

纺织结构复合材料 冲击动力学

顾伯洪 孙宝忠 © 著



科学出版社

纺织结构复合材料 冲击动力学

顾伯洪 孙宝忠 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从连续介质、单胞模型和严格细观结构模型三个尺度层次介绍织物、纺织结构复合材料冲击损伤和破坏机理,内容包括:实验研究二维和三维机织物、针织物、编织物、层压复合材料、三维机织复合材料、三维针织复合材料、三维编织复合材料的弹道冲击和低速横向冲击性能,采用分析模型和有限元模型计算上述材料的冲击破坏,在频域中揭示复合材料的冲击损伤机理和结构稳定性。相关研究工作将可以有效指导柔性纺织材料、刚性纺织结构复合材料在冲击加载和防护领域中的应用。

本书可供纺织科学与工程、复合材料力学和冲击动力学等领域的高校师生和相关专业科研人员阅读,也可供冲击防护领域的工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

纺织结构复合材料冲击动力学/顾伯洪,孙宝忠著.—北京:科学出版社,2012.1

ISBN 978-7-03-033245-5

I. ①纺… II. ①顾… ②孙… III. ①纺织纤维-复合材料-冲击动力学
IV. ①TS102.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 280783 号

责任编辑:王志欣 陈 捷 潘继敏 / 责任校对:包志虹
责任印制:赵 博 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年1月第一次印刷 印张:35 1/2

字数:700 000

定价:108.00元

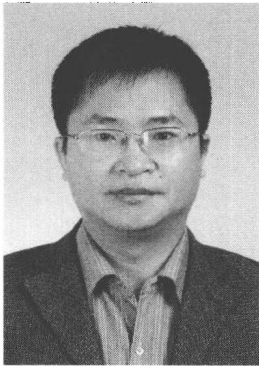
(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



顾伯洪,1967年出生于江苏省武进县,1996年获中国纺织大学(现更名为:东华大学)纺织材料专业博士学位,现为东华大学纺织学院教授。主要研究纺织结构复合材料冲击动力学、纺织材料结构性能和纺织品结构设计等。近5年以通讯作者名义在 *Philosophical Magazine*, *AIAA Journal* 和 *Journal of Composite Materials* 等 SCI 期刊上发表论文 50 篇。承担并完成国家自然科学基金项目和教育部科学研究重大项目多项。入选教育部新世纪优秀人才计划,获“上海市曙光学者”称号,获宝钢优秀教师奖,是 2009 年全国百篇优秀博士学位论文指导教师。

Email: profgu@gmail.com



孙宝忠,1978年出生于山东省曹县,2006年获东华大学纺织材料专业博士学位,现为东华大学纺织学院教授,任东华大学纺织学院高技术纺织品系副主任、轻质结构复合材料研究所副所长。主要研究纺织品结构和性能、轻质结构复合材料制备及力学、纤维集合体构造及力学、材料系统的频域分析、有限元计算和模拟等。近5年发表国际 SCI 期刊论文三十多篇,主持国家自然科学基金委员会、教育部、上海市科学技术委员会、上海市教育发展基金委员会课题共 7 项。先后获得“上海市晨光学者”、“上海市青年科技启明星”、“全国优秀博士学位论文奖”等荣誉。

Email: sunbz@dhu.edu.cn

序

纺织结构复合材料是纺织品在产业领域中的新拓展,出现之初就被发现有广阔的工程应用潜力。三维纺织结构复合材料由于纺织预成型体的整体性结构,在复杂外形的工程结构件制造和冲击吸能阻尼结构的设计方面,相比于层压复合材料具有独特优势。尤其在冲击加载下,沿厚度方向的纤维束将赋予复合材料更高的能量吸收。

自美国杜邦公司于1939年发明并商业化生产尼龙纤维、1965年发明对位芳族聚酰胺纤维(Kevlar®纤维)、1970年荷兰DSM公司发明高强聚乙烯纤维以来,多种高性能纤维的出现使纺织品开始大量应用于冲击防护领域。除软质防弹衣之外,以各种纺织预成型体作为增强相的硬质复合材料也被大量应用于冲击防护和动态阻尼吸能领域。研究纺织物及其复合材料的细观结构与冲击损伤、动态响应之间的关系,是设计高冲击损伤容限复合材料的重要步骤。

纺织结构复合材料的冲击响应是复合材料应用的重要基础性工作,除了明显的工程应用背景以外,该项研究还具有两方面的重要意义:

(1) 就表征复合材料力学性质而言,冲击响应是力学性质的重要内容,尤其是三维纺织结构复合材料在这方面的研究并不多见;对于冲击动力学而言,三维纺织结构复合材料是全新研究对象。

(2) 揭示三维纺织结构复合材料冲击响应和细观结构关系,将可以对飞行器、高速车辆和弹道防护复合材料进行有效设计,对制造性质稳定、使用可靠的复合材料具有工艺上的指导价值。

三维纺织结构复合材料有三维机织、三维编织和三维针织三大类,每大类又存在种类极多的子类。在冲击加载下,三维纺织复合材料内部应力波的传播由于纤维束空间构型的多样性而异常复杂,相对于单向复合材料或层压复合材料,建立基于三维纺织结构复合材料细观结构的力学模型,揭示复合材料应力波传播和耗散、冲击损伤机理,将是极具挑战性的课题。

本书作者在纺织结构复合材料与冲击动力学这两个研究领域的交接处切入,瞄准三维纺织结构复合材料在飞行器、高速车辆和弹道防护领域中的巨大应用潜力,研究三维纺织结构复合材料冲击响应和损伤机理,揭示冲击性能与三维细观结构特征间的关系,应用于后续的复合材料制造和结构件设计;在柔性织物材料和三维纺织结构复合材料冲击破坏机理、复合材料力学性质的应变率效应、新型三维纺织结构预成型体细观结构设计方面取得系列研究结果。该书是这些研究结果的总

结和归纳。

全书对于纺织结构复合材料冲击损伤从两个方向进行阐述：

(1) 从细观结构和单胞结构两种途径研究复合材料冲击变形和能量吸收。基于三维机织、编织、针织复合材料的细观结构和单胞结构,研究复合材料的细观破坏机制;构建单胞冲击损伤的刚度降解模型和临界失效面积破坏准则,发展三维纺织结构复合材料单胞子程序库,研究三维纺织结构复合材料的冲击变形和能量吸收,分析不同细观结构特征对冲击变形、破坏模式和能量吸收的影响。

(2) 用频域分析法研究冲击损伤机理。基于冲击加载过程中的应力时间历史和应变时间历史曲线,在频域中用数字信号分析方法研究在冲击加载下复合材料频率响应、结构稳定性和破坏机理,避免在时域中建立力学模型分析复合材料冲击破坏机理的复杂性,在频域中评价加载条件、细观结构对复合材料频率响应特征的影响以及频率相应特征和破坏机理的关系。

作者积极扩展了纺织科学与工程一级学科的传统研究内容,把纺织材料、纤维增强复合材料在准静态加载条件下的结构与性能关系扩展至冲击加载条件,引入材料应变率效应,在织物组织结构的连续介质假设层面、单胞结构层面和严格细观结构层面研究织物及其复合材料冲击损伤过程和破坏机理,研究结果丰富了纺织材料学的内容。相信该研究对于冲击动力学而言也具有新意。

希望作者能结合纺织结构复合材料冲击动力学的国际学术前沿,对接国家发展的重大战略需求,更深一步拓展纺织结构复合材料冲击损伤机理研究内容,把相应研究成果付诸于实际应用。

本书作者之一的顾伯洪教授 1989 年跟随我攻读硕士学位,一直研究纺织材料结构与性能,后来扩展至纺织结构复合材料。多年研究,小有心得。今日成书,颇感欣慰。希冀百尺竿头,更进一步。斯为序。

中国工程院院士

于 2011 年中秋节

前 言

纺织结构复合材料是目前可真正应用于工程结构的复合材料种类之一。高性能纤维和树脂的发明使纺织结构复合材料更具有性能/重量比指标上的优势。相比于单向复合材料和层压复合材料,纺织结构复合材料中纤维束的排列更加稳定,并能通过纺织技术形成具有整体结构的复杂外形异型件。由于轻质高强、高冲击损伤容限、多重增强结构混杂制造的特点而成功应用于车辆和高速飞行器设计,并表现出巨大的应用潜力。纺织结构复合材料具有在冲击损伤容限和能量吸收方面的可设计性以及增强结构的广泛性。借助三维纺织结构复合材料极为重要的预成型件净型(net-shape)制造特点,可以对特殊部位的异型结构体进行一次成型制造,避免因材料拼接而导致的结构缺陷。三维纺织结构复合材料的应用,将使工程结构冲击防护能力和阻尼能量吸收大幅提高。

本书系统总结了作者十余年在纺织结构复合材料冲击动力学上的研究成果,具体内容包括:研究不同类型三维增强结构复合材料在不同形状物体冲击下的变形过程,考察变形和破坏特征以及能量吸收机制;基于实验宏观和细观观测,解释不同细观结构、不同形状物体对冲击破坏和能量吸收的影响;建立大型精细细观结构模型,在精细结构尺度上用有限元计算复合材料冲击破坏过程,揭示冲击破坏机理,提出三维纺织结构复合材料提高冲击损伤容限而应具有的细观结构特征和相应设计指标;探讨不同细观结构进行组合混杂提高冲击损伤容限的可能性;在频域中研究复合材料冲击加载下的力学行为和结构稳定性,在频域中揭示复合材料冲击损伤机理。

研究三维纺织结构复合材料冲击响应和损伤机理是复合材料力学研究的重要内容,尤其是三维纺织结构复合材料在这方面的研究并不多见;对于冲击动力学而言,三维纺织结构复合材料是全新研究对象。本书从三维纺织结构复合材料和冲击动力学这两个研究领域的交接处切入,瞄准三维纺织结构复合材料在高速飞行器、高速车辆和弹道防护领域中的巨大应用潜力,研究三维纺织结构复合材料冲击响应和损伤机理,进而应用于后续的复合材料制造和工程领域结构件设计。该研究方向除了具有明显的工程应用背景外,从更深层面上拓展了冲击动力学和复合材料力学的研究内容,通过在细观结构层次上揭示冲击破坏机理,可以指导三维多重纺织结构复合材料应用于车辆和高速飞行器的优化设计。

作者在东华大学求学工作近 20 年,依托由几代人艰苦奋斗创立的国家重点一级学科——纺织科学与工程学科(2009 年全国一级学科评估名列同类学科第一),

拓展学科研究内容,在纺织结构复合材料和冲击动力学的交叉领域,研究纺织结构复合材料在冲击加载下的力学行为。作者希望通过该项研究工作,为纺织科学与工程学科增添新内容,同时也为冲击动力学增加新的研究对象。希望本书的出版,能吸引更多同行参与纺织结构复合材料冲击动力学研究。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

顾伯洪 孙宝忠

于2011年教师节

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 纺织结构复合材料在冲击防护领域中的应用	1
1.2 纺织复合材料冲击动力学研究现状	2
1.3 纺织结构复合材料冲击加载基本性质	4
1.3.1 高应变率加载测试.....	4
1.3.2 单向、层合板及二维纺织结构复合材料在高应变率下的力学性能研究	7
1.4 纺织复合材料弹道侵彻性质	9
1.5 本书目标.....	11
参考文献	12
第 2 章 纺织结构复合材料冲击动力学的相关知识	24
2.1 高性能纤维.....	24
2.1.1 玻璃纤维.....	25
2.1.2 高强聚乙烯醇纤维	25
2.1.3 玄武岩纤维	25
2.1.4 芳纶纤维.....	26
2.1.5 碳纤维	26
2.1.6 其他纤维.....	27
2.2 织物几何结构与表征.....	28
2.2.1 机织物的几何结构和表征.....	29
2.2.2 针织物的几何结构和表征.....	30
2.2.3 编织物的几何结构和表征.....	32
2.3 纺织结构复合材料.....	33
2.3.1 复合材料力学基础知识	34
2.3.2 二维纺织复合材料刚度	39
2.3.3 三维纺织复合材料刚度	54
2.3.4 纺织层压复合材料强度	68
2.4 冲击测试技术.....	80
2.4.1 Hopkinson 杆测试技术与数据时频处理.....	80

2.4.2 弹道侵彻测试技术	87
参考文献	88
第3章 纤维材料力学性质应变率效应	92
3.1 纤维束力学性能的 Weibull 统计理论	92
3.2 纤维束力学性质的应变率效应	96
3.2.1 玻璃纤维力学性质应变率效应	96
3.2.2 高强聚乙烯醇(PVA)纤维力学性质应变率效应	98
3.2.3 玄武岩纤维力学性质应变率效应	101
3.2.4 芳纶纤维力学性质应变率效应	108
3.2.5 碳纤维力学性质应变率效应	113
参考文献	116
第4章 三维纺织结构复合材料力学性质、应变率效应和频域特征	117
4.1 三维机织复合材料	117
4.1.1 实验原料	117
4.1.2 三维机织物试样规格及主要设计参数	118
4.1.3 三维机织复合材料在不同应变率下的动态压缩实验	119
4.1.4 三维机织复合材料在不同应变率下的破坏模式	123
4.2 三维针织复合材料	125
4.2.1 实验原料	125
4.2.2 多轴向经编织物试样规格及主要设计参数	125
4.2.3 多层多轴向经编针织复合材料在不同应变率下的动态压缩实验	126
4.2.4 多层多轴向经编针织复合材料在不同应变率下的破坏模式	130
4.3 三维编织复合材料	132
4.3.1 实验原料	132
4.3.2 四步法 1×1 三维编织物试样规格及主要设计参数	132
4.3.3 四步法 1×1 三维编织复合材料在不同应变率下的动态压缩实验	133
4.3.4 四步法 1×1 三维编织复合材料在不同应变率下的破坏模式	136
4.4 机织针织混杂材料	139
4.4.1 机织针织共混结构织物及其复合材料	139
4.4.2 冲击拉伸实验	139
4.4.3 拉伸实验结果	141
4.5 基于系统函数的应变率效应分析	149
4.5.1 引言	149
4.5.2 三维纺织复合材料系统建模方法	149
4.5.3 三维机织复合材料的频率响应特性和稳定性	150

4.5.4	多层多轴向经编针织复合材料频率响应特性和稳定性	155
4.5.5	四步法三维编织复合材料频率响应特性和稳定性	160
4.5.6	机织针织共混复合材料频率响应特性和稳定性	165
4.5.7	连续系统与 Laplace 变换分析法	171
4.5.8	有关问题探讨	177
4.6	复合材料冲击损伤频域分析	178
4.6.1	引言	178
4.6.2	CWK 复合材料冲击拉伸的 FFT 分析	179
4.6.3	CWK 复合材料冲击拉伸的 HHT 分析	182
	参考文献	197
第 5 章	二维平纹机织物弹道冲击能量吸收	200
5.1	分析模型	200
5.1.1	横向冲击下无限长单纱对弹体能量的吸收	200
5.1.2	单根主纱应变能	201
5.1.3	受约束纱线对弹体能量的吸收	202
5.1.4	单层交叉但不交织织物对弹体能量的吸收	203
5.1.5	单层平纹织物对弹体能量的吸收	204
5.1.6	弹道侵彻时间	204
5.1.7	算例和验证	205
5.2	连续介质假设的有限元模型与计算	208
5.2.1	织物连续介质假设有限元建模	208
5.2.2	有限元计算结果	211
5.3	真实细观结构的有限元模型与计算	214
5.3.1	纱线、织物、弹头几何模型建立	214
5.3.2	靶板侵彻有限元模型	216
5.3.3	实体单元有限元模型计算结果	219
	参考文献	228
第 6 章	三维机织物弹道侵彻破坏	230
6.1	三维正交机织物弹道侵彻破坏分析模型	230
6.1.1	三维正交机织物	230
6.1.2	弹道侵彻测试	231
6.1.3	纤维束应变率效应	233
6.1.4	分析模型计算	234
6.2	三维正交机织物弹道侵彻破坏有限元模型	245
6.2.1	背景知识介绍	245

6.2.2	三维正交机织物的细观结构模型	246
6.2.3	几何有限元模型	247
6.2.4	结果和讨论	249
6.3	三维角联锁机织物弹道侵彻破坏分析模型	257
6.3.1	三维角联锁机织物	257
6.3.2	弹道侵彻测试	258
6.3.3	分析模型计算	260
6.4	三维角联锁机织物弹道侵彻破坏有限元模型	269
6.4.1	有限元模型的建立	269
6.4.2	结果和讨论	272
	参考文献	284
第7章	二维层压复合材料弹道冲击损伤有限元模型计算	288
7.1	层压防弹复合材料基本结构特征	288
7.2	有限元模型基本结构	288
7.3	有限元模型计算	290
	参考文献	298
第8章	三维正交机织复合材料弹道冲击破坏	300
8.1	单胞模型	300
8.1.1	三维正交机织复合材料的刚度/柔度矩阵	300
8.1.2	三维正交机织复合材料的材料子程序和破坏准则	308
8.1.3	三维正交机织复合材料弹道侵彻有限元计算结果	312
8.2	细观结构模型	326
8.2.1	三维正交机织细观结构模型	326
8.2.2	弹道侵彻过程有限元计算结果	333
	参考文献	348
第9章	三维角联锁机织复合材料弹道侵彻破坏	349
9.1	单胞模型	349
9.1.1	三维角联锁机织复合材料的刚度/柔度矩阵	350
9.1.2	三维角联锁机织复合材料的材料子程序和破坏准则	356
9.1.3	三维角联锁机织复合材料弹道侵彻有限元计算结果	356
9.2	纤维倾斜模型	364
9.2.1	三维角联锁纺织复合材料的纤维倾斜模型	365
9.2.2	三维角联锁机织复合材料的破坏准则	367
9.2.3	三维角联锁机织复合材料弹道侵彻有限元计算结果	369
9.3	多尺度结构模型	375

9.3.1	三维角联锁机织复合材料弹道侵彻实验	375
9.3.2	三维角联锁机织复合材料多尺度结构模型	377
9.3.3	运算时间	381
9.3.4	有限元计算结果与讨论	382
	参考文献	391
第 10 章	三维编织复合材料弹道侵彻破坏	393
10.1	连续介质简化模型	394
10.2	连续介质精细模型	401
10.3	细观结构模型	410
	参考文献	422
第 11 章	三维多轴向针织复合材料弹道侵彻破坏	424
11.1	单胞模型	424
11.1.1	单胞模型的线弹性刚度/柔度矩阵	425
11.1.2	复合材料弹塑性刚度/柔度矩阵	427
11.1.3	临界损伤面积(CDA)失效理论	427
11.1.4	树脂/纤维的退化和失效	428
11.1.5	单胞均匀化	428
11.1.6	有限元数值模拟	429
11.1.7	有限元模型	429
11.1.8	弹体的剩余速度	430
11.1.9	弹体在穿透过程中加速度情况	432
11.1.10	弹体在穿透过程中的能量损失情况	433
11.1.11	应力波在复合材料靶板中的传播和扩散	434
11.1.12	复合材料靶板的破坏演化	436
11.1.13	复合材料靶板的破坏模式与分析	439
11.2	细观结构简化模型	441
11.2.1	针织结构分析	441
11.2.2	基本假设	441
11.2.3	简化方法	442
11.2.4	针织纱与树脂组合等效模型力学参数的确定	443
11.2.5	树脂和纤维的应力-应变关系	448
11.2.6	细观结构简化模型的建立	449
11.2.7	双轴向经编针织复合材料弹道侵彻有限元模型	450
11.2.8	弹道侵彻有限元计算结果及讨论	455
	参考文献	467

第 12 章 织物弹道侵彻性能影响因素	469
12.1 二维平纹织物弹道侵彻性能影响因素	469
12.1.1 纤维材料应变率效应	469
12.1.2 靶板直径对弹道冲击模型结果的影响	470
12.1.3 子弹弹着点位置对弹道冲击模型结果的影响	472
12.2 三维机织物弹道侵彻性能影响因素	473
12.2.1 纤维特性	473
12.2.2 织物结构	474
12.2.3 子弹几何形状	474
12.2.4 子弹速度	475
12.2.5 织物层数	475
12.2.6 织物靶体尺寸及固定方式	475
12.2.7 摩擦力	476
参考文献	476
第 13 章 纺织结构复合材料弹道冲击性能比较	477
13.1 三维机织复合材料弹道侵彻性能影响因素	477
13.1.1 纤维和基体材料性能以及子弹形状的影响	478
13.1.2 靶厚和纤维体积分布的影响	478
13.1.3 应变率的影响	479
13.2 各类纺织结构复合材料弹道冲击性能比较	481
参考文献	484
第 14 章 三维纺织结构复合材料横向冲击性能	485
14.1 三维机织复合材料横向冲击性能	485
14.1.1 三维正交机织复合材料的横向冲击测试及结果	485
14.1.2 三维正交机织复合材料的横向冲击的有限元计算	491
14.2 三维编织复合材料横向冲击性能	495
14.2.1 简化单胞模型	496
14.2.2 有限元模拟	499
14.2.3 实验和有限元结果	499
14.3 三维针织复合材料横向冲击性能	504
14.3.1 实验概述	504
14.3.2 实验结果与讨论	506
14.3.3 三维多重混杂针织结构复合材料细观力学结构模型	510
14.3.4 复合材料冲击性质有限元计算	520
参考文献	530

第 15 章 总结和展望	531
15.1 研究总结	531
15.1.1 学术成绩 1	531
15.1.2 学术成绩 2	533
15.1.3 学术成绩 3	535
15.2 今后工作展望	537
15.2.1 目前工作现状	537
15.2.2 今后工作展望	538
参考文献	542
致谢	546
索引	548

第 1 章 绪 论

1.1 纺织结构复合材料在冲击防护领域中的应用

纺织结构复合材料是以纺织预成型体作为增强体,以树脂固化形成的纤维增强复合材料。高性能纤维和高性能树脂的发明使纺织结构复合材料力学性质得到极大提高。在单位密度下,高性能纤维和复合材料具有比钢更高的刚度与强度。纺织结构复合材料轻质高强的特点使该类材料在飞行器、高速车辆和弹道防护材料应用领域有较大的发展潜力。尤其是三维纺织结构复合材料,具有极高的断裂韧性和抗分层能力,在冲击载荷下不发生分层现象并具有较高的冲击损伤容限。借助三维纺织结构复合材料极为重要的预成型体净型(net-shape)制造特点,可以对特殊部位的异型结构件进行复合材料一次成型制造,避免因材料拼接而导致结构缺陷。

传统用于防弹用途的纤维增强复合材料主要是平面层压复合材料,弹道冲击损伤形式主要是分层破坏。三维纺织结构复合材料的最大特点是:贯穿于材料厚度方向上的纤维或纱束能够增加复合材料层间剪切强力,提高材料的结构稳定性,避免分层现象。例如,双轴向经编针织复合材料作为一种特殊的三维纺织结构复合材料,经向和纬向的直纱束在上下两层平面内呈 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 排列而不相互交织,提供材料的内刚度和强度,厚度方向上引入的经编针织纱对经纬纱起到束缚作用,使材料的层间剪切强度得到提高,维持材料整体的结构稳定性。在冲击加载下,冲击能量以较高的应力波波速传播至复合材料的大面积区域,具有较高的冲击能量吸收特性。

三维纺织结构复合材料已被广泛应用到航天、航空、防护和民用领域。在一系列实际应用工程中会遇到冲击载荷,由于冲击而产生的应力波以速度 $v = \sqrt{E/\rho}$ (E 为弹性模量, ρ 为密度)在材料中传递并使材料产生损伤破坏,这种冲击载荷下的力学响应往往与准静态加载下的响应有显著不同,故而研究三维复合材料在不同应变率下的力学性质对于实际工程设计是必要的。纺织结构复合材料是用纺织预成型体增强的先进复合材料,是纺织科学技术和材料科学技术的重要发展方向,研究纺织结构复合材料力学性能的应变率效应将扩展该方向的研究领域。

纺织结构复合材料作为目前为数不多能真正用于防护工程的材料之一,具有广泛的应用潜力。在军事用途中,主要用于装甲车辆、飞行器等领域;在民用中,

主要用于高速车辆、土木建筑等领域。借助纺织复合材料在冲击加载下纤维和基体材料的应变率效应,以及复合材料的复杂破坏机制,可使单位质量结构件具有比金属材料更高的冲击破坏能量吸收值。纺织复合材料由于织物种类的多样性、成型复杂外形结构件的易加工性,在复杂形态结构件成型方面有独特优势:借助微观结构的优化设计,可以形成具有高冲击损伤容限的纺织复合材料。纺织结构复合材料微观结构的繁杂多样也给复合材料抗冲击性能优化带来巨大的可设计空间。

由于三维纺织结构织物在厚度方向存在交织纤维束,三维纺织结构复合材料具有比层压复合材料高的层间剪切强度(inter-laminar shear strength, ILSS)和断裂韧性,在横向加载尤其是冲击加载下具有较高的损伤容限。在对冲击损伤容限要求高的场合,三维纺织结构复合材料得到较多应用。冲击载荷所具有的在短暂时间尺度上发生载荷显著变化的特点,必定同时意味着高加载率或高应变率。在动态加载下三维纺织结构复合材料具有明显区别于准静态加载的力学性质和动态响应。只有正确表征三维纺织结构复合材料在动态载荷下的力学性质,才能合理设计抗冲击加载复合材料结构件。研究三维纺织结构复合材料在冲击载荷下的力学性能对于抗冲击三维纺织复合材料及结构的设计有重要意义,是材料动态力学性能研究的一个重要方向。

1.2 纺织复合材料冲击动力学研究现状

高性能纤维(如对位芳族聚酰胺纤维、超高分子量聚乙烯纤维等)应用于弹道冲击防护的主要途径是形成有效稳定的织物结构,研究织物弹道冲击破坏机理是设计软质防护装甲(如防弹衣)和硬质装甲(织物增强复合材料)的基础工作,相关内容可以扩展到超高速冲击防护材料设计(碎片与飞行器间的撞击, Destefanis 等^[1])。织物由于组织结构(单胞)的复杂多样性和结构多层次性;在弹道冲击下产生的织物整体变形和组织结构变形、纱线和纤维断裂、纱线间的滑移、纤维间的滑移以及纤维材料力学性质的应变率效应,使织物在冲击下具有多重破坏和吸能机制。揭示织物弹道冲击破坏机理可以有效地计算织物对弹体能量吸收并用于软质防护装甲设计,并扩展到研究织物增强复合材料弹道冲击破坏机理和硬质防护装甲设计。不同组织结构的织物有不同的结构变形和失效机制,也具有不同的弹道侵彻防护能力。根据不同结构织物的弹道侵彻破坏机理,可以充分发挥高性能纤维的力学性质,设计具有较高弹道冲击防护能力的软质织物结构和复合材料硬质装甲。这方面最好的例子是, Zhu 等^[2]在平纹织物弹道冲击研究的基础上研究平纹织物层压复合材料弹道侵彻,得到了较好的结果。

虽然 Hearle 等^[3]曾研究二维三相织物(二维三轴机织物)的弹道冲击破坏机