

复合材料弹道冲击性能研究进展

金宏彬 丁 辛

(东北大学纺织学院 上海 200051)

摘要：本文总结了近年来复合材料弹道冲击研究的进展，着重从纤维集合体的结构对弹道冲击损伤机理的影响、弹道冲击的分析模型及数值模拟做了概述，总结了人们为提高复合材料弹道冲击性能所做的努力，最后指出了几个尚需深入解决的问题。

关键词：复合材料 弹道冲击性能 纤维集合体结构 分析模型 数值模拟

1 引言

防护材料的应用由来已久。随着高分子材料技术的飞速发展，出现了一些高比强度和高比模量的纤维，如 Kevlar(芳纶)纤维、UHMWPE(超高分子量聚乙烯)纤维等，进一步提高了复合材料的弹道防护性能。而复合材料本质上是一种结构物，纤维集合体的结构(以下简称结构)与复合材料的性能具有很大的关系。因此，近年来对各种不同结构的复合材料弹道性能的研究也逐步成为研究的热点。其中，三维增强结构复合材料和混杂纤维结构复合材料备受关注。

与此同时，人们建立了一些复合材料弹道冲击过程的分析模型，并借助于计算机进行数值模拟。利用模型，人们可以从细观力学的角度分析复合材料的弹道损伤机理，为材料的设计提供理论基础。本文将从结构对复合材料弹道冲击损伤机理的影响、弹道冲击分析模型的建立以及数值模拟等方面，来总结和评述已有的研究工作和已取得的研究成果，以从中获得有益的经验 and 启示，为进一步的研究提供参考。

2 复合材料弹道冲击性能的研究进展

在高速弹体冲击下，复合材料将产生各种形式的损伤，包括整体变形、局部压陷、基体开裂、纤维的拔出与断裂及分层等。这些损伤吸收弹体的能量，阻止弹体的侵彻，通常利用弹道极限 BL (即弹体出射速度为零的条件下弹体入射速度的最大值)来表征材料的弹道性能。而复合材料的力学性能主要取决于增强纤维及纤维集合体的结构。在原料一定的情况下，纤维集合体的结构在复合材料的力学性能中占有重要地位。因此，不同结构的复合材料的弹道冲击损伤形式及程度也各不相同，所反映出来的材料弹道性能也千差万别。

复合材料的结构随着复合材料加工技术的发展而发展。从早期的单向板、多向板，发展为织物层压板，近年来又开发了具有三维纺织结构的复合材料。不同结构的复合材料的弹道冲击性能各异。

单向板和多向板是最为常见的复合材料，在这种结构中，纤维层以一个方向或多个方向依次铺层排列。这类材料受到弹体冲击时，引起的损伤包括基体开裂、分层、纤维的侧向挤压移动和纤维断裂。纤维断裂根数较少、纤维的侧向挤压移动较大是这种结构的复合材料显著的损伤特征^[1]。由于在这类材料中，纤维所受的制约较小，在高速弹体的冲击下容易被挤压而产生侧向移动，使相应的断裂纤维根数较少，导致较低的材料能量吸收能力和较低的弹道极限^[1]。

织物层压板使用平面织物浸渍树脂后依次铺叠而成，常用的织物是机织物。有关这种结构复合材料弹道冲击性能的研究比较成熟，目前已形成了一些共识。这类材料的弹道损伤主要包括整体变形、局部压陷、基体开裂、分层和纤维断裂等，有时还存在少量的纤维拔出^[1,2]。但这类材料中几乎没有纤维被侧向挤压的现象。由于织物组织使得经纬向纤维相互交织，限制了纤维束的侧向移动能力，使更多的纤维发生断裂，从而提高了材料的能量吸收能力^[1]。织物层压板的弹道损伤形式及程度和能量吸收机理还与纤维性能有关。脆性纤维复合材料，如玻璃纤维、碳纤维增强复合材料，分层是能量吸收的主要方式。韧性纤维复合材料，如芳纶、超高分子量聚乙烯复合材料，纤维断裂和基体开裂是主要的损伤形式，也是能量吸收的主要方式^[3]。

另外，织物结构参数对弹道性能也有影响。纤维束越细，织物排列密度越高，弹道冲击过程中纤维的侧向移动越少，相应的纤维断裂数也就较多，弹道冲击性能就越高^[1]。

织物层压板中,弹道损伤与弹体的入射方向有关。在材料的冲击面,纤维主要以剪切的方式发生断裂。而在材料的背面,纤维主要是拉伸断裂^[1,4]。而对于薄板,则主要是剪切破坏^[4]。材料中的分层损伤也是不均匀的,冲击面的分层损伤较小,而在背面分层面积较大^[5]。

为了抑制织物层压板的分层损伤,人们采用了多种措施,例如三维结构成型技术,包括三维机织增强结构、三维编织结构^[6,7]及缝合结构^[8]等,在厚度方向引入增强纤维,以提高材料的层间性能,抑制弹道冲击过程中的分层损伤。研究表明,三维编织结构的复合材料在弹道冲击条件下没有分层损伤^[6,7],弹道冲击过程中的侵彻阻力大于其它结构的复合材料。在冲击载荷/时间曲线图中,有一个对应于纤维断裂的载荷突降,在此之后,编织结构的复合材料仍能较长时间地承受载荷,而织物层压板的承载能力大大下降,表明编织结构的复合材料具有更好的冲击损伤容限^[7]。但这类材料的弹道极限并没有因为分层面积的减少而提高,反而有所下降。三维编织结构中由于纤维束之间所受的局部约束较小,纤维易被侧向挤压,实际断裂的纤维根数较少。因此,三维编织结构复合材料的弹道性能并不象人们所预想的那么理想。

缝合是一种简单而有效地在厚度方向引入增强纤维的方法。Mouritz^[8]研究了芳纶纤维缝合对玻璃纤维/乙烯酯复合材料弹道冲击性能的影响,结果发现缝合能够抑制材料中的分层损伤,但材料的弹道极限及吸收的能量并没有显著的提高。缝合不能提高材料冲击面的压缩强度,而缝合密度不够高又不能提高材料背面的Ⅱ型断裂韧性,所以缝合并没有本质上改变材料的损伤特征。

由此看来,仅仅限制材料中的分层损伤并不能有效地提高复合材料的弹道冲击性能。分层并不是韧性纤维复合材料的主要损伤特征,也不是吸收能量的主要形式。即便分层是脆性纤维复合材料吸收能量的主要形式,但缝合并没有根本改变材料的损伤特征。只有最大限度地使尽可能多的纤维发生断裂,并结合材料的损伤特征设计材料的结构,才能有效提高复合材料的弹道性能。混杂纤维复合材料便体现了上述思想。

混杂纤维复合材料是一种特殊的层压结构复合材料,它由两种或两种以上的纤维材料组成。这种

材料可以根据其损伤特征在材料的不同位置设计不同性能的增强纤维,因而具有独特的弹道性能。Prashant 等人^[5]研究了面层为玻璃纤维织物、芯层为芳纶织物的混杂纤维层压板的动态侵彻过程,结果发现这种混杂结构可以显著减少分层面积。Ellis 等人^[9]研究了碳纤维/SMA(形状记忆合金,具有高达20%的断裂应变和很高的应变能)纤维、碳纤维/Spectra 纤维混杂复合材料的弹道冲击性能。结果发现,当冲击面为碳纤维、背面为单向 SMA 纤维时,冲击面纤维以剪切方式断裂,而背面部分纤维被挤压,部分被拔出,部分发生拉伸断裂,材料的弹道性能与碳纤维复合材料相近。而当背面使用 Spectra 织物时,材料背面发生较大的鼓凸变形,吸收的能量显著提高,弹道极限也显著增大。如果将 SMA 纤维嵌入 Spectra 织物用于背面时,由于背面较大的变形使得 SMA 纤维的高能量吸收能力得到了发挥,材料的弹道极限最高。由此可见,织物比单向纤维更有利于使纤维发生断裂,材料中较大的鼓凸变形有利于提高纤维的断裂吸收能,而在材料背面设计高拉伸性能的纤维,材料的弹道性能明显提高。

近年来,以陶瓷为面板、纤维增强复合材料为背板的结构在高性能弹道防护材料中得到广泛的应用。这种材料在弹道冲击下,陶瓷冲击面产生圆台形剪切损伤区及碎片,背板复合材料中的纤维以拉伸断裂方式失效,吸收大量的动能。

总之,结构对复合材料的弹道冲击损伤及性能有很大的影响,这种影响主要表现在不同结构的复合材料弹道冲击下纤维断裂根数的差异和弹道损伤形式和程度的差异。单向板和多向板在弹体的侵彻下,纤维容易被侧向挤压,使断裂的纤维数较少,导致较低的材料弹道性能。织物层压板由于纤维的相互交织而限制了纤维的侧向移动,断裂的纤维根数较多,材料吸收的能量也较高,但分层及整体变形明显。材料中的损伤也与弹体的入射方向有关,冲击面纤维剪切破坏,分层面积较少;背面纤维拉伸破坏,分层面积最大。三维编织复合材料在弹道冲击下没有分层损伤,但纤维拔出及侧向挤压使得材料的弹道性能并没有显著提高。根据材料冲击面剪切破坏和背面拉伸破坏的弹道损伤特征,在材料背面设计高拉伸性能纤维的混杂纤维复合材料所吸收的能量最高,弹道冲击性能最佳。由此看来,从结构上优化设计材料是可行的,也是比较简便的。

复合材料的弹道冲击过程非常复杂,影响因素也较多,如纤维类型、基体类型、弹体外形、弹体速度、入射角度等。所以,具体到某一材料的弹道冲击损伤形式和弹道极限也各不相同。上述有关结构对材料弹道冲击性能的影响也只反映了其中一个方面。研究表明,复合材料中树脂含量低且仅均匀分布在各纤维层之间而没有浸润纤维束,则在冲击过程中纤维可以发生较大的拉伸变形而不致于脆断,从而吸收较多的能量,材料的弹道性能就越高^[9]。再者,由于弹道冲击时间很短,使得人们难以动态地观察损伤过程中弹体的速度历史和载荷历史。尽管目前人们已经采用高速摄影、激光测速计或微速传感器等,但这些方法远远不能达到要求,而且测试结果经过数学处理后往往误差较大。由此看来,复合材料弹道冲击性能的研究还不系统和成熟。要深入了解材料的弹道损伤机理及能量吸收机理,不仅需要大量的实验,建立丰富的数据库,而且需要从理论上分析损伤过程,建立相应的分析模型,以把握弹体的动态侵彻过程。

3 复合材料弹道冲击的分析模型及数值模拟

尽管在实验的基础上,人们建立了一些经验性的关系或方程,但要对复合材料的动态冲击响应机理有系统和深刻的理解,就必须针对弹道冲击过程建立分析模型,并利用数值模拟方法表征材料的动态响应,进而预测材料的使用性能。

3.1 复合材料弹道冲击的分析模型

分析模型是在材料损伤实验分析的基础上,建立基本力学方程,并结合简单的材料本构关系求解方程,同时考虑应变率效应。这种方法力图在简化力学模型的基础上,有效地反映材料的动态损伤过程,尽快提供尽可能多的损伤信息。

对于脆性纤维复合材料,分层是主要的能量吸收方式,因此分析模型必须考虑分层损伤。Wang 等人^[10]建立了玻璃纤维复合材料准静态侵彻过程中的受力模型,并计算材料在侵彻过程中吸收的能量,进而预测动态条件下弹体的出射速度。针对玻璃纤维复合材料受到钝形弹体冲击情况,有学者分两个阶段建立模型,第一阶段主要是剪切破坏,弹体阻力来自于剪切阻力,第二阶段则由分层和纤维拉伸断裂吸收能量^[11]。

对于韧性纤维复合材料,纤维断裂及基体开裂吸收了主要的能量。因此,分析模型中必须包括纤维的应变吸收能及基体开裂吸收能。对于纤维的应变能,可利用一维弹性波理论进行计算,并将它推广应用于单向层压板和织物层压板^[11]。Zhu 等人^[12]在实验基础上,建立了芳纶层压板的动态侵彻模型,利用有限差分法预测材料的动态冲击响应。模型分析中包括整体变形和局部损伤,前者采用线弹性层压板理论,后者则由压陷、背面膨胀、纤维断裂及分层组成。在分析中,摩擦作用在压陷和侵彻阶段忽略,而在出射阶段它是唯一的作用。该模型可以较准确地描述冲击过程中材料的变形及能量吸收机理,并可以预测弹道极限、出射速度等。

3.2 复合材料弹道冲击过程的数值模拟

尽管人们建立了许多弹道冲击的分析模型,这种方法也便于分析,但不能有效而具体地反映材料的损伤过程,因而难以为材料的设计提供分析手段。因此,建立在严格建模基础上的数值分析方法必不可少,它不仅可以提供许多重要的时间和空间上的损伤分布信息,而且可以在计算机上模拟动态损伤过程,并优化材料设计,从而节约弹道试验的次数及成本。

数值模拟是在显式积分的基础上,在时域内求解各个控制方程。在高速冲击下,各种参量(速度、压力、应力和密度等)随空间和时间急剧变化。这种过程通常用流体动力学和弹塑性动力学方程来描述,构成线性和非线性偏微分方程组,并根据具体情况设置不同的初始条件和边界条件。状态方程建立了比内能、密度与静水压之间的非线性关系。本构方程则考虑了材料的强度效应,在本构方程中必须考虑应变率效应,并利用屈服准则判断材料的塑性变形。常用的本构模型有弹塑性本构模型和粘弹性本构模型^[13]。

为了进行数值计算,要将连续的偏微分方程组离散化,成为求解有限个点的离散方程组,然后利用计算机求解。常用的离散化方法有两类:一类是先建立微分方程组(控制方程),然后用网格覆盖时间和空间,进行近似求解。这类方法以有限差分法为代表。另一类方法是先将连续的目标空间分解成有限个小单元,组成离散化模型,然后对离散化模型求近似的数值解。这类方法以有限元法为代表。这些方法在复合材料弹道冲击模拟方面的应用包括以下

一些探索和尝试。

Nandall 等人^[14]利用连续介质损伤力学(Continuum Damage Mechanics, 简称 CDM)本构模型结合有限元程序 LS-DYNA2D, 模拟层压板的弹道冲击过程, 所模拟的损伤包括分层和侵彻等。

20 世纪 90 年代初, Libersky 等人^[15] SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 方法应用于复合材料的动态冲击响应的研究。SPH 方法是一种拉格朗日质点方法, 其核心是插值理论。它将材料划分为若干个带有质量、密度、速度和能量的质点, 在计算过程中, 每个质点的参量由与之相邻的质点通过插值函数来确定, 而对参量的微分则简化为对插值函数的微分, 从而大大减少了运算量。SPH 方法可以方便地处理裂纹形成与扩展的问题, 如模拟复合材料中的基体开裂、纤维断裂、分层、碎片等损伤。Chen 等人^[16-18]先后将 SPH 方法用于模拟硼/铝复合材料、碳纤维/环氧复合材料及玻璃纤维/环氧复合材料的弹道冲击响应。在模拟碳纤维/环氧复合材料的弹道冲击时, 首先建立了一个宏观的三维各向异性弹塑性本构模型、一个状态方程和一个单向复合材料的失效准则, 采用极应力率方法进行应力应变转变, 在此基础上进行数值模拟^[16]。而在模拟碳纤维/环氧复合材料的弹道冲击时, 则采用了细观力学本构模型, 分别表征纤维和基体的力学行为, 并假设纤维是韧性的, 从而模拟材料中的分层损伤^[17]。在模拟玻璃纤维/环氧复合材料的弹道冲击时, 又采用了粘塑性本构模型, 并预测弹体的出射速度^[18]。

尽管人们已经建立了一些理论模型, 并对弹道冲击过程进行了数值模拟。但这些方法还不成熟, 尚有许多值得改进和提高之处。如有限元法需要对材料划分网络, 如何合理地划分网络使得计算简便而又能反映材料的性质是研究的重点之一。CDM 模型假设厚度方向的损伤形式之间是相互独立的, 而这一假设并不符合实际情况的, 并且表征损伤扩展的威布尔函数不能用于建立材料的弹性和损伤模型, 因此需要建立一个具有物理意义的损伤扩展模型。SPH 方法在计算材料表面的张力时, 往往会产生张力不稳定的现象。SPH 方法还要求建立应变率相关的各向异性塑性模型和失效准则。尽管已建立的一些本构模型曾经成功地应用于复合材料结构的计算, 但大多数是针对纤维含量相对较低的情况, 对

于纤维含量高于 70% 的复合材料, 则需要在程序中引入更合理的材料本构模型及算法。

4 结 语

本文总结了复合材料弹道冲击性能的主要研究方向及所取得的成果, 并认为以下几个方面的工作需要深入开展, 以指导弹道防护复合材料的设计与开发。

(1) 利用先进的测试分析手段, 深入研究混杂结构复合材料的弹道损伤机理, 分析各因素对弹道性能的影响, 特别是纤维集合体结构, 包括织物组织、纤维束号数、织物密度等对弹道性能的影响, 合理设计复合材料的纤维增强结构。

(2) 建立复合材料细观力学本构模型。目前的研究大多集中在宏观力学的层次上, 难以准确地反映材料的细观损伤行为。

(3) 利用计算程序, 数值模拟复合材料的弹道冲击损伤及能量吸收机制, 并指导和优化复合材料的结构设计。

参考文献

- Walsh T F, Lee B L, Song J W. Penetration failure of Spectra polyethylene fiber-reinforced ballistic grade composites. *Key Engineering Materials*, 1998, 141-143: 367-382
- Zhu G Q, Goldsmith W, Dharan C K H. Penetration of laminated Kevlar by projectiles— I. Experimental investigation. *International Journal of Solids Structures*, 1992, 29(4): 399-420
- Zee R H, Hsieh C Y. Energy loss partitioning during ballistic impact of polymer composites. *Polymer Composites*, 1993, 14(3): 265-271
- Cantwell W J, Morton J. Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic. *Composites Science and Technology*, 1990, 38: 119-141
- Peasant K, Rai B. Reduction of impact damage in KFRP through replacement of surface plies with glass fabric plies. *Journal of Composite Materials*, 1991, 25: 694-702
- Jenq S T, Mo J J. Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites. *AIAA Journal*, 1996, 34(2): 375-383
- Flanagan M P, Zikry M A. An experimental investigation of high velocity impact and penetration failure modes in textile composites. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33(12): 1080-1103
- Mouritz A P. Ballistic impact and explosive blast resistance of stitched composites. *Composites*, 2001, 32B: 431-439
- Ellis R L, Lalande F, Jia H, et al. Ballistic impact resistance of SMA and spectra hybrid graphite composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1998, 17(2): 147-164
- Wang B, Chou S M. The behavior of laminated composite plates as armour. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 68: 279-287
- Navarro C. Simplified modeling of the ballistic behavior of fabrics and fiber-reinforced polymer matrix composites. *Key Engineering Materials*, 1998, 141-143: 383-400

- 12 Zhu G Q, Goldsmith W, Dharan C K H. Penetration of laminated Kevlar by projectiles—II. Analytical model, International Journal of Solids Structures, 1992, 29(4): 421 ~ 436
- 13 Charles E, Anderson J R, Sol R B. Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling. International Journal of Impact Engineering, 1988, 7(1): 9 ~ 35
- 14 Nandall D, Williams K, Vaziri R. Numerical simulation of ballistic response of GRP plates. Composites Science and Technology, 1998, 58: 1463 ~ 1469
- 15 Libersky L D, Petschek A D, Carney T C, et al. High strain lagrangian hydrodynamics, a three – dimensional SPH code for dynamic material response. Journal of Computational Physics, 1993, 109: 67 ~ 75
- 16 Chen J K, Allahdadi F A, Carney T C. High – velocity impact of Graphite/Epoxy composite laminates. Composites Science and Technology, 1997, 57: 1369 ~ 1379
- 17 Chen J K, Medina D F. The effects of projectile shape on laminated composite perforation. Composites Science and Technology, 1998, 58: 1629 ~ 1639
- 18 Medina D F, Chen J K. Three – dimensional simulations of impact induced damage in composite structures using the parallelized SPH method. Composites, 2000, 31A: 853 ~ 860

PROGRESS IN THE STUDIES OF BALLISTIC IMPACT BEHAVIOR OF COMPOSITE MATERIALS

Jin Hongbin Ding Xin
(Donghua University)

Abstract: The recent progress in studying ballistic impact performance of composites is reviewed. It focuses on the ballistic penetration mechanisms of composites with different structures of fiber assembly, analytical models and numerical modeling. In addition, the methods for improving the ballistic impact behavior of composites are summarized. Finally several possible interesting research topics are proposed.

Keywords: composite materials ballistic impact behavior structures of fiber assembly analytical model numerical modeling

收稿日期 2002 – 2 – 4

(上接第 6 页)

Abstract: This paper sets up a model for the relationship of fiber concentration and aids content in GMT material design and strength of its end product through artificial neural network and experiment data. The data of each element content of GMT material that have optimized mechanical property are obtained and the efficiency of experiment work is improved.

Keywords: artificial neural network GMT wet process thermoplastic composites material optimization

收稿日期 2002 – 3 – 5

(上接第 18 页)

Abstract: In this paper, we supply a method that uses polyurethane elastomer resins to modified bismaleimide. The synthesis process has been studied. The effect of the different content of MOCA on mechanical properties and heat resistance of resins are also discussed. Differential scanning calorimeter of the matrix samples is also performed to determine the curing processing parameters of the systems. The results indicate that the polyurethane elastomer/BMI system can obviously modify the brittleness of BMI resins.

Keywords: bismaleimide resin 3,3' – dichlorin – 4,4' – diaminodiphenylmethane the polyurethane elastomer toughening curing reaction

收稿日期 2002 – 2 – 28

作者: 金宏彬, 丁辛
作者单位: 东北大学纺织学院, 上海, 200051
刊名: 玻璃钢/复合材料 **ISTIC**
英文刊名: FIBER REINFORCED PLASTICS/COMPOSITES
年, 卷(期): 2002 (2)
被引用次数: 8次

参考文献(18条)

1. Cantwell W J; Morton J Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic 1990

2. Zee R H; Hsieh C Y Energy loss portioning during ballistic impact of polymer composites 1993 (03)

3. Zhu G Q; Goldsmith W; Dharan C K H Penetration of laminated Kevlar by projectiles- I. Experimental investigation 1992 (04)

4. Medina D F; Chen J K Three-dimensional simulations of impact induced damage in composite structures using the parallelized SPH method [外文期刊] 2000

5. Chen J K; Medina D F The effects of projectile shape on laminated composite perforation [外文期刊] 1998

6. Chen J K; Allahdadi F A; Carney T C High-velocity impact of Graphite/Epoxy composite laminates 1997

7. Libersky L D; Petschek A D; Carney T C High strain lagrangian hydrodynamics, a three-dimensional SPH code for dynamic material response 1993

8. Ellis R L; Lalande F; Jia H Ballistic impact resistance of SMA and spectra hybrid graphite composites [外文期刊] 1998 (02)

9. Mouritz A P Ballistic impact and explosive blast resistance of stitched composites [外文期刊] 2001

10. Flanagan M P; Zikry M A An experimental investigation of high velocity impact and penetration failure modes in textile composites [外文期刊] 1999 (12)

11. Jenq S T; Mo J J Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites [外文期刊] 1996 (02)

12. Peasant K; Rai B Reduction of impact damage in KFRP through replacement of surface plies with glass fabric plies 1991

13. Nandlall D; Williams K; Vaziri R Numerical simulation of ballistic response of GRP plates 1998

14. Charles E; Anderson J R; Sol R B Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling 1988 (01)

15. Zhu G Q; Goldsmith W; Dharan C K H Penetration of laminated Kevlar by projectiles- II 1992 (04)

16. Navarro C Simplified modeling of the ballistic behavior of fabrics and fiber-reinforced polymer matrix composites [外文期刊] 1998

17. Wang B; Chou S M The behavior of laminated composite plates as armour 1997

18. Walsh T F; Lee B L; Song J W Penetration failure of Spectra polyethylene fiber-reinforced ballistic grade composites [外文期刊] 1998

本文读者也读过(10条)

1. 刘元坤, 常浩, 汤伟, 梁立, 潘智勇, 吴中伟, 赵前进, LIU Yuankun, CHANG Hao, TANG Wei, LIANG Li, PAN Zhiyong, WU Zhongwei, ZHAO Qianjin 织物及其复合材料的弹道冲击性能研究进展 [期刊论文] - 纤维复合材料 2009, 26 (4)

2. 王云聪, 何煌, 曾首义, WANG Yun-cong, HE Huang, ZENG Shou-yi Kevlar纤维层合板抗弹性能的数值模拟 [期刊论文] - 四川兵工学报 2011, 32 (3)

3. [练军](#), [顾伯洪](#) [三维编织复合材料弹道冲击性能的有限元分析](#)[会议论文]-2005
4. [胡秀章](#), [王元博](#), [王肖钧](#), [王峰](#) [Kevlar层合板动静态侵彻贯穿特性的实验研究](#)[期刊论文]-[实验力学](#)2004, 19(3)
5. [顾伯洪](#), [赵冬冬](#) [叠层织物弹道冲击性能研究](#)[期刊论文]-[纺织学报](#)2000, 21(4)
6. [练军](#), [LIAN Jun](#) [动力有限元在三维编织复合材料弹道冲击性能研究中的应用](#)[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#)2006(2)
7. [顾伯洪](#), [丁辛](#) [三维编织复合材料抗侵彻性能—准静态侵彻实验与弹道侵彻有限元计算的对比](#)[期刊论文]-[东华大学学报\(自然科学版\)](#)2003, 29(4)
8. [练军](#), [顾伯洪](#), [王善元](#), [LIAN Jun](#), [GU Bo-hong](#), [WANG Shan-yuan](#) [纱线弹道冲击的有限元模拟](#)[期刊论文]-[纺织学报](#)2006, 27(9)
9. [顾伯洪](#), [徐静怡](#) [三维编织复合材料弹道侵彻准细观层次有限元计算](#)[期刊论文]-[复合材料学报](#)2004, 21(3)
10. [夏逸平](#), [张凡](#) [柔性防弹材料抗侵彻机理分析](#)[会议论文]-2006

引证文献(8条)

1. [王晋](#), [纪双英](#), [朱亦钢](#), [邢军](#), [张元晋](#), [张洪](#) [二维三轴编织结构复合材料的弹道冲击性能研究](#)[期刊论文]-[新材料产业](#)2011(5)
2. [贾西文](#), [高彦涛](#), [刘元坤](#) [三维正交机织复合材料弹道侵彻有限元模拟](#)[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2010(1)
3. [侯仰青](#), [赵莉](#) [三维角链锁机织物弹道侵彻性能实验研究](#)[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2010(2)
4. [宋孝滨](#), [金利民](#), [王春霞](#) [二维织物冲击响应模拟计算与分析](#)[期刊论文]-[纺织学报](#) 2010(11)
5. [刘元坤](#), [常浩](#), [汤伟](#), [梁立](#), [潘智勇](#), [吴中伟](#), [赵前进](#) [织物及其复合材料的弹道冲击性能研究进展](#)[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2009(4)
6. [王晓强](#), [朱锡](#), [梅志远](#) [纤维增强复合材料抗侵彻研究综述](#)[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2008(5)
7. [陈薇](#) [纤维复合材料及其组合靶板的抗破片机理及弹道特性研究](#)[学位论文]硕士 2006
8. [胡秋霞](#) [织物复合材料的低速冲击特性研究](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_blgfhcl200202007.aspx