第 15 卷　第 2 期　　复　合　材　料　学　报　　Vol 15　No. 2
1998 年　5 月　　ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　May　1998

纤维复合材料的弹道吸能研究

张佐光　　霍　刚　　张大兴　　梁志勇　　仲伟虹
(北京航空航天大学材料科学与工程系, 北京, 100083)

摘　要　本文通过大量的实弹试验考察与分析了芳纶、超高分子量聚乙烯纤维、玻璃纤维、碳纤维复合材料弹道吸能随面密度、弹速、成型压力、树脂基体含量等改变而变化的规律, 揭示出不同纤维复合材料在不同条件下的防弹能力。研究结果对防弹复合材料及其轻质复合装甲的优化设计具有较重要的参考意义。

关键词　纤维复合材料, 防弹材料, 弹道吸能, 防弹复合材料
中图分类号　V 258, V 258. 3, V 258. 5

人员防护在当今社会的许多情况下仍是一个重要的问题。特别是警察、士兵穿戴的防弹背心、防弹头盔等, 不仅要求有较好的防弹性, 而且要穿着轻便、舒适、耐用、易于修补。纤维增强树脂基复合材料具有轻质、高强、工艺性好、弹道性能优异等特点, 是发展较快的一种新型防弹材料。早在1989年, 纤维增强树脂基复合材料防弹制品在北美及西欧的防弹市场上, 就已占总产量的45% [1]。防弹复合材料不仅应用在防弹背心和防弹头盔等近身防护上, 还应用于军用车辆和运钞车等领域, 防弹复合材料背板与陶瓷面板组成的复合装甲是用于武装直升飞机的最理想的轻质装甲。本文中对几种主要的防弹纤维复合材料的弹道性能进行了较详细的研究, 重点考察与分析了面密度、弹速、纤维种类、压力以及树脂含量对各种纤维复合材料弹道吸能的影响规律。研究结果为各种防弹复合材料弹道性能的估算和防弹复合材料及其轻质复合装甲的优化设计提供参考依据。

1　实验部分

1. 1　靶板用纤维材料

实验用纤维如表1所示。

表1　几种纤维及性能指标

Table 1　Properties and suppliers of different fibers

纤维种类	密度/g·cm^{-3}	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	织物类型	来　源
GF	2. 54	2980	85	S-2(平纹布)	南京玻纤院
CF	1. 77	3020	221	T300(平纹布)	日本东丽
TF	1. 45	3250	79	Twaron1000(平纹布)	荷兰AKZO
DF	0. 97	3200	99	Dyneema SK66(UD66)	DSM

收修改稿、初稿日期: 1997—10—10, 1997—08—02

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2　靶板的制备

先将预浸料按设计要求裁成一定尺寸, 并正交铺层至所需厚度, 置于模具中, 在热压机上成型, 升温速率为2～3℃/min。对于GF、CF 和TF 的预浸料, 是在热压机上按树脂体系规定的工艺制度固化成型。对于DF 预浸料, 热压工艺如下: 120℃施加所需的压力, 保温保压30min, 自然冷却到室温卸模。

1.3　靶试系统

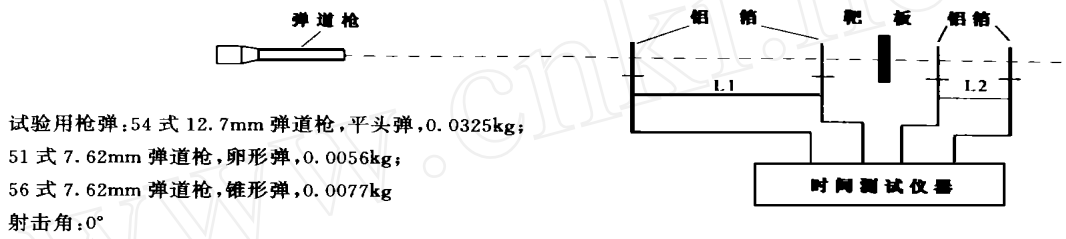

图1　靶试系统示意图　　Fig. 1　Sketch of ballistic testing system

1.4　符号说明

E_a—— 靶板的能量吸收(J): $E_a = 1/2 m_p V_i^2 - 1/2 m_p V_r^2$; BPI——弹道性能指数($Jm^2/kg$): $BPI = E_a/AD$; EI——能量吸收指数(J/mm): $EI = E_a/t$; m_p——弹体的质量(kg); V_i——弹体靶板前的初始速度(m/s); V_r——弹体穿透靶板后的残余速度(m/s); AD——靶板的面密度(kg/m^2); t——靶板厚度(mm)。

2　实验结果与分析

2.1　面密度对弹道吸能的影响

为了考察面密度对纤维复合材料弹道吸能的影响, 分别制备了不同面密度的玻璃纤维复合材料(GFRP)靶板、芳纶复合材料(TFRP)靶板以及Dyneema UD66复合材料(DFRP)靶板, 并进行了靶试, 靶试结果见表2。将表2数据的 E_a-AD 关系作图, 可得到图2。

从表和图中可明显看出, 三种纤维复合材料靶板的 E_a 都随AD 的增加而增加, 但是增加的速率是不同的, 这与纤维有直接关系。

实际上本实验中的TFRP 与DFRP 是防弹型复合材料, 而GFRP 是一种典型的结构型复合材料, 其所用的纤维、基体及基体含量都具有结构复合材料的特征, 它与TFRP、DFRP 相比, 能量吸收值很低, 只有前者的1/4～1/5。应该说明的是, GFRP 用的是锥形弹丸, 而TFRP 和DFRP 则是卵形弹丸, 由于弹体形状不同破坏模式有差异, 使玻璃纤维的应变率效应不能得到充分发挥, 这也是导致GFRP 吸能较低的原因。

2.2　弹速对弹道吸能的影响

由于弹体作用于靶板的瞬间是一个高速的动态过程, 因而不可忽视应变率效应, 复合材料靶板的弹道吸能与弹速有关。为了考察弹速对纤维复合材料弹道吸能的影响, 采用四种不同的纤维, 其制成的靶板参数示于表3。四种纤维复合材料靶板在不同弹速下的靶试结果见表4。

分别对GFRP、TFRP、CFRP、DFRP 四种靶板的 E_a-V_i 关系作图, 得到图3。从图3可以清楚看出: GFRP 靶板和TFRP 靶板的能量吸收均随入射速度 V_i 的增加而较大增加, 且前者增加幅度快于后者。CFRP 虽也有所增加但很少, 几乎可不计。而DFRP 则呈相反趋势, 在实验范围内, 随 V_i 的增加, E_a 减少。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 不同面密度纤维复合材料靶板的弹道吸能

Table 2 Ballistic energy absorption of fiber composites with different areal densities

靶板类型	靶板编号	织物层数	AD/kg•m^{-2}	E_a/J	备 注
GFRP	SG-1	5	1.02	9.21	① 基体为双马来酰亚胺体系, 含量30% 左右 ② 56式弹道枪
	SG-2	21	4.00	32.3	
	SG-3	26	5.27	41.6	
	SG-4	36	7.03	55.5	
	SG-5	46	8.00	73.3	
	SG-6	56	14.54	145	
TFRP	FT-1	8	3.93	183	①基体为改性酚醛树脂体系, 含量15% 左右 ②51式弹道枪
	FT-2	12	6.66	415	
	FT-3	20	11.10	696	
DFRP	PEP-1	15	2.46	70	① 基体为 PE, 含量15% 左右 ② 51式弹道枪
	PEP-2	20	2.62	95	
	PEP-3	30	4.03	251	
	PEP-4	40	5.53	293	
	PEP-5	70	9.68	468	

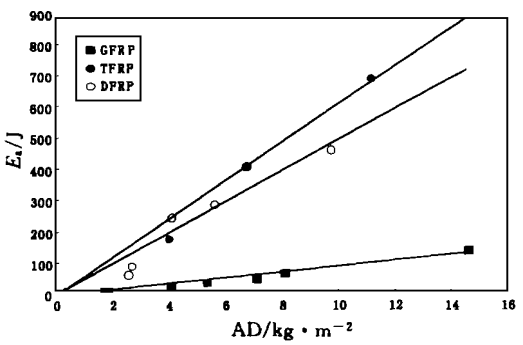

图2 不同纤维复合材料的弹道吸能与面密度的关系

Fig. 2 Ballistic energy absorption of different fiber composites *vs* areal density

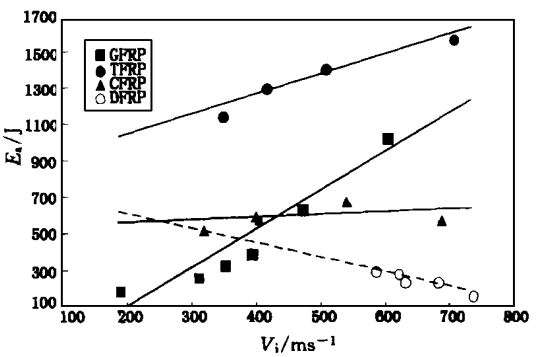

图3 不同纤维复合材料的弹道吸能与弹速的关系

Fig. 3 Ballistic energy absorption of different fiber composites *vs* projectile velocity

表3 四种纤维复合材料靶板的参数

Table 3 Structural parameters for different fiber composites targets

靶板类型	增强纤维	基体材料	t/mm	AD/kg•m^{-2}	备 注
GFRP	S-2玻璃纤维		5.35	8.4	树脂含量均为15% 左右
TFRP	Twaron1000	改性酚醛	7.63	8.7	
TFRP	T300-3000-40B	树脂体系	7.58	9.7	
DFRP	Dyneema SK66	PE	4.20	3.94	

上述实验结果与纤维的应变率效应和弹击破坏机理有关系。GFRP有明显的应变率效应[2], 当应变率从10^{-3}/s提高到5×10^{2}/s其强度提高1倍, 应变率提高到1×10^{3}时, 强度可提高2～3倍。对于碳纤维, J. Harding[3]通过实验得到: 单向碳纤维没有应变率效应, 而碳纤维织物增强复合材料存在一定的应变率效应, 这与碳纤维复合材料的靶试结果是一致的。对于芳

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表4　各种靶板在不同弹速下的弹道性能

Table 4　Ballistic performance for different targets under different projectile velocities

靶板类型	V_i/m·s^{-1}	E_a/J	BPI/Jm^2·kg^{-1}	EI/J·mm^{-1}	备　注
GFRP	186	201	24	38	54式弹道枪
	307	277	33	52	
	348	345	41	64	
	388	410	49	77	
	402	578	69	108	
	467	650	77	121	
	600	1041	124	194	
TFRP	345	1160	133	152	54式弹道枪
	412	1315	151	172	
	504	1423	164	186	
	704	1584	182	208	
CFRP	315	539	56	71	54式弹道枪
	395	612	63	81	
	536	693	71	91	
	682	587	60	77	
DFRP	581	310	79	74	51式弹道枪
	616	300	76	71	
	625	251	64	60	
	677	250	63	60	
	733	183	46	44	

纶, Chocron Benloulo[4]等人研究Aramid/PET 的结果表明: 当应变率从10^{-3}/s 提高到10^3/s 时, 其拉伸强度提高50%。可以认为芳纶的应变率敏感性介于玻璃纤维与碳纤维之间。可见, 上述三种靶板的 E_a-V_i 关系与纤维和复合材料本身的应变率效应相吻合。这说明, 随着弹速的提高, 靶板受到冲击弯曲产生的拉伸应变速率提高, 使得复合材料靶板的断裂强度、断裂应变均提高, 使子弹穿透靶板的阻力增加, 从而使靶板的弹道吸能 E_a 值随之提高。

对于DFRP, 在相同面密度(约4.00kg/m^2) 下, 在弹速为550～750m/s 范围内, 靶板的弹道吸能 E_a 随着弹丸入射速度 V_i 的提高而降低, 此研究结果与美国Prevorsek 所研究的结果完全相似[5]。而且, Prevorsek 还对UHMWPE 纤维及其复合材料的应变率依赖性进行了深入的研究[6], 其研究结果表明: UHMWPE 纤维及其单向和正交铺层复合材料都存在一定的应变率效应, 当应变率从1.7×10^{-1}/s 提高到1.7×10^2/s, 其模量提高2～3倍。另外, Chocron Benloulo[4]等人对DFRP 复合材料的研究结果也表明: 当应变率从10^{-3}/s 提高到10^3/s 时, 其拉伸强度提高80%。由此看来似乎DFRP 复合材料靶板的 E_a-V_i 关系与纤维和复合材料本身的应变率效应并不吻合。实际上应该从弹击时靶板的破坏机理上分析。DFRP 靶板由于UHMWPE 纤维熔点低, 在弹体以较高速撞击靶板时, 摩擦生热瞬间无法耗散, 导致DFRP 靶板呈明显的多阶段破坏模式[7], 即着弹面为冲塞破坏(垂直靶板面的剪切破坏), 背面为拉伸破坏, 随弹速增加, 冲塞破坏的纤维厚度增加, 导致拉伸破坏的纤维减少, 因而应变率效应不明显。又由于单位体积内冲塞破坏所耗散的能量远低于拉伸破坏所耗散的能量, 所以DFRP 靶板的 E_a 值随弹速增加而会下降。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图3没有考虑靶板的重量效应和厚度效应。但是,对于防弹装甲的研究者与使用者来说,考察靶板的单位重量和单位厚度的防弹能力更有实际意义。本文中根据弹道吸能进一步求出了各种纤维复合材料的弹道性能指数和能量吸收指数与弹速的关系,见图4、图5。从图中大体可以看出各纤维复合材料在不同弹速范围内能量吸收的能力。

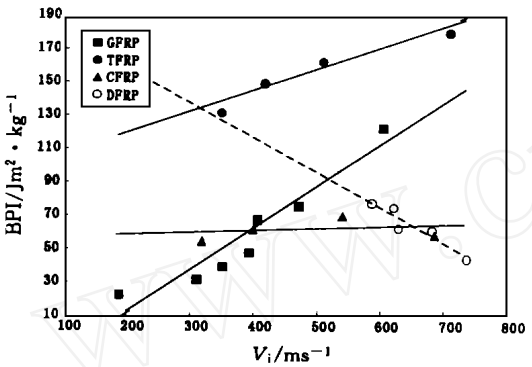

图4 不同纤维复合材料的BPI与V_i的关系

Fig. 4 BPI of different fiber composites vs V_i

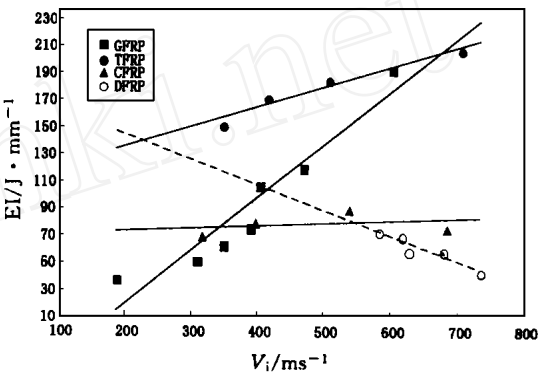

图5 不同纤维复合材料的EI与V_i的关系

Fig. 5 EI of different fiber composites vs V_i

将不同纤维复合材料的BPI-V_i作线性回归,可得回归方程:

$$BPI = mV_i + n$$

m、n与纤维种类、纤维的应变率敏感性及靶板的破坏模式等有关。本实验条件下求得的m、n列于表5。

表5 不同纤维复合材料的BPI-V_i的线性回归结果

Table 5 Linear regression results of BPI-V_i for different fiber composites

靶 板 类 型	回 归 系 数	
	m	n
GFRP	0.2517	-37
TFRP	0.1285	94
CFRP	0.0128	56
DFRP	-0.2082	200

2.3 成型压力对弹道吸能的影响

为优化成型压力,考察压力对芳纶复合材料和UHMWPE纤维复合材料靶板弹道吸能的影响,实验中固定其他参数,如层数、面密度、含胶量、固化温度等都不改变,只改变固化压力(P)。得到的实验结果列于表6,并将表6数据作图,得到图6、图7。

由表6和图6可以看出,当固化压力从1MPa提高到2MPa时,其弹道吸能值有大幅度提高,见表6中F2与F3靶板。因为随着压力增加,一方面提高了靶板的致密程度,利于纤维的协同作用;另一方面使基体-纤维结合状况得到改善。两者共同效果都可以吸收更多的能量,从而使靶板的抗弹性能提高。当固化压力从3MPa增加到4MPa时,弹道吸能不但不增加,而且有所下降。由此可见,TFRP靶板固化压力,需要足够大,但并不越大越好。由表6和图7可以看出,对于DFRP靶板,当成型压力较小(0.5MPa~1.5MPa)时,层与层之间结合不够紧密,当一部分纤维受到冲击时,无法通过层间偶合与其它纤维相互作用,纤维的协同效应差,不利于应力波的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

传播和冲击能量的耗散, 因而吸能较低。随着成型压力的提高, 纤维间协同效应越来越强, 吸能迅速提高, 在2.5MPa 左右时吸能达到最大值。此后, 继续提高压力将使层板弯曲刚度提高, 不利于纤维的拉伸变形, 使得参与拉伸断裂的纤维数目减少, 由于子弹的动能主要是通过纤维的拉伸断裂来消耗, 因而吸能下降。当压力增加到一定程度时, 层板的刚度趋于恒定, 层板的吸能也趋于恒定。

表6　不同固化压力的复合材料弹道吸能

Table 6　Ballistic energy absorption for fiber composites under different molding pressures

靶板编号		AD/kg•m^{-2}	P/MPa	E_a/J	弹击现象	备　注
TFRP	F1	6.59	0.5	-	-	① 树脂含量在15% 左右 ② 51式弹道枪 ③ F1靶板由于压力小、层间粘合差, 无实用价值
	F2	6.61	1	204	穿透	
	F3	6.59	2	> 437	夹弹	
	F4	6.66	3	415	穿透	
	F5	6.63	4	> 314	夹弹	
DFRP	P1	3.97	0.5	156	穿透	① 树脂含量为15% 左右 ② 51式弹道枪
	P2	3.93	1.5	150		
	P3	3.93	2.5	272		
	P4	3.90	4.0	216		
	P5	3.93	8.0	215		

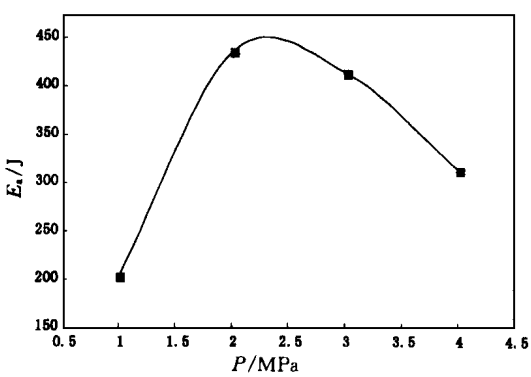

图6　固化压力对TFRP 弹道吸能的影响

Fig. 6　Effect of curing pressure on ballistic energy absorption for TFRP

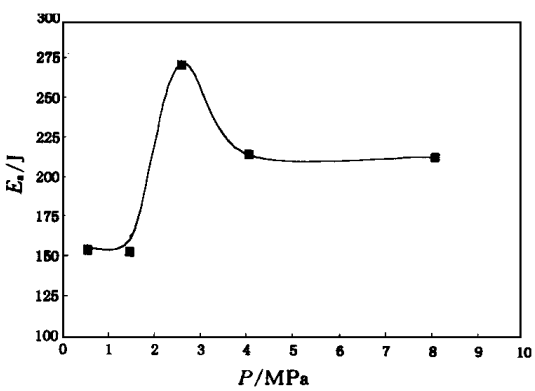

图7　成型压力对DFRP 弹道吸能的影响

Fig. 7　Effect of molding pressure on ballistic energy absorption for DFRP

2.4　树脂含量对弹道吸能的影响

树脂含量是影响复合材料性能的一个重要因素。实验表明, 对于防弹复合材料, 基体含量的影响更明显。表7列出在其他实验条件相同的情况下, 不同树脂含量TFRP 的弹道吸能。

从表7中可以看出, 对于1MPa 固化的A1、A2、A3靶板, 当树脂含量由6.5% 增至15.2%, 其弹道吸能由150J 增加到204J, 吸能随着树脂含量增加而增加。因为构成靶板的Twaron 织物层间是通过树脂基体粘结的, 基体少了, 难以将各层很好地粘结在一起, 靶板将不成整体, 不能充分发挥所有纤维层的协同作用, 因此抵抗子弹的能力将偏低。树脂含量增加, 层与层之间粘结作用加强, 有利于协同作用, 因而抗弹的能力将提高。但是, 对于固化压力均为2MPa 的A4、A5、A6靶板, 含胶量从14.3% 增至20.8%, 其弹道吸能值降低。可以从两个方面理解这一实验

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结果。一是树脂含量多, 与纤维粘结的数量增加, 限制纤维变形的作用突出, 导致抗弹性能差; 二是树脂基体主要在层间粘结, 树脂含量高, 层间的树脂层变厚, 而树脂层又是弱相, 弹击时容易造成树脂基体内聚破坏, 不能充分发挥纤维的作用, 弹道性能势必下降。从表中还可以明显看出, 防弹性能好的靶板树脂含量也只有一般结构芳纶复合材料的二分之一, 这是防弹芳纶复合材料的特点之一。

表7 不同树脂含量 TFRP 的弹道吸能

Table 7 Ballistic energy absorption for TFRP with different resin contents

靶板编号	树脂含量/%	AD/kg•m^{-2}	固化压力/MPa	E_a/J	弹击现象	备 注
A1	6.5	5.83	1	150	穿透	51式弹道枪
A2	9.2	6.00	1	160	穿透	
A3	15.2	6.62	1	204	穿透	
A4	14.3	6.59	2	> 437	夹弹	
A5	17.6	6.84	2	> 361	夹弹	
A6	20.8	6.94	2	264	穿透	

3 结 论

综上所述, 在本研究的条件下, 可以得出以下结论:

(1) 各种纤维复合材料靶板的弹道吸能都随面密度的提高而增加。

(2) 复合材料的弹道吸能受弹速的影响。GFRP、TFRP 的弹道吸能随弹速的升高而线性增加, GFRP 增加的幅度最大, CFRP 几乎不变, 而DFRP 的弹道吸能随弹速的升高而降低。

(3) 成型压力对复合材料靶板弹道吸能影响较大, 对 TFRP 和DFRP 靶板, 成型压力在 2～3MPa 时, 防弹性能最好。

(4) 对防弹复合材料而言, 树脂含量为16±2% 时较为合适。

(5) 靶板的吸能大小还与所用的弹体因素有关, 弹体质量大、弹头钝更利于靶板吸能。

参 考 文 献

1 Weatherall James M, Rappaort Mark S, Morton James T. The outlook for advanced armor materials. 22nd International SAMPE Technical Conference. California: Society for the Advancement of Material and Process Engineering (Vol22), 1990. 1070～1077

2 姜梦梅, 曲英章. 非金属材料动态力学性能研究介绍. 兵器材料科学与工程, 1990(1): 43～47

3 Harding J, Li Y L, Saka K, Taylor M E C. Characterization of the impact strength of woven carbon fiber/epoxy laminate. Proc Int Conf Mech Properties Mat High Rate of Strain. Oxford, 1989. 403～410

4 Chocron Benloulo I S, Rodrigues J, Martinez M A, *et al*. Dynamic tensile testing of aramid and polyethylene fiber composites. Int J Impact Engng, 1997, 19 (2): 135～146

5 Prevorsek D C, Harpell G A, Kwon Y D, *et al*. Ballistic armor from extended chain polyethylene fibers. 33rd International SAMPE Symposium. California: Society for the Advancement of Material and Process Engineering (Vole), 1988. 1685～1696

6 Prevorsek D C, Chin H B, Kwon Y D. Strain rate effects in ultrastrong polyethylene fibers and composites. Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium 47, 1991. 45～66

7 申世光. 陶瓷/复合材料和超高分子量聚乙烯纤维复合材料弹道性能分析与研究: [硕士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1997

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

STUDY ON BALLISTIC ENERGY ABSORPTION OF FIBER COMPOSITES

Zhang Zuoguang　Huo Gang　Zhang Daxing　Liang Zhiyong　Zhong Weihong
(Material Science and Engineering Department, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract　In this paper the relationships between the ballistic energy absorption of aramid fiber, UHMWPE fiber, glass fiber, carbon fiber reinforced composites and areal density, projectile velocity, molding pressure, resin matrix content were investigated and analyzed through lots of ballistic testings. The ballistic resistance of different fiber composites under different conditions was revealed. The study results would be a very valuable reference to the optimal design of ballistic composites and lightweight composite armor.

Key words　fiber composites, ballistic materials, ballistic energy absorption, ballistic composites

复合材料涂层防裂的发展
—参加第十一届国际复合材料会议的体会—

蒋咏秋
(西安交通大学工程力学系, 西安710049)

一、会议概况

第十一届国际复合材料会议于1997年7月14～18日在澳大利亚布里斯班市附近的黄金海岸举行。参加会议的有来自四十多个国家的720多位代表。其中我国代表有25人, 是历届之冠。会议除进行了学术交流外, 还通过竞选, 确定第十三届国际复合材料会议将于2001年在北京举行。

会后我到悉尼大学访问与讲学一周, 然后应成功大学材料科学与工程研究所洪敏雄教授之邀, 访问了台湾的七所著名的工科大学和新竹高科技园区的材料所、光学电子所和高雄市的金属研究与开发中心。其中应邀在台大、交大与成大三校作了学术报告。访台为期二周。

通过澳台一个多月的访问, 我对复合材料涂层材料的防裂的发展体会较深。

二、涂层材料的断裂分析

随着高科技的发展, 对材料性能的要求愈来愈高。例如 C/C (碳/碳) 复合材料, 能承受高温达3000℃, 所以广泛地用在航天飞机和全复合材料的固体火箭发动机上。但该材料承受的温度到达400℃就开始氧化, 因此需要在 C/C 表面用热熔射(Thermal Spraying)涂以陶瓷(例如氧化锆)薄层以防止氧化。

涂层材料也可以是金属或聚合物, 为了优化涂层, 也可以用复合材料。例如以镍为基体, Al_2O_3, SiC 或金刚石颗粒作为增强材料, 也可用短的碳纤维作为增强材料。

这种涂层材料除了防止材料的氧化, 还能防止腐蚀和耐磨, 对结构材料起一种保护层的作用, 并且还能增加材料的硬度。

在台湾新竹科技园区的光电子所, 有许多镜片为了增强其光学性能和实用价值, 采用热蒸涂技术(Thermal Evaporation), 即用电子枪扫射使薄膜(Thin Film)发热而蒸发, 均匀地沉积在基材上。这种薄膜, 可以是聚合物、金属或陶瓷。

(下转第92页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net