

超轻纤维金属层合板的研究进展

吴国清, 潘英才, 张宗科, 黄 正

(北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

[摘要] 纤维金属层合板具有密度小、冲击性能好、疲劳寿命长和损伤容限高等特征, 广泛用于制作飞机、火箭和导弹等飞行器的蒙皮或壳体材料。本文介绍了国内外纤维金属层合板材料的发展概况, 重点综述了新型超轻纤维金属层合板材料的研究现状, 并阐述了纤维镁合金层合板在研究过程中需要关注和解决的若干问题。

关键词: 纤维金属层合板; GLARE; 碳纤维; 镁合金

Research Progress of Ultra-Light Fiber Metal Laminates

WU Guoqing, PAN Yingcai, ZHANG Zongke, HUANG Zheng

(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Fiber metal laminates (FMLs) is widely used as fuselage skin materials for aeronautical and space aircraft due to their low density, high impact resistance, superior fatigue behavior and high damage tolerance. In this paper, development profiles of fiber metal laminates, and research progress of the ultra-light fiber metal laminates are mainly reviewed. Additionally, some urgent research topics of the fiber metal laminates are pointed out.

Keywords: Fiber metal laminate; GLARE; Carbon fiber; Magnesium alloy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.133

纤维金属层合板 (Fiber Metal Laminates, FMLs) 是一种由金属薄板和纤维增强树脂预浸料交替铺设后, 在一定温度和压力下固化而成的层间混杂复合材料, 如图 1 所示^[1-2]。FMLs 材料独特的构成方式决定了它既不同于传统的金属材料也不同于以往的复合材料, 与单一金属材料相比, 它质轻、耐疲劳、耐腐蚀、阻燃性好; 与单一纤维增强树脂复合材料相比, 它损伤容限高、缺口强度大、抗冲击性能和抗湿热性能好^[3-5]。同时, 纤维金属层合板具有较强的可设计性, 如可采用“拼接”技术解决机械接点问题^[6]。因此, 纤维金属层合板材料在航空航天等领域具有广阔的应用前景, 可制作无人机、直升机和战斗机等飞行器的机身壁板、机翼面板、垂尾蒙皮和舱门等部件。

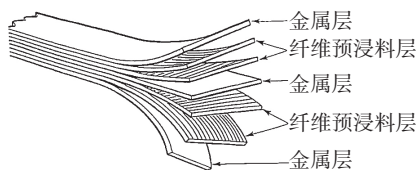


图1 FMLs材料的结构示意图

Fig.1 Build-up of a fiber-metal laminate

1 纤维金属层合板的分类及发展概况

纤维金属层合板由金属和纤维增强树脂复合材料

组合而成, 文献 [4] 根据金属层材料的种类不同将纤维金属层合板分为铝合金层合板、钛合金层合板和镁合金层合板等。也有研究者根据纤维增强树脂复合材料层中基体的不同, 将 FMLs 材料分为热固性 FMLs 材料和热塑性 FMLs 材料两大类^[7]。在实际应用中, 研究者更倾向于按照增强纤维和金属的组合类别划分, 如芳纶纤维增强铝合金层合板 (Armaid Reinforced Aluminum Laminates, 简称 ARALL)、玻璃纤维增强铝合金层合板 (Glass Reinforced Aluminum Laminates, 简称 GLARE)、碳纤维增强铝合金层合板 (Carbon Reinforced Aluminum Laminates, 简称 CARE) 和碳纤维增强钛合金层板 (Titanium/graphite Hybrid Laminates, 简称 TiGr) 等类别。

纤维金属层合板材料是在 19 世纪 70 年代末, 由荷兰 Delft 工业大学率先提出的^[1]。当时, 研究工作主要围绕芳纶纤维增强铝合金层合板进行, 故 ARALL 也被称为第一代 FMLs 材料。研究发现^[3], 一方面, 由于芳纶纤维表面高度结晶, 活性基团少, 使得它与环氧树脂基体的界面结合强度较低, 这导致 ARALL 的力学性能特别是压缩性能较差。另一方面, 由于芳纶纤维和铝合金两者的热膨胀系数相差很大 (铝合金的热膨胀系数约为 $23.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 芳纶纤维预浸料的纵向热膨胀系数约为 $-2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), 导致层合板固化后会存在较高的残余应

力,影响整体性能。因此,ARALL的应用范围受到了限制。

为了解决ARALL存在的问题,1989年设计者用玻璃纤维取代了芳纶纤维开发出第二代FMLs材料,即GLARE。研究发现^[1,5],GLARE同ARALL相比,不仅残余应力状态大为改观,而且提高了材料的压缩性能和冲击性能,降低了材料的吸湿性,因此大大拓展它的使用范围。GLARE是目前使用范围最广、使用量最大的FMLs材料。A380机身上使用的GLARE达机体结构重量的3%,使用面积500m²左右。由于GLARE密度比铝合金小,A380全机总共减重约800kg,同时疲劳寿命提高10~15倍^[5]。

为了进一步获得高模量和高强度的FMLs材料,继GLARE之后研究者把注意力转向了碳纤维增强铝合金层合板。但是,研究发现,由于碳纤维(+0.28V_{SCE},饱和甘汞电极为参比电极)与铝合金(-1.57V_{SCE})之间的电位差较大,当两者复合后可能引发电偶腐蚀行为而加速层合板的腐蚀^[8],这也是CARE迄今无商业化应用的原因^[2]。据报道,未来超音速飞行器飞行时的表面温度可达177℃^[9]。目前,ARALL和GLARE的使用温度一般不能超过120℃。针对这一问题,20世纪末设计者将石墨纤维增强聚醚醚酮复合材料与钛合金复合成功研发出TiGr。由于TiGr适用于更高温度(177℃)环境,又具有更高强度和模量的特点,波音公司研制的梦想飞机787的主体结构(包括机翼蒙皮和发动机吊舱)上已采用这种层合板^[10],更大的应用是在正在发展的超音速飞机或武器上。

我国在纤维金属层合板材料设计,特别是制备和加工水平方面与国际先进水平相比差距很大。从20世纪80年代开始,我国的国防科技大学、中国科学技术大学、北京航空航天大学 and 北京航空材料研究院等高校和航空企业率先就ARALL进行过研究。目前,我国已完成了ARALL的研制,并在某型号飞机上装机批量使用,解决了原铝合金结构存在疲劳裂纹的问题。近年来,西北工业大学、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、成都飞机设计研究所、北京航空材料研究院、中国商飞北研中心和哈尔滨飞机工业集团有限责任公司等单位均开展了铝合金或钛合金与玻璃纤维或碳纤维增强复合材料混杂层合板材料的制作工艺和结构设计等方面的研究,并取得了重要的研究成果。

2 超轻纤维金属层合板的研究现状

2.1 铝锂合金层合板

目前,工程ARALL和GLARE中金属层材料主要为2024-T3和7075-T6(或7475-T6)铝合金。由于铝

锂合金具有较普通铝合金低的密度(2.60g/cm³左右)和高的拉伸模量(80GPa左右),从FMLs材料的减重性能和力学性能综合考虑,采用铝锂合金作为FMLs材料的金属层成为研究者关注的焦点之一。俄罗斯航空材料研究所Antipov等^[11-12]用0.4mm厚1441铝锂合金(Al-Cu-Mg-1.8Li)替代GLARE中相同厚度的2024铝合金后研究发现,层合板密度下降了6%左右,其值约为2.37g/cm³,且在低应力状态下两种层合板抗疲劳性能相当。但1441-FMLs的抗冲击性能稍低于GLARE。国内南京航空航天大学也开展了相关的研究工作^[13-15],采用0.3mm厚的铝锂合金(Al-Cu-Mg-0.7Li)作为层合板的金属层,与结构相同的GLARE对比研究发现,含铝锂合金层合板的静态拉伸强度和拉伸模量略高于GLARE且表现出更好的耐疲劳性能,但两者密度相近^[13]。上述研究表明,铝锂合金的使用对层合板的静、动态性能影响不大甚至略有提升,但对层合板密度的影响则取决于铝锂合金中锂元素的含量。

2.2 镁合金层合板

镁合金是结构材料中最轻的金属,它的密度约为1.78g/cm³,约是铝合金2/3。除此之外,镁合金还具有独特的抗电磁干扰和减振降噪等功能特性,特别是镁锂合金具有比普通镁合金更低的密度和更突出的功能特性^[16]。因此,采用镁合金代替铝合金作为FMLs金属铺层材料引起了研究者极大的兴趣^[17-24]。Pärnänen^[18]和Cortés等^[19]研究发现,用0.5mm厚的镁合金替代铝合金与玻璃纤维增强环氧树脂复合材料复合后,镁合金层合板的密度约为1.85g/cm³,较铝合金层合板降低了约25%。若使用密度更小的自增强聚丙烯(0.92g/cm³)作为复合材料层与镁合金复合,层合板的密度可进一步降低至1.24g/cm³左右,较相同复合材料层的铝合金层合板降低约20%^[20]。

在上述研究中,尽管采用镁合金替代铝合金可大幅度减低层合板的密度,但是镁合金层合板的比模量和比强度也均低于铝合金层合板(见表1),这使得降低密度毫无意义。按照复合材料的混合定律,要提高层合板的静态拉伸性能,一方面,可以通过提高复合材料层的模量;另一方面,可以通过提高镁合金层的模量。Cortés等^[19]将高模量的碳纤维增强树脂复合材料与AZ31镁合金复合后发现,纵向拉伸模量和强度分别约为45GPa和400MPa,与铺层结构相近的GLARE相比,该层合板的比模量更高。但是,其绝对模量和强度仍然低于GLARE(见表1),这不利于在航空、航天等对FMLs材料模量要求高的领域中的应用。北京航空航天大学轻合金实验室^[25]成功将高模量、高强度的碳纤维预浸料与镁合金复合,制备出了一种集结构/功能于一

体的超轻碳纤维镁合金层合板材料(见图2),其密度约为 $1.65\text{g}/\text{cm}^3$,且表现出优异的拉伸性能(拉伸强度约为 810MPa 、拉伸模量约为 82GPa)和弯曲性能(抗弯强度和模量分别约为 1300MPa 和 90GPa)。同时,北京航空航天大学轻合金实验室正在开展将超轻镁锂合金及其复合材料作为层合板金属层材料的研究,此类层合板的密度有望降低至 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 左右。

表1 镁合金层合板的密度及拉伸性能

层合板	密度 / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	拉伸 模量 /GPa	比模量 / ($10^3\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$)	抗拉 强度 /MPa	比强度 / ($10^3\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$)	比穿孔 能 / ($\text{J}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)
GFRP/AZ31 ^[16]	1.85	39.8	2.2	—	—	16.5
GFRP/2024 ^[16]	2.44	56.2	2.3	—	—	16.6
SRPP/AZ31 ^[18]	1.24	15.7	1.3	149	1.2	15.0
SRPP/2024 ^[18]	1.57	21.5	1.4	211	1.3	33.0
CFRP/AZ31 ^[17]	1.75	45.0	2.6	400	2.3	—
GLARE5 ^[5]	2.40	59.0	2.4	683	2.8	—

注: GFRP 为玻璃纤维增强聚合物; SRPP 为自增强聚丙烯; GLARE 为玻璃纤维增强铝合金层合板; AZ31 为镁铝合金; 2024 为铝铜合金。

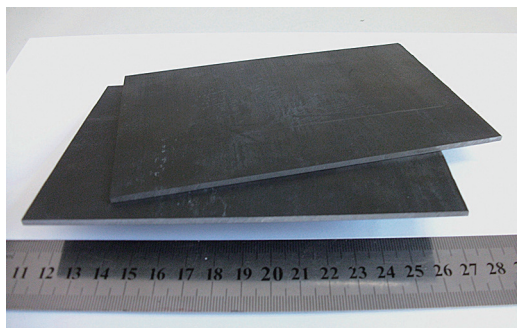


图2 碳纤维镁合金层合板样品图

Fig.2 Photo of carbon fibre reinforced epoxy/magnesium alloys hybrid laminates

在抗冲击性能研究方面,研究结果表明采用镁合金后 FMLs 的抗冲击性能并没有比采用铝合金时得到明显增强^[20]。因此,研究者常采用比穿透能表征两种层合板的抗冲击性能。Múgica 等^[20]对采用镁合金(AZ31B-H24)与自增强聚丙烯复合材料制成的 FMLs 和铝合金(2024-T3)作为金属层的 FMLs 进行了对比冲击试验后发现,采用镁合金后 FMLs 的比穿透能小于铝合金的 FMLs。Pärnänen 等^[18]对分别采用 AZ31B-H24 镁合金、2024-T3 铝合金作为金属铺层的两种 FMLs 进行低速冲击试验,结果表明采用铝合金的 FMLs 的比穿透能与采用镁合金的 FMLs 相当。可见,镁合金层合板与铝合金层合板之间的比穿透能的差异,会随着复合材料层模量的增加而减小。

碳纤维层与镁合金层之间的化学相容性也是该类层合板研究过程中需要考虑的主要问题之一。北京航空航天大学轻合金实验室率先对碳纤维镁合金层合板的腐蚀行为进行了研究,发现采用微弧氧化技术在镁合金表面制备一层绝缘膜能有效抑制它与碳纤维复合材料间的电偶腐蚀行为,同时该膜层的多孔性有利于聚合物的渗入,从而保证层合板具有较高的层间剪切和剥离等综合力学性能^[26-27]。

3 展望

纤维金属层合板材料可提供优异的抗疲劳性能、抗冲击性能和耐腐蚀性能等综合性能,且可以满足结构设计在减重方面的需求,此外金属材料和纤维增强树脂复合材料的多样性为层合板体系设计提供了丰富的可选资源。因此,纤维金属层合板材料在航空航天领域的应用前景将更为广阔,而且还可能向防弹装甲、船舶和汽车等领域拓展。为了满足纤维金属层合板在不同工况条件下的应用,以下问题特别值得关注。

(1) 制备工艺问题。

纤维金属层合板是由经过表面处理的金属薄板和纤维/树脂预浸料交替铺层,加热加压固化制成,因此制备工艺过程主要包括纤维预浸料和金属薄板的制备、金属表面处理和热压固化等阶段。其中,纤维预浸料和薄金属板的制备工艺已经较为成熟。目前,关于层合板的制备方法和工艺研究主要体现在金属层材料的表面处理^[4]。不同的表面处理状态可引发不同的界面性能,从而决定层合板性能的发挥。因此,对纤维复合材料/金属界面物理化学特性如微观和亚微观的形貌结构、羟基化学基团含量等,以及界面结合状态如界面组织结构、表面化学反应状况等要素的认识是研究中首要解决的关键科学问题之一。

(2) 结构设计问题。

不同载荷作用下层合板的结构设计和优化一直是科研者研究的主要内容之一^[28],其结构设计涉及层合板的铺设层数和顺序、组分材料层厚度以及纤维铺设方向等参数。特别是对新型的碳纤维增强镁合金层合板而言,由于金属层模量比复合材料层模量更低,因此需要重新考虑组分材料的组合设计,这涉及组分材料特性以及结构特征对层合板力学行为的影响和作用机制。除了试验手段以外,近期以有限元为代表的数值模型发展迅速,其在用于模拟纤维金属层合板的抗冲击特性以及分析层合板的失效机制等方面正发挥着越来越重要的作用,并已成为研究层合板性能和机理的一种重要手段。

(3) 加工问题。

纤维金属层合板在应用中不可避免涉及机械连接,如铆接和螺栓连接等^[29-30]。因此,切削和钻孔等加工设备和刀具的选择也要引起足够注意,甚至加工时的排屑问题和加工后的修磨边缘都应给予重视,寻求市场上专业供应商的合作很重要。

参考文献

- [1] VLOT A, GUNINK J W. Fibre metal laminates—An introduction [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] 王永贵,梁宪珠,曹正华. 维金属层板技术与大型飞机 [C]//第十八届玻璃钢/复合材料学术年会, 2010.
- WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua. Fiber metal laminates and its application in large airplane [C]//18th Academic Annual Meeting on FRP/Composite Material, 2010.
- [3] ASUNDI A, ALTA Y N. Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1-3): 384-394.
- [4] SINMAZÇELIK T, AVCU E, BORA M Ö, et al. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods[J]. Materials & Design, 2011, 32(7): 3671-3685.
- [5] WU G C, YANG J M. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures [J]. Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 2005, 57(1):72-79.
- [6] 陈琪,关志东,黎增山. GLARE 层板性能研究进展 [J]. 科技导报, 2013, 31(7): 50-57.
- CHEN Qi, GUAN Zhidong, LI Zengshan. Review of GLARE technology[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(7): 50-57.
- [7] ABDULLAH M R, CANTWELL W J. The impact resistance of polypropylene-based fibre-metal laminates[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(11-12): 1682-1693.
- [8] WANG W X, TAKAO Y, MATSUBARA T. Galvanic corrosion-resistant carbon fiber metal laminates [C]//16th International Conference on Composite Materials, 2007.
- [9] BURIANEK D A, SPEARING S M. Fatigue damage in titanium-graphite hybrid laminates [C]// The 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference Proceedings, 1980.
- [10] 吴志恩. 纤维金属层板在飞机制造中的应用及工艺性分析 [J]. 航空制造技术, 2013(1): 137-139.
- WU Zhien. Application and property analysis of fiber-metal laminate for aircraft manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(1): 137-139.
- [11] ANTIPOV V V, SENATOROVA O G, BEUMLER T, et al. Investigation of a new fibre metal laminate (FML) family on the base of Al-Li-alloy with lower density [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2012, 43(4): 350-355.
- [12] ANTIPOV V V. Efficient aluminum-lithium alloys 1441 and layered hybrid composites based on it [J]. Metallurgist, 2012, 56(5): 342-346.
- [13] LI H G, HU Y B, XU Y W, et al. Reinforcement effects of aluminum-lithium alloy on the mechanical properties of novel fiber metal laminate [J]. Composites Part B, 2015, 82: 72-77.
- [14] LI H G, HU Y B, LIU C, et al. The effect of thermal fatigue on the mechanical properties of the novel fiber metal laminates based on aluminum - lithium alloy [J]. Composites: Part A, 2016, 84: 36-42.
- [15] LI H G, HU Y B, FU X L, et al. Effect of adhesive quantity on failure behavior and mechanical properties of fiber metal laminates based on the aluminum - lithium alloy [J]. Composite Structures, 2016, 152: 687-692.
- [16] 王军武,刘旭贺,王飞超,等. 航空航天用高性能超轻镁锂合金 [J]. 军民两用技术与产品, 2013(6):21-24.
- WANG Junwu, LIU Xuhe, WANG Feichao, et al. High performance super light magnesium lithium alloy used in aerospace [J]. Dual Use Technologies & Products, 2013(6):21-24.
- [17] CORTÉS P, CANTWELL W J. The fracture properties of a fibre-metal laminate based on magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science, 2004, 37(3): 163-170.
- [18] PÄRNÄNEN T, ALDERLIESTEN R, RANS C, et al. Applicability of AZ31B-H24 magnesium in fibre metal laminates—an experimental impact research[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2012, 43(9): 1578-1586.
- [19] CORTÉS P, CANTWELL W J. The fracture properties of a fibre-metal laminate based on magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science, 2004, 37(3): 163-170.
- [20] MÚGICA J I, ARETXABAETA L, ULACIA I, et al. Impact characterization of thermoformable fibre metal laminates of 2024-T3 aluminium and AZ31B-H24 magnesium based on self-reinforced polypropylene[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 61(7): 67-75.
- [21] SADIGHI M, PÄRNÄNEN T, ALDERLIESTEN R C, et al. Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3): 545-559.
- [22] VASUMATHI M, MURALI V. Effect of alternate metals for use in natural fibre reinforced fibre metal laminates under bending, impact and axial loadings [J]. Procedia Engineering, 2013, 64: 562-570.
- [23] ASAEI Z, SHADLOU S, TAHERI F. Low - velocity impact response of fiber glass/magnesium FMLs with a new 3D fiberglass fabric [J]. Composite Structures, 2015, 122: 155-165.
- [24] ALDERLIESTEN R, RANS C, BENEDICTUS R. The applicability of magnesium based fibre metal laminates in aerospace structures [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 2983-2993.
- [25] PAN Y C, WU G Q, CHENG X, et al. Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP/magnesium alloys hybrid laminates [J]. Composite Interfaces, 2016, 23(5): 453-465.
- [26] PAN Y C, WU G Q, CHENG X, et al. Galvanic corrosion behaviour of carbon fibre reinforced polymer/magnesium alloys coupling[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 672-677.
- [27] PAN Y C, WU G Q, HUANG Z, et al. Corrosion behaviour of carbon fibre reinforced polymer/magnesium alloy hybrid laminates [J/OL]. [2016-11-22]Corrosion Science, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci>.
- [28] ŞEN I, ALDERLIESTEN R C, BENEDICTUS R. Lay-up optimisation of fibre metal laminates based on fatigue crack propagation and residual strength [J]. Composite Structures, 2015, 124: 77-87.
- [29] LIU D F, TANG Y J, CONG W L. A review of mechanical drilling for composite laminates [J]. Composite Structures, 2012, 94(4): 1265-1279.
- [30] OMANATH A P, YOGESH S G, ASIM T, et al. Analysis of hole quality in drilling GLARE fiber metal laminates [J]. Composite, 2015, 123: 350-365.

(责编 海山)