复合形成柔性防护材料。美国Criminolog公司的一项防穿刺背心专利中提出利用热塑性树脂或环氧树脂浸渍芳纶或高性能玻璃纤维的针织物制成柔性防刺材料，可对刀具、锥子等尖锐器物起到很好的防护作用^[19]。杨川采用Surlyn（沙林）树脂与芳纶织物复合，以芳纶平纹布及芳纶织物/Surlyn复合材料为基础材料，结合防刺过程分析，进行防刺靶板结构与优化研究^[20]。Firouzi 等研究超高分子量聚乙烯织物与尼龙66树脂复合，其防刺性能比纯织物提高77%以上^[21]。

二是橡胶类低模量高韧性弹性体，它们涂覆于织物表面形成柔性防护材料，如橡胶防割手套（图1.3）。美国HDM公司开发的超级耐磨防割面料SuperFabric[®]是由高性能织物、微型六角硬质片和橡胶组成的，鉴于商业机密，具体成分不是很明确，如图1.4所示。

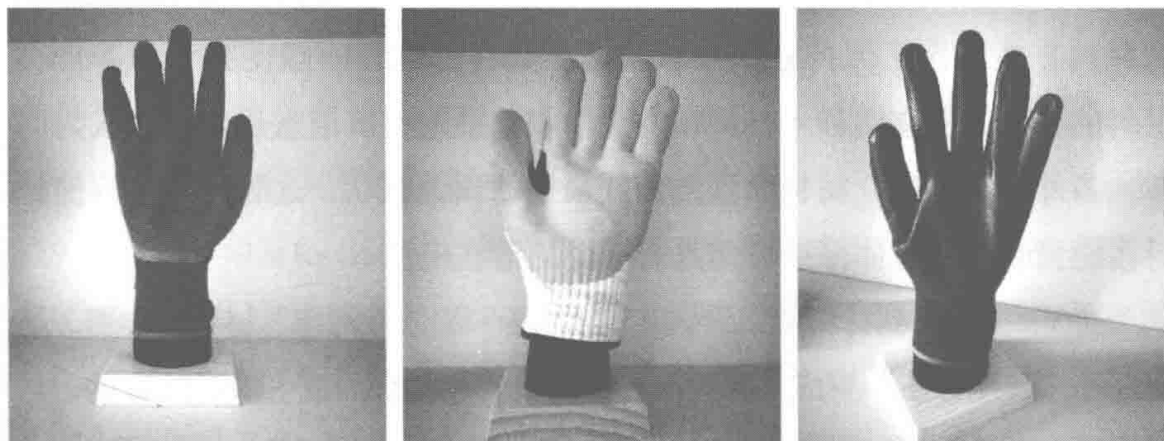


图 1.3 橡胶防割手套

三是近几年研究比较热门的剪切增稠材料与纤维织物的复合结构。剪切增稠材料在受到剪切外力作用时，表观黏度、模量等流变学参数表现出急剧非线性增加的变化，即出现所谓的剪切增稠行为（shear thickening behavior），且此行为是可逆的，因此是一种形状记忆材料。随着合成工艺及生物材料的发展，剪切增稠材料的种类也越来越多，分为剪切增稠

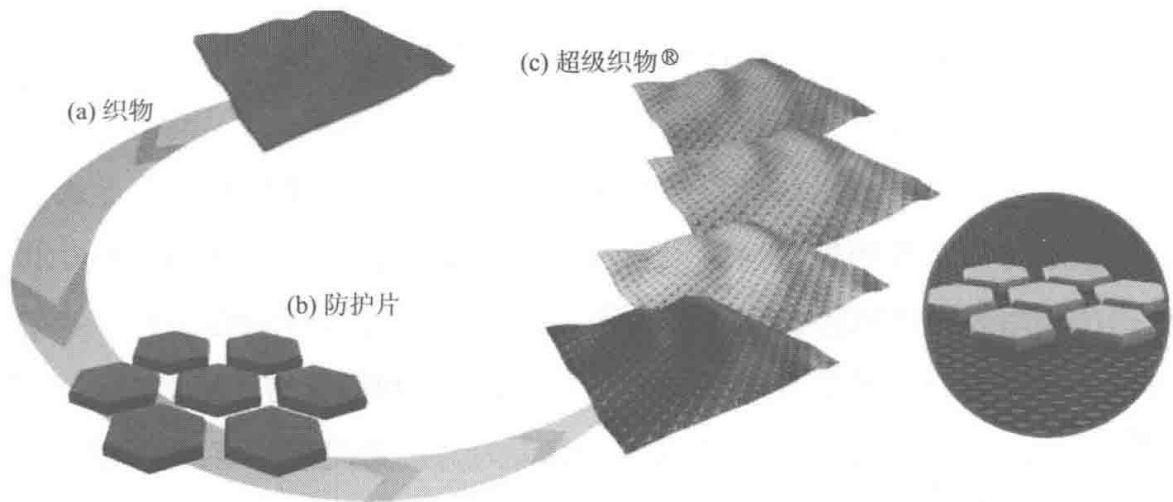


图 1.4 超级织物®

液、剪切增稠胶及剪切增稠材料增强聚氨酯泡沫。

(1) 剪切增稠液 (shear thickening fluid, STF) 是一种力学行为高度非线性的悬浮液, 在外界扰动下, 它甚至可以发生液—固转换, 如在适当的剪切作用下, STF的黏度会随着剪切速率的增加而迅速上升。通常情况下, 这种黏度的上升可达到几个数量级且过程是可逆的。

(2) 剪切增稠胶 (shear thickening gel, STG) 是一种硼硅氧烷聚合物材料, 在常态下保持松弛柔软状态而具有弹性, 一旦受到外力冲击, 材料的分子间能在纳秒 ($1\text{ns}=10^{-9}\text{s}$) 内相互锁定, 从液态迅速变硬成为固态, 当外力消失后, 材料会恢复到其最初的松弛软状, 这种可逆行为使材料在能量吸收和身体保护方面具有广泛的潜在应用。

(3) 剪切增稠材料增强聚氨酯泡沫属于“膨胀性泡沫”材料的类别, 是由一种“智能分子”组成 (黏胶液和一种聚合物化合而成) 的抗冲击单一材料, 可在不同的重力冲击下呈现出两种机械似的状态, 即坚硬与柔软^[22-24]。

目前研究较多且较成熟的是剪切增稠液 (STF), 中国科学技术大学龚兴龙课题组、南京理工大学熊党生课题组及江南大学俞科静课题组等都对其进行了深入和扩展研究。

1.2.2 柔性机械防护用纤维集合体

纤维借助纤维间摩擦形成的结构稳定的纱线和织物统称为纤维集合

体,具体形式有纱线/纤维束、缆绳、网、机织布、针织布、编织布、非织造布等。随着新型纤维及纺织机械装备的发展,新型纺织结构也在不断地涌现,纤维集合体也逐步从服用拓展到各类产业用领域^[25]。

1.2.2.1 纤维原料

柔性机械防护用纤维原料主要指高性能纤维,即具有高强度、高模量、高吸能、耐冲击等特性的纤维,分为有机高性能纤维和无机高性能纤维。目前,国内外柔性防护材料常用的有机高性能纤维包括芳纶、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维、聚对亚苯基-苯并双噁唑(PBO)纤维等;无机高性能纤维包括玻璃纤维、陶瓷纤维、碳纤维及玄武岩纤维等。

(1) 芳纶。芳纶是芳香族聚酰胺纤维在我国的商品名,防护材料所用的芳纶是对位芳香族聚酰胺纤维(PPTA),化学式如图1.5所示。芳纶具有高强度、高模量,其比强度是钢的5~6倍。另外,芳纶

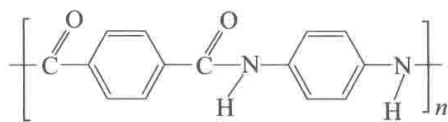


图 1.5 对位芳香族聚酰胺纤维的化学式

的韧性较好,是钢的2倍。芳纶尺寸稳定性在有机高性能纤维中最佳,经纺织加工后的强度保持率较高。芳纶耐高温,但是不耐紫外线及水。美国杜邦(DuPont)公司在1971年首次研制出该纤维,商品名为Kevlar。杜邦公司对Kevlar进行几代的产品更新,目前拥有的产品有Kevlar 29、Kevlar 129、Kevlar 49及Kevlar KM2等。后继出现的芳纶商品有荷兰阿克苏诺贝尔(Akzo Nobel)公司生产的Twaron,日本帝人株式会社(Teijin)生产的Technora,俄罗斯生产的Terlon以及我国生产的芳纶1414等^[26]。

对位芳纶在防护领域的应用最为广泛,可用于防弹、防刺、防割、抗冲击、减震等。除了具有良好的防护性能,芳纶的应用还大幅减轻了重量,是设计和开发轻量型防护产品的常用原料。目前,用于机械防护材料的对位芳纶主要有两方面的研究。一是对芳纶的化学改性研究,即在纺丝阶段加入增强剂来改善纤维的力学性能和对原有纤维进行表面改性^[27]。Hipp通过湿法纺丝在试验室研制出芳纶共聚物纤维,通过切割试验探讨了纤维结构、形态及物理性能与纤维抗切割性能的关系^[28]。Nie采用环氧

氯丙烷作为处理剂通过接枝反应对芳纶进行表面改性。改性后的芳纶拉伸力学性能没有降低，但是界面黏结力和表面摩擦性能明显提高^[29]。二是芳纶与其他纤维的混纺，此种方法有利于降低原材料成本及提高防护服装的服用性能。美国专利NO. 4918912阐述了一种抗切割和耐磨纱线，此纱线是由40%~60%的芳纶、20%~40%的尼龙和10%~30%的腈纶组成的混纺纱^[30]。

(2) 超高分子量聚乙烯纤维。超高分子量聚乙烯 (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) 由乙烯基单体自由基聚合而成的聚合物，

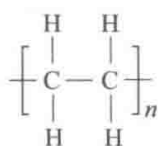


图 1.6 超高分子量聚乙烯纤维的化学式

化学式如图1.6所示。1979年荷兰皇家帝斯曼集团 (DSM) 在实验室采用十氢萘作溶剂利用凝胶纺丝法首次成功研制出超高分子量聚乙烯纤维，并申请了专利，直到1990年此纤维才成为商品进行工业化生产。目前，UHMWPE纤维的常见商品有荷兰DSM的Dyneema[®]SK系列、美国霍尼韦尔 (Honeywell) 公司的Spectra[®]系列。除了上述两种商品，还有意大利SniaFiber (SNIA) 公司的Tenfor系列以及日本三井公司的Tekmilion等。我国对高性能纤维的研制及生产也非常重视，投入大量的人力物力。早在20世纪80年代，中国纺织科学院就对UHMWPE纤维的研发展开工作，后来中国纺织大学 (现东华大学) 也加入对此纤维的研制。直到2000年，我国终于实现了UHMWPE纤维的商业化生产，成为继荷兰、美国、日本之后的第四个拥有生产UHMWPE纤维自主知识产权的国家。国内主要的厂家有北京同益中新材料科技股份有限公司、湖南中泰特种装备有限责任公司、宁波大成新材料股份有限公司及中国石化仪征化纤股份有限公司等。尽管我国的UHMWPE纤维已经商品化，但是仍存在很多的技术问题，如纤维的质量不高、产品不稳定，极大地影响了下游产品的品质；国内研发及生产企业的品牌意识及知识产权意识不强，导致我国的产品在市场上显得品牌混杂而影响力不足^[31-32]。国内外对UHMWPE纤维的研发及生产都极其重视。这是因为UHMWPE纤维的发展，对国防建设和军事装备有着不同寻常的战略意义。

UHMWPE纤维的相对分子质量极高，一般在 $1 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ 。由于纺丝过程的高倍牵伸，纤维具有高取向、高结晶等特点，因而具有优良的力学性能。UHMWPE纤维是所有高性能纤维中最轻的，密度仅为 0.97g/cm^3 ，因此，纤维比强度是迄今已商品化的所有纤维中最高的。UHMWPE纤维具有良好的化学性能，耐强酸、强碱，与对位芳纶相比，抗紫外线性能优良。但是UHMWPE纤维熔点低，只有 150°C 左右，玻璃化转变温度也较低，在高温下，纤维性能受到很大影响^[33]。近年来，关于UHMWPE纤维柔性防护材料的研究主要集中在两方面：一是UHMWPE纤维纺织集合体的设计，包括纱线结构的设计和织物结构的设计；二是UHMWPE纤维纺织材料增强韧性聚合物的复合材料^[34]。目前国内防刺服的生产原料基本以UHMWPE纤维为主。

(3) 聚对亚苯基-苯并双噁唑纤维。聚对亚苯基-苯并双噁唑纤维 (poly-p-phenylene Benzobisoxazole, PBO)，被誉为“21世纪超级纤维”，最初是由美国空军空气动力学研究人员研发的。其投放在市场上的商品名为Zylon，其化学分子式如图1.7所示

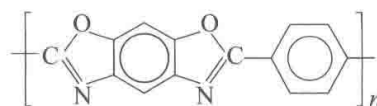


图 1.7 聚对亚苯基-苯并双噁唑纤维的化学式

PBO纤维是目前有机纤维中力学性能最好的纤维，其高端PBO纤维产品的强度高达 5.8GPa ，模量高达 280GPa 。另外，PBO纤维还具有良好的阻燃性能，耐高温达到 600°C ，极限氧指数为68，在火焰中不燃烧、不收缩。因此，PBO纤维主要用途集中在阻燃材料和力学增强材料，如用于消防服，高温加工业中的缓冲垫料，橡胶制品的复合增强材料，防弹、抗冲击等机械防护增强材料等^[35-36]。

(4) 无机高性能纤维。目前，柔性机械防护材料应用最多的纤维是有机高性能纤维。除此之外，无机高性能纤维如玻璃纤维、陶瓷纤维、金属纤维等也开始应用于防护材料中。无机纤维的刚性较大，不易弯曲或弯曲易折断，给纺织加工特别是针织上机带来一定的难度。无机纤维纺织材料服用性能很差，很难单独用于个体防护装备。可将无机高性能纤维与其他纤维制成包芯纱或混纺纱，开发新型功能纺织品^[37]。