

石墨烯纳米片对碳纤维增强金属层板层间力学性能的影响

赵昌葆¹, 曹猛¹, 薛红前², 胡宗浩³, 周志强³, 孟庆实¹, 王朔^{1,2}

(1.沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136; 2.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;
3.沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘要:提出一种新的方法,用来改善碳纤维增强金属板(CARALL)的层间黏结强度。将不同质量分数(0,0.1%,0.3%,0.5%和1.0%)的石墨烯纳米片(GnPs)利用超声分散的方法使其均匀分散于环氧树脂中,并利用湿法铺层方法完成CARALL的制作。进行I型断裂韧性的测试,探究GnPs对CARALL层间性能的影响,并进行CARALL的拉伸与弯曲性能测试,研究GnPs对CARALL力学性能的影响。通过SEM与光学图像观察GnPs的增强机制与CARALL试件的失效模式。结果表明,当GnPs的添加量为0.5%时,CARALL具有最佳的层间黏结强度与力学性能。当添加0.5%GnPs时,I型断裂韧性提高79%;拉伸强度、弹性模量与断裂应变率分别提高14.5%,11.0%和15.5%;弯曲强度与弯曲应变率分别提高23.9%和81.5%。这是由于添加GnPs到环氧树脂中可以分散CARALL所承受载荷,并利用自身的断裂、拔出和脱黏等机制吸收能量,进一步改善CARALL的层间力学性能。

关键词:碳纤维增强金属层板;石墨烯纳米片;层间性能;力学性能;强化机制

中图分类号:V258

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2022)01-0141-07

在过去的几十年中,由于纤维增强复合材料具有更高的比强度和刚度,在结构应用中的使用已大大增加^[1-2]。航空航天工业采用越来越多的复合材料组件来满足其轻质化要求,其中波音787和空中客车A350使用的复合材料质量占比超过50%。纤维金属层板(FMLs)是由交替堆叠的薄金属板和纤维在一定的温度和压力固化下形成的一种超混杂结构,是替代具有相同面密度的整体式金属板的一种性能优异的复合材料。其与铝合金相比有更优异的抗疲劳性能、抗冲击性能、抗腐蚀能力以及阻燃性。除此之外,FMLs还结合了纤维的高性能和金属合金的延展性,因此表现出极佳的机械性能^[3]。其中,碳纤维增强铝层压板(CARALL)是相对较新的纤维金属层压板材料^[4]。CARALL相较于应用广泛的玻璃纤维增强铝层压板(Glass)有着刚度高、强度大以

及耐疲劳等优势^[5]。但迄今为止,由于碳纤维增强铝层压板的潜在腐蚀,CARALL的工业用途很少见。但是,与其他经典的纤维增强复合材料相比,CARALL的高性能在空间应用等领域有着极大的优势,是一种潜力巨大的新型材料。然而纤维金属层板存在界面机械连接性能差等明显的缺陷,这引起了研究人员的广泛关注^[6]。金属层与纤维树脂界面是整个FMLs层板结构相对薄弱的区域,大部分的结构失效都发生在该区域,如基体开裂、分层以及金属层与基体材料之间的脱胶。因此改善金属纤维/树脂之间的黏结强度,对提高纤维金属层压板的性能具有重要意义。目前提高金属与树脂之间的界面强度主要通过金属的表面处理^[7],如表面阳极化处理、机械打磨、喷丸等方法。除此之外,另一种方法为向FMLs结构中添加纳米材料进行改性,以提

收稿日期:2021-06-03

基金项目:国家自然科学基金(51973123)、航空科学基金(2018ZF54036,2020Z055054002)与辽宁省教育厅科研基金(JYT2020007)资助

作者简介:赵昌葆(1974—),沈阳航空航天大学副教授,主要从事先进制造技术研究。

通信作者:王朔(1984—),沈阳航空航天大学副教授,主要从事航空复合材料结构性能研究。e-mail:shuowang@sau.edu.cn。

高金属与树脂之间的黏结强度^[8-9]。已有许多研究表明这是一种提高 FMLs 性能的经济有效的方法。

Khoramishad 等^[9]通过添加质量分数为 0.5% 的多壁碳纳米管 (MWCNT) 来改善 FMLs 的拉伸和冲击性能。张娴等^[10]通过添加 MWCNT 改善钛基纤维金属层压板的层间性能,发现添加 MWCNT 后钛基纤维金属层压板的剪切强度和层间剪切强度分别提高 87.5% 和 39.4%。李红丽等^[11]研究了 MWCNT 对 Ti-碳纤维超混杂板力学性能的影响,发现添加质量分数为 5% 的 MWCNT 可以提高 74% 的 I 型断裂韧性,弯曲性能与未添加 MWCNT 相比提高了 42%。

石墨烯 (GnPs) 是碳的二维 (2D) 同素异形体,自 2004 年以来就引起了学术界的极大关注。石墨烯具有出色的比表面积和极好的机械和电气性能,这赋予了石墨烯优于其他碳同素异形体的优势,以开发多功能和结构增强的复合材料^[12]。已有研究可以表明添加 GnPs 可以提高 FMLs 的性能,但基于 GnPs 研究 FMLs 的机械性能的很少,因此需要进一步研究 GnPs 对 FMLs 机械性能的影响,来扩展 FMLs 的应用。

因此,在本文中,以 CARALL 为研究对象,通过双悬臂梁实验研究 GnPs 对 CARALL 界面性能的影响,同时研究了 GnPs 对 CARALL 的断裂韧性、拉伸性能以及弯曲性能的改善程度。通过光学图像以及扫描电子显微镜观察样品的失效形式以及断裂表面形貌,分析 GnPs 改善 CARALL 力学性能的机理。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

选用厚度为 0.3 mm 的 2024-T3 铝作为金属层;选用厚度为 0.25 mm,密度为 200 g/m² 的平纹碳纤维编织布 (由上海新奥复合材料技术研发中心提供);选用 E51 型环氧树脂作为复合材料基体;Asbury Carbons (新泽西州阿斯伯里) 提供了石墨插层化合物 (Asbury 1395);而 Jeff-amine 230 (J230) 固化剂购自中国亨斯迈。

1.2 GnPs 的制备与分散

使用石墨烯插层化合物,利用热膨胀和超声处理的方法获得所需要的石墨烯纳米片 (如图 1 所示)。图 1 为处理之后得到的 GnPs 透射电镜显微图,可以看到所得到的 GnPs 为薄薄的几层堆叠而成的,并且边缘非常薄,具有单层石墨烯的特征。将

适量石墨烯插层化合物放入坩埚中,利用马弗炉于 700℃ 热处理 1 min。在热处理过程中,热冲击立即将嵌入剂转化为大量气体,从而引起体积膨胀,将致密的石墨烯插层化合物转变为松散连接的薄 GnPs 组成的蠕虫状膨胀石墨片。将得到的 GnPs 按照不同质量分数 (0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%) 添加于丙酮溶剂中,超声震荡 4 h,将 GnPs 均匀分散于丙酮中,之后加入定量的环氧树脂,超声处理 30 min,将 GnPs 与环氧树脂均匀混合,80℃ 加热挥发丙酮溶剂,留下 GnPs 与环氧树脂的混合物。

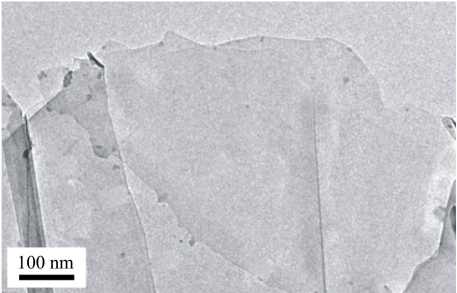


图 1 石墨烯的透射电镜显微图

1.3 FMLs 层板的制备

采用热压罐固化成型工艺制备 3/2 结构的碳纤维增强铝合金层板 (CARALL),在铺层之前采用酸碱腐蚀处理的方法对铝板表面进行处理,提高表面粗糙度,提高与环氧树脂的黏结强度。

采用湿法铺层技术铺设 3/2 结构的 CARALL,使用制备并改性的 GnPs/环氧树脂胶黏剂作为基体。铺层完成后利用热压罐进行固化,固化曲线如图 2 所示。固化完成后利用水切割机将样品切割成标准试样。

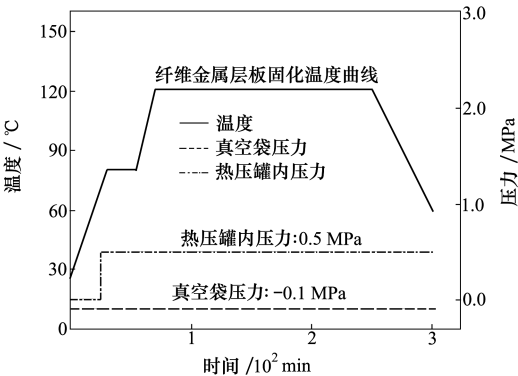


图 2 碳纤维金属层板热压罐固化成型曲线

1.4 性能测试及表征

1.4.1 I 型断裂韧性测试

CARALL 复合材料界面的 I 型断裂韧性根据 ASTM D5528-01 双悬臂梁法标准进行测试,加载速率为 5 mm/min。利用改进的波束理论(MBT)、改进的梁修正理论(MBT)以及柔性校准方法(CC)处理实验所得数据。I 型层间断裂韧性的理论表达式如(1)式所示

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \tag{1}$$

式中: P 为载荷 /N; δ 为载荷点位移 /mm; b 为试样宽度 /mm; a 为分层长度 /mm; Δ 为校正系数 /mm, 通过生成最小柔度平方根 $C^{1/3}$ 作为分层长度的函数,如图 3 所示。符合性值由以(2)式确定

$$C = \delta/P \tag{2}$$

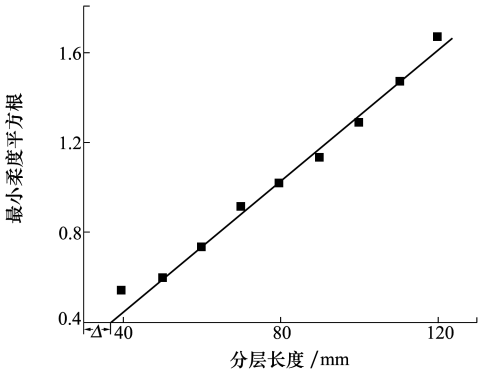


图 3 修正的波束理论,用于一致性校准

1.4.2 拉伸测试

CARALL 复合材料的拉伸性能根据 ASTM D3039 标准进行测试,样品尺寸为 250 mm×25 mm,使用 MTS 100 kN 万能试验机进行拉伸测试,加载速度为 2 mm/min。当拉伸载荷下降 40%时,认为试件已失效。每组实验重复 5 遍。

1.4.3 弯曲测试

CARALL 复合材料的三点弯曲性能根据 ASTM D790 标准进行测试,样品的跨厚比为 32 : 1。支撑圆角半径 3 mm,压头位于跨度中心的样品上方,半径为 3 mm,加载速率为 1.5 mm/min。加载后,样品会发生挠曲,直到在测试样品上发生分层或开裂,或者直到达到最大应变 10.0% (以先发生者为准)为止。三点弯曲试验在室温下进行。CARALL 的弯曲应力和应变由(3)~(4)式确定:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \tag{3}$$

$$\varepsilon_f = \frac{6\gamma h}{L^2} \tag{4}$$

式中: σ_f 为弯曲应力 /MPa; ε_f 为弯曲应变; F 为加载载荷 /N; L 是支撑跨度 /mm; b 是样品的宽度 /mm; h 是样品的厚度 /mm; γ 是试样中心的挠度 /mm。每组测试重复 5 次。

1.4.4 微观分析

采用扫描电子显微镜 SEM (SU8020, Japan) 观察样品的失效形貌,采用透射电子显微镜 TEM (Tecnai G2F30 S-TWIN) 观察 GnP s 的特征。

2 结果与讨论

2.1 添加 GnP s 对 CARALL 的 I 型断裂韧性的影响

添加不同含量 GnP s 的 CARALL 基准的抗分层性曲线(R 曲线)如图 4a)所示,它反映了裂纹扩展传递过程中断裂韧性值(G_{Ic})的变化。例如图 4a)中圆形曲线为质量分数为 0.1% GnP s 添加量下断裂韧性随裂纹扩展时的变化。从图中可以看到断裂韧性值随着裂纹扩展出现波动,当裂纹扩展到 90 mm 时尤为明显,这被称为“黏滑现象”。这种局部黏滑行为可归因于平面断裂韧性变化区域,由于使用机织碳纤维,分层平面中的基体厚度不是恒定的,随着裂纹的扩展,它会遇到不同厚度的裂纹树脂基体,在韧性高的区域,会储存更多的能量,直到达到使裂纹进展所需的量。随着裂纹的推进,来自相对较韧区域的储存能量被释放,以便沿着较不坚韧的区域扩展裂纹,从而导致滑动行为。添加 GnP s 后 CARALL 的断裂韧性值显著提高,所有添加 GnP s 的 CARALL 韧性-裂纹扩展曲线都在纯 CARALL 上方,且当 GnP s 添加量为 0.5%时, CARALL 的层间断裂韧性值提升最大。如图 4c)所示,造成这种现象的原因是环氧 GnP s 的存在可以在承受并分散加载于 CARALL 的载荷,并且在裂纹扩展过程中导致裂纹发生偏转,扩展路径增大,或者由于断裂失效时自身的断裂(图中红色箭头所示)和拔出(图中黄色箭头所示)吸收大量的能量,从而提高了 CARALL 的层间断裂韧性。图 4b)为添加不同含量的 GnP s 后 CARALL 层间断裂韧性值的变化。由图中可知当添加 GnP s 后,所有的 CARALL 层间断裂韧性都被增强,且当 GnP s 添加量达到 0.5%时, CARALL 的层间断裂韧性值最大,达到 1 056.32 J/m²,较纯净的

CARALL(589.54 J/m^2) 提高了 79%。除此之外,当 GnP_s 添加量达到 1% 时,CARALL 的层间断裂韧性值有所下降,这是由于添加高含量的 GnP_s 发生团

聚导致。当 GnP_s 在环氧树脂基体中发生团聚时,会导致团聚体处产生应力集中点,当承受载荷时易出现微裂纹,从而降低了 CARALL 的断裂韧性。

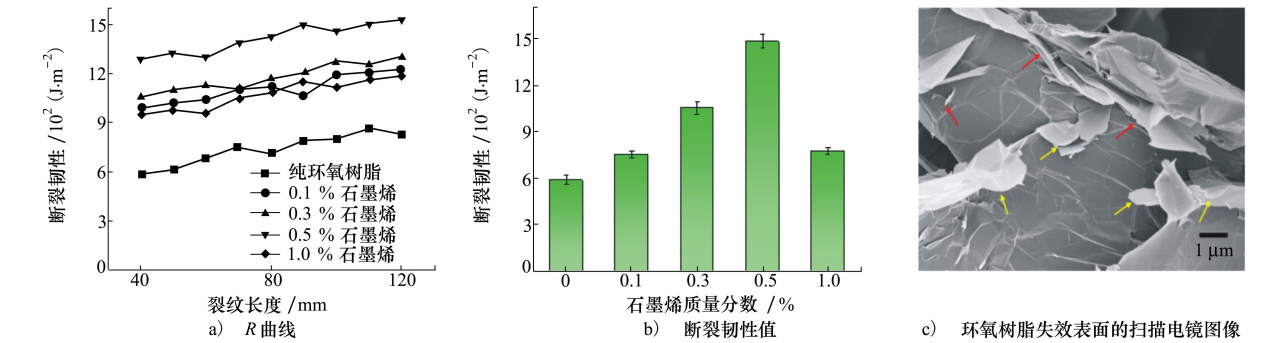


图4 纯碳纤维金属层板和不同质量分数石墨烯的碳纤维金属层板断裂韧性值

2.2 添加 GnP_s 对 CARALL 拉伸性能的影响

图 5 为具有不同含量 GnP_s 的 CARALL 拉伸性能测试结果,包括拉伸强度、弹性模量以及断裂伸长率。如图 5a) 所示,随 GnP_s 含量增加,CARALL 的拉伸强度也不断增大,当 GnP_s 的质量分数为 0.5% 时,CARALL 的拉伸强度达到最大,为 356.14 MPa,相较于纯环氧 CARALL(310.91MPa)提高了 14.5%,然而随 GnP_s 含量进一步提高,1% GnP_s 的 CARALL 拉伸强度发生降低,为 346.77 MPa,但仍比纯 CAR-

ALL 高。由图 5b) ~ 5c) 可知,CARALL 的弹性模量与断裂伸长率的变化趋势与拉伸强度的变化趋势相似,当 GnP_s 的质量分数为 0.5% 时,CARALL 的弹性模量与断裂伸长率达到最大值,为 41.325 GPa 和 2.105%,分别比纯 CARALL 提高 11.0% 和 15.5%。随着 GnP_s 质量分数达到 1%,CARALL 的弹性模量与断裂伸长率出现了下降,这与高含量下 GnP_s 的团聚现象有关。

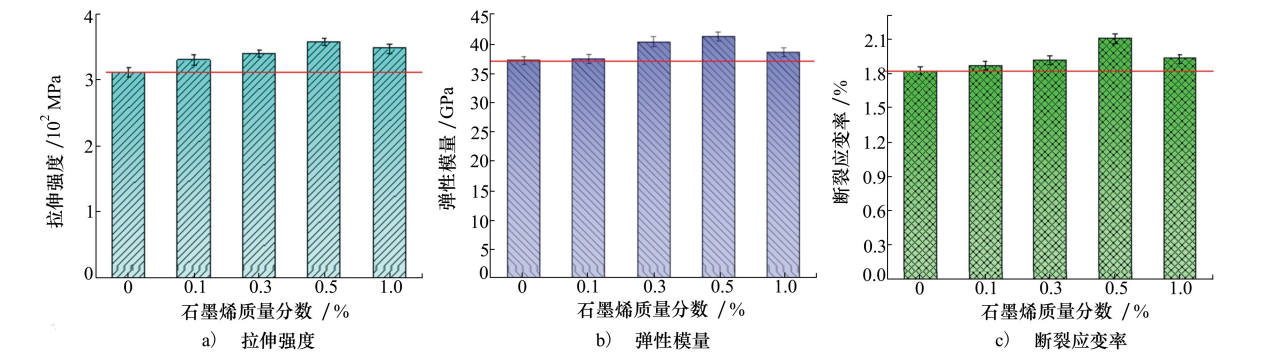


图5 纯碳纤维金属层板和添加不同含量石墨烯的碳纤维金属层板的拉伸性能

为了进一步解释 GnP_s 增强 CARALL 的拉伸性能的原因,需要对 CARALL 的组成结构分析。CARALL 主要由碳纤维、环氧树脂基质、铝板组成。当 CARALL 承受拉伸载荷时,由碳纤维、环氧基质、铝板和界面共同承担。添加 GnP_s 主要从 3 个方面改善 CARALL 的拉伸性能:①添加 GnP_s 可以改善环氧树脂基质的拉伸性能,这已有大量研究可以证明^[14-17]。②添加 GnP_s 可以改善碳纤维与环氧树脂的黏结性能。图 6 为拉伸断裂表面的显微图像,从

图 6a) 中可以看到在纯 CARALL 中,碳纤维的表面非常光滑,表明与树脂黏结性能较差,这不利于载荷的传递。然而图 6b) ~ 6d) 中在添加 GnP_s 后,碳纤维表面是粗糙的,如图中黄色箭头所示;这显示环氧树脂与碳纤维黏结较好,可以更好地传递载荷。除此之外,在图 6d) 中还发现有较大的环氧树脂团聚体,如图中红色箭头所示。这可能是由于添加 1.0% GnP_s 后其在环氧树脂基体中出现团聚现象,导致在此处产生缺陷并出现应力集中现象,使得 CARALL

的拉伸性能在添加 1.0% GnPs 时出现下降现象。这已有研究可以证明^[18]。
③添加 GnPs 可以提高环氧基质与铝的界面性能,

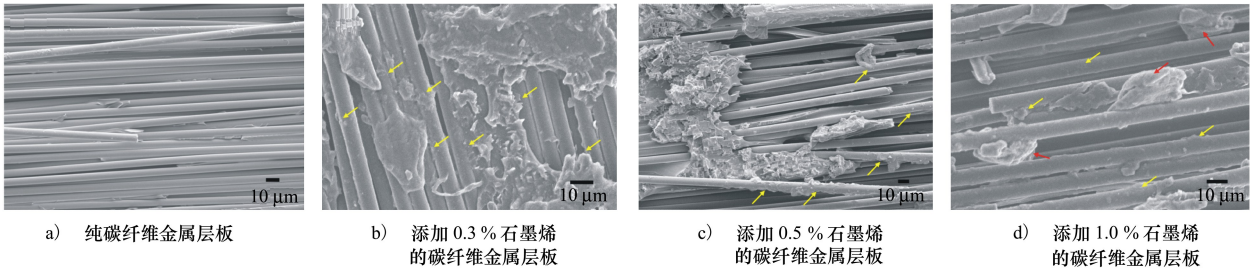


图 6 碳纤维金属层板拉伸断裂的表面扫描电镜图像

2.3 添加 GnPs 对 CARALL 弯曲性能的影响

图 7 为纯 CARALL 与添加 0.1%,0.3%,0.5%,1.0% GnPs 的 CARALL 弯曲性能测试结果。由图 7a)可知,添加 GnPs 可以提高 CARALL 的弯曲强度。当 GnPs 的添加量为 0.1%,0.3%和0.5%时,CARALL 的弯曲强度不断提高,分别比纯 CARALL 提高 2.2%,15.4%和 23.9%。且当 GnPs 添加量为 0.5%时,CARALL 弯曲强度最大,为 585.840 MPa。这是由于添加 GnPs 后,改善了碳纤维与环氧树脂的界面性能,载荷可以更好地在碳纤维与环氧基体之间传递,并且由于环氧中 GnPs 的存在,二者之间“互锁”,可以更好地承受载荷。随着 GnPs 含量进

一步增加,CARALL 的弯曲性能出现下降,当添加的 GnPs 量为 1.0% 时,CARALL 的弯曲强度为 570.224 MPa,但仍比纯 CARALL 弯曲强度高。这与聚合物中高含量的 GnPs 会出现团聚现象有关。图 7b)为添加不同质量分数 GnPs 的 CARALL 弯曲断裂应变变化的结果。可以得到添加 GnPs 后的 CARALL 弯曲断裂应变变化趋势与弯曲强度结果相同,当 GnPs 的添加量为 0.5%时,CARALL 具有最大的弯曲断裂应变 3.325%,比纯 CARALL (1.832%) 提高了 81.5%。且当 GnPs 质量分数达到 1.0%时,弯曲断裂应变开始下降。

图 8 为未添加 GnPs 与添加 0.5% GnPs 的 CAR-ALL 弯曲试件失效图。由图 8a)可知,在未添加 GnPs 时,CARALL 在加载过程中出现分层破坏,导致环氧层与铝板的黏结失效,这是纯 CARALL 弯曲失效的主要原因。由 8b)可知,添加 GnPs 后,CAR-ALL 在承受弯曲载荷时并没有发生分层现象,而是在 CARALL 的中性层之下的纤维因承受过大的拉力而发生断裂导致的弯曲失效。这可以说明添加

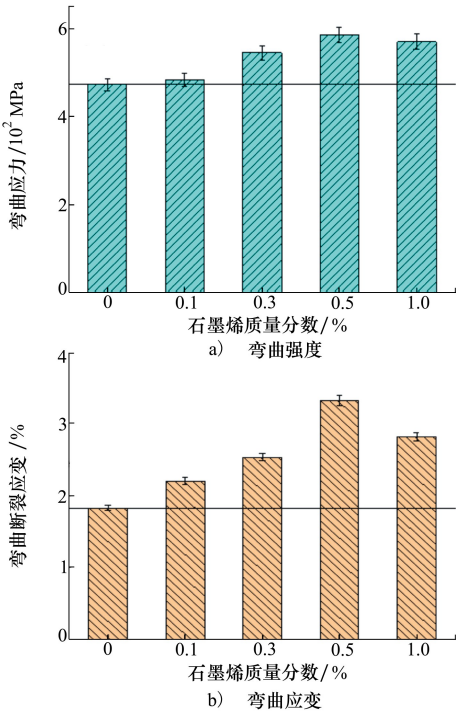


图 7 纯碳纤维金属层板和添加不同含量石墨烯的碳纤维金属层板拉伸性能

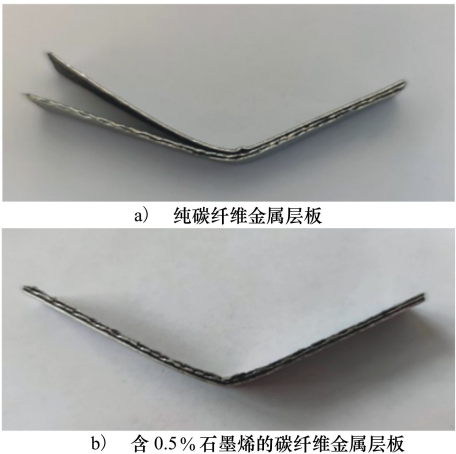


图 8 弯曲试件失效光学图片

GnPs 可以有效改善铝/树脂界面的性能,进而提高 CARALL 的弯曲性能。

3 结 论

本研究中探究 GnPs 的添加量对 CARALL 力学性能(包括层间断裂韧性、拉伸性能和弯曲性能)的影响,结果表明:

1) 添加 GnPs 可以有效改善 CARALL 的界面性能。实验结果表明添加 0.5% GnPs 时,CARALL 的 I 型层间断裂韧性值有较大提升,相比于纯 CAR-

ALL 提高了 79%。

2) 添加 GnPs 可以有效改善 CARALL 的拉伸性能。当 GnPs 的添加量为 0.5%时,CARALL 的拉伸强度、弹性模量和断裂应变率分别比纯 CARALL 提高 14.5%,11.0%和 15.5%。

3) 添加 GnPs 可以提高 CARALL 弯曲性能,当添加 0.5%的 GnPs 时,CARALL 的弯曲强度和弯曲应变与纯 CARALL 比分别提高 23.9%和 81.5%。

4) 添加的 GnPs 通过与环氧基体的“互锁”和自身在受载时的断裂和拔出等现象吸收了大量的能量,从而提升 CARALL 的力学性能。

参考文献:

- [1] SINMAZÇELİK T, AVCU E, BORA MÖ, et al. A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods[J]. Materials & Design, 2011, 32: 3671-3685
- [2] ABOUHAMZE M, SINKE J, BENEDICTUS R. Investigation of curing effects on distortion of fibre metal laminates[J]. Composite Structures, 2015, 122: 546-552
- [3] ALI A, PAN L, DUAN L, et al. Characterization of seawater hygrothermal conditioning effects on the properties of titanium-based fiber-metal laminates for marine applications[J]. Composite Structures, 2016, 158: 199-207
- [4] KROLLMANN J, SCHREYER T, VEIDT M, et al. Impact and post-impact properties of hybrid-matrix laminates based on carbon fiber-reinforced epoxy and elastomer subjected to low-velocity impacts[J]. Composite Structures, 2019, 208: 535-545
- [5] BIENIAS J, DADEJ K, SUROWSKA B. Interlaminar fracture toughness of glass and carbon reinforced multidirectional fiber metal laminates[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 175: 127-145
- [6] PÄRNÄNEN T, KANERVA M, SARLIN E, et al. Debonding and impact damage in stainless steel fibre metal laminates prior to metal fracture[J]. Composite Structures, 2015, 119: 777-786
- [7] PAN L, ALI A, WANG Y, et al. Characterization of effects of heat treated anodized film on the properties of hygrothermally aged AA5083-based fiber-metal laminates[J]. Composite Structures, 2017, 167: 112-122
- [8] AGHAMOHAMMADI H, ESLAMI-FARSANI R, TCHARKHTCHI A. The effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior of basalt fibers metal laminates: an experimental study [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 98: 102538
- [9] KHORAMISHAD H, ALIKHANI H, DARIUSHI S. An experimental study on the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on high-velocity impact behavior of fiber metal laminates[J]. Composite Structures, 2018, 201: 561-569
- [10] ZHANG X, HU Y, LI H, et al. Effect of multi-walled carbon nanotubes addition on the interfacial property of titanium-based fiber metal laminates[J]. Polymer Composites, 2018, 39: 1159-1168
- [11] 李红丽, 张娴, 李华冠, 等. 多壁碳纳米管对 Ti-碳纤维/反应型聚酰亚胺超混杂层板力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37: 581-590
- LI Hongli, ZHANG Xian, LI Huaguan, et al. Effect of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of Ti-carbon fiber/reactive polyimide super-hybrid laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37: 581-590 (in Chinese)
- [12] SALOM C, PROLONGO M G, TORIBIO A, et al. Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 84: 119-125
- [13] HAN S, MENG Q, ARABY S. Mechanical and electrical properties of graphene and carbon nanotube reinforced epoxy adhesives: experimental and numerical analysis[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 120: 116-126
- [14] JIA Z, FENG X, ZOU Y. An investigation on mode II fracture toughness enhancement of epoxy adhesive using graphene nanoplatelets[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 155: 452-456
- [15] KERNIN A, WAN K, LIU Y, et al. The effect of graphene network formation on the electrical, mechanical, and multifunctional properties of graphene/epoxy nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2019, 169: 224-231

- [16] JIA Z, FENG X, ZOU Y. Graphene reinforced epoxy adhesive for fracture resistance[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 155: 457-462
- [17] LI L, LANG L, KHAN S, et al. Investigation into effect of the graphene oxide addition on the mechanical properties of the fiber metal laminates[J]. Polymer Testing, 2020, 91: 106766

Effect of graphene nanosheets on interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced metal laminates

ZHAO Changbao¹, CAO Meng¹, XUE Hongqian², HU Zonghao³, ZHOU Zhiqiang³,
MENG Qingshi¹, WANG Shuo^{1,2}

(1.College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3 Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: Aiming at the problem of weak bond strength between CARALL metal/resin/fiber layers, this paper proposes a new preparation method to improve the bond strength between CARALL layers. In this method, Graphene platelets (GnPs) with different mass fractions (0%, 0.1%, 0.3%, 0.5% and 1.0%) are uniformly dispersed in epoxy resin by ultrasonic dispersion method, and using the wet layup method completes the production of CARALL. Carry out the I type fracture toughness test, explore the influence of GnPs on the CARALL interlaminar performance, and carry out the test of the tensile and flexural properties of CARALL to study the influence of GnPs on the mechanical properties of CARALL. The enhancement mechanism of GnPs and the failure mode of CARALL specimens were observed by SEM and optical images. The results show that when the amount of GnPs added is 0.5%, CARALL has the best interlaminar strength and mechanical properties. When 0.5% GnPs is added, the type I fracture toughness is increased by 79%; the tensile strength, Young's modulus, and strain rate at break are increased by 14.5%, 11.0%, and 15.5%, respectively; the flexural strength and flexural strain rate are increased by 20.5% and 89.7%, respectively. This is because adding GnPs to the epoxy resin can disperse the load carried by CARALL, and use its own fracture, pull-out and debonding mechanisms to absorb energy, and further improve the interlayer mechanical properties of CARALL.

Keywords: carbon-reinforced aluminum laminates; graphene platelets; interface properties; mechanical properties; strengthening mechanism

引用格式: 赵昌葆, 曹猛, 薛红前, 等. 石墨烯纳米片对碳纤维增强金属层板层间力学性能的影响[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 141-147

ZHAO Changbao, CAO Meng, XUE Hongqian, et al. Effect of graphene nanosheets on interlaminar mechanical properties of carbon fiber reinforced metal laminates[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 141-147 (in Chinese)