

上海交通大學

八十七周年校庆学术报告会 论文摘要

材料科学与工程专辑



1896—1983

上海交通大学
八十七周年校庆学术报告会论文摘要
材料科学与工程专辑

编 辑：上海交通大学科技交流室
出 版：江苏省武进县村前印刷厂
印 刷：江苏省武进县村前印刷厂

一九八三年四月出版
编号：82645

材料科学与工程专辑

目 录

碳—铝复合丝的研究·····	李贤淦 郭公毅 张曾祐 李仁和	(1)
铝—碳复合材料的界面反应·····	李贤淦 张国定	(3)
碳—铝复合材料的扩散粘结(二)·····	侯鼎康等	(6)
碳铝复合材料断裂现象分析·····	张国定 李贤淦 王文龙	(9)
各种碳纤维镀镍热处理后组织和性能的变化·····	王文龙 张国定	(12)
铜及铜合金基材上底层的喷镀技术·····	蒋国昌 林行方	(14)
关于自熔性合金发展动向的分析·····	蒋国昌 高余良	(17)
关于粉粒在弧束中的运动和加热·····	蒋国昌 费铸铭	(19)
关于混合粉热喷镀技术的理论分析·····	蒋国昌 刘南圭 费铸铭	(22)
关于铝及铝合金工件热喷镀的理论分析—打底层最佳喷镀工艺的选择·····	蒋国昌 林行方	(26)
氧化铝陶瓷和金属陶瓷耐热隔离涂层—防止增压器喷咀环不锈钢叶片的渗碳试验·····	刘南圭 吴淦英	(29)
增压器喷咀环叶片喷涂隔离涂层后渗碳程度的检测·····	吴淦英	(31)
顶底双吹氧气转炉冶炼中、低碳铬铁热模拟试验研究·····	张 宁(执笔)	(34)
底枪冷、热态试验研究·····	张 宁 陈显慧(执笔)	(37)
掘进机滚刀刀圈崩刃破断的失效分析·····	徐佐仁 郁金星	(40)
隧洞掘进机盘形滚刀的耐磨性研究·····	荣雪华	(43)
双相10MnNb钢的组织 and 性能研究·····	徐佐仁 郁金星	(45)
不锈钢真空加热的探讨·····	杨安静 杨春生	(46)
可控氮化的研究·····	潘健生 胡明娟 毛立忠 唐伟扬 许正才 唐余泉	(49)
18Cr2Ni4WA钢氮化层组织强化机理的研究·····	郑经铎 王育烽 沈甫法 俞德刚 毛树楷	(51)
热轧态双相钢的发展及应用·····	杨安静	(54)
氮化和滚压强化后表面疲劳裂纹扩展抗力的研究·····	俞德刚 郑经铎 王育烽 沈甫法	(57)
对K6镍基合金叶片表面斑点形成原因的初步探讨·····	陆树荪 徐荣明 金秀珍 王子达	(60)

工艺因素对 K 6 镍基铸造合金高温瞬时拉伸性能与组织的影响.....	王怡之 陆树荪 (63)
超声波探伤中斜探头横波声压计算法的探讨.....	乐书华 张寿柏 孔凡公 王怡之 (65)
Fe-C合金系 Ms 温度的热力学计算及马氏体相变驱动力	张鸿冰 徐祖耀 罗守福 (68)
高强度铁基耐热合金的高温晶界脆化.....	胡庚祥 J. W. Morris, Jr (70)
淬火空位对马氏体相变的影响.....	徐祖耀 颜林发 (73)
贝氏体中的巨型台阶和碳化物.....	徐祖耀 顾文桂 俞学节 (75)
低碳马氏体的形成及其应用.....	徐祖耀 (77)
淬火温度对 4330M 钢应力腐蚀的影响—晶界上杂质的偏聚对高强度钢应力腐蚀开裂的作用.....	林栋樑 吴建生 (80)
ZG24SiMnVTi 断裂韧性的研究.....	戈大钊 蔡泽高 (83)
ZG24SiMnVTi 铸钢车钩钩体开裂原因的分析.....	戈大钊 蔡泽高 (86)
Y 形籽晶法制取镍双晶.....	陈贤芬 吴建生 林栋樑 (89)
钢中微区低含量碳的电子探针定量分析.....	王永瑞 何啸海 方莲华 陈世朴 (92)
高温周期持久试验机结构与调试.....	朱永保 (95)
点阵错配度对定向凝固镍基合金蠕变性能的影响.....	姚德良 孙传棋 (98)
定向凝固镍基高温合金的横向性能.....	黄颂惠 李其娟 (101)
高温奥氏体化处理对 18Cr ₂ Ni ₄ WA 钢组织和性能的影响.....	嵇 钊 曾振鹏 (105)
冶金质量和淬火温度对 40CrNiMoA 钢腐蚀疲劳性能的影响.....	徐培元 杨正瑞 (109)
40CrNiMoA 钢 在 水 介 质 中 应 力 腐 蚀 裂 纹 扩 展 机 制 的 探 讨.....	杨正瑞 徐培元 (112)
高强度钢在蒸馏水中的过载延滞效应.....	陈雅珍 杨正瑞 (116)
高强钢在水介质中裂纹扩展出现“V”形推进的初步探讨.....	杨正瑞 曾振鹏 (119)
钕单晶的制取及其生长机理.....	陈贤芬 吴建生 林栋樑 (122)
焊缝白点形成机理及其对破断过程的影响.....	蔡泽高 陈雅珍 曾振鹏 水 橙 (125)
“42-160”柴油机连杆开裂原因分析.....	蔡泽高 戈大方 王永瑞 方莲华 余志洪 孟二扣 (128)
硼对 12Ni3CrMoV 钢回火碳化物的析出及强韧性的影响.....	李朋兴 顾明元 金晓东 (131)
GCr15 钢的超塑性的 $m-\delta^*$ 关系的研究.....	李寿民 刘 勤 (135)
Zn-22%Al 共析合金的超塑性的 $m-\delta^*$ 关系的研究.....	刘 勤 李寿民 (138)
工业纯铝超塑性的研究.....	肖文斌 董长发 张慧玲 (140)
国内外冲裁间隙问题的探讨.....	丁 灏 张厥梁 杜 黎 (141)
国内外模具技术近况综述.....	丁 灏 (141)
杯—杆型正反复合挤压两端金属流出量规律的实验研究.....	王 鹭 丁伟民 阮雪榆 张鸿光 (142)
宽板自由弯曲回弹角的理论分析.....	杜国辉 阮雪榆 (144)

测恒定真应变速率(ϵ)的简便方法(变 v —定 ϵ 法).....	李寿民 刘 勤	(145)
纯铝耦合块的等温模锻.....	肖文斌 董长发 张慧玲	(147)
棒料精密剪切.....	洪慎章 胡学根	(148)
提高模锻件精度的几条途径.....	吴 安	(149)
钢锭开坯形状对锻粗变形的影响.....	洪慎章	(151)
节约能源有效方法之一—锻造余热淬火工艺.....	洪慎章	(152)
用压电晶体传感器测定冷挤压凹模内壁压力分布.....	王学文 陈保罗	(153)
高速锤锻模失效的分析.....	洪慎章	(155)
有色金属及合金冷挤压力的研究.....	张质良 吴年盛 郁雅珍	(156)
冷挤压凹模强度和变形的有限元分析.....	王学文 夏萼辉 陈保罗	(157)
最佳冲裁排样的计算机辅助设计.....	夏萼辉 卞铭甲 李绍成	(158)
温塑性成形时变形抗力的研究.....	张质良	(159)
复合挤压力的平面应变问题上限解.....	李绍林 丁琢如 阮雪榆 丁伟民 王 鹭	(161)
锻挤复合成形变形力的上限法分析.....	阮雪榆 王学文 杨筑萌	(162)
“兰脆”温度挤压特性研究.....	张质良 余大伟 阮雪榆	(162)
复合挤压的研究.....	阮雪榆 李绍林 张水忠 李光伟	(163)
阶梯形空心件挤压工艺方案的讨论.....	丁伟民 王 鹭	(164)
带底深孔薄壁正挤压件的质量问题.....	丁伟民 王 鹭	(166)
三瓣式高压胶管接头外套的温锻.....	吴 安 王以华	(168)
小型锻炉的余热锅炉的设计及制造.....	王以华	(171)
提高锻件精度的有效途径——小损耗模锻.....	王以华	(174)
高温梯度下Fe—石墨共晶定向凝固的研究.....	王务献 厉松春 陈宏星	(176)
Al—Si 共晶合金的定向性及钠的影响.....	厉松春 陈霞文 王务献	(178)
Fe—C共晶合金的灰口白口转变.....	陈宏星 厉松春 王务献	(180)
可锻铸铁低温退火工艺研究.....	沈嘉猷 吴炳荣 张增泰 严国粹	(182)
Al—Si共晶合金变质剂—JDSB-1双色变质块的研制.....		
.....	黄良余 翟春泉 林 凡 丁文江 沈嘉猷	(184)
铝铜合金的新型精炼剂—JDJL-1 三气精炼剂的研制.....		
.....	黄良余 翟春泉 丁文江 林 凡 沈瑞坤 尤德培	(186)
MC-77高阻尼合金的组织性能及其阻尼机理的探讨.....	高阻尼合金研制组	(188)
烧结剥离型铸钢涂料的理论与应用.....	温文鹏 严名山 邹忠桂 朱纯熙	(191)
J-DGT-81 铸钢涂料的研制与应用.....	章玉林 沈嘉猷 陈昌华	(192)
双闭环熔透适应控制脉冲等离子弧焊.....	何德孚 姚 舜 倪纯珍	(194)
同步分频控制式脉冲微束等离子弧焊初步研究.....	姚 舜 倪纯珍 何德孚	(197)
微处理器主使等离子弧焊接过程熔透适应控制系统初探.....		
.....	何德孚 朱贤博 姚 舜 俞海良 倪纯珍	(200)
钼合金脉冲TIG 焊工艺研究(一)~熔池行为控制与结晶裂纹的抑制.....		
.....	严向明 齐志扬	(203)

12Ni3CrMoV钢 Z向插销试验.....	王 铤 俞柏荣 张必强 章 瑛 (206)
超声波胶点焊.....	齐志扬 严向明 林儒仪 (208)
微量元素对Al-Si共晶钎料的影响.....	陈根宝 吴锦华 李戈扬 (210)
铝基钎料及其钎焊接头的耐腐蚀性能.....	陈根宝 吴锦华 胡 斌 (212)
有限元法在焊接热传导分析中的应用.....	陈 楚 汪建华 杨洪庆 (214)
难熔金属的精密点焊技术(一)~异种金属的可焊性研究.....	齐志扬 严向明 张兆伍 (217)
电解电容器中引出铝梗与氧化铝箔的超声波点焊.....	齐志扬 严向明 林儒仪 (220)
SD-0.25轻型弯曲振动式超声波点焊机的研制.....	齐志扬 林儒仪 陈 义 (223)
熔化极脉冲氩弧焊脉冲电流波形对熔滴过渡影响.....	朱正行 周元祺 杨君仁 (226)
磁测应力技术.....	周浩森 陈立功 石忠贤 (228)
焊接接头的低周疲劳强度.....	周浩森 陈立功 刘乾初 黄双利 (230)
平面应力磁测技术研究.....	周浩森 陈立功 (232)
15CrMoV 钢 再热裂纹机理的研究	陈 楚 张月嫦 姚寿山 吴鲁海 刘妙涛 李雪珍 (234)

碳—铝复合丝的研究

材料科学及工程系 李贤淦 郭公毅 张曾祐 李仁和

碳—铝复合材料是一种新型的结构材料,具有优异的高温性能,高温时的尺寸稳定性。高的比强度和比模量,比现在先进的工程材料更为优良,例如(50%)人造丝(Rayon)基石墨纤维增强铝和(50%)聚丙烯腈基碳纤维增强铝的比强度(10^6 吋)和比模量(10^6 吋)分别为2.4, 490和2.6, 290;而铝合金7075-T6为0.8, 106;钛合金(Ti-6Al-4V)为1.1, 103。此外,金属基复合材料能在300℃以上温度环境中工作;有良好导电性和导热性。所以在宇航、卫星及海、陆、空军都有应用的潜力,引起广泛重视。碳—铝复合丝的研制是制造碳—铝复合材料的重要步骤。

制备碳—铝复合丝的方法有许多,然而化学气相沉积钛硼涂层并进行液态金属直接浸渍的方法是被认为是最成功的方法之一,但现在还几乎不知道用钛硼涂层法处理后的纤维性能与成功浸渍之间的关系。认为钛硼法适用于人造丝(Royon)基纤维、高模量聚丙烯腈(PAN)基纤维,而不适于石墨化不够的PAN(II)型纤维。目前我们采用聚丙烯腈基未经石墨化处理的国产碳素纤维增强纯铝和铝合金(LD2和LD10)基体获得良好效果,制得的复合丝的拉伸强度分别达到70~100kg/mm²和50~70kg/mm²。明显地表现出用纯铝基体有较高的强度性能。所得结果与有关资料比较于表1:

表 1 用钛硼法生产的碳—铝(合金)复合丝的拉伸强度比较

纤维类型	工业牌号	基 体	纤维体积 百分数(%)	拉伸强度 kg/mm ² δ	% ROM	资料来源
人造丝Rayon	Hhornel 50	201	33	82	95	[6]
聚丙烯腈 PAN I型	Hercules HM3000	201	30-40	103	98	[2]
聚丙烯腈 PANII型	Thornel 300	202	29	25	28	[2]
聚丙烯腈 未石墨化(国产CI)	中 强 型	LD-10	50±	50—72		本 室
"	"	纯 铝	50±	70—100		本 室

可以看出,复合丝之拉伸强度不同程度地低于按混合规则 (ROM) 的计算值,性能在制备过程中衰减。我们进一步分别测定了工艺流程的各步骤中拉伸强度降低的情况,并与资料报导之数据相比较列于表2:

表 2

在钛硼处理和铝合金浸渍之后各种纤维

纤维类型	工业牌号	Ti-B处理后 的强度衰减%	铝(合金)浸渍 后的强度衰减%	Al ₄ C ₃ 生成量 (P.P.m)	资料来源
人造丝Rayon	Thornel 50	8	2	250	[2]
聚丙烯腈 PAN I型	Modmor I	10	9	125	[2]
聚丙烯腈 PAN II型	Thornel 300	32	39	>6000	[2]
聚丙烯腈 未石墨化(国产C ₁)	中强型基体 LD 10	19	30	>1000	本室
"	中强型基体纯铝	19	10		

不同种类的纤维在钛硼处理和铝(合金)浸渍之后拉伸强度衰减的程度不同。而在我们的试验中,由于工艺和设备上的某些特点,虽然使用的是未经石墨化处理的碳素纤维,而用纯铝为基体制得的复合丝拉伸强度比用铝合金为基体制得的复合丝拉伸强度高,一般达 70~100 kg/mm²,最高达 125kg/mm²。强度衰减的减小表现在液态金属浸渍之后。用气相色谱分析的方法显示出它们之间碳化铝数量的明显差别。这种差别即表现在采用的纤维类型的不同之间,也表现在采用的基体种类的不同之间。一些其它的试验,如在石墨基片(或碳纤维)上沉积铝并经不同真空加热处理,研究碳铝之间反应的情况,认为碳化铝的生成量多少与强度降低密切相关。我们对碳铝复合丝进行脱铝试验证明:脱铝之后的纤维束与原纤维拉伸强度相近。对复合丝进行不同高温真空热处理试验,并对处理之后复合丝强度、碳化铝数量及脱铝后强度进行测定表明,高温热处理(主要是超过 550℃)使碳化铝成倍增加,复合丝和脱铝后之纤维束强度都明显下降,纤维严重受损伤。不过,在一般复合丝制备过程中,保持良好的气相沉积炉和液态浸渍炉的温度及碳纤维在其间的停留时间的配合,可以使上述的所谓化学损伤降低。碳铝复合丝的制备除了考虑可能的化学损伤、机械损伤外,界面的结合状态,界面脆性层和缺陷的存在,不同材质的膨胀系数的悬殊差异也都显著地起着作用。这对我们的工艺选择是很重要的。

虽然,我们采用未经石墨化的碳素纤维为增强剂,用纯铝为基体,在合适的工艺条件下,得到了高强度的复合丝。但还需经过进一步加工成型条件和材料实用条件的考验。

总之:

(1)用化学气相沉积钛硼法和液态铝直接浸渍法,用未经石墨化的碳素纤维可制的高强度碳铝复合丝。

(2)上述方法不仅适用于石墨纤维为Rayon基、PAN基也适合于国产未经石墨化之碳素纤维,重要的是,使各种特性的纤维与不同性能的基体,在合适的工艺条件下进行最佳的配合,

(3)在我们试验条件下,碳化铝的生成不是复合丝强度降低的主要原因,而控制碳铝反应,使界面有适当的结合,有利于提高强度。

(4)复合丝的强度也与纤维类型,基体种类有关。

(全文在第二届全国复合材料学术交流会上宣读)

铝—碳复合材料的界面反应

材料科学与工程系 李贤淦 张国定

复合材料界面的稳定性是材料实用价值的重要标志之一。在高温条件下,材料界面产生不同程度的相互作用,形成不同的结合状态,直接地影响着材料的断裂过程和强度。故界面现象的研究,不仅要揭示其内在关系,且使整个生产过程有效控制界面反应,使材料达到最佳性能。

我们的工作围绕着铝—碳复合丝在不同温度下进行真空热处理及其界面结合状态和拉伸强度的影响进行探讨。

(一)拉伸强度:用M-40石墨纤维和国产碳素纤维增强纯铝及铝合金基体的复合丝经不同温度真空热处理后拉伸强度测定结果表明:以纯铝为基体的复合丝拉伸强度比铝合金基体的复合丝拉伸强度高。当热处理温度低于550℃时,拉伸强度基本保持不变。当温度超过550℃,拉伸强度略有下降。超过650℃,则明显下降。文章[1]中提出用化学气相沉积钛硼涂层的方法制成复合丝,涂层与纤维或基体间反应生成钛、硼,尤其铝的碳化物,结果使纤维受损伤。把高温热处理后的复合丝用氢氧化钠溶液溶去全部铝层,重新得到碳纤维束,测定

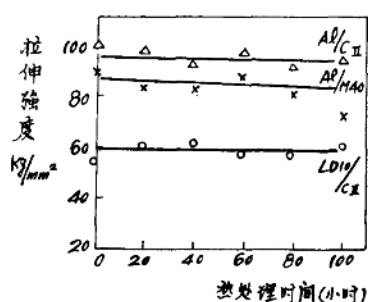


图1铝/碳复合丝在氩气保护下经450℃100小时热处理后拉伸强度。

其拉伸强度表明:碳纤维强度的衰降与上述结果相对应。可见高温热处理引起界面反应导致复合丝拉伸强度的降低。

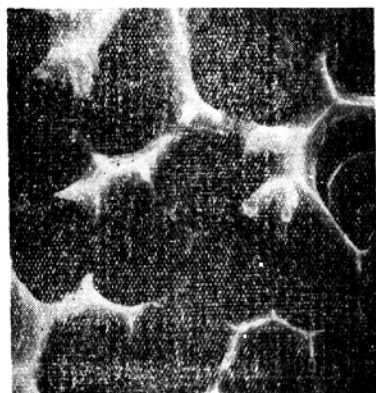
(二)长时间热处理:取同样复合丝,在氩气保护下经450℃、100小时热处理后拉伸强度测定结果示于图1。可见其拉伸强度基本保持不变。W. G. Harigan[2]研究结果指出,T50/6061复合丝(钛硼涂层)在465℃,1000小时热处理后用离子显微探针质量分析仪分析了界面化学成份表明无明显变化。界面是稳定的。

(三)断口形貌:用扫描电镜对不同温度热处理前后试样断口形貌变化的观察证明了界面结合状态与拉伸强度密切相关。照片1和2为未经热处理之不同复合丝断口形貌。可看出,复合良好的样品断口形貌类同。纤维完全被基体包容,它们之间结合适中。拉伸时由基体经涂层向纤维传递载荷。脆性涂层裂纹或自身缺陷引起应力集中。微裂纹扩展受界面阻挡,不易向纤维延伸,纤维发挥承载作用。束丝拉断,首先纤维拉断,基体有相当塑性变形,有明显“颈缩”形貌,足使基体与纤维间拉开。纤维轮廓完整清晰。照片3和4为经高温热处理之后断口形貌。与照片1和2比较看出:界面反应使断口形貌变化。不同基体和不同纤维表现

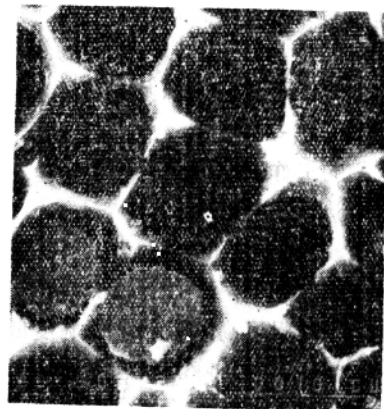
的特征也不同。在铝合金为基体的复合丝中的界面反应尤为明显可见。界面反应不仅使纤维损伤。界面强结合使应力集中变为敏感，同时加快纤维断裂过程。材料拉伸强度降低。

照片 5 和 6 表示复合丝经 450°C ，100小时热处理断口的扫描电镜照片。与未处理之断口照片相比较，没有什么差别。

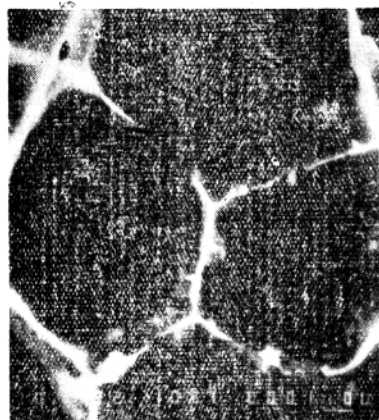
可见，界面行为对材料性能有很大影响。界面反应之程度与热处理温度有关，而对不同纤维和不同基体的复合丝有不同温度上限。譬如：对纯铝基体以不超过 600°C ，对铝合金(如LD2，LD10)不超过 550°C 。不同基体表现为不同之组成，由此合金元素的性质、基体熔点，液固相区的温度范围的差异。同时也表现为纤维结构的差异。



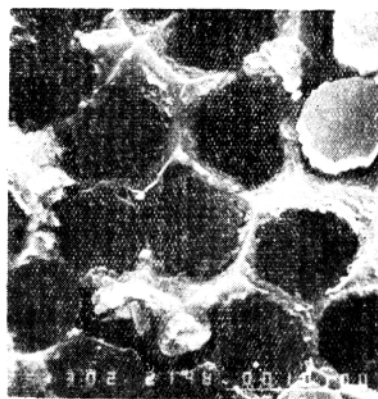
照片 1 国产碳纤维(CI)-铝合金
(LD10)复合丝未经热处理的
断口扫描电镜照片(3000X)



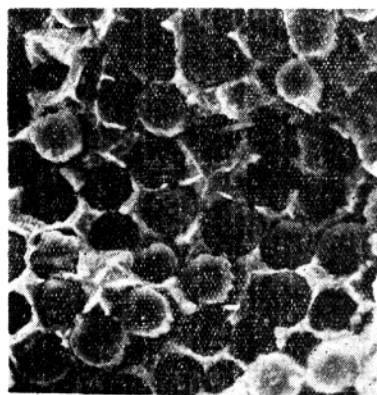
照片 2 国产碳纤维(CII)-铝合金
(LD10)复合丝未经处理
断口扫描电镜照片(3000X)



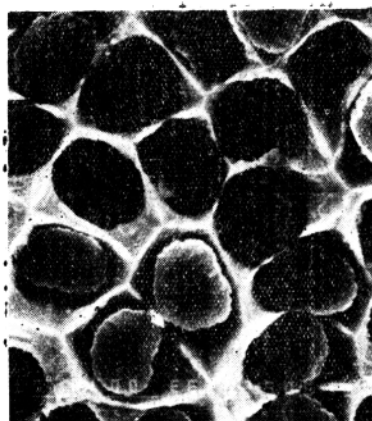
照片 3 国产碳纤CI-维铝合金(LD10)
复合丝经 600°C 热处理 1 小时
后断口扫描电镜照片(4200X)



照片 4 国产碳纤维CII-铝合金(LD10)
复合丝经 650°C 热处理 1 小时
后断口扫描电镜照片(3000X)



照片5 国产碳纤维CII-铝合金复合丝
在氩气氛中，450°，100小时
热处理后的断口扫描电镜
照片(1500X)



照片6 M40石墨纤维-铝合金(LD10)复
合丝在氩气氛中，450°，100小
时热处理后的断口扫描电镜
照片(3000X)

(本文在第二届全国复合材料学术会上宣读)

碳—铝复合材料的扩散粘结(二)

材料科学与工程系 侯鼎康 赵昌正 金城 蒋玉扣

一、引言

经过适当处理的碳纤维束丝的热压是制备碳铝复合材料的主要工艺方法之一。以前我们曾对涂镍碳纤维与铝的扩散粘结作过初步报告,近年来我室用气相沉积Ti-B涂层法制取碳—铝复合丝并与铝箔进行热压制备出了具有一定性能的复合板。我室采用固、液态热压(温度介于基体固、液相线之间),这样既可避免固态热压时造成的纤维的多量碎裂,也可防止液态热压时纤维表面过多脆性化合物的生成而降低材料性能的缺点,是迄今较为成功的固结技术。

二、试验

用上海碳素厂的中强型碳纤维(拉伸强度在 200kg/mm^2 左右)进行化学涂Ni或涂Cu,或用化学气相沉积—液态浸渍制得的碳—铝复合丝($V_f = 40 \sim 50\%$, $\sigma = 70 - 100\text{kg/mm}^2$),然后将它们与LD2或LF2铝箔叠层后热压成复合板,再进行强度测试和组织观察。

三、扩散粘结过程

施加于碳—铝复合材料的载荷是通过界面传递给纤维的,因此理想的界面结合对发挥材料性能是至关重要的,纤维—基体界面的建立是复合材料工艺最终提出的主要问题。众所周知,液态铝是不能直接润湿碳纤维的,在热压过程中,涂在纤维上的镍(或铜)溶解于铝形成初期液相,对曾被镍复盖着的纤维表面发生润湿。

铝液对碳纤维的润湿在热力学上是不平衡的。试样在适当的温度和压力下,铝箔之间开始出现金属小液滴,慢慢地渗入到纤维之间。在液相渗透的前方是Ni或Cu的沉积物,这里铝液的成份相当于最易熔的Al-Ni或Al-Cu合金,在其他地方的基体成分就不同了。由于热压时沿试样平面方向的温度不均匀性,在基体成分变化大的地方,液相的渗透将是不连续的,在纤维没有被液相渗透的区域就会形成缺陷。因此要求涂层均匀复盖纤维,热压温度尽可能均匀一致,再加以适当的压力以保证液相在已经润湿的纤维之间有一定的速度流动,使之复合良好。

对Ti-B涂层的复合丝来讲就简单多了,因为纤维在浸渍时已完成了润湿过程。热压过程是通过附加的铝箔将其粘结在一起,并使复合丝表面疏松的基体更趋致密。热压工艺并不改变润湿的条件,但工艺参数对界面变化有显著影响。温度过高时,可以明显地看到界面生成物(图1)。

四、试验结果与讨论

1. 本室研制的复合板的纤维体积含量在 25% 左右, 室温拉伸模量为 $10 \times 10^3 \text{kg/mm}^2$, 基本符合混合物定则。涂铜纤维压制的复合板的最高模量达 $13.93 \times 10^3 \text{kg/mm}^2$, 表明此材料的室温刚性还是很有希望的。用纯铝浸渍的Ti-B复合丝和LD2铝箔压制的复合板的拉伸强度为 40kg/mm^2 , 是混合物定则的60%左右, 强度的潜力还没有得到充分的发挥。本材料的抗变形性能特别好, 高温膨胀系数在14—500℃时为 $1.84 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 仅为基体的1/14。它将为此种材料在宇航及其他尺寸稳定性要求高的材料领域开拓广泛用途。

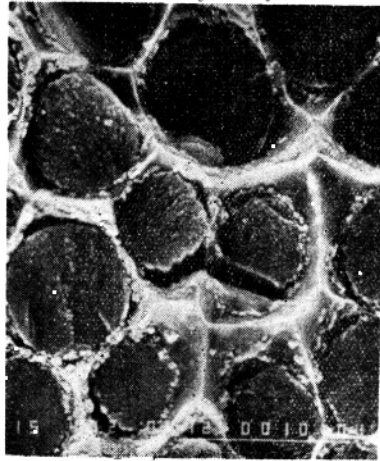


图1 Ti-B涂复, 纯Al浸渍的复合丝和LD₂复合 $V_f = 24.3\%$ 4000X

2. 温度是影响复合材料扩散粘结的主要因素, 它不仅影响扩散粘结的进行, 而且直接影响界面生成物层的厚度。此外, 厚度还与时间有关。

界面层可能是工艺要求人为地涂复上去的, 如Ti-B涂层; 也可能是基体(包括基体中的合金元素)与涂层或纤维相互作用的产物, 或者是成分非常复杂的混合物。据研究表明, 只有当此(脆性)层超过一定厚度时才会对强度产生有害影响。对碳—铝复合材料来讲, 有人计算得到的脆性层的临界厚度只有 $0.17 \mu\text{m}$ 。界面脆性层的实际厚度与纤维种类、基体成分、材料的制造方法和工艺制度等有关, 我们的研究结果也证实了这一点。碳与铝作用生成的 Al_4C_3 就是一种脆性化合物, 温度超过 550°C 已有较多量生成, 这将造成材料强度的降低。在涂镍纤维中Al与Ni形成脆性的金属间化合物, 这也将导致材料性能的下降。图2所示的断口非常平齐, 这种材料的纤维与基体作用过分, 因此强度不高, 但模量较大。图3的断口呈犬牙交叉状, 常有少量纤维拔出, 界面结合适中, 基体有明显塑性变形, 材料强度较高, 模量也接近混合物定则。

3. 压力的影响 扩散粘结需要施加一个均匀恒定的压力。压力过小, 不能保证纤维—基体的良好结合。压力过大, 将导致纤维严重降解。而且沿试样平面方向的压力由于各种原因, 很难保持均匀。

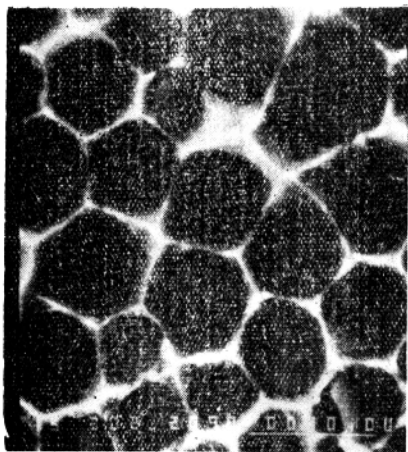


图2 室温拉伸模量 $13.93 \times 10^3 \text{kg/mm}^2$, 3000X

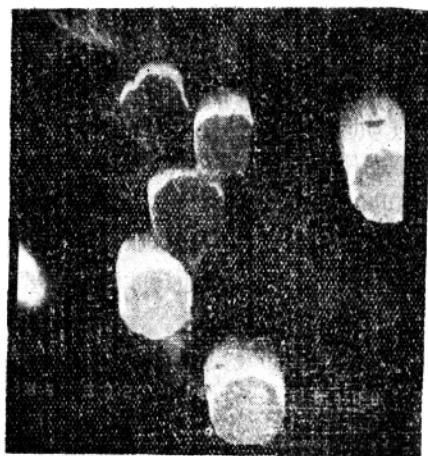


图3 Ti-B涂复, 纯Al浸渍 kg/mm^2 的复合丝和 LD_2 复合 $V_f = 31.8\%$ 室温拉伸强度为 31.6kg/mm^2 模量为 $10.5 \times 10^3 \text{kg/mm}^2$, 3000X

热压时间对性能也有影响, 但三者之中, 温度的作用是主要的。最佳参数范围很窄。为充分发挥复合材料的强度潜力, 控制好工艺条件是非常重要的。

五、结 束 语

碳—铝复合材料是近期国际上广泛研究的有着广阔应用前景的一种材料, 它在我国的研究还刚刚开始, 迄今还没有见过有关这种材料研究结果的公开报告。我室进行的初步研究表明, 这种材料的刚性及高温抗变形性能优异, 材料的强度还有潜力, 很值得进一步研究。由于碳纤维的特殊性, 对影响材料性能的各种因素也需要进一步深入探讨。

(本文在第二届力学、宇航、航空三学会年会上宣读)

碳铝复合材料断裂现象分析

材料科学与工程系 张国定 李贤淦 王文龙

碳铝复合材料具有十分优异的综合性能—比强度高,比模量高,导热导电性好,高温性能好,热膨胀系数小,不老化,不吸湿,是宇航及先进工程技术所急需的新型结构材料。目前在宇航中应用的实例已充分显示出这种复合材料的巨大潜力。要制备出高性能的碳—铝复合材料,需合理地选择纤维与基体的类型,制备工艺和参数,因此结合复合材料的制备过程研究经不同处理后碳—铝复合材料的抗拉强度,断口形貌,界面状态等,探索复合材料性能变化的规律,以便正确地选择制备工艺方法及参数。为此我们利用扫描电镜透射电镜和拉伸试验观察和测定了C/A1, C/LD₂, M40/A1三种碳—铝复合丝经不同温度的加热处理后的抗拉强度断口形貌,定性的分析了界面反应,界面结合状态和纤维在复合材料中的分布对碳—铝复合材料抗拉强度的影响。

一、试 验

试验选择用液态金属浸渍法制备出的丝状碳—铝复合材料为试样:1,碳纤维/纯铝(C/A1),2,碳纤维/LD₂铝合金(C/LD₂),3,石墨纤维/纯铝(M40/A1),三种。将这三种试样分组经400℃, 500℃, 550℃, 600℃, 650℃, 高温真空处理,加热一小时,然后测定其抗拉强度,部份试样用10%浓度的NaOH溶液将复合丝中的铝基体浸蚀掉,分离出的碳纤维束经清洗,烘干,浸胶,并测定脱铝碳纤维束的抗拉强度,与碳—铝复合丝的抗拉强度相比较,研究纤维在制备过程及不同处理后损伤的程度,对碳—铝复合丝强度的影响。并用SEM和TEM观察分析相应试样的断口形貌。

二、试验结果及讨论

(一)试验测定C/LD₂复合丝的断裂载荷及抗拉强度,同时测定由这种碳—铝复合丝中分离出的碳纤维束断裂载荷及抗拉强度,列于表1中

试验结果表明从C/LD₂复合丝中分离出的碳纤维束的断裂载荷比C/LD₂复合丝的断裂载荷高很多,约高一倍左右。这一结果证明碳纤维在复合丝制备中并没有明显损伤,脱铝碳纤维的抗拉强度与碳纤维原始强度值相当。按所测碳纤维的强度及C/LD₂复合丝中的Vol%估算出的复合丝强度值明显高于实测的C/LD₂复合丝的抗拉强度,这说明C/LD₂复合丝抗拉强度偏低的原因是多方面的,碳—铝界面反应在复合丝制备过程并不严重,也不是强度偏低的唯一原因。界面反应程度和界面结合状态对复合丝强度有明显影响,过强的界面结合使界面不能起阻止裂纹向碳纤维内部扩展的作用,复合丝呈脆性断裂,断口平整。而界面结合适中的,界

表 1 C/LD₂ 复合丝及脱铝碳纤维平抗拉强度和 ROM 估算强度

结果	试样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C/LD ₂	断裂荷载 kg	4.5	3.7	3.0	4.0	3.0	4.5	4.3	5.0	5.0	4.0	4.0	3.5	4.7	4.5
复合丝	抗拉强度 kg/mm ²	64.3	52.8	42.8	57.1	42.8	64.3	61.4	71.4	71.4	57.1	57.1	50	67.1	64.3
脱铝碳纤维束 (C/LD ₂)	断裂荷载 kg	8.8	6.2	8.8	8.8	8.3	7.4	6.6	6.0	7.8	8.0	8.2	9.2	7.2	7.2
经NaOH浸触	抗拉强度 kg/mm	231.5	163.1	231.5	231.5	218.4	194.7	173.68	157.8	205.2	210.5	215.7	242	189.4	189.4
混合法则估算强度值 kg/mm ²		122.75	88.05	122.75	122.75	115.7	103.85	93	85.4	109	111.75	114.35	127.5	101.2	101.2

面既能有效地传递载荷，又能防止裂纹向纤维内部扩展。因为界面处纤维与基体“脱粘”使裂纹扩展改变了方向，阻止裂纹向碳纤维内部扩展。

(二)三种碳-铝复合丝经高温处理后测定其抗拉强度和观察相应的试样断口发现：随真空处理温度升高，特别是600℃以上处理碳-铝复合丝的性能和断口形貌都有明显变化。C/LD₂复合丝经650℃一小时高温处理抗拉强度急剧下降，抗拉强度由64.7kg/mm²下降到23.1kg/mm²。碳纤维与铝基体发生明显的界面反应。图1为C/LD₂复合丝高温处理后的断口，由图1可见界面区有明显粒状反应物出现，碳纤维受损伤。三种复合丝经不同温度高温真空处理后的抗拉强度及脱铝碳纤维的抗拉强度变化如图2所示，在低于550℃高温处理性能变化

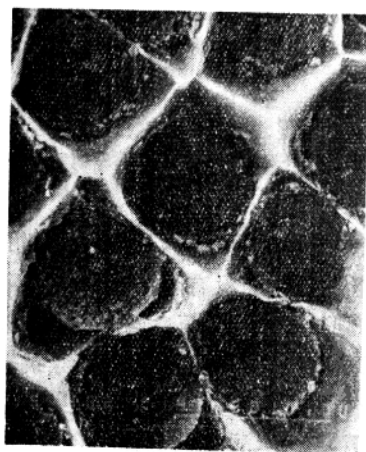


图 1

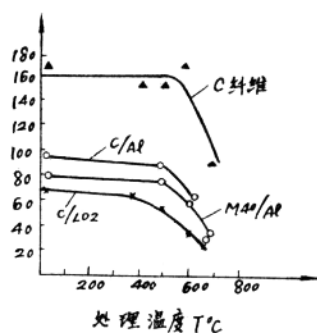


图 2

不大，而在 600℃ 以上处理界面反应严重，碳纤维受损伤，抗拉强度明显下降。因此必须严格控制二次加工时的温度。

(三)用扫描电镜和透射电镜观察分析各种碳-铝复合丝断口时发现碳-铝复合材料的断裂过程存在一定的规律，断裂往往起源于复合材料存在缺陷和纤维过于密集的区域，纤维在基体中分布不均匀引起复合材料中应力分布不均匀，在纤维表面存在很大的应力梯度，当相邻纤维越接近应力梯度越大，形成应力集中，使纤维脆断。SEM和TEM的许多观察结果都证明了这一点。图3为典型的复合丝断口图片，可清晰看到裂纹起源于两根纤维非常接近的区域及裂纹扩展方向。

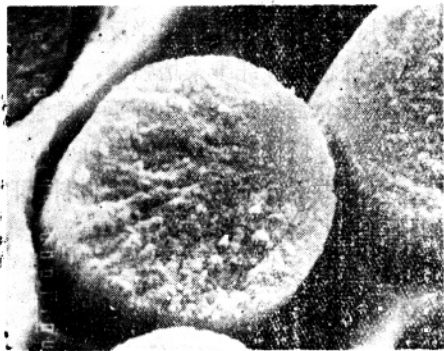


图 3 碳-铝复合丝断口(SEM5000X)

(一)碳-铝复合材料的断裂过程有一定规律性。界面结合状态，界面反应程度，纤维在铝基体中的分布对碳铝复合材料的断裂过程和性能都有密切关系。因而在制备复合材料时需合理选择工艺方法，严格控制工艺参数避免引起严重的界面反应。获得合适的界面结合状态和纤维的均匀分布等。以便制备出高性能的碳-铝复合材料。

(二)严重的碳-铝反应会损伤碳纤维，形成脆性化合物，使碳-铝复合材料的抗拉强度急剧下降，600℃ 以上高温加热将导致碳纤维与铝的严重反应，引起性能大幅度下降，因此在用复合丝进行二次加工时，应严格控制加热温度，尽可能不超过600℃。

(三)在碳纤维并未损伤的情况下，碳-铝复合材料的强度也会受界面结合状态和纤维分布的影响，而低于估算值。

(四)在500℃ 以下高温处理对碳-铝复合材料的性能影响不大保持原有性能，这对在高温下使用碳-铝复合材料有参考意义。

(本文在第二届全国复合材料学术会上宣读)