

头盔用复合材料抗侵彻性能研究进展

黄晨光¹ 施楣梧² 段祝平¹

¹ 中国科学院力学研究所, 北京 100080

² 中国人民解放军总后勤部军需装备研究所, 北京 100010

摘要 对头盔用复合材料抗冲击性能的研究及其主要成果进行了总结和评述, 包括所用材料的冲击动力学性能、头盔结构在冲击下的损伤和破坏特点、其能量吸收机制的理论分析和数值模拟等几方面, 提出了一些亟待深入的研究方向。

关键词 纤维增强复合材料, 侵彻, 冲击动力学, 动态测试技术

1 引言

远古时期, 人们便采用了简单的头部防护措施, 如在头部绑上树枝、藤条和动物皮毛等, 这可以防止或减轻一些意外的伤害。然而在当时, 人们主要是出于装饰和图腾崇拜的目的来使用这些防护的。到中世纪, 武士开始使用铁制头盔来防止敌人的箭、梭镖和矛对头部的伤害。不过, 在冷兵器时代结束以前, 头盔采用的材料及结构并没有从防护的角度做更多的理性研究, 所采用的材质和式样往往根据民族的服饰习惯来确定, 此时, 头盔的另一个重要作用是作为区分敌我双方的标志^[1]。

在两次世界大战前后, 人们经历了一个重要转变。开始, 由于高性能火枪的出现, 人们一度对头盔的防护失去了信心, 因为在火枪的射击下, 当时的任何头盔都没法直接承受。后来, 随着头盔的改进及作战方式的改变, 人们又认识到钢制头盔能对炮弹碎片以及流弹的伤害起到有效的防护作用, 可以较大程度地减少或减轻意外的伤亡。

二战以后, 由于军用和警用需求的推动, 关于头盔的研究在一个新的水平上持续发展。头盔抗侵彻性能及其材料的冲击力学性能研究得到了广泛的重视。在80年代初, 复合材料头盔投入装备以前, 美国和一些北约国家装备

表1 美式钢盔(1982年)性能指标

总重量 (kg)	面密度 (kg/m ²)	V ₅₀ (m/s)
1.37	10.8	402~430

头盔的性能指标如表1所示^[2]。其中, 面密度是指复合材料层板(或其它结构)中, 单位表面积与板厚度所包围的体积内材料的总重量。这是控制复合材料板抗侵彻能力的一个重要因素。V₅₀是指对一固定的复合材料结构, 1.1克的标准破片(FSP)穿透它的概率为50%时的破片速度^[3,4]。

随着高分子化学和材料技术的飞速发展, 一些高比强度和高比模量的纤维, 如 Nylon、Aramid、UHMWPE (Spectra 900 或 1000、Dyneema)、玻璃纤维等, 相继被应用于头盔。

收稿日期: 1999-03-19, 修回日期: 1999-06-08

80年代中期,复合材料头盔在美英等国开始装备,和传统的钢盔相比,这种新型头盔表现出了更好的抗侵彻能力, V_{50} 有了较明显的提高,见表2所示^[2].也从此使复合材料头盔成为发展的主要方向.

表2 美英复合材料头盔的主要性能指标

头盔型号	总重量 (kg)	面密度 (kg/m ²)	V_{50} (m/s)
英国 GS Mk 6 型	1.3	7.7	340~610
美国 PASGT 型	1.45	10.8	610

本文将针对这种新型的复合材料头盔,从纤维及其板材的动力学性质、复合材料板材在高速冲击下的能量吸收机制、头盔抗穿透和侵彻的实验、理论和数值研究等三个领域,来总结和评述已有的研究工作和已取得的重要结果.最后,将提出一些有意义的研究方向,以促使人们深入、理性地了解复合材料头盔抗侵彻的机理,为发展头盔等人体防护技术提供指导.

2 头盔用材料冲击动力学性能的研究介绍

头盔在经受破片或子弹的打击时,材料内变形的速率在 $10^3 \text{ s}^{-1} \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 之间.而高分子材料的分子运动是率相关的,其表现出的宏观力学性质依赖变形速率.因此,分析头盔这样的复合材料结构与弹的相互作用时,不能用准静态条件下测得的材料性能数据,而需要用高应变率的测试手段来研究复合材料在实际工况下的性能.下面我们将按纤维和板材两类分别介绍.

2.1 头盔用纤维的动态力学性能研究

在国内,总后军需装备研究所和中国纺织大学^[5]联合进行了 Twaron 纤维和 7901 型 PVA 纤维的冲击拉伸实验. Twaron 是一种对位芳香族聚酰胺,7901 型 PVA 是高强的聚乙烯醇纤维.实验装置是中国科技大学的摆锤式 Hopkinson 拉杆,所采用试样的实验段为平行纤维束,其两端用连接装置与输入和透射杆相连^[5].

他们得到的两种纤维动态拉伸性能与准静态的值见表3.

表3 Twaron 和 PVA 纤维动态性能实验结果

样品	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	E (GPa)	σ_b (GPa)	ϵ_b (%)	U_C (MPa)	u_c (10 ³ m ² /s ²)
Twaron	0.01	60.00	2.37	5.20	71.29	49.51
	180	72.00	2.55	5.25	79.42	55.15
	1000	70.00	2.71	5.96	99.20	68.89
PVA	0.01	20.28	1.19	9.89	66.62	49.72
	270	49.68	1.50	4.7	43.51	32.47
	1500	51.22	1.85	5.97	67.84	50.60

表1中, $\dot{\epsilon}, E, \sigma_b, \epsilon_b, U_C, u_c$ 分别表示材料经历的应变率、材料的扬氏模量、强度、失效应变、破坏能及比破坏应变能密度.这两种纤维的模量和破坏应力随着应变率的提高都有一定程度的上升.其中, PVA 纤维的应变率敏感性表现得更加突出.有意义的是,在高应变率下, Twaron 纤维除强度有一定的上升外,其失效应变也有提高,这样导致冲击载荷作用下,破坏应变能的明显提高,这也是 Twaron 这类纤维得以在个人防护中广泛使用的原因.

在此基础上,他们发展了一种冲击条件下,纤维束的统计本构方程,如下

$$\sigma^D = E^D \cdot \epsilon^D \exp(-L\alpha^D (E^D \epsilon^D)^{\beta^D}) \quad (1)$$

其中, σ^D, ϵ^D 分别表示纤维束的应力和应变, L, α^D, β^D 代表纤维束强度的 Weibull 分布函数参数,他们还利用实验得到的应力应变关系曲线拟合了这三个参数.

Ward, Brown 等人^[2,6~8]利用爆炸加载的方式,研究了儿种常用纤维的动态拉伸力学性质,并比较了与准静态条件下的差异,见表4.纤维冲击拉伸的速度为 305 m/s.

表中, Nylon 6,6 材料最早被用于头盔的制造,但是现在逐渐被芳纶等纤维替代. Kevlar 29 是现在应用最多的纤维,它的高比强度和比模量使之在防弹衣等软体防护措施和头盔等复合

材料硬盔甲中大有用武之地,它与前面提到的 Twaron 标准型纤维的性能大致相当. Spectra 1000 是美国 Allied Signal Co. 生产的一种超高分子量聚乙烯材料,类似于荷兰和日本生产的 Dyneema,是一种新型的有可能应用于头盔的高性能防弹纤维. PBT 是美国空军和 Du Pont 公司以及 Dow 公司研制的一种具有潜力的防侵略纤维材料. 目前,头盔材料的主体仍然为芳纶纤维,往往是芳纶与其它一些纤维的及树脂组成的复合材料 [2].

表 4 中的结果显示,在高应变率下,多种纤维材料的模量和强度比准静态时都有下降,呈现出一种负的率敏感特征,从变形机理而言,这是难以理解的,也与文献 [5] 的结论相左. 作者认为,表 4 中展现出的这一现象,有可能源于动态和准静态测试试样加工工艺的不同. 当然,这需要更多更充分的实验结果来论证.

表 4 几种常用纤维的动态拉伸性能

纤维	密度 (10^3kg/m^3)	比强度 ($10^6 \text{m}^2/\text{s}^2$)	比模量 ($10^6 \text{m}^2/\text{s}^2$)	延伸率 (%)	载荷 条件
Nylon 6.6	1.14	0.88	4.05	18.2	准静态
		0.60	3.87	13	冲击
Kevlar 29	1.44	1.98	47.3	3.6	准静态
		1.00	42.8	2.6	冲击
Spectra	0.97	3.24	171	2.8	准静态
		2.21	75.6	2.2	冲击
PBT	1.59	2.64	180	1.5	准静态
		1.76	99	14	冲击

2.2 复合材料板材冲击力学性能的研究

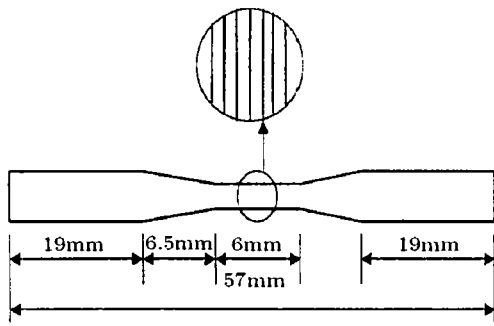
纤维增强复合材料冲击动力学性能的研究应该是从 80 年代初期开始的 [9]. Harding 等人 [10] 首先成功地利用 Hopkinson 拉伸杆技术进行了纤维增强复合材料的冲击拉伸性能实验,之后,Harding 等 [11] 在 1989 年更系统地报道了复合材料的动态性能实验研究结果. 他们实验用的材料为 Fothergill 和 Harvey 公司生产的编织碳纤维增强 Ciba-Geigy XD 927 环氧树脂,其中纤维的重量含量约为 50%.

Hopkinson 杆的实验原理和实验结果分析在文献 [12] 中有详细的讨论,此处不再赘述. 他们在实验中采用的试样,如图 1 所示. 他们除发展了这种新的实验方法外,得到的主要实验结果包括: (1) 材料的拉伸、压缩和层间剪切强度在高应变率下(应变率为 $200 \text{s}^{-1} \sim 1000 \text{s}^{-1}$) 有明显的提高; (2) 在冲击作用下,材料沿加载方向的弹性模量有了显著提高; (3) 与准静态实验相比,冲击拉伸试样的失效应变有轻微降低.

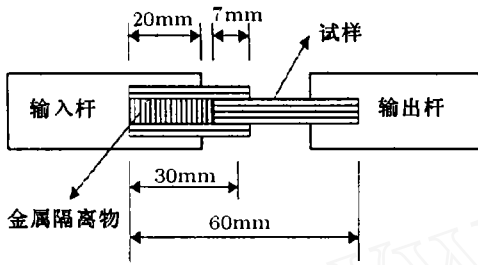
另外, Groves 等人 [13] 发展了碳纤维增强树脂材料的冲击性能实验研究系统,涵盖的应变率区间为 $1 \text{s}^{-1} \sim 3000 \text{s}^{-1}$. 其中,应变率在 $1 \text{s}^{-1} \sim 100 \text{s}^{-1}$ 范围内时,使用的是传统的高速液压试验机;应变率为 $10 \text{s}^{-1} \sim 1000 \text{s}^{-1}$ 时,采用的设备为高能落塔实验装置 (High Energy Drop Tower) 和 LLNL 实验室的多轴复合材料测试装置;当应变率高于 1000s^{-1} 时,他们采用的是 Hopkinson 杆测试技术. 用来进行冲击压缩和剪切的高能落塔装置图,如图 2 所示. 实验所采用的试样见图 3. 他们得到了板材的拉伸、压缩和剪切强度与材料经历的应变率的关系,并总结出了纯经验型的本构方程. 另外,在他们的工作中,给出了多种树脂材料的率相关特性.

文献中还有大量类似的工作 [14~19], 他们研究的背景与防护头盔无关,往往作为民用. 这些工作中,研究材料大部分是碳纤维、玻璃纤维等增强的各类树脂基复合材料,并且通常基体含量较高,纤维的含量相对较低. 在此展示这些研究的原因是,他们所发展的研究方法和测试手段是可以借鉴的,极具参考价值.

Benloulou 等人 [20~24] 利用 Hopkinson 杆测试技术进行了如表 5 所示的几种材料的动态拉伸实验研究,并且利用 Autodyn-2D 程序数值模拟了整个的实验过程,将输入、输出杆上记录



(a) 拉伸、压缩标准试样



(b) 剪切试样

图1 Harding等采用的冲击拉伸、压缩和剪切实验用试样

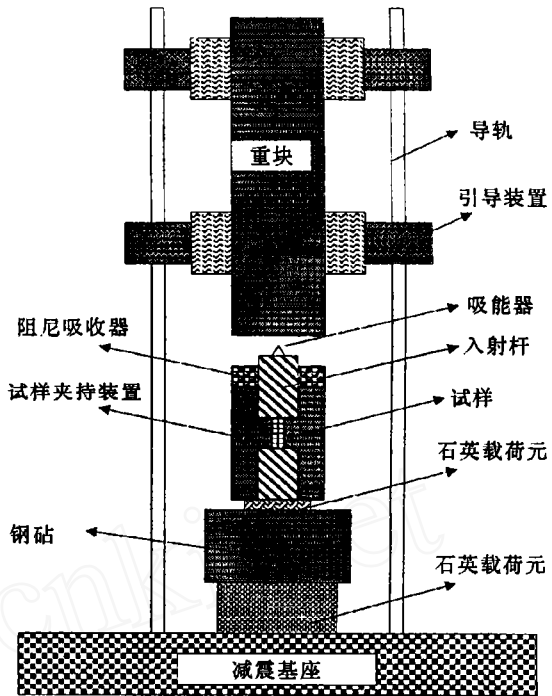


图2 高能落塔复合材料冲击装置

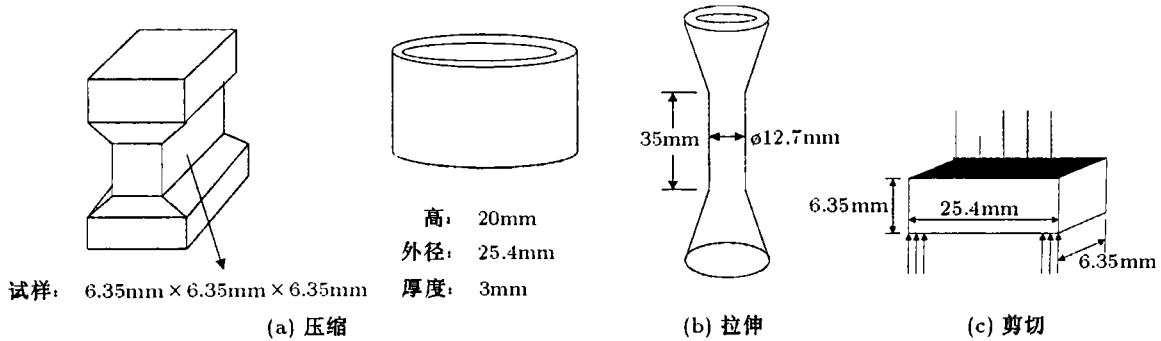


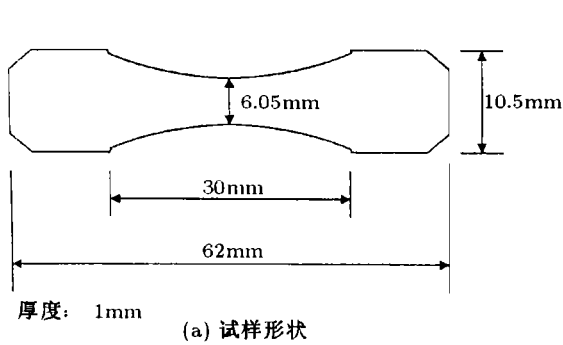
图3 Groves等采用的试样图

信号与差分法的计算结果相比，发现二者吻合较好。这在一定程度上保证了他们所采用的实验装置及获得的结果是可靠的。

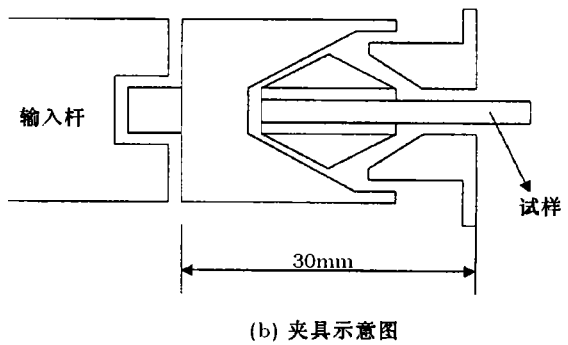
实验用试样如图4所示。由于实验材料的强度较高，冲击拉伸时，试样与输入、输出杆的连接就变得较为重要，它是实验成功与否关键的一环。如果使用的连接方式不当，往往会造成试样中接头部分（而非标距段）的变形和破坏，使实验结果产生较大的误差，甚至无效。他们发展的夹具如图4(b)所示，并在实验中证明了夹具的有效，及夹具引起的应力波的扰动对测试结

表5 文献 [20~24] 中研究的材料描述

材料	基体材料	纤维	编织方式	面密度 (kg/m ²)	纤维含量 (%)	空隙率 (%)
A/PP	PP	Aramid 336	0#90 编织	2.31 (2层)	76	5.2
A/PET1	PET	Aramid 336	0#90 编织	2.15 (2层)	81	17
A/PET2	PET	Aramid 336	0#90 编织	2.53 (2层)	67	4.6



(a) 试样形状



(b) 夹具示意图

图 4 Benloulou 等采用的冲击拉伸试样和夹具

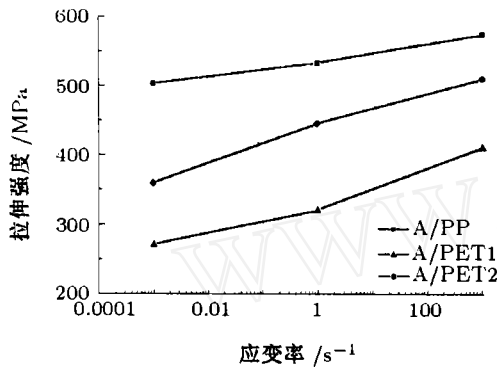


图 5 几种实验材料动态拉伸强度与应变率的关系

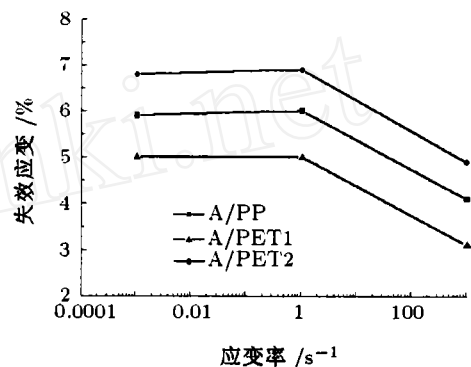


图 6 几种材料失效应变与应变率的关系

果的影响可以忽略。

表 5 中三种材料的拉伸强度和失效应变随应变率的变化规律见图 5 和图 6。其中，拉伸强度基本上与应变率的对数呈线性变化的关系，而失效应变的变化则相对复杂：在较低的应变率区间，失效应变表现出率不敏感的特点；在相对高的应变率区间，失效应变随应变率的升高急剧下降。

Sharma, Frissen, Morye 等人^[25~27]为进行 Dyneema UD66 HB1 板材的抗冲击性能的数值研究，分别进行了一系列关于上述材料的冲击性能实验研究。最后，在 Sharma 的工作中，总结出了材料的正交各向异性的弹性本构和破坏准则，见表 6。

关于头盔材料的动态性质实验，还可以参考一些文献^[28~30]。

3 头盔及其板材的冲击损伤和侵彻研究

最近的一二十年中，纤维增强复合材料的冲击损伤研究引起了广泛的重视，并得到了一些有益的结论：Broutman (1975)^[31]研究了冲击速度对复合材料层板破坏形态的影响，认为，低

表 6 DYNEEM18 材料的正交本构与失效模型参数

方程类型	变量名	大小	出处
本构方程	E_1	4.5 GPa	Sharma, 1998
	E_2	32.8 GPa	Frissen, 1996
	E_3	32.8 GPa	Frissen, 1996
	ν_{12}	0.061	DSM, 1998
	ν_{23}	0.006	Sharma, 1998
	ν_{31}	0.3	Sharma, 1998
失效模型	σ_{11}^f	80 Mpa	Sharma, 1998
	σ_{22}^f	2700 MPa	Morye, 1998
	σ_{33}^f	2700 MPa	Morye, 1998
	σ_{12}^f	160 Mpa	Sharma, 1998
	ϵ_{11}	0.0024	Sharma, 1998
	ϵ_{22}	0.05	Sharma, 1998
	ϵ_{33}	0.05	Sharma, 1998
侵蚀破坏模型	侵蚀应变	5.00	Sharma, 1998

速冲击下, 材料的损伤特征为基体的破坏和层间破坏; 高速冲击下, 控制性的破坏方式为增强纤维的破坏; 提高复合材料纤维的含量, 一般都能显著改善复合材料的抗冲击特性. Hunston (1984)^[32], Husman (1975) 等^[33]总结了在树脂的含量和力学性能不同时, 树脂的韧性对复合材料整体抗冲击特点的影响. Abrate (1991, 1994)^[23,34]利用数值方法和实验手段研究了复合材料的多种损伤形式的演化和控制机理.

Dorey(1989)^[35]总结了碳纤维和玻璃纤维增强复合材料的冲击损伤研究, 讨论了材料损伤形态和损伤分布对于下列因素的依赖:

- (1) 冲击体(子弹)的特性: 硬度、几何、速度、动量和动能;
- (2) 复合材料的性质: 纤维、基体和界面性能, 纤维的含量等;
- (3) 层板特点: 单层板厚度及铺排方向, 层板厚度, 编织方式;
- (4) 试样的结构响应特性等.

上述研究中, 子弹为直径几个毫米的各种材质的圆球或圆棒.

Espinosa^[36]以抗穿透为背景, 用实验方法研究了 S-2 玻璃纤维 (60% 体积含量) 增强聚酯复合材料平板结构在高速冲击下的响应, 他们采用 NDI、NVI 激光干涉测速仪测量了带 30° 尖角的钢弹侵彻过程中, 钢弹和复合材料背面速度的演化. 并采用正反两种侵彻方案, 保证弹体和靶材速度测量的准确. 他们在侵彻断口附近, 发现了三种不同的损伤破坏机制: 区域 A (靶板的后表面附近) 的主要模式是层间破坏, 以及弹体前纤维的拉伸破坏; 区域 B (板材的中心区域), 层间破坏较少发现, 可观察到纤维的拉伸破坏及大挠度变形; 区域 C (靶板前表面), 断口附近的变形较小, 纤维和基体表现出明显的脆性破坏特征. 由于侵彻过程中, 弹速会逐渐降低, 不同区域的不同断口特征, 从一个侧面展示了冲击速度对材料损伤、破坏细观特征的影响. 另外, 他们还利用压剪炮技术研究了这类复合材料的抗冲击剪切和压缩性能.

Abdel-Rahman 等^[37]利用 ELVS 激光测速仪和高速摄影机 (曝光时间为 1 μs) 研究了 1.1 g 和 2.8 g 的几种形状子弹对 KEVLAR 129 材料的侵彻过程, 高速摄影机记录了靶板的变形过程. Morye 等人^[38]研究了钢球对 Nylon 66 增强靶板的冲击过程, 用高速摄影记录了靶的变形过程, 并且用超声 C-Scanner 技术分析了靶材在承受不同子弹冲击后的损伤和破坏区域.

采用类似的研究方法, 研究不同复合材料的冲击变形损伤过程的工作还有很多^[39,40]. 图 7 显示了复合材料板材在承受冲击和侵彻时, 变形和破坏的典型样式.

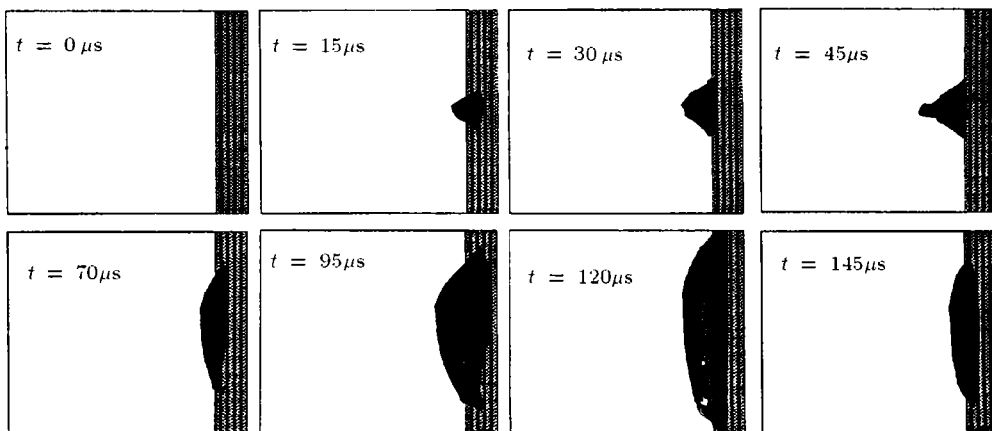


图 7 复合材料板材承受冲击侵彻时, 结构变形破坏示意图

复合材料冲击变形、破坏过程的实验观察, 以及破坏模式和区域的甄别和确定, 是进行复合材料抗侵彻性能分析的重要基础.

4 头盔材料的能量吸收机制及分析模型

在头盔中使用的复合材料, 各组份材料在高应变率下都呈脆性. 故此, 这些材料的动态强度及模量往往决定了所制备产品的能量吸收性能. 前者决定了单位材料破坏所需能量, 后者决定了参与能量吸收的材料的多寡. 材料中的应力波传播速度依赖于材料的模量, 应力波传播速度快, 就能在穿透现象发生以前, 使更多的材料参与高速冲击的抵抗 [2].

当一单丝在一点承受横向冲击时, 单丝内将会出现从冲击点向两端传播的弹性纵波和横波. 纵波和横波的速度 c 和 U 为

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad U = c(\sqrt{\varepsilon_0(1 + \varepsilon_0)} - \varepsilon_0), \quad V = c(\varepsilon_0[2\sqrt{\varepsilon_0(1 + \varepsilon_0)} - \varepsilon_0])^{1/2} \quad (2)$$

ρ, E 分别为纤维的模量和体积密度, V 为已知的冲击速度.

对于编织在一起的纤维, 其中的应力波传播与单丝不同: 当应力波在某些单丝中产生后, 在传播的过程中, 在编织的交叠处 (Crossover), 应力波会出现反射和绕射, 并导致应力波前后面的区域内, 应变幅度增加, 从而在一定程度上降低材料的抗穿透性能. 浸泡树脂的单丝及编织复合材料中, 应力波的传播速度参见 Landa 的工作 [41].

头盔材料中, 纤维的含量一般都较高 (70%~80%, 重量比). 这是因为, 树脂虽然在准静态条件下起到了传递应力, 增加韧性的作用, 但在高应变率条件下, 它在抗侵略性能方面的主要作用是负面的, 树脂将加强单丝交叠处的应力和变形集中现象, 致使材料的抗冲击性能降低.

应注意, 头盔除了抗侵略性能要求外, 还必须维护头盔整体的刚性, 即头盔任一点在受到冲击作用时, 背面相应位置的位移量应在被允许的范围内 (自由位移). 这就决定了在头盔材料中必须加入一定比例的树脂等高分子基体.

在头盔抗冲击性能的研究中, Tobin 等 [2,42,43] 提出了一个著名的经验公式, 把材料的 V_{50} 与其面密度之间建立了联系

$$V_{50} = KA^{0.5} \quad (3)$$

其中, A 为复合材料的面密度, K 为拟合参数. 许多研究者 [2,6,41,43] 都把自己的实验结果总结成公式 (3) 的形式, 参见图 8.

利用面密度来衡量材料的防弹性能, 无疑是不完善的, 它忽略了材料内纤维的编织方式和树脂的分布对材料抗弹性能的影响, 及纤维与树脂在抗穿透中的不同作用等.

另外, 在近年还出现了关于分析材料吸能机理、子弹极限速度的模型和方法. Morye 等 [38] 用能量守恒的原理, 分析了材料所能抵抗的极限冲击速度. 他们假定, 子弹的动能主要用于三方面:

破坏区纤维的失效能量 E_{TF} 、变形区的弹性变形能 E_{ED} 以及靶板内材料的动能 E_{KE} . 在这种简化分析中, 三种能量及极限冲击速度可以按下面的公式计算.

$$E_{TF} = 4E_c R_c DT \quad (4)$$

$$E_{ED} = \frac{1}{2} M \varepsilon^3 = \frac{\pi M \varepsilon_0^2 T}{(2R_c - D)^2} \left[\frac{R_c^4}{3} - \frac{D^2 R_c^2}{2} + \frac{D^3 R_c}{3} - \frac{D^4}{16} \right] \quad (5)$$

$$E_{KE} = \frac{1}{2} \pi R_c^2 T \rho V_c^2 \quad (6)$$

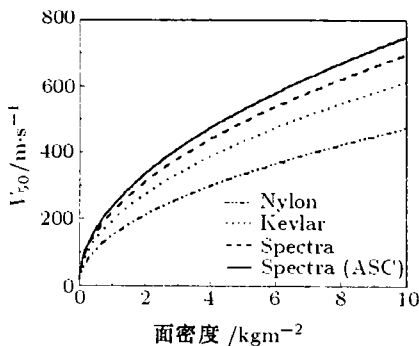


图 8 几种材料的 V_{50} 与其面密度的关系

Nylon $K = 149.3$, Kevlar $K = 193.3$,
Spectra $K = 219.5$, Spectra (ASC) $K = 236.5$

$$E_{\text{Total}} = E_{TF} + E_{ED} + E_{KE} \quad (7)$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{2}{m} E_{\text{Total}}} \quad (8)$$

其中, V_0 为极限穿透速度, D 为子弹的直径, m 为子弹的质量, T 为复合材料的厚度, ρ 为材料的密度, ε_0 为复合材料的失效应变, M 为材料的拉伸模量, E_C 为单位体积材料失效所需要的能量, R_c 为鼓包区的直径, V_c 为鼓包横向运动的速度.

文 [18] 还对理论结果与实验观察进行了比较. 这一方法从原理和计算上讲都是比较简单的, 并且能应用于多层板等复杂情况, 有较好的通用性. 但是, 在分析模型中, 需要知道很多过程参量, 例如: 需要用 C-Scan 技术探测和确定材料的破坏区域; 利用高速摄影和激光测速仪等分析鼓包的形状和运动速度等, 这大大限制了该模型的预测功能.

在 Slepian 的工作中^[44], 提出了一种新的分析方法. 首先针对一维条件, 对于一可变形的柔性单丝, 控制方程可以写成

$$\left[\sigma(s, t) \frac{R'}{|R|} \right] = \rho \ddot{R}(s, t) \quad (9)$$

其中, t 为时间, s 为位置, R', \ddot{R} 分别代表 R 的空间和时间的二阶导数, σ 为丝内的拉应力, R 为位移矢量.

如果单丝某点承受冲击以速度 v 横向运动时, 单丝内的拉应力和剪力在小应变假设成立时有

$$\sigma = 2^{-2/3} E^{1/3} \rho^{2/6} \nu^{4/3} < \sigma^* \quad (10)$$

$$Q = 2^{2/3} A E^{1/6} \rho^{5/6} \nu^{5/3} < B \sigma^{**} \quad (11)$$

上式中, σ^*, σ^{**} 为纤维的拉伸和剪切强度, A 是纤维的横截面积, B 为冲击面积, 上式仅在 v 保持不变时成立. 横向位移的计算公式为

$$w(t) = \frac{3m\nu_0^2}{B\sigma^{**}} \left[1 - \left(1 + \frac{B\sigma^{**}t}{\nu_0} \right)^{-1/2} \right], \quad W_{\max} = W(\infty) = \frac{3m\nu_0^2}{B\sigma^{**}} \quad (12)$$

W_{\max}, m, ν_0 分别为最大横向位移、子弹质量及子弹初始速度.

由公式 (10)~(12), 我们便可以得到单丝材料能抵抗的最大冲击速度.

相应地, 在轴对称条件下, 他们得到了膜的运动控制方程^[44] 为

$$\left[r\sigma(s, t) \frac{R'}{|R|} \right]' = r \ddot{R}(s, t) \quad (13)$$

也可写成

$$r\rho\ddot{u} = (r\sigma_r)', \quad r\rho\ddot{w} = (r\sigma_z)' \quad (14)$$

应力为

$$\sigma_r = \sigma(1 + u')\lambda, \quad \sigma_z = \sigma w'/\lambda \quad (15)$$

$$\sigma = E\varepsilon, \quad \varepsilon = \lambda - 1, \quad \lambda = \sqrt{(1 + u')^2 + (w')^2} \quad (16)$$

子弹的控制方程为

$$m\ddot{w} = -Q \quad (17)$$

接触条件为

$$w(r_0, t) = w(t) \quad (18)$$

由方程 (15)~(18), 利用差分算法, 加上材料的破坏准则和刚度要求, 便可得出极限速度. 这一模型, 理论上较严格, 但适用范围较窄, 难以直接用到头盔抗弹分析中去.

另外, Xia 等^[45]利用梁、板理论, 研究了层合板在冲击作用下的响应特征, 得到了层板内的位移、应力等随冲击速度的变化关系. 但他们的方法如应用到复合材料层板的抗侵彻分析中, 则存在待改进的地方, 一是他们的模型把每一层的材料看作各向同性, 二是分析过程在数学上十分繁杂, 推广到多层板时较困难.

总之, 头盔在碎片或子弹作用下, 能量吸收机理的理论分析, 还是比较初步的, 模型也大多显得粗糙^[46~55]. 只是对于单丝在冲击作用下的响应分析, 有比较成熟的结果. 而对于编织体, 或浸泡过树脂及其它高分子材料的硬防护材料, 还远没有得到令人满意的结果. 对于已有材料抗冲击性能的理论预测, 鲜有和独立进行的实验结果吻合良好的, 至于对结构及材料使用上的优化以提高防弹性能方面的分析, 很少见到相应工作. 这种现状产生的原因主要有两方面的因素: 一是理论分析本身的困难, 它涉及到多个物理过程和多个学科领域; 二是由于明显的军用背景, 各国间对最新的研究成果及关键技术相互封闭.

5 头盔用复合材料抗冲击的数值研究

迄今为止, 还没有在文献中发现碎片或子弹侵彻头盔的数值模拟工作. 但是下面介绍的工作及算法研究, 无疑是一些有益的探索和尝试.

Abdel-Rahman, Lomov, Wang 等^[37,56,57]发展了一种称之为“网状结构”(net-structure, mass-string system)的计算模型. 在该模型中, 质量集中在节点上, 节点间的“弹簧”单元描述面内的刚度, 节点拥有 x, y, z 三个方向的自由度. 参见图 9.

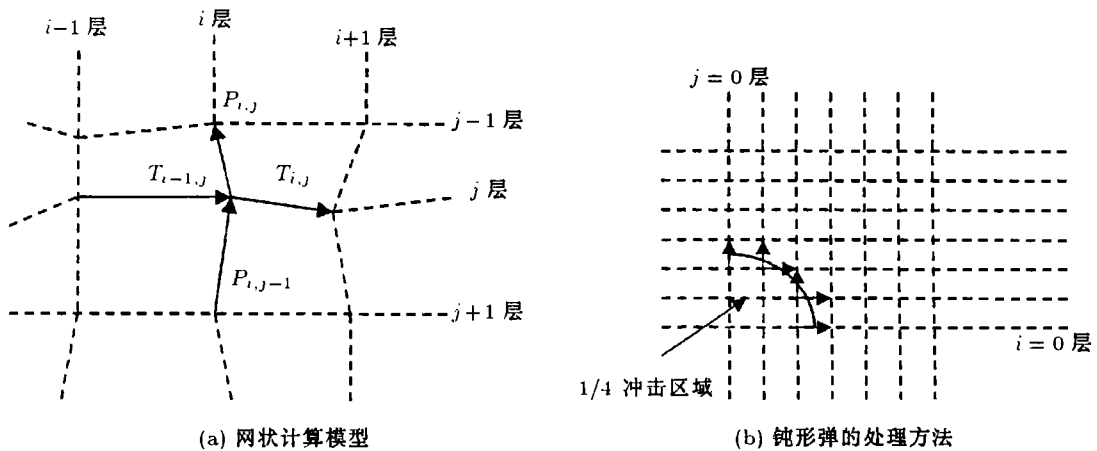


图 9

动量守恒方程可以写成

$$\frac{m}{\Delta t} (v_{(n)i,j}^t - v_{(n)i,j}^{t-\Delta t}) = T_{(n)i,j}^{t-\Delta t} - T_{(n)i-1,j}^{t-\Delta t} + P_{(n)i,j}^{t-\Delta t} - P_{(n)i,j-1}^{t-\Delta t} \quad (19)$$

其中, m 为节点的质量, Δt 为时间增量步长, $v_{(n)i,j}^t$ 表示 t 时刻节点 (i, j) 的速度矢量, $T_{i,j}$ 为节点 (i, j) 和 $(i+1, j)$ 间的弹簧的拉力, $P_{i,j}$ 代表了节点 (i, j) 和 $(i, j+1)$ 之间弹簧的拉力. 其它方程还有

本构方程

$$T_{i,j}^t = N\epsilon_{T_{i,j}}^t + K\dot{\epsilon}_{T_{i,j}}^t, \quad P_{i,j}^t = N\epsilon_{P_{i,j}}^t + K\dot{\epsilon}_{P_{i,j}}^t \quad (20)$$

其中 N, K 分别为 t 时刻材料的拉伸刚性和粘性张量.

几何方程

$$\varepsilon_{T_{i,j}}^t = \varepsilon_{T_{i,j}}^{t-\Delta t} + \frac{(L_{T_{i,j}}^t - L_{T_{i,j}}^{t-\Delta t})}{L_{T_{i,j}}^{t-\Delta t}}, \quad \varepsilon_{P_{i,j}}^t = \varepsilon_{P_{i,j}}^{t-\Delta t} + \frac{(L_{P_{i,j}}^t - L_{P_{i,j}}^{t-\Delta t})}{L_{P_{i,j}}^{t-\Delta t}} \quad (21)$$

其中, $L_{i,j}^t$ 为 t 时刻节点 (i, j) 与 $(i+1, j)$ 之间的距离.

网状结构内, 节点坐标的计算公式为

$$x_{i,j}^t = x_{i,j}^{t-\Delta t} + v_{(x)i,j}^t \cdot \Delta t, \quad y_{i,j}^t = y_{i,j}^{t-\Delta t} + v_{(y)i,j}^t \cdot \Delta t, \quad z_{i,j}^t = z_{i,j}^{t-\Delta t} + v_{(z)i,j}^t \quad (22)$$

设子弹的质量为 m_p , 直径为 d_p , 其冲击作用按如下假设处理: 子弹投影区域内, 网络节点的纵向速度为子弹的速度, 见图 9(b). 子弹速度的演化方程按子弹的动量守恒方程计算

$$\frac{m_p + \sum_{\text{Proj.}}^{\text{within}} m}{\Delta t} (V_p^t - V_p^{t-\Delta t}) = \sum_{\text{Proj.}}^{\text{Outside}} T_{(z)i,j}^{t-\Delta t} + \sum_{\text{Proj.}}^{\text{Outside}} P_{(z)i,j}^{t-\Delta t} \quad (23)$$

其中, $\sum T_{(z)i,j}^{t-\Delta t}, \sum P_{(z)i,j}^{t-\Delta t}$ 是图 9(b) 中显示的子弹投影区外的弹簧单元拉力的 z 方向的投影. 利用公式 (19)~(23), 加上适当的初始和边界条件, 便可以计算出冲击过程中子弹的动能损失、网格内吸收的能量 (变形能和动能).

上述的分析主要针对单层板, 未考虑层间效应. Slepian 等^[44] 在膜模型的基础上 (见公式 (15)~(18)), 发展了可以考虑层间作用的差分计算模型, 其基本方程如下:

平衡方程

$$\rho_f \ddot{u}_j = r^{-1} (h/h_s) (r\sigma_r)'_j + h_s^{-1} (S_r^{j+1,j} - S_r^{j,j-1}) \quad (24)$$

$$\rho_f \ddot{w}_j = r^{-1} (h/h_s) (r\sigma_z)'_j + h_s^{-1} (N_z^{j+1,j} - N_z^{j,j-1}) \quad (25)$$

其中, ρ_f 是编织体的密度, $u_j(r, t), w_j(r, t)$ 是第 j 层内面内位移及横向位移, $h, 2h_s(r, t)$ 为每编织层的净厚度及两层间的距离, S_r, N_z 为层间应力在 r, z 方向的投影. 当前层的膜应力为

$$\sigma_j = \begin{cases} \sigma_j(\varepsilon) & (\varepsilon \leq \varepsilon_{j,\text{lim}}) \cap (\lambda_j \geq 1) \cap (t \leq t_j(r)) \\ 0 & (\lambda_j < 1) \cup (t \geq t_j(r)) \end{cases} \quad (26)$$

其中, λ_j 为伸长比, 见公式 (16), $\varepsilon_{j,\text{lim}}$ 为失效应变, t_j 是破坏发生的时刻. 由公式 (15)~(18), (24)~(26), 可用差分方法计算层间效应的影响, 并可模拟破坏的过程.

头盔的数值模拟工作, 除了这些模型与算法外, 还可利用一些算法相对成熟的商业程序, 如著名的差分程序 Autodyn-2D&3D 就得到了相对较多的应用^[58], 它由 Century Dynamics Limited 公司提供. 该程序主要针对爆炸和高速撞击下结构的响应分析. 所采用的基本方程是动量守恒、质量守恒和能量守恒方程. 时间流程按显示的时间积分方法进行. 该程序中适合复合材料冲击计算的材料模型是理想的正交各向异性连续体本构, 可采用最大拉应力、最大剪应力破坏准则, 能够计入材料损伤对结构性能的影响.

与此同时, 一些著名的有限元冲击动力学程序, 如 LLNL 的 DYNA2D 和 3D, Livermore Software Technology Corporation 的 LS-DYNA 等^[59] 也开始涉足这一领域. 特别是 LS-DYNA 在材料模型及破坏算法的丰富、软件的包装等方面有明显的优势, 得到了较多的青睐.

但应该看到, 上述两个商业软件, 如果要应用到头盔计算中, 仍有明显不足的地方. 它们虽然都曾成功应用于复合材料结构的计算, 但大多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, 作者认为, 它们需要在程序中引入更合理的新的材料本构方程及算法.

6 结 语

本文以新型复合材料头盔的抗侵彻性能研究为背景, 总结了相关领域的主要研究方向及取得的成果. 评述内容包括: 纤维动态性能的实验研究、确定复合材料板材动力学性能的实验方法、高纤维含量复合材料的能量吸收机理和理论模型、关于头盔材料抗侵彻性能的经验与半经验分析模型, 以及数值方法在其中的应用.

通过总结, 作者认为下述几个方面需要更加深入地发展, 以使研究结果满足军用头盔发展的实际需要.

(1) 针对头盔用复合材料的高纤维含量特点, 发展材料的本构模型. 这当然必须建立在大量而系统的材料动力学性能的实验研究基础上;

(2) 由于复合材料抗侵彻性能研究中涉及的物理过程和物理量繁多, 这就需要通过量纲分析等方法寻找一些控制性的参量, 提高头盔设计的理性化程度. 遗憾的是, 这一方面的工作, 文献中难以发现;

(3) 现在的研究, 基本上停留在宏观力学的层次上, 应该引入一些细观力学的理论和实验手段, 使材料性能的描述、能量吸收机制等方面的模型更加合理;

(4) 针对新型头盔的纤维编织方式, 可以发展一些新的, 带有破坏准则的网状模型. 同时也可以在商业程序的基础上, 引入新的本构模型和算法, 使数值模拟的结果更加合理;

(5) 头盔抗侵彻性能的力学研究, 一个终极性的目标就是能够参与材料参数选择及结构的优化设计, 真正发挥指导性的作用.

参 考 文 献

- 1 Zholidkovskiy O. Knight of the twentieth century. AD719551, FSTC-HT-23-1051-70, 1971
- 2 Brown J R, Egglestone G T. Ballistic properties of composite materials for personal protection. AD-A215 100, 1989
- 3 MIL-P-46593A (ORD). Military Specification, Projectile, Calibres 0.22, 0.30, 0.50 and 20 mm, Fragment-Simulating
- 4 Kruger R. Aramid fibers in ballistic materials. *Polymer in defence*, 1987, 5: 20~24
- 5 熊杰. 高强纤维在个人防护中的应用. [博士论文]. 上海: 中国纺织大学, 1998
- 6 Merriman E A, Miner L H. Fragmentation resistance of fiber reinforced ballistic structure. In: Proceeding of the 10th international symposium on ballistics, San Diego, Ca. 1987. 75~86
- 7 Lin L C, Bhatnagar A, Lang D C, et al. Ballistic performance of lightweight spectra composite hard armor. In: Proceeding of the 33th international SAMPE symposium, Anaheim, Ca, 1988. 235~254
- 8 Ward J E, Koza W. Hi-tech fibers for improved ballistic protection. In: Science symposium proceedings. Natick research, development and engineering centre, 1986. 279~305
- 9 Harding J. Lecture Notes for the Short Course on Structural Impact. University of Oxford, 1992. 27~29
- 10 Harding J, Welsh L M. A tensile testing technique for fiber-reinforced composites at impact rates of strain. *Journal of Materials Science*, 1983, 18: 1810~1826
- 11 Harding J, Li Y L, Saka K, et al. Characterization of impact strength of woven carbon fiber/epoxy laminate. In: Proceeding of international conference on mechanical properties of materials at high strain rate, Oxford. 1989. 403~410
- 12 Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high strain rates of loading. *Proc Soc B*, 1949, 62: 676~701
- 13 Groves S E, Sanchez R J, Lyon R E, et al. High strain rate effects for composite materials. UCRL-JC-107836, 1992
- 14 Daniel I M, Labeledz R H, Liber T. New method for testing composites at very high strain rates. *Experimental Mechanics*, 1981, 21(2): 71~77
- 15 Ross C A, Cook W H, Wilson L L. Dynamic tensile tests of composite materials using a split-Hopkinson pressure bar. *Experimental Mechanics*, 1984, 11: 205~211

- 16 Jang B Z, Chen L C, Hwang L R, et al. The response of fibrous composites to impacting loading. *Polymer Composites*, 1990, 11: 98~110
- 17 Cairns D S, Lagace P A. Thick composite plates subjected to lateral loading. *Journal of Applied Mechanics*, 1987, 54: 611~616
- 18 Al-Salehi F A R, Al-Hassani S T S, Hinton M J. An experimental investigation into the strength of angle ply GRP tubes under high rate of loading. *Journal of Composite Materials*, 1989, 23(3): 288~295
- 19 Sierakowski R L. High strain rate testing of composite. In: Proceedings from dynamic constitutive failure models. AFWAL-TR-88~4229, 1988
- 20 Benloulou I S C, Rodriguez J, Martinez M A, et al. Dynamic tensile testing of aramid and polyethylene fiber composites. *Journal of Impact Engineering*, 1997, 19: 135~146
- 21 Morrison C, Bader M G. Behavior of aramid fiber yarns and composites under transverse impact. In: Proc of the First ECCM, Bordeaux. 1985. 706~712
- 22 Dupont Company. A guidance to designing and preparing ballistic protection of Kevlar aramid. Memo 440, 1983
- 23 Abrate S. Impact on laminated composite materials. *Appl Mech Rev*, 1991, 44(4): 155~190
- 24 Cantwell W J, Morton J. The impact resistance of composite materials—a review. *Composites*, 1991, 22: 347~362
- 25 Sharma N, Kelly P, Carr D, et al. Modeling the ballistic performance of body armour using a finite difference code. In: Gott P L, Kelly P M ed. Personal Armour System Symposium 98. 1998. 259~288
- 26 Frissen R, Peijs T, Verlinde A. Modeling the ballistic impact behavior of high performance polyethylene-fiber-reinforced laminated. In: 16th international symposium on ballistic. 1996. 23~28
- 27 Morye S S. Hybrid composite for ballistic protection. In: IRC in Polymer Science and Technology. The University of Leeds, Second year PhD Report. 1997
- 28 NATO. NATO standardization agreement ballistic test methods for fragment protective materials. Draft STANAG 2920, 1994
- 29 Ballistic test method for personal armour and lightweight materials (DCTA, MOD). UK/SC/5449. 1996
- 30 Wright S C, Fleck N A, Strong W J. Ballistic impact of polycarbonate—an experimental investigation. *Int J Impact Engng*, 1993, 13: 1~20
- 31 Broutman L J, Rotem A. Impact strength and toughness of fiber composite materials. In: Foreign object impact damage to composite. American Society for Testing and Materials. STP568. 1975, 114~133
- 32 Hunston D L. Composite interlaminar fracture: effect of matrix fracture energy. *Composite Tech Review*, 1984, 176~180
- 33 Husman G E, Whitney J M, Halpin J C. Residual strength characterization of laminated composites subjected to impact loading. In: Foreign Object Impact Damage to Composite. American Society for testing and Materials, STP568. 1975. 92~113
- 34 Abrate S. Impact on laminated composites: Recent Advances. *Applied Mechanics Review*, 1994, 47: 517~544
- 35 Dorey G. An overview of impact damage in composites. In: Proc of Int Conf Mech Prop Materials at High Rates of Strain, Oxford. 1989. 395~402
- 36 Espinosa H D. Dynamic inelastic of polymer matrix composites. ARO 34475.2-EG-II, 1996
- 37 Abdel-Rahman N, Starratt D, Pageau G, et al. Experimental and theoretical investigation of the ballistic impact of textile materials. In: Personal Armour Systems Symposium 98. 1998. 213~222
- 38 Morye S S, Hine P J, Duckett R A, et al. Modeling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. In: Personal Armour Systems Symposium 98. 1998. 223~237
- 39 Morye S S. Internal report: IRC in polymer science and technology. The University of Leeds. 1997
- 40 Potti S V, Sun C T. Prediction of impact induced penetration and delaminated. *Int J of Impact Engng*, 1997, 19: 31~48
- 41 Landa B P. An analytical model to design composite material armour. In: Proc of Int Conf Mech Prop Mater at High Rates of Strain, Oxford. 1989. 565~573
- 42 Tobin L B. The evaluation of body armour and helmets: a reappraisal of the FSP V_0 and V_{50} measure. Internal SCRDE research report, No 93/2. 1993
- 43 Tobin L. A comparison of the levels of protection afforded by various fabrication of Kevlar and Nylon helmet. SCRDE/85/8 part1, SCRDE85/10, part 2. 1985
- 44 Slepyan L I, Ayzenberg-Stepanenko M V. Penetration of Metal-fabrics composites by small projectiles. In: Personal Armour Systems System 98. 1998, 289~298
- 45 Xia Y R, Ruiz C. Response of layered plates to projectile impact. In: Proc of Int Conf Mech Prop Mater at High Rates of Strain, Oxford. 1989. 573~580
- 46 Roylance D, Wilde A, Tocci G. Ballistic impact of textile structures. *Textile Res J*, 1973, 43: 41~49
- 47 Cunniff P M. An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. *Textile Res J*, 1992, 62: 495~509

- 48 Ting J, Roylance D, Chi C H, et al. Numerical modeling of the fabric panel response to ballistic impact. In: Proc 25th Int SAMPLE Techn Conf. Oct, 26~28. 1993. 384~392
- 49 Vinson J R, Zukas J A. On the ballistic impact of textile body armour. *J Appl Mech*, 1975, 6: 263~268
- 50 Shim V P W, Tan V B C, Tay T E. Modeling deformation and damage characteristics of woven fabric under small projectile impact. *Int J Impact Engng*, 1995, 16: 585~605
- 51 Navarro C, Rodrigues J, Cortes R. Analytical modeling of composite panels subjected to impact loading. *Colloque C8 J Phy IV*, 1994, 4: 515~520
- 52 Cunniff P M. A semiempirical model for ballistic impact performance of textile-based personnel armour. *Textile Res J*, 1996, 66: 45~49
- 53 Chocron-Benloulou I S, Rodriguez J, Sanchez-Galvez V. A simple analytical model to simulate textile fabric ballistic impact behavior. *Textile Res J*, 1997, 67: 520~528
- 54 Chocron-Benloulou I S, Rodriguez J, Sanchez-Galvez V. A simple analytical model for ballistic impact in composites. *Colloque C3 J Phy IV*, 1997, 7: 821~826
- 55 Smith J C, Mkrackin F L, Schiefer F H. Stress-strain relationships in threads impacted transversely. *Textile Res J*, 1958, 28: 34~41
- 56 Roylance D, Wang S S. Penetration mechanics of textile structure. In: Laible RC ed. Ballistic materials and penetration mechanics. Elsevier Sci Publ. 1980, 272~292
- 57 Lomov S. Oblique high velocity impact on a textile woven target: mathematical simulation. In: Personal Armour System Symp 96. 1996. 145~156
- 58 O'Grady H. Application of numerical modeling to the impact response of ballistic protection materials. In: Personal Armour System Symp 98. 1998. 239~258
- 59 Livermore Software Technology Cooperation. LS-DYNA User's Manual. Version 940. 1997

REVIEW ON THE DYNAMIC BEHAVIORS AND PENETRATION OF THE COMPOSITES HELMET UNDER IMPACT LOADING

Huang Chenguang¹ Shi Meiwu² Duan Zhuping¹

¹ Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

² Research Institute of the General Logistics Department of the CPLA, Beijing 100010, China

Abstract The studies on energy absorption mechanisms and the penetration processes of the helmet made of fiber reinforced composites and impacted by the FSP or bullet are reviewed in this paper. The development of the numerical simulation for the penetration of helmet is also discussed.

Keywords fiber reinforced composites, penetration, impact dynamics, high speed camera