

抗动能多功能复合材料 结构模型试验研究

Experimental Study on Composite Structure Models
for Hypervelocity Impact Resistance

黎 义^{1,2}, 李建保¹, 吴远秀²

(1 清华大学材料科学与工程系, 北京 100084;

2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

LI Yi^{1,2}, LI Jian-bao¹, WU Yuan-xiu²

(1 Department of Materials Science and Technology,

Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Beijing Research Institute of Materials & Technology, Beijing 100076, China)

摘要: 根据超高速碰撞破坏原理, 对抗动能多功能复合材料的结构模型进行了试验研究, 并设计了数种结构模型。实验结果表明, 所提出的陶瓷基复合材料迎击面加固防护层、多孔复合基体缓冲层和 Kevlar/ 织物增强环氧树脂结构层等试验模型具有良好的抗超高速撞击功能。

关键词: 抗超高速冲击; 复合材料; 结构模型; 试验研究

中图分类号: V258.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 07-0003-03

Abstract: The new composite structure models for hypervelocity impact resistance were provided based on the rule of dynamic wreck damage. Several materials system including dual-wall configurations, energy absorption porous materials, fiber-reinforced ceramic matrix composites and epoxy matrix composites were experimentally investigated, the concept of structural pressure wall models with multifunctional was provided to prevent the perforation against hypervelocity impact.

Key words: hypervelocity impact; perforation-resistant composite; structure model

随着洲际弹道导弹、人造卫星、宇宙飞船、空间站的发展和宇航员太空作业等空间计划的迅速发展, 对空间飞行器和宇航员可能遇到流星体陨石或空间碎片的危害及其防护措施的研究引起了人们极大的关心和兴趣。

国外发展了一种分隔式 (stand-off) 多层壳体的屏蔽技术, 其基本概念是高速弹丸与屏蔽壳体碰撞时, 弹丸被粉碎、熔化、汽化、形成“碎片云团”。碎片云团在主壳体前的空腹中运动时, 不断膨胀扩大, 当与主壳体撞击时, 其碰撞面积要比陨石 (弹丸) 直接撞击时的面积大得多, 故大大地降低了作用于主壳体单位面积上的冲量, 这种屏蔽技术的基本原理至今仍是空间结构防护超高速碰撞破坏的最佳方案^[1-4]。本研究在分隔式双层壳体结构的模式下建立了以整体织物增强复合材料及多孔夹层板复合材料为主体的抗动能多功能复合材料主壳体结构模型。

1 实验

1.1 材料模型和试验条件

抗动能结构模型分为屏蔽层、空腔、迎击面、缓冲层与结构层, 如图 1 所示。实验用复合材料模型的基本结构组成如表 1 所示。

进行了电子束、一级、二级轻气炮和超高速实弹撞击等验证实验, 其中超高速实弹撞击实验与实际环境相接近。

超高速实弹撞击实验: 弹丸为 ϕ mm 铝球; 弹速为 4 ~ 8km/s; 空腔距离为 30mm。

2.2 实验过程

实验过程是在口径为 14mm 的二级轻气炮上进行的。主要过程是在第二级用火药推动压缩管中的活塞运动, 压缩预先充入的轻气, 在高压室内形成第二级所需的高温高压推进气体。

当应力上升到一定释放值时, 位于发射管始端的膜片破裂, 推进气体进入发射管并推动弹丸加速运动, 至炮口处达到所需的速度。速度的调节主要是改变初始装填条件, 通常是改变装药量的大小和压缩管

中的充气应力。实验是在真空状态下进行，每次实验时，炮管内真空度为- 0.1MPa。

表 1 抗动能复合材料模型的基本结构组成

Table 1 Constitute of the perforation-resistant multi-wall system

编号	迎击面	缓冲层	结构层	平均密度/ (g · cm ⁻³)	备注
01	2DC/ SiC 陶瓷	多孔 C	4Dkevlar/ E	1.52	多层软 粘结结构
02	4DT i/ SiC 陶瓷	4DC/ 多孔 SiC	4DC/ E	1.665	多层软 粘结结构
03	4DT i/ SiC 陶瓷	4DC/ 多孔 SiC	4Dkevlar/ E	1.597	多层软 粘结结构
04	3DC/ SiC 陶瓷				整体
05	4Dkevlar/ E				整体

屏蔽板材料为 1.5mm LY12 铝，复合材料厚度为 15mm

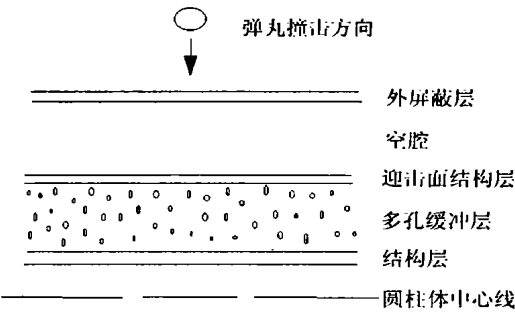


图 1 分立式多层圆柱壳体结构
Fig. 1 Normal high speed impact of a generic stand-off structure

2 结果与讨论

2.1 实验结果

对抗动能复合材料结构模型进行了各种条件下的碰撞实验，当不采用屏蔽板，复合材料作为单层靶直接撞击，在弹速 1km/s 左右时靶板被贯穿，如图 2 所示，如果在复合材料前面加一层薄铝板，做成双层靶，在弹速 7km/s 左右无贯穿性破坏，如图 3 所示，双层靶具有良好的抗超高速撞击性能，是一种有效的防护结构，一些典型实验结果见表 2。

2.2 碰撞破坏过程与结构模型分析

从对分立式的超高速撞击实验来看，其物理过程十分复杂，但从宏观上基本可视为如下物理过程，首先弹丸与屏蔽板的撞击可分为几个过程：

- (1) 直径为 d_p 的弹丸以速度 V_P 首先接触到厚度为 t_{b1} 的屏蔽板；
- (2) 屏蔽层上的压力使弹丸第一次减速，屏蔽板材料与弹丸材料以相同的速度迁移，形成了组合质量团，其内能以不断增加的压力和温度形式存在并达到峰值；
- (3) 组合质量团内的内能转化成粒子破碎和碎片膨胀辐射的能量，这便形成了一个不断膨胀的球形碎片云团，称为一次碎片云团，其质心运动速度为 V_{C1} 。
- (4) 一次碎片云团撞击壳体迎击面，迎击面上的压力使碎片云团第二次减速；
- (5) 当碎片云团的能量足够大时，迎击面被击穿，形成二次碎片云团；

表 2 高速撞击实验结果

Table 2 Summary of pressure wall damage
 $d_p = 5.4\text{mm}$, $t_{b1} = 1.5\text{mm}$, $s_1 = 30\text{mm}$

试样编号	弹速/ (km · s ⁻¹)	样品破坏情况	备注
05	1.17	弹孔贯穿，无剥离，弹孔小，正面弹孔 12.1mm × 9.5mm，背面 10.2mm × 14.5mm	单层靶
04	3.8	弹孔贯穿，正面孔径 31mm × 35mm，背面 33mm × 26mm，纤维拔出，有剥离	单层靶
03	7.4	未贯穿，正面有 $\phi 80\text{mm}$ 环形圈破坏范围，背面略有凸起，未开裂	双层靶
02	7.2	未贯穿，正面有 $\phi 8\text{mm}$ 环形圈破坏范围，背面略有凸起，未开裂	双层靶
01	1.14	弹孔贯穿，整靶分成两层，正面弹孔 15mm × 24mm，背面 13mm × 20mm	单层靶

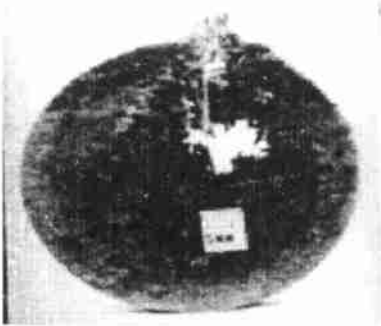


图 2 04# 单层靶撞击后形貌
Fig. 2 Image of damage on single-wall (No.04)

- (6) 二次碎片云团喷向缓冲层，缓冲层的减压卸载功能使碎片云团再次减速，能量大幅降低；
- (7) 被减速的二次碎片云团撞击向结构层；

(8) 当二次碎片云团的能量足够低时, 结构层可得到保护, 否则将被击穿。

从材料的碰撞破坏过程来看, 超高速撞击可分为两种主要类型:

(1) 较“粗大”颗粒的撞击; (2) 类似于薄飞片的碎片云团的撞击。

主壳体的伤害在很大程度上取决于碎片云团中那些较“粗大”的碎片的冲击, 这些碎片在结构层表面产生一系列较大的弹坑, 也有可能使结构层开裂和层裂, 采用迎击面板可有效破碎一次碎片云团中较“粗大”的颗粒, 使得高能量的点动能向较低能量的面动能转化。二次碎片云团的撞击类似于薄飞片的撞击, 具有高能量冲击波的破坏特性。设置缓冲层的目的是用来吸收碎片云团作用在结构层上的冲击能量, 防止结构层的层裂和减少其变形。本模型主要靠多孔材料的压实热能来提高材料的加固性能, 这是因为在冲击波压缩过程中, 无论是压到同一应力, 或是压到相同的比容, 多孔材料的热能增加总是比密实材料的多。由于多孔材料具有这种以热的形式表现出来的吸收冲击波能量的性质, 所以它具有良好的减弱冲击波的作用。W. Herrmann 及 M. Mcarroll 等人用 P - α 模型的三相物态方程函数来描述多孔材料的吸能能力^[5]。

$$P = f(\alpha, \rho, E) / \alpha$$

式中: P 为应力; ρ 为多孔材料的密度;

E 为单位质量的内能; α 为多孔度。

从上式中可看出, 增加材料体系的多孔度 α , 有利于降低作用于主壳体上的脉冲压力 P 。当碎片云团以较低的比冲量 I (或速度) 作用于多孔材料时, 脉冲

冲载荷。这种理论已得到不少的实验验证, 例如: 当使用电子束或激光束对材料进行脉冲加热模拟实验时, 材料表面的薄层区域几乎是在恒容下被加热的。该薄层区的最外层呈气相, 内层呈液相, 再往里面是高温固相材料。对于多孔材料来说, 在脉冲加热的极短时间内, 气相开始迅速膨胀填充了原来的孔隙, 而液体中的孔隙却未能立即消失, 成为“多孔液体”, 这就形成了液相区的压力“零效应”。

薄飞片的撞击是可以抵挡的, 只要选用合理不同多孔度的多孔材料, 就能有效地吸收冲击波能量, 明显降低冲击波峰压, 防止结构内层的破坏, 但在碰撞过程中, 多孔材料层总是被压得粉碎或飞落, 图 4、图 5 是 03[#] 模型撞击实验后的断面与微观结构形貌。

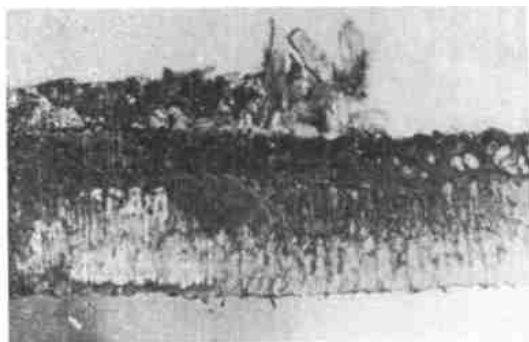


图 4 03[#] 模型撞击后的横断面

Fig. 4 Section view of panel No. 03

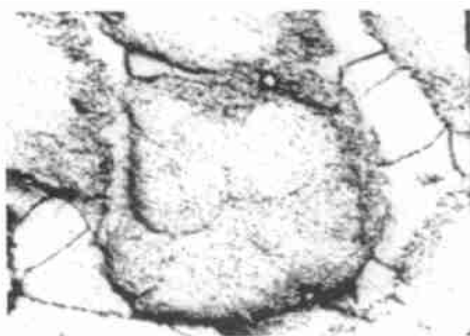


图 5 02[#] 模型撞击后的微观形貌

Fig. 5 Microview of panel No. 02

3 结论

陶瓷基复合材料迎击面防护层、多孔碳化硅缓冲层和 Kevlar 织物增强环氧树脂结构层等模型具有良好的抗动能破坏功能; 当 ϕ_{mm} 铝弹丸以 7km/s 的高速碰撞在总体厚度为 16mm , 平均密度为 1.6g/cm^3 的该类复合材料上时, 结构层未被贯穿, 并保持结构的完整性。

(下转第 11 页)

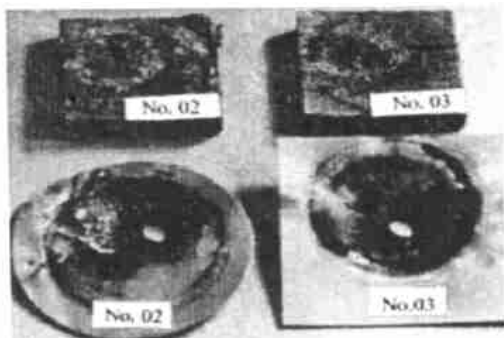


图 3 02[#]、03[#] 双层靶撞击后形貌

Fig. 3 Images of damage on Panel No. 02, No. 03

能量不足以使多孔体熔化, 这时主要靠多孔体的压实热能来提高材料的加固性能。当碎片云团作用在主壳体上的比冲量 I 进一步提高时, 冲击波作用后的沉积能量足以致使材料的局部熔化或全部熔化, 多孔体的表面熔化使其更有利于衰减超高速冲击所引起的脉

TiCu₃+ Al₂O₃ 发生了 B 和 Ti 的原位反应生成了 TiB₂, 有关 Cu (Ti, B) 和 TiCu₃ 生成 TiB₂ 的机理资料^[6] 已经进行了较深入的研究。

3.3 (TiB₂+ Al₂O₃) / Cu 性能分析

从图 6 的元素的面分析结果, 可以看出试验所得到的 (TiB₂+ Al₂O₃) 增强铜基复合材料晶粒细小, Al₂O₃ 颗粒与 TiB₂ 颗粒相互之间呈弥散分布, 没有偏聚产生。由于此时的增强相是原位生成的, 与基体之间的结合较好, 从断口形貌 (图 7) 可以看出, 断裂的韧窝处有撕裂棱存在, 就说明了这点。

正是由于增强相 (TiB₂+ Al₂O₃) 具有较高的弹性模量, 较高的熔点以及较高的硬度和强度, 并且增强相与颗粒之间结合较好, 它能阻碍塑性变形时位错的移动, 因而提高了复合材料的硬度, 它还能阻碍高温时复合材料的再结晶, 提高其软化温度, 使 (TiB₂+ Al₂O₃) 增强铜基复合材料具有较好的性能。

4 结论

(1) Cu-Al-TiO₂-B₂O₃ 体系的粉末通过机械合金化可以形成 Cu (Ti, B) 及 Al₂O₃ 和少量的 TiCu₃ 粉末。Al₂O₃ 是通过机械合金化过程中的自维持反应形成的。

(2) Al₂O₃ 的形成分为两步: 首先, 在孕育期内, Cu (Al) 或 Al (Cu) 与 TiO₂ 或 B₂O₃ 形成复合颗粒, 在界面处, 它们在某种程度上已结合成为 Cu (Al) (TiO₂) 或 Cu (Al) (B₂O₃); 其次, 界面处的过渡态 Cu (Al) (TiO₂) 或 Cu (Al) (B₂O₃) 受到球磨产生的热量激发, 生成了 Cu (Ti) (Al₂O₃) 或 Cu (B) (Al₂O₃), 放出大量的热量, 点燃自维持反应。

(3) 采用 TiO₂ 或 B₂O₃ 和 Cu, Al 作为原料, 在机械合金化和加压烧结的工艺下, 可以制备性能较好的 (TiB₂+ Al₂O₃) 增强铜基复合材料。

参考文献

- [1] A Chrysanthou, G Erbaccio. Production of copper-matrix composites by in situ processing [J]. Journal of Materials Sciences, 1995, 30 (24): 6339—6344.
- [2] C Biselli, D G Morris and N Randall. Mechanical alloying of high-strength copper alloys containing TiB₂ and Al₂O₃ dispersed particles [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 30 (10): 1327—1332.
- [3] E Yuasa, T Morooka, R Laag, W A Kaysser and G Petzow. Microstructural change of Cu-Ti-B powders during mechanical alloying [J]. Powder Metallurgy, 1992, 120—124.
- [4] Z Y Ma, S C Tjong. High temperature creep behavior of in-situ TiB₂ particulate reinforced copper-based composite [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A284 (1—2): 70—76.
- [5] 胡文彬. Al/TiO₂ (+ C) 自蔓延高温合成反应的研究 [D]. 长

沙: 中南工业大学博士学位论文, 1994.

- [6] 董仕节, 雷永平, 史耀武. 原位生成 TiB₂/Cu 复合材料的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34 (5): 69—74.
- [7] J Eckert, L Schulz and E Hellerstern. Glass-forming rang in mechanically alloyed Ni-Zr and the influence of the milling intensity [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 64 (6): 3224—3228.
- [8] 董仕节. 点焊电极用 TiB₂ 增强铜基复合材料的研究 [D]. 西安交通大学博士学位论文, 1999, 5.
- [9] 商宝禄, 季玮. 冶金过程原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1986. 235—257.
- [10] 廖为鑫, 解子章. 粉末冶金过程热力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 205—229.
- [11] E Ma, J Pagan and G Cranford. Evidence for self-sustained molten formation during room-temperature high-energy ball milling of elemental powders [J]. Journal of Materials Research, 1996, 8 (8): 1836—1844.
- [12] G B Schaffer and P G McCormick. Anomalous combustion effects during mechanical alloying [J]. Metallurgical Transactions, 1991, 22A (12): 3019—3024.
- [13] R Chulz, M Trudeau, J Y Huat. Interdiffusion during the formation of amorphous alloys by mechanical alloying [J]. Physical Review Letters, 1989, 62 (24): 2849—3228.
- [14] L L , M O Lai. Mechanical alloying [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [15] J B Holt, D D Kingman and G M Bianchini. Kinetics of the combustion synthesis of TiB₂ [J]. Materials Science and Engineering, 1995, 71: 321—327.

收稿日期: 2001-08-23; 修订日期: 2002-04-10

作者简介: 董仕节 (1965—), 男, 博士, 副教授, 从事材料科学及材料加工专业, 联系地址: 湖北省十堰市湖北汽车工业学院 (442002)。

* * * * *

(上接第 5 页)

参考文献

- [1] Whipple FL. Meteorites and space travel [J]. Astronomical, Journal 1947, 52: 137.
- [2] W P Schonberg. Protecting spacecraft against orbital debris impact damage using composite materials [J]. Composites 2000, A31: 869—878.
- [3] Lawrence, R J A. Simple model for the optimization of stand-off hypervelocity particle shields [J]. Int J Impact Eng, 1987, 5: 451—561.
- [4] Schonberg WP, Walker EJ. Use of composites in multi-wall structures to prevent perforation by hypervelocity projectiles [J]. Composite Structures, 1991, 19: 15—40.
- [5] Corroll M M Hott A C. Three phase State Equation for Pressure and porosity model [J]. J Appl Phys, 1972, 43: 1626.

收稿日期: 2001-08-07; 修订日期: 2002-05-10

作者简介: 黎义 (1960—), 博士, 研究员, 从事航天功能复合材料技术的研究, 联系地址: 北京 9200 信箱 73 分箱 (100076)。