

文章编号: 1000-324X(2008)02-0219-04

冲击损伤对 C/C 复合材料烧蚀性能的影响

李淑萍¹, 李克智¹, 李玉龙², 袁秦鲁², 郭领军¹, 和永岗¹

(西北工业大学 1. 材料学院; 2. 航空学院, 西安 710072)

摘要: 利用 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 装置, 对炭化钨含量为 2wt% 的 C/C 复合材料进行了载荷峰值为 137MPa 的动态冲击损伤, 采用氧乙炔烧蚀装置研究了冲击损伤对 C/C 复合材料烧蚀性能的影响, 并结合扫描电镜讨论了冲击损伤对样品烧蚀机理的影响. 研究表明: 与未受冲击的 C/C 复合材料相比, 冲击损伤后, 复合材料的质量烧蚀率增加了 40%, 线烧蚀率增加了 118%.

关键词: C/C 复合材料; SHPB; 冲击损伤; 烧蚀特性

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Effect of Impact Damage on Ablative Performances of the Carbon/Carbon Composites

LI Shu-Ping¹, LI Ke-Zhi¹, LI Yu-Long², YUAN Qin-Lu², GUO Ling-Jun¹, HE Yong-Gang¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The carbon felt/carbon (C/C) composites with 2wt% hafnium carbide were damaged by using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) with the maximum impact loading of 137MPa or so, and the effect of dynamic impact damage on ablative properties of the C/C composites was investigated in oxyacetylene flame equipment with high velocity gas. The effect of impact damage on ablative mechanism of the composites was also discussed based on SEM observation. The results show that the linear ablation rate is increased by 118%, and the mass ablation rate is increased by 40% for the damaged C/C composites than those measured for the undamaged C/C composites.

Key words: C/C composites; SHPB; impact damage; ablative performances

1 引言

C/C 复合材料具有高的比模量、比强度以及优异的高温性能、优异的抗热震性能和抗烧蚀性能^[1], 尤其是当难熔金属 Zr、Hf、Ta 等加入到炭基体时, 其抗烧蚀性能可得到进一步的提高^[2-7], 因而 C/C 复合材料作为抗烧蚀和防热结构材料, 在航天航空领域有着极其重大的应用潜力. 当 C/C 复合材料用作航天飞机、超音速飞机的鼻锥、机翼前沿等热屏蔽材料时, 结构材料与外界物体之间发生碰撞的可能性是不可避免的^[8], 这种碰撞不仅会降低材料的力学性能、破坏结构的气动外形, 而且会

影响到材料的氧化、烧蚀行为, 因而了解这种碰撞对 C/C 复合材料烧蚀性能、形貌的影响有着重要意义. 为了解高速碰撞损伤 C/C-SiC 复合材料力学性能的影响, Srivastava 等^[9] 利用 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 作为冲击损伤工具研究了动态冲击损伤后的氧化行为对 C/C-SiC 复合材料弯曲强度的影响, 而本工作则利用 SHPB 技术研究了动态冲击损伤对含炭化钨为 2wt% 的 C/C 复合材料烧蚀性能的影响, 并对试验结果进行了初步讨论.

2 实验

收稿日期: 2007-05-12, **收到修改稿日期:** 2007-07-02

基金项目: 国家“973”资助项目(2006CB600908); 中国科协“自然科学基础性、高科技学术期刊”资助; 国家自然科学基金重大计划(90405016)

作者简介: 李淑萍(1973-), 女, 博士研究生. **通信联系人:** 李克智, 教授. E-mail: likezhi@nwpu.edu.cn

2.1 材料

所用材料为采用高压沥青浸渍-炭化工艺制备的含炭化钨为 2wt% 的整体炭毡增强的 C/C 复合材料, 其密度为 1.85g/cm^3 . 按标准要求, 烧蚀试验的试样尺寸为 $\phi 30\text{mm} \times 10\text{mm}$.

2.2 冲击预损伤

待烧蚀试样的冲击损伤利用压杆直径为 $\phi 12.7\text{mm}$ 的 SHPB 装置^[10]进行, 冲击损伤时将试样夹持在透射杆和入射杆之间, 使试样的轴心线与压杆的轴心线保持共线, 利用气压驱动子弹撞入射杆后所产生的应力波脉冲对试样进行冲击加载, 根据一维应力波理论, 试样所承受的冲击载荷响应可按式(1)进行计算:

$$\sigma_s = E\varepsilon_T(t) \quad (1)$$

式中 E 为高强钢压杆的弹性模量, $\varepsilon_T(t)$ 为透射杆上应变片所采集到的由透射波产生的应变信号.

2.3 复合材料的烧蚀性能测试及结构表征

按标准采用氧乙炔烧蚀装置对复合材料样品进行烧蚀试验. 烧蚀条件如下: 乙炔压力为 0.095MPa , 流量为 $1.116\text{m}^3/\text{h}$; 氧气压力为 0.4MPa , 流量为 $1.512\text{m}^3/\text{h}$; 氧乙炔枪口到试样烧蚀表面中心的距离为 10mm . 烧蚀温度为 3000°C , 烧蚀时间为 30s .

利用扫描电镜对损伤样品和未预损伤样品进行烧蚀形貌观察, 以了解冲击损伤对复合材料烧蚀行为的影响.

3 结果和讨论

3.1 冲击载荷响应

典型的 SHPB 压杆上应变片采集到的 C/C 复合材料冲击预损伤处理结果如图 1 所示: 其中入射波表示试样所受到的冲击应力脉冲, 透射波幅值则反映了该冲击应力脉冲在试样中产生的冲击应力的, 由于样品的直径大于冲击损伤试验所用 SHPB 压杆的直径, 故图 1 中的反射波并不能真实的反映试样在该冲击载荷下所发生的应变响应, 同时图 1 中的反射波在达到峰值以后的连续下降显然预示着材料在该冲击应力脉冲的作用下并没有发生宏观意义上的压缩破坏, 只是发生了一定程度的损伤. 根据公式 (1), 三个复合材料试样在冲击过程中的应力响应如图 2 所示: 在经历了大约 $50\mu\text{s}$ 后, 复合材料中的应力由零增加到峰值载荷 137MPa 左右, 且三个试样的冲击损伤应力峰值有较好的一致性. 与采用坠落装置进行的冲击实验相比^[11,12], SHPB 装置产生的冲击响应, 其响应时间要低一个数量级, 故采用 SHPB 装置对材料进行冲击加载能

更好地反映较高速物体碰撞对复合材料所造成的冲击损伤.

C/C 复合材料的微观结构特征在于其内部存在大量的微裂纹和孔洞, 这些微裂纹和孔洞一方面增强了复合材料在冲击过程中贮存弹性应变能的能力, 使得冲击载荷对复合材料所做的功大部分被转化为弹性应变能贮存在材料中, 改善了复合材料的抗冲击能力, 表现为冲击后复合材料的表面并没有出现明显的主裂纹; 同时, 微裂纹和孔洞的存在也会在复合材料中造成局部应力集中, 由于应力集中, 复合材料中取向不利的原有裂纹会进一步扩展或在某些薄弱区域 (如界面) 处产生新的裂纹, 使得部分冲击载荷所做的功转化为微裂纹的扩展与形成所需的永久变形耗散能. 冲击损伤前后复合材料表面的微裂纹如图 3 所示, 冲击损伤前复合材料 (图 3(a)) 的表面几乎观察不到微裂纹的存在, 而冲击损伤后, 由于微裂纹的扩展与形成, 在复合材料 (图 3(b)) 表面损伤区域的一些位置可观察到微裂纹.

3.2 烧蚀性能

表 1 是 C/C 复合材料的烧蚀试验结果: 未受

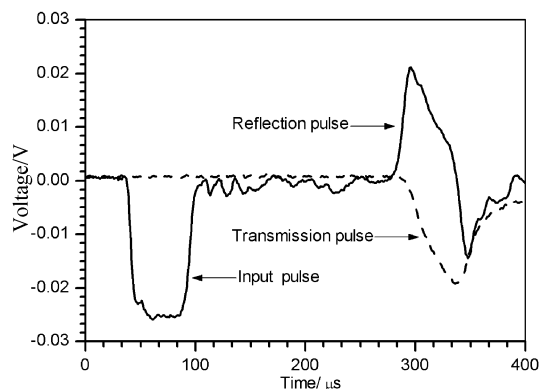


图 1 典型 C/C 复合材料的 SHPB 冲击损伤响应

Fig. 1 Typical response of impact damage made by SHPB of C/C composites sample

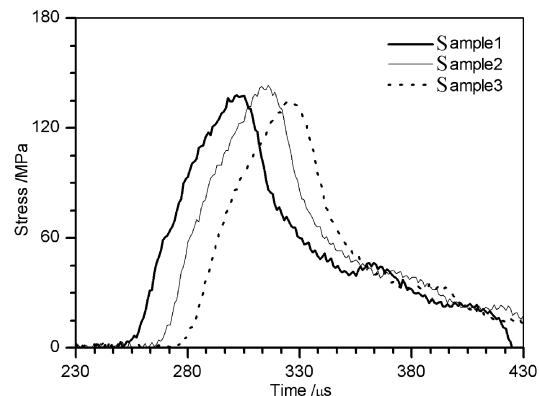


图 2 C/C 复合材料的冲击响应过程

Fig. 2 Response of impact of C/C composites

冲击损伤的 C/C 复合材料在经历 30s 的烧蚀后, 其三个试样的平均线烧蚀率为 0.0007mm/s, 平均质量烧蚀率为 0.00078g/s; 冲击损伤后, C/C 复合材料三个试样的平均线烧蚀率为 0.00153mm/s, 平均质量烧蚀率为 0.00107g/s. 与未受冲击损伤的材料相比, C/C 复合材料在冲击损伤后其平均线烧蚀率增加了约 118%, 质量烧蚀率增加了约 40%.

未受冲击损伤 C/C 复合材料烧蚀驻点组织形貌如图 4(a) 所示, 从图中可以看出, C/C 复合材料在烧蚀后其表面出现了河流状的烧蚀花样、烧蚀

沟槽、烧蚀裂纹, 由于高速热气流对表面基体炭的冲刷烧蚀, 纤维束的脉络骨架清晰可见. 预损伤复合材料烧蚀后, 其表面烧蚀驻点的组织形貌如图 4(b) 所示, 与未受冲击损伤的复合材料 (图 4(a)) 相比, 其烧蚀后的表面显得更加粗糙不平, 表面存在着更加明显的烧蚀斑点、烧蚀沟槽、烧蚀裂纹, 且其深度亦增大.

C/C 复合材料表面露头纤维束的烧蚀形貌如图 5 所示, 碳纤维与基体界面处烧蚀的程度较严重, 碳纤维的周围存在着明显的环状沟槽, 表明复合材料最易受烧蚀的地方是纤维与周围基体的界面, 其次才是碳纤维和沥青碳. 未受冲击的复合材料 (图 5(a)) 在烧蚀后, 其纤维的头部是平的, 而受到冲击损伤的复合材料 (图 5(b)) 在烧蚀后, 其碳纤维的头部是尖的, 类似与针状, 且碳纤维周围的环状烧蚀沟槽比未受冲击复合材料的要大且深, 这表明冲击损伤使得碳纤维与基体的界面更易于被烧蚀. 这主要是由于冲击损伤时, 由于碳纤维与基体炭弹性模量的失配, 纤维与基体的界面在受到冲击载荷时会产生微裂纹以释放应力集中, 这种微裂纹的出现不仅加速了界面处的烧蚀, 而且弱化了基体炭对碳纤维的保护, 从而加剧了碳纤维的烧蚀, 使碳纤维烧蚀后的头部表现为针状.

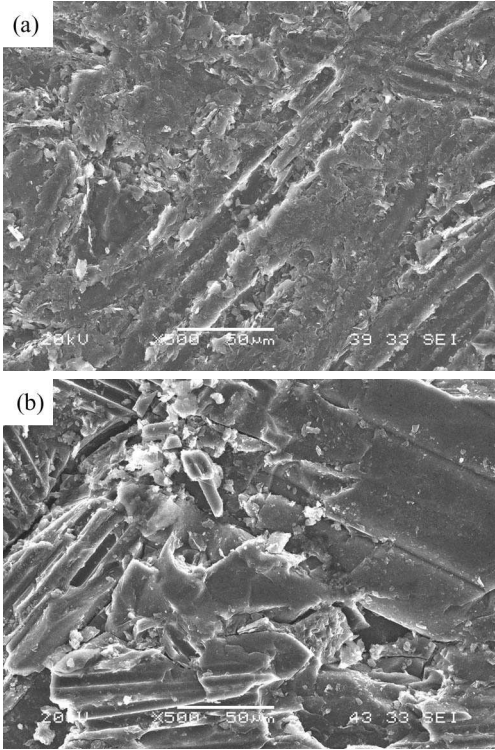


图 3 冲击损伤对复合材料表面形貌影响的 SEM 照片
Fig. 3 Effect of impact damage on C/C composites sample surface feature
(a) Undamaged composites sample; (b) Damaged composites sample

表 1 烧蚀试验结果				
Table 1 Ablation testing results				
Sample	Linear ablation rates/mm·s ⁻¹	Average	Mass ablation rates/g·s ⁻¹	Average
1*	0.001		0.00079	
2*	0.0013	0.00153	0.00142	0.00107
3*	0.002		0.001	
1	0.00067		0.00078	
2	0.00033	0.0007	0.0007	0.00078
3	0.0017		0.00086	

* Denoted the damaged composites sample

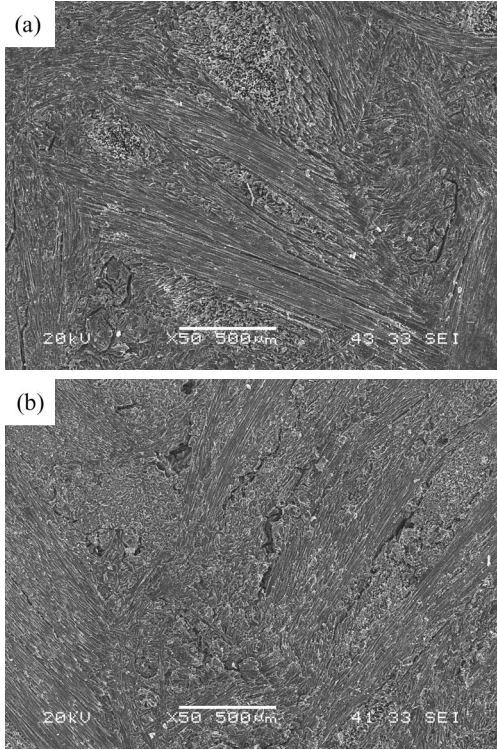


图 4 C/C 复合材料表面烧蚀的 SEM 形貌
Fig. 4 SEM photographs of the surface of the C/C composites sample after ablation for 30s
(a) Undamaged composites sample; (b) Damaged composites sample

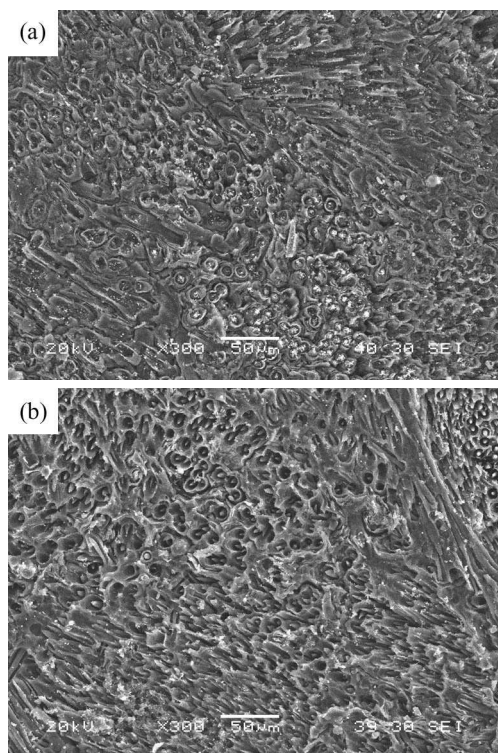


图 5 C/C 复合材料表面纤维烧蚀的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM photographs of the surface fibers of C/C composites sample after ablation for 30s

(a) Undamaged composites sample; (b) Damaged composites sample

将试样垂直于烧蚀表面剖开, 冲击损伤对烧蚀次表面的影响如图 6 所示, 与未受冲击损伤的复合材料 (图 6(a)) 相比, 受到冲击损伤的复合材料 (图 6(b)) 的次烧蚀表面组织显得更加疏松. C/C 复合材料的压缩试验表明, 该复合材料的压缩强度在 140 MPa 左右, 137MPa 的冲击载荷已接近其压缩强度, 故该冲击载荷在复合材料内部必然会造成一些不可恢复的损伤, 与碳纤维相比, 基体炭的破坏应变更小, 故这种损伤主要以基体裂纹的形式存在. 当复合材料受到烧蚀时, 这些裂纹为氧气和热量从材料表面向内部扩散提供了通道, 增大了复合材料和氧气的接触面积, 加快了复合材料内部的烧蚀, 从而在材料的内部造成更加疏松多孔的组织.

4 结论

采用沥青浸渍 - 炭化工艺制备的含炭化钨为 2wt% 的 C/C 复合材料有较好的抗烧蚀性能, 按标准, 采用氧乙炔烧蚀 30s 后, 其线烧蚀率为 0.0007mm/s, 质量烧蚀率为 0.00078g/s. 当 C/C 复合材料受到峰值为 137MPa 的冲击载荷后, 以微裂纹形式存在的冲击损伤加速了复合材料的表面剥蚀, 为氧气和热量从材料表面向内部扩散提供了通

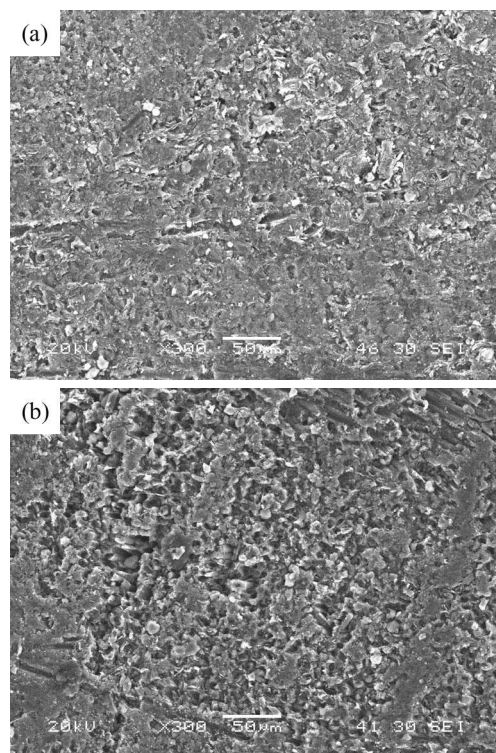


图 6 烧蚀后复合材料横断面的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM photographs of transection of the C/C composites after ablation for 30s

(a) Undamaged composites sample; (b) Damaged composites sample

道, 使得与未受冲击的复合材料相比, 损伤后, C/C 复合材料的线烧蚀率增加了 118%, 质量烧蚀率增加了 40%.

参考文献

- [1] Fitzer E. *Carbon*, 1987, **25** (2): 163-190.
- [2] 崔红, 苏君明, 李瑞珍, 等. 西北工业大学学报, 2000, **18** (4): 669-674.
- [3] 何捍卫, 周科朝, 熊翔. 稀有金属材料与工程, 2004, **33** (5): 490-494.
- [4] 苏君明. 新型炭材料, 1996, **11** (4): 18-24.
- [5] Tong Qingfeng, Shi Jingli, Song Yongdong, *et al.* *Carbon*, 2004, **42** (12): 2495-2500.
- [6] 李翠艳, 李克智, 欧阳海波, 等. 稀有金属材料与工程, 2006, **35** (2): 365-369.
- [7] 相华, 徐永东, 张立同, 等 (XIANG Hua, *et al.*). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2006, **21** (4): 893-898.
- [8] Keisuke Fujii, Eiichi Yasuda, Takashi Akatsu, *et al.* *Int. J. Impact. Eng.*, 2003, **28** (9): 985-999.
- [9] Srivastava V K, Maile K, Bothe K, *et al.* *Mater. Sci. Eng. A*, 1999, **A271** (1): 38-42.
- [10] 李玉龙, 郭伟国, 徐绯, 等. 爆炸与冲击, 2006, **26** (5): 385-395.
- [11] 郑海燕, 刘元镛, 郭伟国. 航空材料学报, 2002, **22** (3): 33-38.
- [12] 魏俊, 赵建华, 梁越明. 宇航学报, 1999, **20** (1): 92-98.