



庆祝北京航空航天大学建校四十周年

优秀学术论文集

(1952~1992)

北京航空航天大学科研处

1992. 10



祝 贺
北航校庆40周年

为了发展经济，消费不能超前。但，
为了发展经济，教育必须超前。
教育与科研紧密相联，为了社会发展，
在思想上必须与时俱进勇于创新；
在行动上必须与时俱进力求创新。
只有创新才能发展，
只有创新才能前进，
只有创新，社会主义的中国才能
全面跃居世界先进水平，成为
引导世界劳动人民航向
共产主义理想目标的灯塔。

武光 1992年10月1日



百丰樹人
桃李續紛

祝賀北航建校四十年

沈元





为木银耕耘四十年
桃李弥苑遍兰蕙友
银乌穿梭新主
絮今新更好看

李调望以高为校在甲午年

王大昌





艱苦樸素

勤奮好學

全面發展

勇于創新

慶祝北航建校40周年
愿优良校風永存

曹保鈞

1992.9.



北航四十周年校庆

发扬传统
坚持改革
培育英才
攀登高峰

沈吉团

前 言

北航四十年历史的进程中，有一个好的传统，就是十分重视开展科学研究工作。从科研中汲取营养来丰富教师的知识，以提高教学水平和培养学生的质量。在北航创建的初期，学校的领导和有着大学教学经验的教师们，从古今中外高等学府对社会的功能中知道，一个大学不只是知识的传授课堂，还应是知识的发源场地。正如邓小平同志所讲的“既是教学中心，又是科研中心”。

在北航校训：“艰苦朴素、勤奋好学、全面发展、勇于创新”中，最后四个字就是要勉励学生努力超越前人、高于前人，只有靠科学的探索和创造才能攀登新的高度。要求学生具有科研的初步训练，而教师就应首先具备这方面的能力。50年代，当北航的各专业建立起来，教学各环节已初步掌握（应该说，还没有完全熟练掌握），校领导就号召开展科研工作。首先是与各专业有密切联系的工程设计制造性的新型号研制任务，因此有了1958年三个型号的上天。这些给予教师和高年级学生极其有益的锻炼，对于教师业务水平的提高和毕业生工作能力的训练起了很大作用。此后，为了赶超世界先进水平，更向与航空航天有关的各个领域的深度和广度进军。甚至在十年灾难期间，在极其困难的环境中，仍有千余教职工奋力于高空无人驾驶飞行器的研制，给部队的建设作出了贡献。

以经济建设为中心和改革开放的好政策带来了科学的春天。尤其是近年来，中央领导强调提出的“科技是第一生产力”，鼓舞了广大师生，也提供了较前有所好转的条件和机遇。北航的科研工作有了长足的进展，从技术开发到工程设计研制，以及应用性的基础研究，全面

开花，取得硕果累累。学校对国家科技发展的直接贡献加大了，培养人才的水平也提高了，学校在国内外的影响和地位也在上升。

这里所收集的 70 多篇中、英文科研论文，是 80 年代末至 90 年代初的部分优秀作品（还不能说是全部），它们覆盖了北航的所有各系、各专业。把它们印刷出版，是作者们（他们中大部分是北航的毕业生，个别老教师虽非毕业于北航，但也是四十年校史的创造者）呈给四十岁母校的献礼。愿北航的教学和科研向新的高度飞跃！

曹经纶

1992 年 10 月



V
1023
1952-92

热烈庆祝
北京航空航天大学
建校四十周年
(1952 — 1992)

北京航空航天大学建校四十周年

优秀学术论文集

目 次

1. 混杂纤维复合材料的冲击特性 张佐光 宋焕成(1)
2. 微重力偏晶合金凝固特征 黄 正 赵德乾 陈熙琛(7)
3. 铝双晶晶界滑动的实验研究 周自强 武保林 陈昌麒(11)
4. 17-4PH 钢时效过程中的显微组织研究 臧鑫士(18)
5. 用自动冲击机研究 300M 钢韧脆转变 唐振廷 温旭君(24)
6. 星载合成孔径雷达成像处理 李春升 李景文 周荫清(30)
7. 一种新型可编程全数字实时相关检测器 张 军 张其善(35)
8. 隐身目标散射特性及电磁仿真 王宝发 卢才成 苏东林 金 星(41)
9. 全渐近到达滑动模态控制方法的应用 尔联洁 戴树岭(56)
10. 电传操纵飞机起飞着陆动态特性仿真研究
..... 冯亚昌 陈 刚 李沛琼(61)
11. 航空高压稀土永磁直流电动机 朱耀忠 陶 冲(68)
12. 传感器线性度计算方法的研究 孙德辉(76)
13. 捷联惯导可靠性的均衡向量及其补偿方法
..... 以光衡 吴 备 武 玮(85)
14. 湍流的通用物理方程 高 歌(93)
15. 对于叶轮机气动弹性力学一个基本假设的讨论
..... 杨晓东 陶德平 周 盛(98)
16. 管内流体振荡强化换热的机理探讨 曹玉璋 赵令德 朱谷君(106)

17. 压气机叶栅端区流控制技术的实验研究.....
..... 彭泽琰 吴国华 严 明 任丽芸(112)
18. 压气机旋转失速的一个气动声学模型.....
..... 孙晓峰 胡宗安 冯毓诚 周 盛(120)
19. 齿轮的摇型节径振动及其减振法 晏砺堂 邱士均(126)
20. 高效油膜阻尼器的研究与开发 张世平 晏砺堂(132)
21. 加力燃油浓度场计算方法研究.....
..... 杨茂林 顾善建 徐 行 黄 勇 覃洪波(138)
22. Dryden 大气紊流模型的数字仿真技术
..... 赵震炎 肖业伦 施殷坚(149)
23. 计算三维边界层分离流动的一种双向推进有限元格式.....
..... 李椿萱 金 生(159)
24. “人·座舱·热环境”系统的数学模型 ... 袁修干 沙 斌 杨春信(168)
25. 受钉传载荷含边缘裂纹板的复变-广义变分解法
..... 崔德渝 张 行(179)
26. 计算飞行器隐身性能的临界仰角法 张 考(186)
27. 含孔边裂纹铆接加劲平板的解析变分解法.....
..... 张 行 傅东山 肖仁仕 苏开鑫(199)
28. 翼身组合体流场测量和分析 吕志咏 卢红雨 李屹东 杨芝利(207)
29. 最坏风模型及对飞机突防航迹跟踪的影响 王立新 胡兆丰(213)
30. 颤振主动抑制研究(上)——控制律的综合研究 邹丛青(221)
31. 颤振主动抑制研究(下)——控制律的实验验证 陈桂彬(227)
32. 环芯法测试残余应力 A, B 释放系数的研究 王桂芳 陈惠南(234)
33. 一个开放的逻辑系统 李 未(239)
34. 并发演算 CC 及其性质..... 李 未 王颢安(249)
35. 《信息处理用现代汉语常用词词表》的选词标准.....
..... 刘 源 梁南元 谭 强(259)
36. 特征造型及其支撑软件的研制 唐荣锡 王亚平 吴红明(269)

37. CAD/CAM 中参数 Bernstein-Bezier 三角曲面造型方法的研究…
 张 鲜 朱心雄(276)
38. 超声波振动钻削微孔的横刃入钻特性 ... 张德远 王立江 张 明(284)
39. 成形极限曲线(FLC)的新概念 陈光南 胡世光(288)
40. 软支承动平衡机微机化电测系统的研究 魏东波(295)
41. 高温合金焊接结晶裂纹研究 邹莱莲 秦占先(304)
42. 离散事件动态系统的仿真与最优化 陈智民 冯允成(309)
43. 动态平衡运量配流问题及其稳态伴随解算法 黄海军(320)
44. 机器人系统跟踪控制的一种新策略 高为炳(328)
45. 非线性系统的最小阶动态解耦 夏小华 高为炳(336)
46. 参数空间中鲁棒稳定性问题 肖 笛 程 勉 高为炳(342)
47. 机器人动力学方程的高效计算公式 施 旗 张启先(348)
48. 机器人典型平衡系统的研究 孙杏初(355)
49. 二程的人生哲理与社会的精神文明 庞万里(363)
50. 商品经济和公有制改革的根本出路 黎发源 李筱光(372)
51. 英语言语动词研究 王拯亚(376)
52. 工程系统工程及其在型号研制中的应用 阮 铤 章国栋(381)
53. BH14A 振动冲击数控系统总体方案设计 李玲珠(394)
54. 民用飞机蒙特卡罗可靠性仿真 ... 杨为民 屠庆慈 盛一兴 祝 渊(402)
55. 基于自适应多点约束逼近的二级结构优化方法研究.....
 黄 海 夏人伟(410)
56. 飞机/发动机一体化评估系统研究 汪家芸 张 津 朱一颀(417)
57. 平行航路飞机相撞危险的数学模型 李春锦 王英勋(427)
58. 高空无人驾驶飞机航向系统的改进方案——具有平滑校正的航向
 基准系统 李拯祥(434)
59. 有介质保护层的矩形微带天线的谐振阻抗、谐振频率与带宽
 刘连印(442)

混杂纤维复合材料的冲击特性

张佐光 宋焕成

(材料科学与工程系)

摘 要

本文通过 Charpy 冲击试验,对混杂纤维复合材料的冲击强度、冲击韧性指数随混杂比、界面数变化的规律以及冲击混杂效应作了研究,并且建立了冲击强度估算模型。

1 引 言

混杂纤维复合材料(简称 HFRP)具有优异的综合性能,不仅比强度、比刚度高,而且还有良好的冲击韧性^[1,2]。本文采用玻璃纤维(S-2;GF)、芳族聚酰胺纤维(Kevlar-49;KF)与碳纤维(T-300;CF)混杂,分别增强 648# 树脂基体(LER: $\epsilon_{\max}=0.78\%$)和 6828# 树脂基体(HER: $\epsilon_{\max}=1.23\%$),制作单向混杂复合材料层压板(见表 1),进行仪器化 Charpy 冲击试验,并通过实验所得的载荷-形变曲线,对冲击韧性指数、冲击强度以及混杂效应进行了研究。

表 1 混杂复合材料层压板参数*

LER-C/G,C/K			HER-C/K			
试样号	铺层形式	$V_{CF}(\%)$	试样号	铺层形式	$V_{CF}(\%)$	界面数
GFRP	(G ₁₆) _s	0	KFRP	(K ₁₆) _s	0	0
C-1	(CG ₁₅) _s	3.4	C-1	(CK ₁₅) _s	3.8	2
C-2	(C ₃ G ₁₃) _s	10.9	C-2	(C ₃ K ₁₃) _s	11.9	2
C-3	(C ₅ G ₁₁) _s	19.4	C-3	(C ₅ K ₁₁) _s	21.0	2
C-4	(C ₇ G ₉) _s	40.5	C-4	(C ₇ K ₉) _s	31.0	2
C-5	(C ₉ G ₇) _s	29.2	C-5	(C ₉ K ₇) _s	43.0	2
C-7	(C ₁₃ G ₃) _s	69.6	C-7	(C ₁₃ K ₃) _s	72.0	2
CFRP	(C ₁₆) _s	100.0	CRFP	(C ₁₆) _s	100.0	2
C-7	(C ₁₃ K ₃) _s	72.0	B-1	(C ₃ K ₄ C ₄ K ₃) _s	31.0	6
C-5	(C ₉ K ₇) _s	43.0	B-2	(C ₃ K ₃ C ₃ K ₃ C ₃ K ₃) _s	31.0	10
C-4	(C ₇ K ₉) _s	31.0	B-3	(C ₃ K ₃ C ₃ K ₂ CKCK ₃) _s	31.0	14
C-3	(C ₅ K ₁₁) _s	21.0	B-4	(C ₃ K ₂ CKCK ₂ CKCK ₃) _s	31.0	18
C-2	(C ₃ K ₁₃) _s	11.9	B-6	[(CK) ₄ CK ₃] _s	31.0	26
C-1	(CK ₁₅) _s	3.8				
KFRP	(K ₁₆) _s	0				

* $V_F=58\sim 63\%$

2 实验结果与讨论

2.1 冲击载荷-形变曲线的特征

图 1 给出了几种 HFRP 的 Charpy 冲击载荷-形变曲线。由该图可以看出:

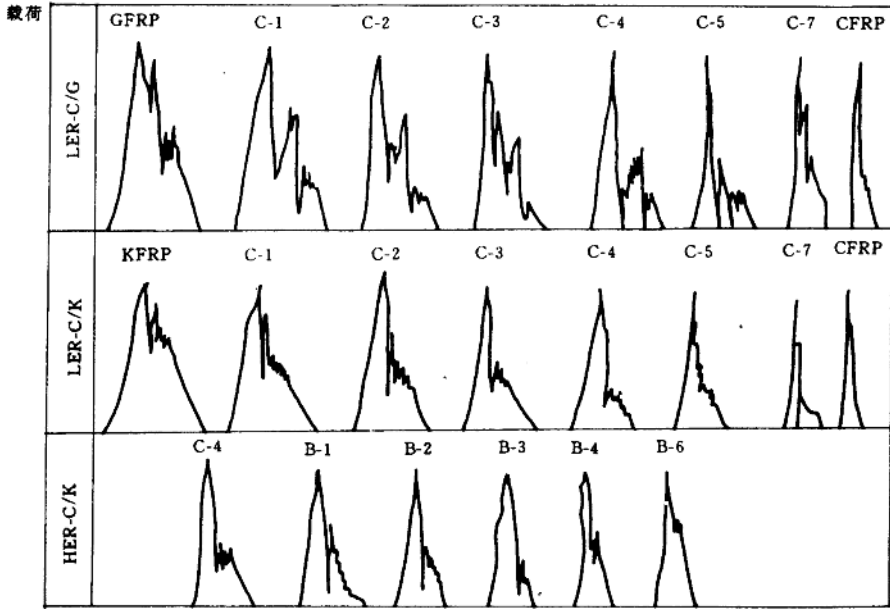


图 1 Charpy 冲击载荷-形变曲线

(1) 纤维类型不同,冲击峰数各异。C/G-HFRP 呈明显的三级破坏,每一条载荷-形变曲线上均出现一个主峰,二个次峰。C/K-HFRP 则不同,除主峰明显外,只有一个不明显的次峰,基本上属二级破坏。CFRP 则是一个尖单峰,为明显的一级破坏。由于纤维在复合材料中是主要的承载者,因而它的种类不同,材料必然反映出冲击行为是不同的。

(2) 冲击峰形随混杂比不同而变化。随着碳纤维相对体积含量(V_{CF})的增加,冲击形变减小,冲击峰变窄。混杂比直接影响峰的面积。

(3) 次峰随界面数增加而消失。界面数(指两种纤维的接触面积)不同,就是铺层形式不同。在恒定混杂比的情况下,冲击峰因界面数变化而变化。界面数由少到多,次峰逐渐消失。因为界面数多,两种纤维间相互制约的能力增强,受力较均匀。

(4) 峰的面积还与基体有关。LER-C/K 的冲击峰要略大于 HER-C/K,但峰形基本相似,这反映出基体与纤维间的匹配作用。

综上所述,由于峰是能量贮存和释放的结果,故峰形反映出增韧机制和破坏机制。

2.2 冲击韧性指数

反映材料冲击韧性好坏的一个常用参数是冲击韧性指数 DI 。实验中测得的 DI 示于图 2。从图 2 中发现,三种 HFRP 的 DI 有一个共同的特点:随 V_{CF} 增加而变化的趋势是一致的。 V_{CF}

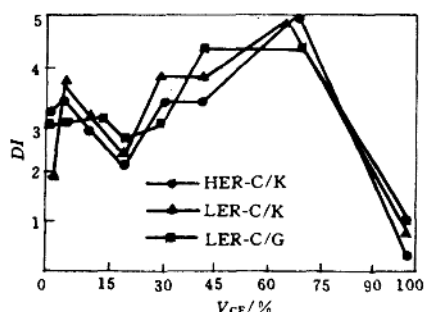


图2 DI与混杂比的关系

Mallick^[3]等人的实验结果一致。可解释为:KFRP在芯层,不仅可将外层的CFRP隔离开,以便充分发挥CFRP的刚度,同时还可以阻止表层裂纹向芯层扩展。

表2 DI与界面数的关系(HER-C/K)

试样号	C-4	B-1	B-2	B-3	B-4	B-6
界面数	2	6	10	14	18	26
DI	3.4	2.7	1.8	1.6	2.5	4.2

2.3 冲击强度

冲击强度 a_s 是指单位面积上所消耗的冲击功,也是反映材料韧性的一个指标。

(1) 纤维类型及混杂比对 a_s 的影响

图3给出几种HFRP的 a_s 与混杂比的关系。图中的点为实测值,实线为计算值。图3表明,混杂后的C/G, C/K的 a_s 值分别在GFRP, KFRP与CFRP之间,且随 V_{cf} 增加, a_s 均下降,这是减少了韧性纤维的缘故^[4]。另外,同是LER体系, C/G的 a_s 比C/K的高,这说明GF对改善CFRP的冲击韧性要优于KF。因为GF有良好的应变率敏感性,它本身远程无序的微晶结构使得在冲击载荷下能够产生较大的塑性流动^[3]。因此GFRP的 a_s 达37J/cm²,比KFRP大30%。

(2) 基体类型及界面数对 a_s 的影响

同为C/F混杂,树脂基体不同, a_s 也不相同,见图3。当 $V_{cf} < 60\%$ 时, LER-C/K的 a_s 大于HER-C/K,当 $V_{cf} > 60\%$ 时,则相反。实验结果还表明, HER-CFRP的 a_s 要比LER-CFRP的大50%,而HER-KFRP的 a_s 又要比LER-KFRP的小30%。这说明韧性较好的树脂基体,对于提高断裂应变较小的复合材料的冲击强度有明显效果,而对于断裂应变较大的复合材料效果不明显,甚至有负作用。这种现象可从纤维与树脂间的匹配上来解释。由于HER体系的断

增加, DI首先下降,而后几乎在 $V_{cf} = 21\%$ 时,出现最小值,之后又增加。不过最大值与最小值差不大。另外LER-C/K的DI略高于HER-C/K。因为LER体系的断裂应变不仅小于HER体系,而且还小于CF,材料在开始受冲的瞬间,基体先于纤维破坏,使纤维间过早地失去了“协同”作用,从而减少了弹性贮能, DI增大。

DI还与界面数有很大的关系。由表2得知,界面数为2的C-4(夹芯结构)的DI几乎要比相同混杂比的B型(层间结构)系列的大。即:层间混杂材料的DI小于夹芯混杂材料。这一结果与

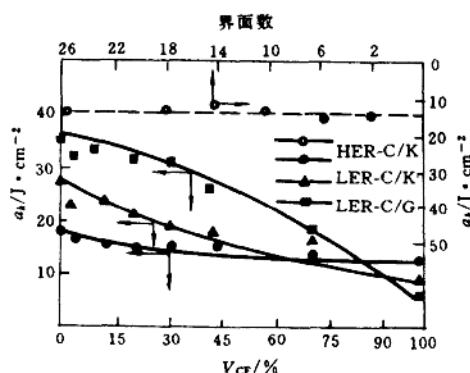


图3 几种HFRP的 a_s

裂应变与 CF 的差不多,因而在冲击力作用下,纤维与基体有良好的“协同”效应,能够充分发挥出纤维的作用,使冲击能较大;另一方面,因为 LER 体系的断裂应变远小于 CF,在 CF 达到断裂应变之前,基体早已破坏,纤维与基体不能“协同”作用,故冲击能较低。图 4 示出了异种基体的 CFRP 冲击断口的 SEM 照片。

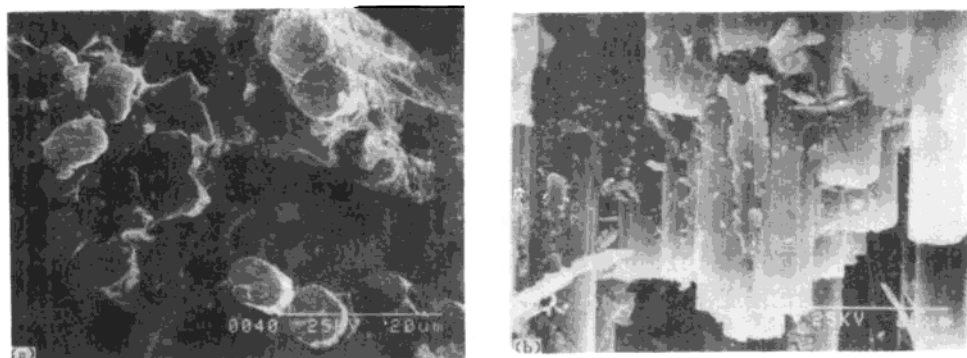


图 4 二种不同基体的 CFRP 冲击断口的 SEM 照片

(a) HER-CFRP (b) LER-CFRP

另外, a_s 几乎不随界面数变化,即不受铺层形式的影响。见图 3。

(3) a_s 的估算模型

通过对实验得到的大量冲击峰的模型化处理,可得如图 5 的三角形峰模型。图中虚线是 CFRP 冲击峰,实线是 HFRP 的冲击峰。令

$$OA = L(C) \quad OC = l_i(C) \quad CA = l_p(C)$$

$$OB = L(H_f) \quad DB = l_p(H_f) \quad OD = l_i(H_f)$$

$$\text{即} \quad L(C) = l_i(C) + l_p(C) \quad L(H_f) = l_i(H_f) + l_p(H_f)$$

再考虑到混杂效应系数,便可得到冲击强度估算式

$$a_s = \frac{k}{2} \sigma_{\max}(C) (1 + R_s) [L(C) + l_i(C) \cdot R_i + l_p(C) \cdot R_p] \quad (1)$$

式中 k 为峰形修正系数,它与基体、纤维、混杂比、界面数有关,本文当 $V_{CF} < 30\%$ 时取 $k = 1.2$,当 $V_{CF} \geq 30\%$ 时取 $k = 1.1$ 。其余符号见后文说明。应用(1)式计算得到的 a_s 也示于图 3(见图中实线)。与实测值有较好的吻合。

2.4 冲击混杂效应

混杂效应是 HFRP 的一个特殊的力学性质,通常是用一个相对的量——混杂效应系数 R 来描述其大小。不同的定义, R 有不同的值。

(1) 能量的混杂效应系数 R_s , 定义为

$$R_s = \frac{a_s(H_f) - a_s(C)}{a_s(C)} \quad (2)$$

式中 $a_s(H_f)$ 、 $a_s(C)$ 分别为 HFRP、CFRP 的冲击强度。将 R_s 列于表 3。可知, R_s 随 V_{CF} 增大而减小,而与界面数几乎无关。不过 LER-C/K 的 R_s 要远大于 HER-C/K,而 LER-C/G 的 R_s 又要高于 LER-C/K。因此,可以通过 R_s 比较不同韧性纤维对改善 CFRP 冲击强度作用的大

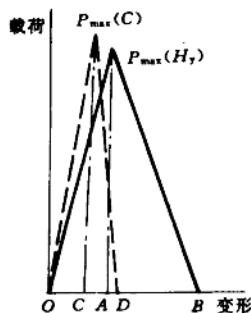


图 5 冲击峰模型图

小。

(2) 形变的混杂效应系数

由于 GF、CF 加入到 CFRP 中,可以提高 CFRP 的断裂应变,故 R 又可用形变定义。

① 总形变的混杂效应系数 R_L 定义为

$$R_L = \frac{L(H_f) - L(C)}{L(C)} \quad (3)$$

式中 $L(H_f)$ 、 $L(C)$ 分别为 HFRP、CFRP 的冲击总形变。 R_L 值见表 3。

表 3 混杂效应系数

种 类	No.	R_i	R_p	R_t	$ R_p/R_i $	R_L	R_{eL}	R_e
LER-C/G	C-1	1.50	14.7	16.2	9.8	6.7	3.9	-0.17
	C-2	1.42	15.1	16.5	10.6	7.0	4.2	-0.11
	C-3	1.54	14.9	16.4	9.7	6.9	3.9	0.05
	C-4	0.72	13.3	14.5	18.0	5.8	2.9	0.08
	C-5	0.31	18.9	19.2	61	7.8	3.2	0.075
	C-7	0.34	17.9	18.2	53	7.4	7.8	-0.02
LER-C/K	C-1	1.81	16.9	18.7	9.6	7.8	2.43	-0.27
	C-2	2.1	16.7	18.8	8.0	8.0	2.53	-0.24
	C-3	1.55	15.4	17.0	9.9	7.2	2.28	-0.21
	C-4	0.81	14.8	15.6	18.3	6.7	1.9	-0.34
	C-5	0.46	17.1	17.6	37.0	7.2	1.75	-0.10
	C-7	0.23	17.8	18.0	77.4	7.4	1.46	-0.25
HER-C/K	C-1	0.09	10.4	10.5	116	3.0	0.49	-0.43
	C-2	-0.09	12.5	12.4	136	3.3	0.38	-0.33
	C-3	0.12	9.9	10.0	83	2.7	0.44	-0.39
	C-4	-0.18	12.4	12.2	69	3.2	0.49	-0.37
	C-5	-0.18	9.3	9.1	52	2.4	0.34	-0.35
	C-7	-0.50	11.0	10.5	22	2.6	0.29	-0.27
HER-C/K	B-1	-0.03	11.0	11.0	440	3.0	0.49	—
	B-2	-0.25	13.4	13.1	54	3.5	0.59	—
	B-3	0.04	13.4	10.4	254	2.8	0.44	—
	B-4	-0.28	11.7	11.4	42	3.0	0.47	—
	B-6	-0.42	11.0	10.6	26	2.7	0.44	—

② 分形变的混杂效应系数 R_i

$$R_i = R_t + R_p \quad (4)$$

$$R_i = \frac{l_i(H_f) - l_i(C)}{l_i(C)} \quad (5)$$

$$R_p = \frac{l_p(H_f) - l_p(C)}{l_p(C)} \quad (6)$$

式中 $l_i(H_f)$ 、 $l_i(C)$ 为 HFRP、CFRP 的弹性形变; $l_p(H_f)$ 、 $l_p(C)$ 为相应的破坏扩展形变。 R_i 、 R_t 、 R_p 也列于表 3。可见 R_i 均远小于 R_p , 即 $|R_p/R_i|$ 大, 说明 GF 或 KF 的加入, 主要增加了 CFRP 的破坏扩展形变。 R_i 、 R_p 还与基体有关, LER 的 R_i 、 R_p 均高于 HER 的相应值。因此, R_i 、 R_p 及 R_t 不仅能反映基体-纤维的匹配作用, 而且还能揭示韧性纤维的作用机理。

(3) 最大应力的混杂效应系数 R_e 。