

http://pmse.scu.edu.cn

共固化阻尼薄膜夹嵌复合材料研究进展

肖亚梅^{1,2}, 梁森¹, 赵国群³

(1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛滨海学院 机电工程学院, 山东 青岛 266555;
3. 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:共固化阻尼薄膜夹嵌复合材料(CDCSVFE)具有高比刚度、比强度、大阻尼、较好层间结合力等优良性能被广泛应用。因此,近年来,采用实验探究、数值模拟及理论建模推导不同工艺、结构的CDCSVFE阻尼性能、动和静力学性能的研究成为热点,使得CDCSVFE工艺、结构优化及理论研究不断深入。文中重点回顾了CDCSVFE的工艺、结构及理论研究现状,包括阻尼层层数、厚度、环境及边界条件等因素对CDCSVFE阻尼性能、动和静力学性能的影响,并对目前最新CDCSVFE的制备工艺、结构及主要理论研究方法加以强调。最后提出CDCSVFE目前发展难点及未来的发展方向,为CDCSVFE从次承力件走向主要承载构件奠定基础。

关键词:共固化阻尼薄膜夹嵌复合材料;加工工艺;数值模拟;理论研究

中图分类号:TB334 文献标识码:A 文章编号:1000-7555(2025)01-0165-07

复合材料具有高比刚度和比强度,广泛应用于航空航天、汽车高铁、土木建筑等领域。相比于传统的金属材料,其阻尼性能要高出10~100倍,减振降噪性能得到提高,能够延长材料的疲劳寿命和抗冲击性能^[1,2]。但在一些应用领域中复合材料结构阻尼特性仍然较低,例如飞机机翼、风电叶片等构件承受复杂多变载荷时其对阻尼性能、结构刚度、层间结合性能等方面的要求很高。在保证复合材料良好力学性能的同时提高阻尼性能,延长结构承受循环载荷

及振动噪声的寿命成为研究关键问题。复合材料的可设计性为其阻尼性能及力学性能的提高提供了广阔空间。共固化阻尼薄膜夹嵌复合材料(Co-cured damping composite structures with visco-elastic film embedded, CDCSVFE)是将黏弹性材料、纤维增强材料、树脂基体通过物理及化学方法形成的三相固体复合结构,如图1所示,这种复合材料通过合理的组分和结构设计,能达到材质的优化配置,获得传统材料难以比拟的综合力学性能^[3-6]。因此,近年来关

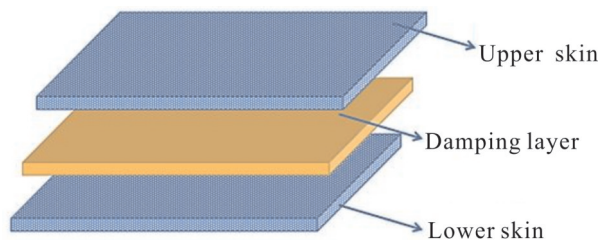


Fig. 1 Structure schematic diagram of CDCSVFE

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0005

收稿日期:2023-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52075280)

通讯联系人:梁森,主要从事复合材料力学研究,E-mail: liangsen888111@163.com

于CDCSVFE方面的探索成为学者们研究的热点。本文主要介绍了近年来CDCSVFE工艺探索、结构优化、理论研究等方面的最新进展、存在问题及未来的发展方向,为轻质、大阻尼、高刚度复合材料的开发及CDCSVFE更广泛的应用提供参考。

1 CDCSVFE 工艺探究

1.1 胶粘接固化工艺

传统的阻尼复合材料加工主要采用胶粘接固化工艺,即将已经硫化的高阻尼材料胶粘在复合材料的预浸料中,通过树脂的固化工艺,将基体材料与已经硫化的高阻尼材料胶粘成一体。Biggerstaff^[7]将已经硫化的阻尼材料嵌入石墨/环氧树脂基体进行固化加工成型,石墨/树脂基体固化过程中,阻尼材料与石墨/树脂基体相互作用导致其阻尼性能相比于阻尼材料本身有所下降。Pan等^[8]使用丁腈橡胶为阻尼材料,将胶黏剂(J67)涂抹到黏弹性材料上与复合材料预浸料黏合在一起,再与复合材料同时热压固化,研究了其阻尼特性及动、静力学性能。Tillman等^[9]研究了碳纤维增强环氧树脂基预浸料固化后,再与胶黏剂结合,其应变释放能GIC远低于共固化加工结构,原因在于固化后的复合材料与胶黏剂的相容性差,存在明显的界面,胶黏剂容易脱落,会降低结构的使用寿命。溴化丁基橡胶与石油树脂共混作为复合材料的阻尼层,基于阻尼层的自粘性,将阻尼层直接黏附在约束层间,通过动态力学分析仪DMA来表征三明治约束阻尼梁结构损耗因子随各种因素的变化^[10]。胶粘接固化工艺存在的问题是将已经硫化的阻尼材料与预浸料粘接后再进行固化,已经硫化的阻尼材料会出现老化失效的现象,降低复合材料整体的阻尼及力学特性。

1.2 共固化工艺

共固化加工是将未硫化的黏弹性材料溶于有机溶剂中,然后刷涂到未固化的复合材料预浸料上,再通过共同热压工艺形成CDCSVFE。树脂的固化时间和压力与黏弹性材料的硫化反应时间和压力一致,通过对温度和压力等工艺参数的探索,使得黏弹性材料在共固化过程中同时发生硫化,这样能够很好的避免已经硫化的黏弹性材料在共固化过程中发生老化失效等现象。与传统的加工工艺相比,共固

化加工工艺可以获得结构较好的层间结合性能。Zheng等^[11-16]研究了不同阻尼材料与纤维增强树脂基复合材料共固化加工,采用界面抗剪强度试验和微观结构分析对界面结合行为进行了实验研究。界面结合机理表明,共固化过程中阻尼材料和树脂基体材料形成了分子键的键合,界面出现互穿聚合物网络结构。同时,根据高分子聚合原理提出树脂与丁腈橡胶、溴化丁基橡胶及氟橡胶间的官能团发生了化学交联,在基体与阻尼层形成化学键的结合,大大提高了CDCSVFE的层间结合力及阻尼特性。Fig.2为树脂与橡胶化学键结合示意图。张忠胜等^[17,18]研究了嵌入高温、中温共固化复合材料阻尼结构制作工艺及层间结合性能,其采用的刷涂工艺能形成互穿网络结构,提高了复合材料结构的层间结合性能。Dhilipkumar等^[19-22]研究3种粘接技术对结构剪切强度和自由振动特性的影响。其中,共固化加工工艺提高了复合材料结构的固有频率,表现出良好的剪切性能。与胶粘接固化加工相比,共固化加工工艺具有提高复合材料层间结合力,提高复合材料阻尼特性的优点。因此,研究共固化加工工艺制备CDCSVFE成为目前先进复合材料的热点。

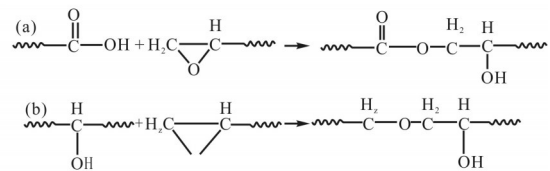


Fig. 2 Schematic diagram of chemical crosslinking reaction: (a) esterification reactions between functional groups and epoxy groups; (b) etherification reactions between functional groups and epoxy groups

2 CDCSVFE 结构优化

2.1 连续性CDCSVFE 结构

当单层黏弹性材料或阻尼材料比较薄时,与纤维增强树脂基复合材料共固化后,CDCSVFE 阻尼性能得到提高,且CDCSVFE 的刚度没有明显的下降。但是,嵌入单层黏弹性复合材料共固化后得到的CDCSVFE 阻尼性能的提高往往不能满足某些环境下对复合材料阻尼性能的要求。因此,Biggerstaff等^[7]使用碳纤维增强环氧树脂与多层黏弹性阻尼材料进行固化制得复合材料,发现多层阻尼材料与复合材料在固化过程中树脂与阻尼层相互作用,相互

渗透导致阻尼层发生变化。梁等^[23]提出新型多层阻尼薄膜嵌入的共固化复合材料结构,能够显著增加结构的一阶弯曲模态损耗因子,但是复合材料的刚度也有所下降。

2.2 穿孔CDCSVFE结构

为了减少共固化过程中阻尼层对结构造成的刚度损失,对连续性CDCSVFE结构进行优化,形成非连续性CDCSVFE,即当多层黏弹性材料与预浸料共固化前对其穿孔方式进行结合,实现获得大阻尼复合材料结构的同时尽可能的减少刚度损失。Robinson等^[24]提出共固化穿孔阻尼薄膜夹嵌复合材料结构,其阻尼层上有一系列小孔,以允许树脂流过阻尼层并完全湿润结构。实验制作、振动测试和刚度测试研究了孔直径和孔间距的影响。结果表明,阻尼和刚度对孔间距和孔尺寸非常敏感。梁森等^[25]提出一种嵌入式共固化穿孔阻尼复合材料的模压法制作工艺,将阻尼材料溶于有机溶剂中形成阻尼材料溶液,用刷子或喷枪或浸润工艺将该溶液刷在单层贫胶预浸料之上,待阻尼材料溶液中的有机溶剂挥发后,就得到带阻尼薄膜的贫胶预浸料,穿孔之后将其铺设于上、下部贫胶预浸料之中,保证阻尼薄膜的硫化温度和时间与树脂固化温度和时间一致。Fig.3为共固化穿孔阻尼结构示意图。穿孔CDCSVFE结构在共固化过程中,蒙皮中的树脂处于熔融态后贯穿阻尼薄膜中的小孔,形成类似钉状的局部耦连结构,称为“树脂钉”。树脂钉将上、下蒙皮牢固连接起来,在不降低复合材料阻尼特性的同时显著提高了结构的层间结合强度^[26]。

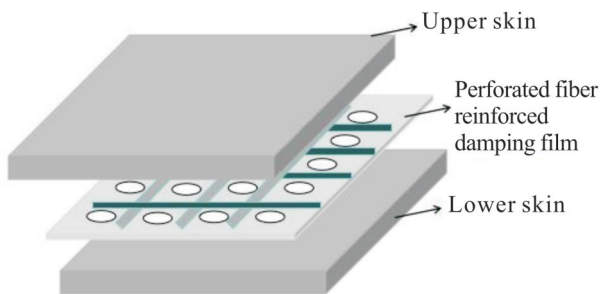


Fig. 3 Co-curing perforated damping structure

2.3 缝合CDCSVFE结构

相比于共固化穿孔CDCSVFE及网格CDCSVFE,缝合CDCSVFE具有更好的层间结合性

能。梁森等^[27,28]提出一种共固化缝合阻尼复合材料,即在连续性CDCSVFE的基础上,用编织纤维线对复合材料进行缝合后再进行共固化而成。共固化时蒙皮中的树脂熔融后会沿缝线贯通整个层合结构形成“复合钉”。与传统连续阻尼夹嵌复合材料结构相比,这些周围树脂裹着缝线的“复合钉”贯通了整个结构,使新结构具有三向力学性能可设计、阻尼高、层间结合性能强等优点。缝合后的复合材料进行共固化时,预浸料中的树脂会沿着缝线流动,待固化完成后,在复合材料板的法线方向上形成树脂和缝合材料的复合体,能有效增强复合材料的层间剪切强度。Fig.4为缝合CDCSVFE结构示意图。这种结构的层间结合力和抗弯刚度相比于连续性CDCSVFE更强,对其结构、力学性能及动力学性能研究的也比较广泛,成为阻尼薄膜夹嵌复合材料发展的必然趋势。

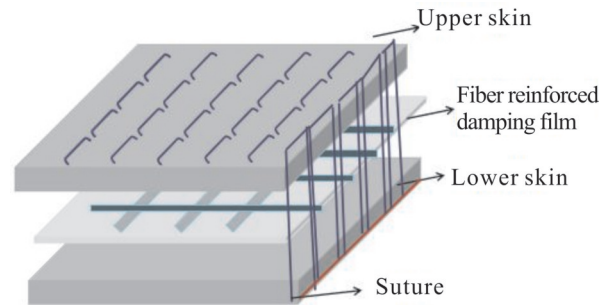


Fig. 4 Co-curing suture damping structure

3 CDCSVFE实验探究

Zheng等^[11-16]研究了4种不同厚度阻尼膜与玻璃纤维增强树脂基复合材料共固化加工的界面结合性,采用界面抗剪强度试验和微观结构分析对界面结合行为进行了实验研究。当阻尼层厚度为0.1 mm,试件的界面抗剪强度比传统的阻尼夹层复合材料提高了72.55%。闫盛宇^[29]通过自由衰减实验、层间剪切试验、拉伸试验研究发现,缝合的CDCSVFE阻尼层0.1 mm,缝合针距为8 mm时,层间结合强度可达到7.91 MPa,拉伸强度最高可达427.4 MPa,缝合针距为16 mm时阻尼比达2.92%。李雪^[30]通过弯曲试验研究了阻尼结构承载能力、弯曲刚度、最大弯曲挠度分别是无阻尼结构的14.8倍、4.5倍和3.0倍,提高了结构的刚度,增大了材料的承载能力。阻尼

层薄膜与复合材料产生化学交联反应方式与缝合形成“复合钉”的方式、阻尼层与复合材料层通过化学交联+穿孔形成“树脂钉”结合形成非连续性CDCSVFE结构,其在材料阻尼提高的同时结构的刚度损耗较少。目前,关于湿热环境中CDCSVFE结构的阻尼性能随温度的变化规律及力学性能有一定的研究,但是对于动静力学实验及理论研究比较缺乏,制约了其在更多工程领域中的应用。

大部分对CDCSVFE性能的研究都是在常温环境中。然而,CDCSVFE结构常常在高温、高湿及多变载荷环境服役。因此,研究CDCSVFE在高温、高湿环境中的阻尼性能及动静力学性能至关重要。付小静等^[31]研究了湿热环境中连续性CDCSVFE的阻尼性能,随温度升高复合材料阻尼系数先减小后增大,在湿热耦合作用下,温度提高,湿度越大,阻尼层越厚,相对阻尼系数增大的速度越大。原因在于当温度低于30℃,黏弹性材料的阻尼性能起决定性作用,当温度高于30℃时,纯复合材料阻尼性能在复合材料中起决定性作用,导致复合材料的阻尼性能随着温度的升高而增加。

4 CDCSVFE 数值模拟

4.1 连续性CDCSVFE 结构数值模拟

在研究CDCSVFE结构实际服役过程中阻尼及动力学特性时,通过实验探究验证往往成本高、耗时长。因此,通过数值模拟技术对结构实际服役环境进行模拟计算是结构设计必不可少的手段。CDCSVFE结构动力学特性研究主要集中在阻尼层位置、层数及阻尼层的黏弹特性对复合材料结构的动静力学的影响。通常采用实验法、有限元数值分析及理论研究相结合,互相印证。实验方面主要采用锤击法模态分析结合数值模拟技术分析不同阻尼复合材料动力学特性。文献设计了CDCSVFE的仪表盘,将模态实验和数值模拟相结合对多层仪表板的动力学行为进行研究^[32]。杨功先等^[33]和Mi等^[34]采用模态应变能法研究了嵌入式共固化复合阻尼结构的模态损耗系数,并将仿真结果与实验数据进行了比较,详细研究了阻尼层的厚度、数量和位置对共固化阻尼薄膜夹嵌复合材料阻尼性能的影响。王绍清等^[35,36]基于有限元的模态应变能法探讨了边界条

件对单层连续阻尼结构和多层连续阻尼结构阻尼性能的影响,同时研究了一短边固支的单层连续阻尼结构模态损耗因子随阻尼层厚度变化的规律并计算了双层阻尼薄膜嵌入的四边简支夹芯板的固有频率和损耗因子。

4.2 非连续性CDCSVFE 结构数值模拟

王辉等^[37]利用ANSYS建立了共固化穿孔阻尼薄膜夹嵌复合阻尼材料板的静力学模型,采用数值模拟方法分析了板的面内等效弹性参数随穿孔参数的变化规律,增大穿孔阻尼层厚度和阻尼层穿孔孔径、减小阻尼层穿孔孔距,均有利于增大剪切模量。Hwang等^[38]对非连续性纤维复合材料中的阻尼采用有限元模态应变能法研究了其阻尼性能。文献通过自由衰减试验研究了夹嵌在复合材料中的阻尼层厚度及缝合共固化阻尼材料缝合针距对复合材料阻尼性能的影响^[39]。利用数值模拟方法研究了阻尼层厚度为0.1 mm时非连续共固化缝合阻尼复合材料一阶模态频率、二阶模态频率、三阶模态频率和模态阻尼的变化,通过与模态试验结果对比,验证了数值模拟模型的有效性。王绍清等^[35]利用模态应变能法探讨了边界条件对单层连续阻尼结构和多层连续阻尼结构阻尼性能的影响。

综上所述,研究CDCSVFE的动力学性能和静力学性能等相关性能可设计的特性,通常采用有限元模态应变能的方法以及模态测试实验相结合模拟和实验得到结构的损耗因子和固有频率,探讨了黏弹性阻尼层厚度、位置等因素对结构的损耗因子的影响,为大阻尼层间结合性能更好的复合材料结构设计提供了理论支撑。

5 CDCSVFE 理论研究

关于连续性和非连续性CDCSVFE工艺探索、结构优化和性能研究采用实验和数值模拟方法已经比较广泛,其在理论方面也有一定的研究。Yang等^[39]研究了共固化多层阻尼夹嵌薄膜复合材料固支梁的自由振动特性,得到黏弹性阻尼层厚度与总厚度之比(H_0/H)为0.5及梁长度与总厚度之比(a/H)越大得到的最大损耗因子,将理论解与模拟结果对比,验证了理论解的有效性。Yuan等^[40]利用胞元法研究了穿孔CDCSVFE的弹性参数及动力学特性。

Zhai 等^[41]基于一阶剪切变形理论和 Hamilton 原理, 推导了 CDCSVFE 梁、单层阻尼薄膜、2 层阻尼薄膜夹嵌复合材料梁、板及双曲壳的动力学特性, 利用变分原理和伽辽金法推导并求解出在固支边界条件下的自由振动特性理论解。综上所述, 关于 CDCSVFE 结构理论研究主要基于结构的几何方程、本构关系、一阶剪切变形理论、分段位移折线理论、变分原理及哈密顿原理等构建 CDCSVFE 理论模型, 然后利用变分法、伽辽金等方法对理论模型求解, 将理论解与数值仿真结果进行对比, 验证了理论模型和理论方法的有效性。

6 总结与展望

本文综述了近年来关于连续性和非连续性 CDCSVFE 的研究进展, 包括复合材料层间结合力的工艺探究, 力学特性及动力学在实验、数值模拟以及理论方面的研究, CDCSVFE 动力学研究以及涉及到的主要研究方法、存在问题。

存在问题: 目前对连续性 & 非连续性 CDCSVFE 阻尼特性及动、静力学性能研究, 还只是在简单的环境中进行, 在复杂交变载荷及严苛环境多重因素耦合作用下连续和非连续 CDCSVFE 的力学性能、稳定性、阻尼特性及动力学行为还有待深入研究。除此之外, 关于此结构的大挠度实验、数值分析及理论缺乏深入研究, 共固化复合材料的设计参数如何确定, 结构的几何非线性是需要进一步研究的问题。对于以上问题的深入探究能够为 CDCSVFE 更广泛的应用奠定基础。

参考文献:

- [1] Finegan I C, Gibson R F. Recent research on enhancement of damping in polymer composites[J]. *Composite Structures*, 1999, 44: 89-98.
- [2] Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41: 143-151.
- [3] 倪楠楠, 温月芳, 贺德龙, 等. 无纺布插层共固化双马树脂基复合材料的力学和阻尼性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(5): 75-80.
Ni N N, Wen Y F, He D L, *et al.* Mechanical and damping properties of bismaleimide resin co-cured composite with nonwoven fabrics[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2016, 32(5): 75-80.
- [4] 梁森, 梁磊, 米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构的新进展[J]. *应用力学学报*, 2010, 27(4): 767-771.
Liang S, Liang L, Mi P. Process on embedded and co-cured composite damping structure[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2010, 27(4): 767-771.
- [5] Fotsing E R, Sola M, Ross A, *et al.* Light weight damping of composite sandwich beams: experimental analysis[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 47: 1501-1511.
- [6] Napolitano K L, Kosmatka J B. Co-cured extension-twist coupled damped composite structure[J]. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32: 1914-1932.
- [7] Biggerstaff J M. *Vibrational damping of composite materials*[D]. San Diego: University of California, 2006.
- [8] Pan L, Zhang B. A new method for the determination of damping in co-cured composite laminates with embedded viscoelastic layer [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2009, 319: 822-831.
- [9] Tillman M S, Hayes B S, Seferis J C. Influence of substrate - adhesive resin compatibility on the fracture properties of composite bonds[C]. *International SAMPE Symposium and Exhibition*, 2001.
- [10] 李聪, 吴国章, 曹德明, 等. BIIR/P70 共混物为夹层的三明治梁阻尼行为的 DMA 表征[J]. *高分子材料科学与工程*, 2009, 25(1): 122-125.
Li C, Wu G Z, Cao D M, *et al.* DMA Characterization of the damping behavior of sandwich beam laminated with BIIR/petroleum resins blends[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2009, 25(1): 122-125.
- [11] Zheng C, Liang S. Improving interfacial shear strength of co-cured sandwich composites by designing novel damping layer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 854: 157175.
- [12] Zheng C, Wang S, Liang S. Interface bonding mechanisms of co-cured damping carbon fiber reinforced epoxy matrix composites [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 822: 153739.
- [13] Zheng C S, Liang S. Fabrication and investigation on damping performance of novel co-curing sandwich composites[J]. *Polymer Composites* 2020, 41: 5116-5125.
- [14] Zheng C, Duan F, Liang S. Manufacturing and mechanical performance of novel epoxy resin matrix carbon fiber reinforced damping composites[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113099.
- [15] Zheng C, Liang S. Preparation and damping properties of medium-temperature co-cured phenolic resin matrix composite structures[J]. *Composite Structures*, 2019, 217: 122-129.
- [16] 郑长升, 梁森. 中温共固化阻尼复合材料制备及层间结合性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(6): 63-69.
Zheng C S, Liang S. Preparation and interlayer bonding performance of medium-temperature co-cured damping

- composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2009, 25(1): 122-125.
- [17] 张忠胜, 梁森. 嵌入式高温共固化复合材料阻尼结构层间结合性能[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(4): 185-191.
Zhang Z S, Liang S. Interlaminar bonding property of embedded high-temperature co-cured composite damping structure[J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2019, 217(1): 122-129.
- [18] 张忠胜, 梁森. 嵌入式中温共固化复合材料阻尼结构制作工艺及层间结合性能[J]. *航空学报*, 2013, 34(8): 1972-1979.
Zhang Z S, Ling S. Manufacturing process and interlaminar bonding property of embedded medium temperature co-cured composite material damping structure[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(8): 1972-1979.
- [19] Dhilipkumar T, Rajesh M. Influence of glass fibre reinforced polymer composite pin reinforcement on shear and dynamic behaviour of composite joint manufactured through co-cure technique[J]. *Journal of Composite Materials*, 2022, 56: 1799-1809.
- [20] Dhilipkumar T, Rajesh M. Enhancing shear strength and structural stiffness of composite joint with carbon nanotube reinforced adhesive through co-bonding technique[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022, 36: 2143-2157.
- [21] Dhilipkumar T, Rajesh M. Enhancing strength and stiffness of composite joint through co-cure technique[J]. *Composites Communications*, 2021, 27: 100878.
- [22] Dhilipkumar T, Rajesh M. Effect of manufacturing processes and multi-walled carbon nanotube loading on mechanical and dynamic properties of glass fiber reinforced composites[J]. *Polymer Composites*, 2022, 439: 1772-1786.
- [23] 梁森, 李雪, 王东山, 等. 多层阻尼薄膜嵌入的共固化复合材料结构动力学性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1453-1460.
Liang S, Li X, Wang D S, *et al.* Dynamics property of co-cured composite structure with multilayer damping membranes embedded[J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2015, 32(5): 1453-1460.
- [24] Robinson M J, Kosmatka J B. Embedding viscoelastic damping materials in low-cost VARTM composite structures[C]. San Diego, California: SPIE, *Smart Structures and Materials: Damping and Isolation*, 2005, 5760: 349-360.
- [25] 梁森, 杨先锋, 古恒, 等. 嵌入式共固化穿孔阻尼复合材料的模压法制作工艺: 中国, 107283878A[P]. 2017-10-24.
- [26] Yuan L, Liang S. Free vibration analysis of embedded and co-cured perforated damping sandwich composite beam[J]. *Journal of Composite Materials*, 2021, 55: 2605-2615.
- [27] 闫盛宇, 梁森, 郑长升, 等. 嵌入式共固化缝合阻尼复合材料的力学性能[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(11): 96-100.
Yan S Y, Liang S, Zheng C S, *et al.* Mechanical properties of embedded co-cured stitched damping composite[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(11): 96-100.
- [28] 梁森, 闫盛宇, 陈新乐, 等. 共固化缝合阻尼复合材料的动力学性能[J]. *振动. 测试与诊断*, 2021, 41(5): 939-944.
Liang S, Yan C Y, Cheng X L, *et al.* Dynamic property of co-cured stitched damping composite structure[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(5): 939-944.
- [29] 闫盛宇. 嵌入式共固化缝合阻尼复合材料力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
Yan S Y. Study on mechanical properties of embedded co-cured stitched damping composite[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [30] 李雪. 嵌入式共固化阻尼复合材料结构力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
Li X. Study on the mechanical properties of the embedded co-cured damping composite structures[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015.
- [31] 付小静, 梁森, 梁天锡. 温湿效应下嵌入式共固化复合材料阻尼性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(12): 2781-2788.
Fu X J, Liang S, Liang T X, *et al.* Damping properties of embedded co-cured composites under the effect of heat and humidity[J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2016, 33(12): 2781-2788.
- [32] 梁森, 张术国, 梁天锡, 等. 大阻尼高比刚度复合材料仪表板结构设计及动态特性分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(26): 212-217.
Liang S, Zhang S G, Ling T X, *et al.* Structural design and dynamic characteristics of large damping and high specific stiffness composite panels[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(26): 212-217.
- [33] Yang G, Liang S, Zheng C, *et al.* Dynamic analysis of co-curing double-layer damping films embedded composite beam with fixed-support boundary[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236: 8890-8904.
- [34] Mi P, Liang S. A research on loss factor of embedded and co-cured composite damping structure[C]. *Advanced Materials Research*, 2012, 487: 593-597.
- [35] 王绍清, 郑长升, 梁森, 等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构的动力学性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2020, 38(2): 278-281.
Wang S Q, Zheng C S, Liang S, *et al.* Dynamic performance of embedded and co-cured composite damping structure[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2020, 38(2): 278-281.
- [36] 王绍清, 梁森, 刘鹏. 共固化双层阻尼薄膜复合材料结构的阻尼性能[J]. *振动, 测试与诊断*, 2021, 41(3): 547-551.
Wang S Q, Liang S, Liu P. Damping properties of co-cured

- composite structures with double-layer damping membranes embedded[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(3): 547-551.
- [37] 王辉, 梁森, 王常松. 嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构动力学性能分析[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(1): 187-193.
- Wang H, Liang S, Wang C S. Dynamic property analysis of the embedded co-cured perforated damping layer composite structure [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(1): 187-193.
- [38] Hwang S J, Gibson R F. Micromechanical modeling of damping in discontinuous fiber composites using a strain energy/finite element approach[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1987, 109: 47-52.
- [39] Yang G, Zheng C, Liang S, *et al.* Dynamic characteristics of carbon fiber reinforced and fixed supported composite beams with co-cured multilayered viscoelastic films[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023, 30: 3125-3140.
- [40] Yuan L, Liang S. Dynamic properties of composite panel sandwiched by a perforated fiber reinforced damping film[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43: 753-767.
- [41] Zhai Y, Ma J, Liang S. Dynamics properties of multi-layered composite sandwich doubly-curved shells[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113-142.

Progress in Research of Co-Cured Composite Structures with Visco-Elastic Film Embedded

Yamei Xiao^{1,2}, Sen Liang¹, Guoqun Zhao³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. School of Electrochemical Engineering, Qingdao Binhai University, Qingdao 266555, China; 3. School of Material Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

ABSTRACT: The co-cured damping composite structures with visco-elastic film embedded (CDCSVFE) with characteristics of high specific stiffness, specific strength, large damping, good interlayer bonding force and other excellent properties are widely used. Therefore, in recent years, CDCSVFE process exploration, structure optimization and theoretical research have become a hot research area. The damping properties research has become a hot topic and dynamics properties of CDCSVFE with different technology processes and structures were studied by numerical analysis, experimental exploration and theoretical derivation. This paper reviewed the current research status of CDCSVFE technology, structure and theory, including the influence of damping layer number, thickness and embedding mode, boundary conditions on the damping and dynamic properties of CDCSVFE, and emphasized the latest preparation process and main theoretical research methods of CDCSVFE. Finally, the present development difficulties and future development direction of CDCSVFE were put forward. It will lay the foundation for CDCSVFE to become a future main bearing part from a current secondary bearing part.

Keywords: CDCSVFE; processing technic; numerical simulation; theoretical research