

文章编号:1674-8190(2021)01-001-12

# 胶螺混合连接在复合材料结构中的研究进展

邹鹏<sup>1</sup>,倪迎鸽<sup>2</sup>,毕雪<sup>1</sup>,陈向明<sup>1</sup>

(1. 中国飞机强度研究所 全尺寸飞机结构静力/疲劳实验室, 西安 710065)

(2. 西安航空学院 飞行器学院, 西安 710077)

**摘要:** 复合材料胶螺混合连接由于同时具备螺栓连接和胶接的优点,在航空航天领域得到了广泛的关注。本文总结了国内外胶螺混合连接在复合材料结构中的研究进展。以均衡载荷分配、提高承载能力为目标,分别从复合材料修理与损伤容限、成型工艺与传力路径、参数影响与载荷分配、胶层剥离抑制与多钉载荷分配以及承载能力预测等方面介绍了胶螺混合连接结构的研究现状及相关成果,指出目前胶螺混合连接结构存在的问题以及可能的解决方案与发展方向,可为胶螺混合连接在复合材料结构中的进一步应用提供参考。

**关键词:** 复合材料;胶螺混合连接;载荷分配;承载能力

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Development on Bonded-bolted Hybrid Joint in Composite Structure

ZOU Peng<sup>1</sup>, NI Yingge<sup>2</sup>, BI Xue<sup>1</sup>, CHEN Xiangming<sup>1</sup>

(1. Full Scale Aircraft Structural Static/Fatigue Laboratory, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. School of Aircraft Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The composite bonded-bolted hybrid joint (BBHJ) is widely focused and developed in aerospace and aviation fields for its full consideration of advantages of bolt and bonded joint. In this review, the relative research development of this BBHJ in composite structures at home and abroad is thoroughly summarized. Focusing on enhancing load sharing and structure bearing ability, the research status, research development and related achievements are introduced from the aspects of composite repairing and damage tolerance, forming process and force-transferring route, parametric influence and load sharing, adhesive de-bonding inhibition and multi-bolt load sharing, and the bearing strength prediction. The existing problems, probable solutions and future developing direction of this joint style is further discussed in order to provide useful reference for the further application of BBHJ in composite structure.

**Key words:** composites; bonded-bolted hybrid joint; load sharing; structure bearing capability

收稿日期:2020-07-15; 修回日期:2020-10-21

基金项目:国家自然科学基金(52005458);航空科学基金(2018ZE23011)

通信作者:邹鹏, zoupeng\_0625@126.com

引用格式:邹鹏,倪迎鸽,毕雪,等. 胶螺混合连接在复合材料结构中的研究进展[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 1-12.

ZOU Peng, NI Yingge, BI Xue, et al. Research development on bonded-bolted hybrid joint in composite structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 1-12. (in Chinese)

## 0 引言

传统的复合材料连接方式主要有机械连接(螺栓、铆接等)、胶接连接、缝合连接以及 Z-Pin 连接等,其中胶接连接由于耐久性差,对湿热环境敏感且缺乏有效的无损检测技术等原因无法在飞机主承力结构中广泛使用<sup>[1-2]</sup>。而在胶接接头中增加机械连接形成混合连接形式,作为一种新的设计特性,可以在一定程度上提高接头承载能力,满足民用航空器适航需求<sup>[3]</sup>。N. Chowdhury<sup>[4]</sup>指出,胶螺混合连接结构中的螺栓连接一方面可以降低胶层的剥离应力,阻止裂纹扩展;另一方面相较于纯胶接结构,螺栓可以防止突然发生的灾难性失效,这对于很难检测到缺陷的连接区域具有重要意义。

围绕胶螺混合连接的研究,不论是用作修补,还是安全保障措施,最终均与结构承载有关。在胶螺混合连接中可以将机械连接看作是对胶接的加强,而理想的连接状态是胶层和螺栓同时承担载荷,并且在接头濒临破坏时,二者均达到极限强度,亦或胶接先达到极限载荷,而螺栓连接还能继续承载<sup>[5]</sup>。要达到这种状态,要求胶接与机械连接在变形上相协调,实现两种连接形式承载的合理高效分配。然而,由于接头形式刚度的差异,导致载荷无法同时传递到胶层和螺栓,造成非均衡化承载。研究表明,胶接和螺接二者载荷承担的同步性和均衡性对于保证结构承载能力十分重要。K. P. Raju、K. Bodjona 等<sup>[1,6]</sup>特别指出载荷的合理分配可以有效实现“Across the Board”的强度提升。然而在实际胶螺混合连接中很难做到二者同时承受较高载荷,通常是胶黏剂承担了大部分载荷,而螺栓仅起到了有限的辅助作用。因而改进承载机理,实现有效的载荷分配成为提高结构承载能力的关键<sup>[6]</sup>。此外 C. Bois 等<sup>[7]</sup>在其研究中也指出,对于混合连接接头的评估使用主要包括两个阶段:评估胶螺两种接头载荷传递的贡献分配值(即载荷分配)和预测相应接头的失效强度(即承载能力)。因此为了实现螺栓和胶接的载荷均衡化分配,提升二者同时承载的能力,需要开展大量的参数化研究工作,从材料参数、结构参数以及工艺参数等方面入手<sup>[8-13]</sup>,优化传力路径,提高结构承载性能,实现复合材料胶螺混合连接结构的推广应用。

本文针对胶螺混合连接结构的现状进行梳理,

并结合目前的最新研究进展,从复合材料修理与损伤容限、成型工艺与传力路径、参数影响与载荷分配、胶层剥离抑制与多钉载荷分配以及承载能力预测等方面进行了系统性分析与总结。

## 1 发展历程

到目前为止,对于胶接和机械连接接头的单独研究已经有五十多年的历史,相比之下混合连接的研究尚短。典型的螺栓连接结构、胶接结构以及胶螺混合连接结构如图 1 所示。航空行业中对于复合材料胶螺混合连接的研究最早起源于 L. J. Hart-Smith<sup>[14]</sup>于 20 世纪 80 年代的研究,其最初是作为保险性结构和修补使用,用以提高损伤容限<sup>[15-16]</sup>。随后在 20 世纪 90 年代中期由 S. C. Tan<sup>[17]</sup>和 M. Steward<sup>[18]</sup>针对该混合连接结构进一步开展了应用研究。在航空航天领域,一方面由于胶接损伤难以有效预测,工艺控制困难,导致其无法广泛应用于飞机结构中;另一方面,载荷主要由胶层承担,而螺栓起的作用有限,因此混合连接效率低,无法广泛应用。对于航天安全性能要求高的结构,在使用混合连接时,通常使用较长的搭接长度和特定模量的黏接剂以保证安全。实际上随着黏接剂材料的不断发展,国外许多研究者通过试验和理论预测发现,混合连接也可以有较好的连接性能,甚至在某些情形下,相较于传统连接,混合连接有更好的静强度和疲劳寿命。而在其他领域,混合连接也因其独特的性能及安全性而获得了广泛关注。黄文俊等<sup>[19]</sup>指出,复合材料混合连接结构的传力路径多,合理设计可以有效提高连接效率和载荷传递能力,并实现重量收益。

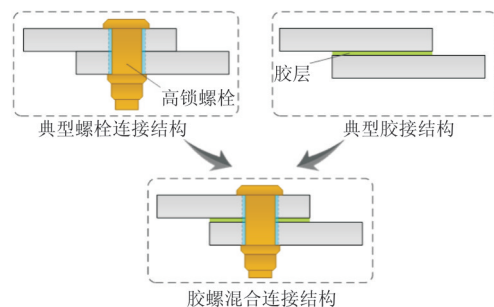


图 1 胶螺混合连接结构

Fig. 1 Bonded-bolted hybrid joint

对于传统的胶接接头,为了保证接头的性能,

一般需要采用以下三种措施:①采用“设计特征”来减小脱黏;②对于每一种胶接结构开展试验验证;③采用无损检测技术对接头进行检测以保证接头强度。然而实际上对每一种航空结构件都进行全尺度验证试验会产生巨大的费用,并且无损检测技术也无法准确预测接头强度。试图采用设计特征,减少脱黏层尺寸的增长则需要增加额外的裂纹抑制组件,增加了结构装配复杂性和结构质量。因而,在胶接接头中添加螺栓,形成混合接头,成为一种满足承载要求且较为经济的设计特征。研究表明,采用紧固件对胶接连接加强,一方面可以使胶层损伤的扩展被阻止或延缓,使抗剥离、抗冲击、抗疲劳和抗蠕变等性能提高<sup>[20-22]</sup>,另一方面相对于纯胶接结构,也存在可能带来应力集中的不利影响。但是,胶接和机械连接的应力集中出现在不同部位,对于胶接连接,应力集中发生在被胶接件胶层端部和附近的复合材料处;对于机械连接,应力集中则主要发生在孔附近<sup>[23]</sup>。而采用混合连接,反而使得被胶接件端部和孔周的局部应力集中均得到一定缓和,使其在接头强度、疲劳寿命和能量吸收等方面均具有一定的潜在优势<sup>[24-25]</sup>。此外 K. Bodjona 等<sup>[26]</sup>指出,现有复合材料结构中的许多螺栓接头从技术上讲都是混合连接,它们都包含一层垫片以填充由制造公差或误差引起的间隙,或者使用密封层来阻止微动磨损以及流体/微粒流入流出。但是,大多数螺栓连接分析都忽略了垫片/密封层,从而导致预测接头刚度准确度的降低,并且厚垫片/密封层还会由于增加了载荷偏心率,被黏物偏移变大造成螺栓倾斜等原因,导致接头强度下降<sup>[27-29]</sup>。

## 2 研究现状

### 2.1 复合材料修复与损伤容限

复合材料胶螺混合连接结构的应用起始于构件修补,提高损伤容限,因而相关研究者针对修复后的承载能力做了大量的试验和仿真工作。国外 L. J. Hart-Smith<sup>[15,30]</sup>认为鉴于无法有效解决载荷分配问题,复合材料混合连接的性能提升不大,但是对于修复损伤的胶接接头,限制损伤扩展具有重要作用。近年国内中国民航大学的学者在复合材料修复方面开展了针对性的研究<sup>[31-32]</sup>,徐航<sup>[31]</sup>分别介绍了胶接、铆接以及胶铆混合连接修复工艺的

相关理论,重点论述了阶梯型补片内贴补(如图 2 所示)的操作流程与优势,并通过 ANSYS 建模,对补片铺层进行了优化;王瑞峰<sup>[20]</sup>同样通过有限元模型,对比分析了楔形挖补情况下胶铆混合修理和胶接修理在受到拉伸载荷、垂直于板面均布载荷情况下的修理效果(如图 3 所示),认为修理件在受到以上两种载荷时,胶铆混合修理能够降低修理件应力集中系数,明显减少胶层所承受载荷。对大孔径损伤的修理,铆钉孔对结构静强度影响不大,但是对于小孔径损伤修理,胶铆混合修理的作用不再有效,反而会由于铆钉的开孔降低结构的静强度。因此在以上两种载荷作用下,胶铆混合修理更加适用于大损伤孔情况,对于小损伤孔,直接采用胶接修理是更好的选择。刘礼平等<sup>[32]</sup>则采用 ANSYS 对比分析了复合材料机身蒙皮胶接修理以及胶铆混合修理的应力分布与最大剥离应力,发现相较于单一胶接修理,胶铆混合修理的 Mises 应力和剥离应力均较小,且分布更为均匀,能够在使用过程中有效降低胶层的剥离破坏。

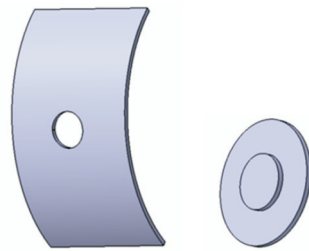
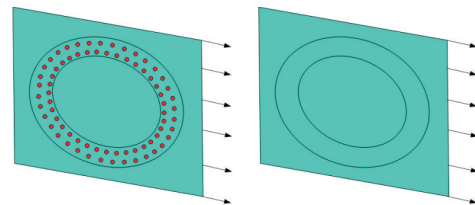
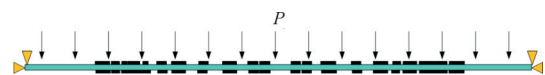


图 2 混合修理损伤去除与阶梯型补片示意图<sup>[31]</sup>

Fig. 2 The sketch of removed damaged material and stepped patch for hybrid repair<sup>[31]</sup>



(a) 拉伸载荷



(b) 垂直于板面均布载荷

图 3 楔形挖补修理受载情况<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Loading condition of wedged repair<sup>[20]</sup>



值得注意的是,由于修补场景的特殊需求,铆接<sup>[33]</sup>和埋头螺栓<sup>[34]</sup>是修理时重点考虑的形式。尽管铆接和埋头螺栓会在一定程度上降低螺栓连接的挤压强度,但是其可以减少表面突起,具有空气动力学优势,在气动外形要求严格的区域被广泛应用<sup>[35-36]</sup>。此外,相较于螺栓连接,尽管铆接能够提高效率,消除螺栓孔间隙,但是也要注意铆接过程不适当的工艺参数很容易损坏复合材料被黏物<sup>[37-41]</sup>。

## 2.2 成型工艺与传力路径

胶螺混合连接结构的成型工艺与传力路径是指由于胶层、螺栓连接各自的成型特点以及相互间的前后顺序导致的工艺顺序的差别以及由此造成的传力特性的不同。在成型工艺方面,目前胶螺混合连接接头主要有两种典型工艺(如图 4 所示):①在已固化的胶接接头上打孔,然后安装螺栓,并拧紧形成接头;②连接处预先制孔,然后涂胶,并安装拧紧螺栓,待胶层固化后形成接头。搭接区域的螺栓孔如果在黏接之前进行钻孔,则必须在固化过程中将销钉插入孔中以确保孔位对齐。因而除了改善接头性能外,在某些情况下采用混合连接接头的作用是在黏接结构固化时将其固定,从而方便后续加工制造。作为钻孔的替代方法,R. Matsuzaki 等<sup>[24]</sup>研究了纤维缠绕到螺栓周围的承载能力,以避免纤维端产生钻孔相关的损伤,研究发现虽然使用此技术未观察到静态强度的提高,但疲劳寿命有所改善。

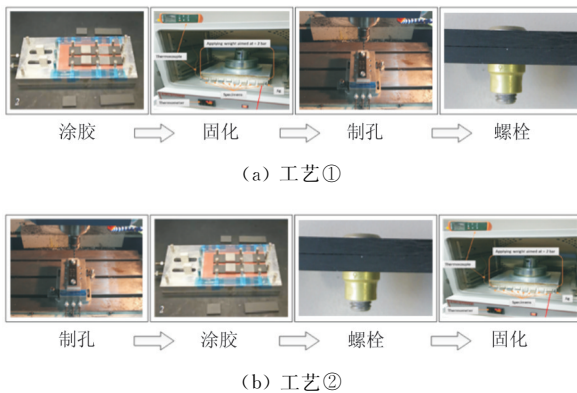


图 4 胶螺混合连接制作工艺

Fig. 4 Fabrication technical processes of bonded-bolted hybrid joint

马毓等<sup>[42-43]</sup>对比分析了双搭接接头两种混合

接头制作工艺,研究了二者承载变形过程中的传力机理和变形协调条件,并通过理论推导建立了各自承载能力的计算方法,通过试验验证了方法的准确性。研究中发现,采用工艺①制作的连接接头,由于螺栓与孔之间的配合间隙造成螺栓与胶层未直接接触,从而将接头传力及变形分为 3 个阶段:阶段 1,内外搭接板相对移动,胶层剪切变形承担载荷;阶段 2,内搭接板或外搭接板与螺栓接触,载荷由胶层和/或界面摩擦力承担;阶段 3,内、外搭接板均克服间隙接触螺栓,载荷由胶层和螺栓共同承担。采用工艺②制作接头时,承载过程较为简单,螺栓预紧力将迫使多余的胶黏剂填充螺栓与螺栓孔之间的配合间隙,使螺栓与胶层紧密相连,促使胶层和螺栓同时承载。在胶螺混合连接接头中,螺栓传递载荷可能包含两种方式:螺栓杆与孔之间的接触传递以及被黏物外表面与螺栓头/垫圈之间的摩擦力传递。K. Bodjona 等<sup>[13]</sup>认为前者更适合胶螺混合接头中大量载荷的传递;而后者可靠性较低,由于它依赖于螺栓预紧力,而承载能力会由于接头变形<sup>[44-45]</sup>以及复合材料的黏弹性蠕变逐步降低<sup>[46-48]</sup>。此外,黏合剂因预紧力作用而发生的蠕变也反过来会对螺栓预紧力造成影响。

王衔等<sup>[12]</sup>利用试验,研究拉伸载荷下双搭接复合材料板与钢板胶螺混合连接的性能,分析了该连接结构的极限承载能力、应变分布和破坏模式,同时考虑了制作工艺对混合连接的影响。结果表明:混合连接承载力稳定,两种工艺制作的固定尺寸的混合接头中,先胶接再钻孔的接头,在一定数量范围内,增加螺栓数会使承载能力上升,但过多使用螺栓承载能力反而下降;先钻孔再涂胶的接头螺栓和胶层协同工作性能好,但制作工艺要求更高。

此外,受胶接不同成型工艺的影响,混合连接接头也有一定区别。当共固化成型时,被黏物和接头是同时生产的。这种方法通常与湿法铺层结合使用,并用于制造复合材料与金属接合处<sup>[38]</sup>。另一种常见方法是二次黏接,这就要求任一复合材料被黏物都要事先固化。二次黏合允许在黏合之前对被黏物进行处理和检查<sup>[49]</sup>,并且在黏合过程中,使用黏合支架或垫片精确控制黏合层的厚度<sup>[50]</sup>。

## 2.3 参数影响与载荷分配

胶螺混合连接结构的载荷分配是指螺栓承担

的外部载荷与黏合剂承担的外部载荷的比例分配<sup>[13-14]</sup>。在载荷分配的参数影响方面,相关的研究较多,目前主要考虑的因素包括:胶黏剂属性、螺栓属性、被黏物属性等材料参数和胶层几何厚度、端头形式、拧紧力矩、搭接形式等设计参数<sup>[51-53]</sup>。

在材料参数方面,胶黏剂属性尤其值得关注。K. Bodjona 等<sup>[13]</sup>假设了接头双线性弹塑性黏合行为,使用傅立叶振幅灵敏度测试(FAST)定量确定了影响载荷分配最重要的参数是黏合剂屈服强度,而杨氏模量影响相对较小。而在另一项仅考虑线弹性材料行为的研究中,却认为黏合剂杨氏模量的影响最为强烈<sup>[54]</sup>。对比两项研究可以发现,材料力学行为对载荷分配的重要性。实际上外载荷的大小也会对材料行为产生重要影响,在更高的载荷下,影响大小的差异会变得更加明显<sup>[13]</sup>,这主要是与材料的非线性效应相关。黄文俊等<sup>[19]</sup>建立的胶螺混合连接损伤累积的三维有限元模型(如图 5 所示),其中复合材料由于设计需要,在端部有一垂直于板面的翻边,模型中考虑了胶层物理非线性和接触非线性等问题,分析了复合材料端头翻边、胶层厚度、胶层韧性以及接触面摩擦系数等因素的影响,发现端头翻边由于可以抑制端头的损伤扩展,提高局部刚度,因而可以明显提高结构的拉伸强度。韧性胶层同样也能够提高结构性能,但胶层厚度对结构的强度基本没有影响;螺钉杆与连接孔接触面间摩擦系数越大,连接结构的拉伸强度越高。

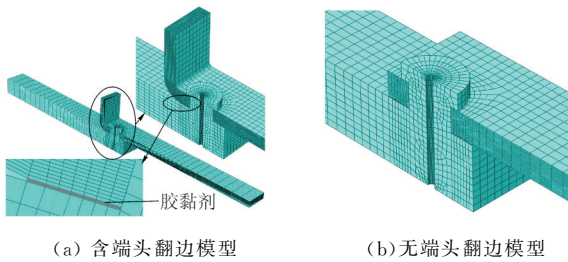
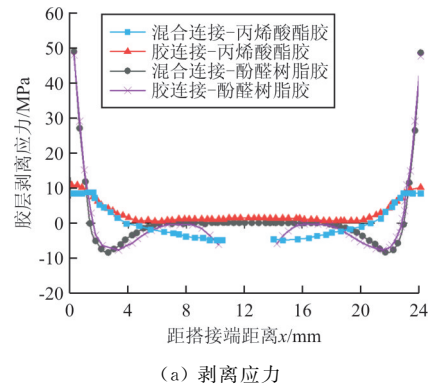


图 5 胶螺混合连接有限元模型<sup>[19]</sup>

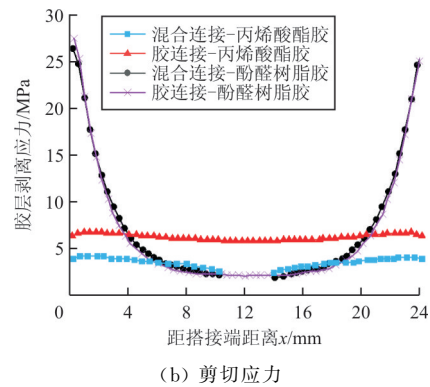
Fig. 5 Finite element model of bonded-bolted hybrid joint<sup>[19]</sup>

李成等<sup>[55]</sup>针对单搭接胶螺混合连接以及对应的胶连接、螺栓连接开展了对比研究,并且分析了两种不同弹性模量的胶材料对混合连接应力分布的影响(如图 6 所示),计算了混合连接胶层与螺栓的承载比例。研究发现,胶层的加入能够缓解连接

孔边应力集中,且低模量的胶黏剂可以促进胶层与螺栓的共同承载,从而达到比传统连接方式更好的承载性能。C. T. Hoang-Ngoc 等<sup>[56]</sup>、G. H. Lim 等<sup>[57-58]</sup>研究了柔性胶黏剂(低模量、大应变)对于混合连接接头载荷分配的影响;而 C. Bois 等<sup>[7]</sup>、G. Kelly<sup>[14]</sup>的研究表明,黏合剂的塑性行为会导致胶接接头有效刚度的降低,从而导致混合连接中螺栓承载能力的增加。



(a) 剥离应力



(b) 剪切应力

图 6 不同胶层材料混合连接与胶连接的胶层应力分布图<sup>[55]</sup>

Fig. 6 The adhesive stress distribution of hybrid and bonded joints for different adhesive materials<sup>[55]</sup>

几何参数同样会对承载分配产生影响。K. Bodjona 等<sup>[13]</sup>的研究表明:对于三种不同的外载荷水平,重叠长度始终是最大的影响,其次是黏合剂厚度和螺栓孔间隙,层合板的厚度和接头宽度的影响要小得多;而在 G. Kelly<sup>[8]</sup>的研究中,虽然改变层合板厚度对厚层压板影响相对较小,但对于非常薄的层压板却具有明显的影响;在 K. Bodjona 等<sup>[13]</sup>的研究中并未考虑过如此薄的厚度;B. Kumar 等<sup>[9]</sup>提出了一种添加薄板连接附属件的方式(如图 7 所示)来提供额外的载荷传递路径以提高

承载能力,该方式相较于传统的混合连接形式载荷提高 80% 以上,但是该结构增加了结构重量和安装复杂度;此外,袁辉等<sup>[59]</sup>针对胶层与螺栓可以协调变形的胶螺混合连接接头,通过理论分析与试验对比的方式,研究了多个参数对胶螺混合接头承载力的影响规律与机理,包括胶层厚度、螺栓位移、螺栓刚度等,结果表明:接头的破坏形式和承载能力受接头几何力学参数影响较大。

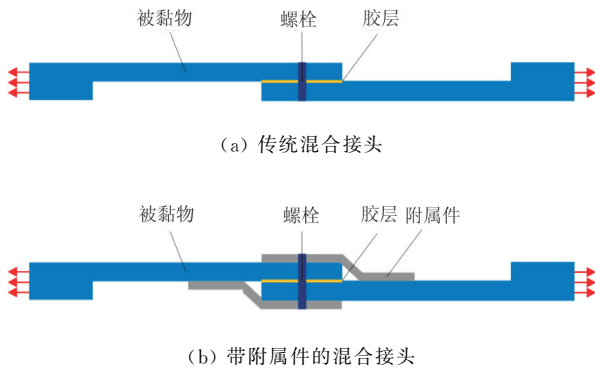


图 7 新型含附件的混合连接<sup>[9]</sup>  
Fig. 7 Hybrid joint with attachments<sup>[9]</sup>

对于胶螺混合结构,螺栓承载实验测量的准确性是验证载荷分配的关键手段<sup>[60-62]</sup>,但是在该方面的研究尚需进一步改进。许多研究人员使用自行设计加工的测量螺栓来测量拉伸载荷下单搭接接头的剪切载荷(如图 8 所示),螺栓载荷分配比例分别达到 32% (施加 8 kN 载荷时)和 36% (施加 10 kN 载荷时)<sup>[6,14]</sup>。在这两项研究中均使用单螺栓、短搭接、相对较厚的黏接线以及低屈服强度的韧性胶黏剂。相反,在另一份研究中,即使施加到 14 kN 的载荷时,长搭接的双排单搭接接头螺栓的载荷分配比例也低于 5%<sup>[54]</sup>。该研究使用了与 G. Kelly<sup>[14]</sup>相同的黏合剂和黏合层厚度。对比两项研究可知,几何参数和被黏物材料在载荷分配中的重要性。

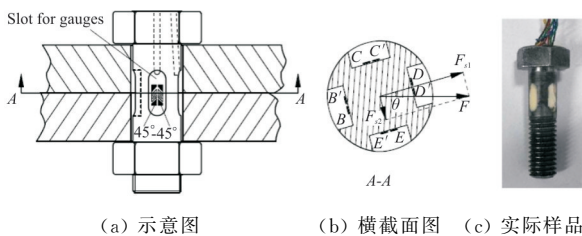


图 8 用于承载测量的定制螺栓<sup>[60]</sup>

Fig. 8 Instrumented bolt for load vector measurement<sup>[60]</sup>

## 2.4 胶层剥离抑制与多钉载荷分配

在胶螺混合连接领域,部分研究人员将注意力集中于胶层剥离机理及其抑制策略。常用的紧固件配置为单排单螺栓连接<sup>[63]</sup>,这种配置消除了许多复杂的影响和相互作用,能够有效获得影响接头性能的机理。但是,上述配置不能代表大多数实际的接头设计,实际上接头往往是多行多列的<sup>[64-65]</sup>。N. Chowdhury 等<sup>[66]</sup>采用了渐进损伤的方法,研究了复合材料胶铆混合连接中铆接阵列以及胶层缺陷对结构承载能力的影响,研究结果表明:第一行螺栓的位置决定着胶层裂纹扩展率,随着裂纹进入紧固件的夹紧区域,应变能释放率会急剧下降,导致裂纹扩展速率缓慢,从而提高了混合连接接头的抗疲劳能力;张明星<sup>[67]</sup>在对 T800 碳纤维复合材料多钉混合连接的钉载分布及破坏模式计算中发现:首末两排钉承担载荷最大,中间的钉载最小,模量相对较大的胶层阻止了钉载的有效传递,破坏模式主要为钉孔挤压和层合板拉伸破坏;陈向明等<sup>[68]</sup>通过对比单钉和双钉胶螺混合连接结构,发现相对于胶接结构,单钉混合连接结构的承载能力并不会明显提高。但是两钉胶螺混合连接中两螺栓外侧的胶层由于较大的面外力会很快发生破坏,而内侧的胶层由于螺栓的法向作用使其只受纯剪切力,从而提高了该区域胶层的承载能力。鉴于此结论,对混合连接构型进行了改进设计(如图 9 所示),将两螺栓外侧对结构承载能力影响不大的胶层去除,从而避免初始破坏,很好地提高了连接强度。

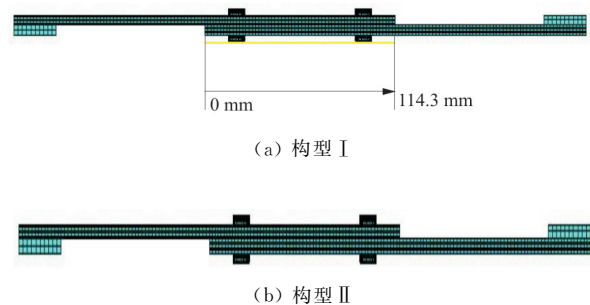


图 9 两种构型的胶-螺混合连接模型<sup>[68]</sup>  
Fig. 9 Two different bonded-bolted hybrid joints configurations<sup>[68]</sup>

由于螺栓扭矩拧紧而产生的预紧力会在螺栓头/垫圈下方的被黏物和胶黏剂中产生压缩应力<sup>[69-71]</sup>,这会阻碍裂纹的张开,从而减慢或阻止裂



纹的扩展<sup>[72-73]</sup>。螺栓预紧力作用下的接头压缩应力分布如图 10 所示,该载荷可以有效提高接头局部损伤抵抗能力,延长胶螺混合和螺栓连接的疲劳寿命<sup>[69-71]</sup>。并且这种提升在低振幅循环载荷下更为明显,这可能是由于螺栓张力松弛,导致在较高面内载荷下的预紧力削弱<sup>[45]</sup>。胶螺混合连接的载荷分配可以延迟疲劳裂纹的产生;一旦形成裂纹,螺栓预紧力作用可以减缓其扩展,从而改善胶螺混合连接结构的疲劳性能;螺栓张力松弛会减少预紧作用。此外 F. E. Goldarag 等<sup>[74]</sup>研究了混合连接接头在预紧力矩作用下的接头预紧力变化;S. Gomez 等<sup>[75]</sup>利用试验和有限元方法,研究了预紧力矩对混合连接接头疲劳寿命的影响,分析了不同预紧力矩和纵向载荷作用下的应力和应变分布,揭示了预紧力矩产生的侧向预紧力在疲劳寿命中的重要作用。

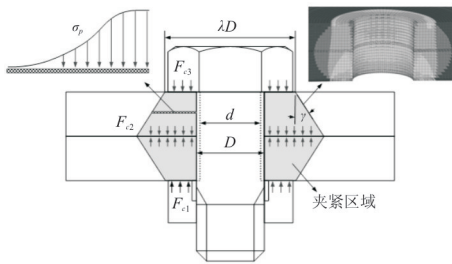


图 10 预紧力作用下的接头压缩应力<sup>[69]</sup>

Fig. 10 Compressive stress of joint under preload<sup>[69]</sup>

## 2.5 承载能力预测

在胶螺混合接头中,尽管黏接剂的硬度低于螺栓,但是黏结接头比相同尺寸的螺栓接头要坚硬得多<sup>[14,34]</sup>。这说明结构刚度是由材料和几何参数共同导致的<sup>[25]</sup>,在典型的胶螺混合接头线性加载期间,如图 11 中的原点和 A 点之间所示,这种刚度差异导致胶黏剂自身传递大部分载荷<sup>[25,34]</sup>。在该区域胶螺混合接头的刚度与胶接接头基本相同<sup>[14,24,76]</sup>。在较高的载荷下,胶黏剂的非线性行为(超弹性或塑性)则会降低黏接接头的刚度<sup>[7,54]</sup>。在此阶段,螺栓开始承担越来越大的载荷比例<sup>[6,14]</sup>,胶螺混合接头的刚度开始超过两种单独接头的刚度<sup>[8,14]</sup>。对于紧配合孔,一旦出现非线性黏接效应(图 11 中的 A 点)就会立即出现这种刚度增强效应。对于间隙配合孔,仅在黏合剂充分变形,克服螺栓孔间隙(图 11 中的点 B)或施加足够

的螺栓预紧力,允许载荷通过螺栓头的摩擦传递到螺栓,才发生这种增强效应。如果在加载过程中的任何阶段胶黏剂层发生严重失效,胶螺混合连接接头的承载将完全由螺栓承担,其载荷水平将突降至纯螺栓连接结构在该位移下能够承受的载荷大小(图 11 中的紧配合点 C 和间隙配合点 D)。随后,胶螺混合接头的行为类似于螺栓接头<sup>[77]</sup>。

另外,应该注意的是,许多胶螺混合接头使用的胶黏剂不会表现出明显的材料非线性<sup>[78]</sup>;使用的胶黏剂的破坏应变低<sup>[79]</sup>;黏接线很薄<sup>[80-81]</sup>(例如,共固化接头)。在这种情况下,胶螺混合接头的响应是准线性,直至胶黏剂破坏,类似于胶接接头,此时螺栓产生的刚度效应无法体现<sup>[24]</sup>。

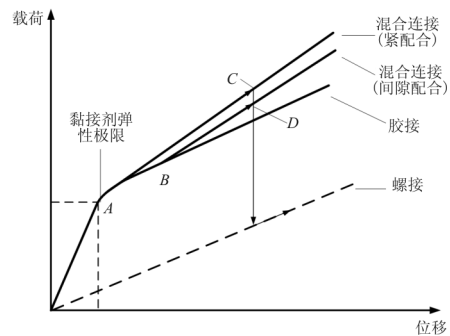


图 11 典型载荷—位移曲线

Fig. 11 Typical load-displacement curve

对于胶螺混合连接结构的研究,最终都会落在承载能力预测上<sup>[82-83]</sup>。除了上文提到的相关文献外,陈向明等<sup>[68]</sup>对复合材料胶铆单搭连接结构进行了试验研究与理论分析,采用弹簧阻尼模型,建立了混合连接结构拉伸强度的计算方法;N. Chowdhury 等<sup>[84]</sup>则主要针对胶铆混合连接加载过程中的损伤机理开展了研究,并进一步对比分析了不同连接形式以及不同预紧力作用下的承载能力;程小全等<sup>[85]</sup>针对平面编织复合材料单排胶螺混合连接结构拉伸性能进行了试验研究,研究发现:机械连接可以分担部分载荷,并强化胶接连接。但是二者的载荷传递机理存在很大不同,胶接主要是通过层间剪切传递载荷,而机械连接则是通过铺层的面内拉伸以及层间剪切传递载荷。只有将二者结合起来,综合考虑二者的承载机理才能提高传递载荷效果。Xu P 等<sup>[86-88]</sup>针对 GLARE 板的胶螺混合结构开展了解析模型、数值仿真和实验研究,建立了双弹簧解析模型,考虑了螺栓性能、胶黏剂刚度、

几个参数、螺栓孔间隙、被黏物属性、接触状况以及预紧力松弛等因素,发现螺栓孔间隙、被黏物几何参数以及胶层属性是三个主要的影响参数。而螺栓孔之间的紧配合同样会对承载能力造成影响,但是在这方面相关的研究较少<sup>[89]</sup>。

### 3 总结分析

胶螺混合连接结构的发展脉络与相关研究现状如图 12 所示。

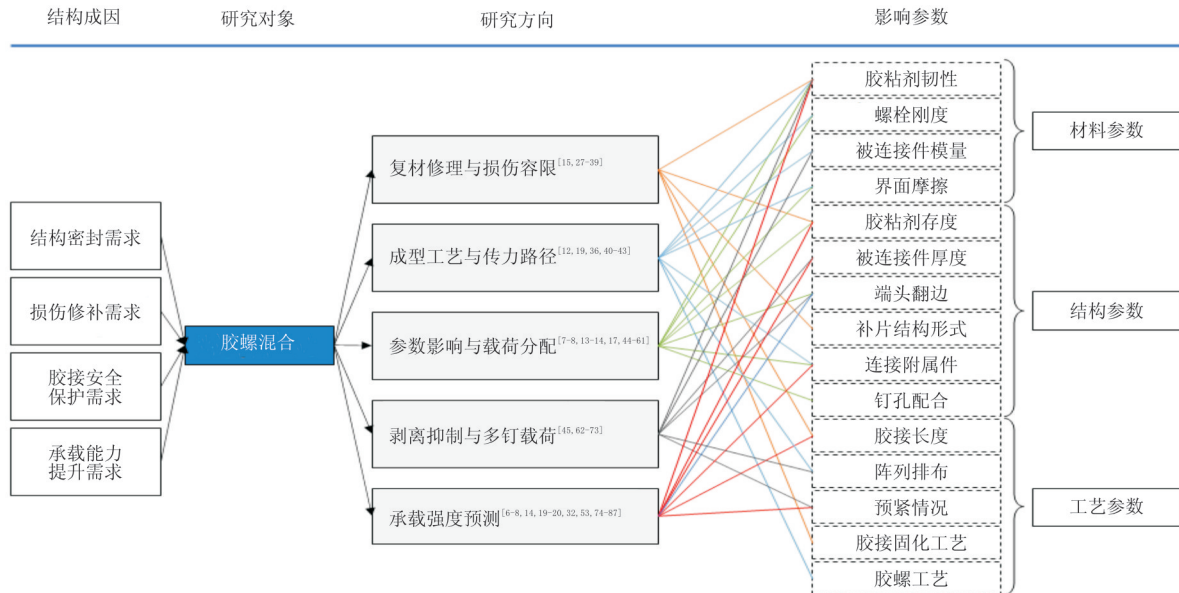


图 12 胶螺混合连接结构的发展脉络与研究现状

Fig. 12 Development context and research status of bonded-bolted hybrid joint structure

从图 12 可以看出:虽然研究方向侧重点各有不同,但是各研究点之间存在着紧密的联系,材料参数、结构参数以及工艺参数是影响结构性能的三个重要方向,因此对于胶螺混合连接问题需要综合考虑各种因素,确定最终效果。目前国内外对于胶螺混合连接结构的研究,已由作为保险性结构转移到提升承载能力,如何有效匹配两种连接形式的刚度,提高载荷分配的均衡性是贯穿混合连接研究的关键问题,也是难点问题。目前虽然从材料、结构以及工艺上提出了一些解决方案,但是存在重量、效率、尺寸限制等局限性。在设计允许的前提下,采用韧性胶黏剂、较长的搭接长度、螺钉杆与孔紧密接触以及采用合适的预紧力可以有效提高载荷分配比例。进一步地,在质量限制低的情况下,也可以通过端头翻边设计、适当增加钉载数量以及添加薄板连接附属件的方式大幅度提高结构承载能力。

### 4 研究展望

尽管在胶螺混合连接在复合材料修理与损伤容限、成型工艺与传力路径、参数影响与载荷分配、

胶层剥离抑制与多钉载荷分配以及承载强度承载能力预测等方向已经开展了大量研究工作,取得了大量研究成果,但是仍然存在以下问题亟须进一步探讨解决,包括以下 5 个方面:

(1) 现有的方法对于提升胶螺载荷分配的作用有限,因此有必要进一步研究新的结构形式,设法从根本上改变传统混合连接载荷传递机理,提升胶层和螺栓承载能力的同步性与均衡性。

(2) 针对胶螺混合多钉连接结构的研究相对较少,尤其在载荷传递机理方面,由于涉及到胶螺载荷传递和多螺栓载荷传递两种性质各异的载荷传递机理,因此需要开展进一步的研究,设法厘清二者的载荷传递机制及相互关系。

(3) 胶螺载荷分配的试验测量是研究的重点也是难点,现有的螺栓载荷测量设备多是基于应变测量的自制设备,缺乏统一的标准,精度也无法保证。因此,对胶螺载荷分配的试验测量也是值得关注的问题。

(4) 胶螺混合接头的优点之一,是能够大量吸收断裂过程中能量,这对于必须耗散大量能量的结



构很重要。然而,目前对于能量吸收机理的研究尚不明确,相关的文献并未对能量吸收做详细分析。

(5) 有效的强度预测方法是开展承载能力提升工作的基础。目前的强度预测方法大多是基于有限元方法和试验方法,但是在有限元方法中,渐进损伤的刚度折减方法尚未明确。因而,建立基于刚度折减的混合连接承载能力解析模型,对于提高计算准确性与效率具有重要意义。

## 5 结束语

本文分别从复材修理与损伤容限、成型工艺与传力路径、参数影响与载荷分配、胶层剥离抑制与多钉载荷分配以及承载能力预测等方向系统分析了目前国内外针对复合材料胶螺混合连接结构的研究现状,并进一步归纳总结了目前胶螺混合连接结构存在的问题以及可能的解决路径,为该结构的深入研究与广泛应用指明了方向。

### 参考文献

- [1] RAJU K P, BODJONA K, LIM G H, et al. Improving load sharing in hybrid bonded/bolted composite joints using an interference-fit bolt[J]. *Composite Structures*, 2016, 149: 329-338.
- [2] HU B, LI Y, JIANG Y T, et al. Bond behavior of hybrid FRP-to-steel joints[J]. *Composite Structures*, 2020, 237: 1-7.
- [3] LOPEZ-CRUZ P, LALIBERTÉ J, LESSARD L. Investigation of bolted/bonded composite joint behaviour using design of experiments[J]. *Composite Structures*, 2017, 170: 192-201.
- [4] CHOWDHURY N. Static and fatigue testing bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy laminates used on aircraft structures[J]. *Composite Structures*, 2016, 142: 96-106.
- [5] 丁玲. 全复合材料无人机机翼结构优化设计[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2014.  
DING Ling. Structure optimal design for all composite wings of an unmanned aerial vehicle [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2014. (in Chinese)
- [6] BODJONA K, RAJU K, LIM G H, et al. Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints-Part I: model development and validation[J]. *Composite Structures*, 2015, 129: 268-275.
- [7] BOIS C, WARGNIER H, WAHL J, et al. An analytical model for the strength prediction of hybrid (bonded/bolted) composite joints[J]. *Composite Structures*, 2013, 117: 354-361.
- [8] KELLY G. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints[J]. *Composite Structures*, 2006, 72: 119-129.
- [9] KUMAR B, SUN C T, WANG P H, et al. Adding additional load paths in a bonded/bolted hybrid joint[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(5): 1593-1598.
- [10] QIAN H, SUN C T. Performance of a composite double strap joint with attachments[C]//2004 ASTM International Joining and Repair of Composite Structures Conference. West Conshohocken, PA: ASTM, 2004: 55-66.
- [11] TURAGA U V R S, SUN C T. Improved design for metallic and composite single-lap joints[J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(2): 440-447.
- [12] 王衍, 陈涛, 张天骏. 碳纤维复合材料板与钢板胶-螺混合双搭接接头拉伸性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2014, 44(10): 3-4.  
WANG Xian, CHEN Tao, ZHANG Tianjun. Experimental study on tensile behavior of hybrid CFRP-steel double-lap joint using bolts and adhesive[J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(10): 3-4. (in Chinese)
- [13] BODJONA K, LESSARD L. Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints-Part II: global sensitivity analysis[J]. *Composite Structures*, 2015, 129: 276-283.
- [14] HART-SMITH L J. Bonded-bolted composite joints[J]. *Journal of Aircraft*, 1985, 22(11): 993-1000.
- [15] CHAN W S, VEDHAGIRI S. Analysis of composite bolted/bonded joints used in repairing[J]. *Journal of Composite Material*, 2001, 35(12): 1045-1061.
- [16] KELLY G. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints[J]. *Composite Structures*, 2005, 69: 35-43.
- [17] TAN S C. Evaluation of composite joints[R]. US: Dayton Research Institute, 1994.
- [18] STEWART M. An experimental investigation of composite bonded and/or bolted repairs using single lap joint designs [C]//38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. US: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997: 2752.
- [19] 黄文俊, 程小全, 武鹏飞, 等. 复合材料混合连接结构拉伸性能与影响因素分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(10): 1408-1413.  
HUANG Wenjun, CHENG Xiaoquan, WU Pengfei, et al. Analysis on tensile properties and influence factors of composite hybrid joints [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(10): 1408-1413. (in Chinese)
- [20] 王瑞峰. 复合材料胶铆混合连接与胶接修理的力学性能对比研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.  
WANG Ruifeng. A comparative study of mechanical property of bonded repair and adhesive-rivet hybrid repair of composite laminate[D]. Tianjin: Civil Aviation University

- of China, 2016. (in Chinese)
- [21] 徐建新, 于学民, 陈文俊, 等. 胶铆混合连接复合材料层合板结构的弹性分析[J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(6): 49-54.  
XU Jianxin, YU Xuemin, CHEN Wenjun, et al. Elastic analysis of composite laminated structure with adhesive-rivet hybrid joining[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(6): 49-54. (in Chinese)
- [22] 王毅, 冯宪章, 李磊, 等. 复合材料层合板二次共固化补强胶层失效分析研究[J]. 机械强度, 2012, 34(6): 862-867.  
WANG Yi, FENG Xianzhang, LI Lei, et al. Bonding adhesive damage study of the secondary cure reinforcement tensile experiment [J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(6): 862-867. (in Chinese)
- [23] SHISHESAZ M R, MOHAMMAD H. A review on stress distribution, strength and failure of bolted composite joints [J]. Applied and Computational Mechanics, 2018, 49: 415-429.
- [24] MATSUZAKI R, SHIBATA M, TODOROKI A. Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39: 154-163.
- [25] GRAHAM D, REZAI A, BAKER D, et al. The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 64: 11-24.
- [26] BODJONA K, LESSARD L. Hybrid bonded-fastened joints and their application in composite structures: a general review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016, 35(9): 764-781.
- [27] COMER A, DHOTE J, STANLEY W, et al. Thermo-mechanical fatigue analysis of liquid shim in mechanically fastened hybrid joints for aerospace applications[J]. Composite Structures, 2012, 94: 2181-2187.
- [28] HUHNE C, ZERBST A, KUHLMANN G, et al. Progressive damage analysis of composite bolted joints with liquid shim layers using constant and continuous degradation models[J]. Composite Structures, 2010, 92: 189-200.
- [29] ZHAI Y, LI D, WANG L. An experimental study on the effect of joining interface condition on bearing response of single-lap, countersunk composite-aluminum bolted joints [J]. Composite Structures, 2015, 134: 190-198.
- [30] HART-SMITH L J. Design methodology for bonded-bolted composite joints Vol. 1: analysis derivations and illustrative solution; AFWAL-TR-81-3154[R]. US; McDonnell Douglas Corporation, 1982.
- [31] 徐航. 复合材料胶铆混合修理优化设计[D]. 天津: 中国民航大学, 2015.  
XU Hang. Optimal design of composite material adhesive-rivet hybrid repair[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015. (in Chinese)
- [32] 刘礼平, 王瑞峰, 王博鳌, 等. 复合材料胶铆混合修理应力特性分析[J]. 航空维修与工程, 2015(7): 79-82.  
LIU Liping, WANG Ruifeng, WANG Boao, et al. Research on the stress characteristics of composite adhesive-rivet hybrid repair[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(7): 79-82. (in Chinese)
- [33] CHEN Y, YANG X, LI M, et al. Mechanical behavior and progressive failure analysis of riveted, bonded and hybrid joints with CFRP-aluminum dissimilar materials[J]. Thin Wall Structure, 2019, 139: 271-280.
- [34] LI G, CHEN J, YANISHESKY M, et al. Static strength of a composite butt joint configuration with different attachments[J]. Composite Structures, 2012, 94: 1736-1744.
- [35] HART-SMITH L. Mechanically-fastened joints for advanced composites phenomenological considerations and simple analyses[M]. New York, NY: Plenum Press, 1980: 543-574.
- [36] HART-SMITH L. The key to designing efficient bolted composite joints[J]. Composites, 1994, 25: 835-837.
- [37] CHOWDHURY N, CHIU W, WANG J, et al. Static and fatigue testing thin riveted, bonded and hybrid carbon fiber double lap joints used in aircraft structures[J]. Composite Structures, 2015, 121: 315-323.
- [38] FIORE V, ALAGNA F, GALTIERI G, et al. Effect of curing time on the performances of hybrid/mixed joints[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45: 911-918.
- [39] DI F G, FRATINI L, PASTA A. Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single lap joints between CFRP panels and aluminum blanks[J]. International Journal of Adhesion Adhesives, 2013, 41: 24-32.
- [40] MARANNANO G, ZUCCARELLO B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints [J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 71: 29-39.
- [41] CAMPBELL F C. Manufacturing technology for aerospace structural materials[M]. Oxford: Elsevier Science, 2006: 273-368.
- [42] 马毓, 江克斌, 赵启林. 制作工艺对复合材料胶-螺混合连接接头传力机理及承载力的影响分析[J]. 机械强度, 2011, 33(1): 99-105.  
MA Yu, JIANG Kebin, ZHAO Qilin. Analysis of the impact of the fabrication technical process on the load transfer mechanism and carrying capacity of the bonded-bolted hybrid composite joints [J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(1): 99-105. (in Chinese)
- [43] 马毓, 赵启林. 复合材料胶-螺混合连接接头承载力分析[J]. 复合材料学报, 2011, 28(4): 225-230.  
MA Yu, ZHAO Qilin. Analysis of the bonded-bolted hybrid composite joints' carrying capacity [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(4): 225-230. (in Chinese)
- [44] OSKOU EI R, CHAKHERLOU T. Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates[J]. Aerospace Science Technology, 2009, 13:

- 325-330.
- [45] CHAKHERLOU T, MIRZAJANZADEH H, VOGWELL J, et al. Investigation of the fatigue life and crack growth in torque tightened bolted joints[J]. *Aerospace Science Technology* 2011, 15: 304-313.
- [46] CHEN H. The static and fatigue strength of bolted joints in composites with hygrothermal cycling [J]. *Composite Structures*, 2001, 52: 295-306.
- [47] ASTM. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap joint laminated assemblies; D3165 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2014.
- [48] ASTM. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal): D1002-10 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2010.
- [49] BAKER A, KELLY D. Joining of composite structure [M]. 2nd ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [50] Da SILVA L F, DILLARD D A, BLACKMAN B, et al. Testing adhesive joints: best practices [M]. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2012: 125-145.
- [51] LEE Y, LIM D, CHOI J, et al. Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints[J]. *Composite Structures*, 2010, 92: 2916-2926.
- [52] SADOWSKI T, GOLEWSKI P, ZARZEKA-RACZKOWSKA E. Damage and failure processes of hybrid joints: adhesive bonded aluminum plates reinforced by rivets[J]. *Computational Materials Science*, 2010, 50: 1256-1262.
- [53] ESMAEILI F, ZEHSAZ M, CHAKHERLOU T N, et al. Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria[J]. *Materials & Design*, 2015, 67: 583-595.
- [54] PAROISSIEN E, SARTOR M, HUET J, et al. Hybrid (bolted/bonded) joints applied to aeronautic parts: analytical two-dimensional model of a single-lap joint[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(2): 573-582.
- [55] 李成, 朱红红, 铁瑛, 等. 单搭胶/螺栓混合连接结构的应力分布与载荷分配[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(4): 933-938.  
LI Cheng, ZHU Honghong, TIE Ying, et al. Stress distribution and load sharing in single-lap bonded/bolted joints [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(4): 933-938. (in Chinese)
- [56] HOANG-NGOC C T, PAROISSIEN E. Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive[J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2010, 30(3): 117-129.
- [57] LIM G H, HEIDARI-RARANI M, BODJONA K, et al. Mechanical characterization of a flexible epoxy adhesive for the design of hybrid bonded-bolted joints[J]. *Polymer Testing*, 2019, 79: 48.
- [58] LIM G H, BODJONA K, RAJU K P, et al. Evolution of mechanical properties of flexible epoxy adhesives under cyclic loading and its effects on composite hybrid bolted/bonded joint design [J]. *Composite Structures*, 2018, 189: 54-60.
- [59] 袁辉, 刘鹏飞, 赵启林, 等. 胶-螺混合连接承载力的参数影响研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(3): 66-71.  
YUAN Hui, LIU Pengfei, ZHAO Qilin, et al. Research on the influence factors of the bearing capacity for bonded-bolted hybrid joints[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(3): 66-71. (in Chinese)
- [60] LIU F, ZHANG J, ZHAO L, XIN A, et al. An analytical joint stiffness model for load transfer analysis in highly torqued multi-bolt composite joints with clearances [J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 625-636.
- [61] HAI N D, MUTSUYOSHI H. Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 347-359.
- [62] CHOWDHURY N M, CHIU W K, WANG J, et al. Experimental and finite element studies of bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy panels used in aircraft structures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 100: 68-77.
- [63] ARMENTANI E, LAISO M, CAPUTO F, et al. Numerical FEM evaluation for the structural behaviour of a hybrid (bonded/bolted) single-lap composite joint [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2018, 8: 137-153.
- [64] US Department of Defense. HDBK-17-3F: composite materials handbook-Vol 3 polymer matrix composites materials usage [M]. US: US Department of Defense, 2002.
- [65] KWEON J, JUNG J, KIM T, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding [J]. *Composite Structures*, 2006, 75: 192-198.
- [66] CHOWDHURY N, WANG J, CHIU W, et al. Experimental and finite element studies of thin bonded and hybrid carbon fibre double lap joints used in aircraft structures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85: 233-242.
- [67] 张明星. T800 碳纤维复合材料混合连接层合板钉载分布及有限元计算 [C] // 2011 复合材料桥梁技术研讨会. 北京: 中国硅酸盐学会, 2011: 62-66.  
ZHANG Mingxing. Load distribution and finite element calculation of T800 carbon fiber hyper joints composite laminates [C] // 2011 Composite Bridge Technical Seminar. Beijing: The Chinese Ceramic Society, 2011: 62-66. (in Chinese)
- [68] 陈向明, 柴亚南, 袁菲, 等. 胶-螺混合连接结构的传力分析 [J]. *机械强度*, 2015(4): 673.  
CHEN Xiangming, CHAI Yanan, YUAN Fei, et al. Load transfer analysis in bonded-bolted hybrid joints [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2015(4): 673. (in Chinese)
- [69] 段元欣. CFRP 螺栓干涉连接结构预紧行为及静强度研究



- [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- DUAN Yuanxin. The preloading behavior and strength of bolted CFRP laminate joints with interference-fit[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
- [70] ESMAEILI F, ZEHSAZ M, CHAKHERLOU T N, et al. Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria[J]. *Materials & Design*, 2015, 67: 583-595.
- [71] ESMAEILI F, CHAKHERLOU T N, ZEHSAZ M. Investigation of bolt clamping force on the fatigue life of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints via experimental and numerical analysis[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 45: 406-420.
- [72] FU M, MALLICK P. Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2001, 21: 145-159.
- [73] ESMAEILI-GOLDARAG F, BABAEI A, JAFARZADEH H. An experimental and numerical investigation of clamping force variation in simple bolted and hybrid (bolted-bonded) double lap joints due to applied longitudinal loads [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 91: 327-340.
- [74] GOLDARAG F E, BARZEGAR S, BABAEI A. An experimental method for measuring the clamping force in double lap simple bolted and hybrid (bolted-bonded) joints [J]. *Transactions of Famena*, 2015, 39(3): 87-94.
- [75] GOMEZ S, ONORO J, PECHARROMAN J. A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2007, 27: 263-267.
- [76] BODJONA K, LESSARD L. Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method [J]. *Composite Structures*, 2015, 134: 1024-1035.
- [77] PIRONDI A, MORONI F. Clinch-bonded and rivet bonded hybrid joints: application of damage models for simulation of forming and failure[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009, 23: 1547-1574.
- [78] PAROISSIEN E, LACHAUD F, SCHWARTZ S, et al. Simplified stress analysis of hybrid (bolted/bonded) joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2017, 77: 183-197.
- [79] LI W, GUO S, GIANNOPOULOS I K, et al. Strength enhancement of bonded composite laminate joints reinforced by composite Pins[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 1-10.
- [80] GAMDANI F, BOUKHILI R, VADEAN A. Tensile behavior of hybrid multi-bolted/bonded joints in composite laminates[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, 95: 1-7.
- [81] LI X, CHENG X, GUO X, et al. Tensile properties of a hybrid bonded/bolted joint: Parameter study[J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112329.
- [82] LIN W, JEN M. The strength of bolted and bonded single-lapped composite joints in tension[J]. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33: 640-666.
- [83] JEN M, LIN W. Innovative fracture tests of single lapped bolted and bonded composite joints[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, 19: 1444-1473.
- [84] CHOWDHURY N, WANG J, CHIU W, et al. Experimental and finite element studies of thin bonded and hybrid carbon fibre double lap joints used in aircraft structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85: 233-242.
- [85] 程小全, 汪源龙, 张纪奎, 等. 平面编织复合材料胶螺混合连接接头拉伸性能分析[J]. *固体力学学报*, 2011, 32(4): 346-352.
- CHENG Xiaoquan, WANG Yuanlong, ZHANG Jikui, et al. Tensile performance analysis of combined adhesive and bolted joints for plain woven composites[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2011, 32(4): 346-352. (in Chinese)
- [86] XU P, ZHOU Z, LIU T, et al. A novel double-spring analytical model for hybrid GLARE joints: model development, validation, parameter study and global sensitivity analysis[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 177: 105.
- [87] XU P, ZHOU Z, LIU T, et al. Propagation of damage in bolt jointed and hybrid jointed GLARE structures subjected to the quasi-static loading[J]. *Composite Structures*, 2019, 218: 79-94.
- [88] XU P, ZHOU Z, LIU T, et al. The investigation of viscoelastic mechanical behaviors of bolted GLARE joints: modeling and experiments[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 175: 105.
- [89] EMAMI G Z, CHAKHERLOU T N. Numerical and experimental investigation of the effect of the cold expansion process on the fatigue behavior of hybrid (bonded-bolted) double shear lap aluminum joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 126: 30-43.

#### 作者简介:

邹 鹏(1989—),男,博士,工程师。主要研究方向:复合材料结构强度以及复合材料先进连接。

倪迎鸽(1987—),女,博士,讲师。主要研究方向:变体飞机的一体化设计以及声发射损伤监测。

毕 雪(1993—),女,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料结构强度。

陈向明(1983—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:复合材料结构强度。

(编辑:丛艳娟)