

文章编号:1005-0523(2013)04-0001-06

复合材料连接技术进展

黄志超¹, 陈伟达¹, 程雯玉¹, 薛曙光¹, 赖家美²

(1. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要:介绍复合材料连接技术进展。主要介绍复合材料传统机械连接、胶接连接、缝合连接、Z-pin连接、混合连接、冷碾铆接等连接技术的工作原理、发展现状及影响连接性能的相关因素,比较这几种连接技术的优、缺点及应用性。结果表明:在复合材料连接工艺中,机械连接技术成熟、运用最广泛,混合连接是机械连接的拓展,缝合连接和Z-pin连接常作为辅助连接,胶接技术逐渐成熟,冷碾铆接研究较少,但有广阔的应用前景;各种连接的使用有相应的条件和要求,故连接性能的好坏涉及很多因素,比较复杂。

关键词:复合材料连接;机械连接;胶接;缝合连接

中图分类号:TB332;V257

文献标志码:A

随着汽车轻量化、航空及军工材料多元化发展趋势,传统金属材料已不能完全满足使用需求,复合材料的快速发展和广泛应用使得材料运用更加完善,但无论何种场合、使用何种材料,材料连接技术一直广受关注。在许多先进行业中,为提高结构效率,对结构的整体性有很高的要求,复合材料有提高结构整体性的优越条件,但尚存的连接处却需传递更大的载荷,连接技术就显得更加突出和关键。

复合材料具有比强度高、比刚度高、密度小、热膨胀系数小以及尺寸稳定性好等特点,但复合材料属脆性材料且各向异性,其加工、连接部位的设计及强度分析都比金属材料复杂的多。目前,复合材料的连接方法主要有:传统机械连接、胶接连接、缝合连接、Z-pin(金属或纤维增强复合材料细棒)连接、混合连接及冷碾铆接等。本文介绍复合材料这几种连接技术的工作原理、连接特点,并比较各种连接技术的优、缺点。

1 传统机械连接

传统的机械连接有螺栓连接、销钉连接、铆钉连接等连接方式。一些传统机械连接的连接件如图1。

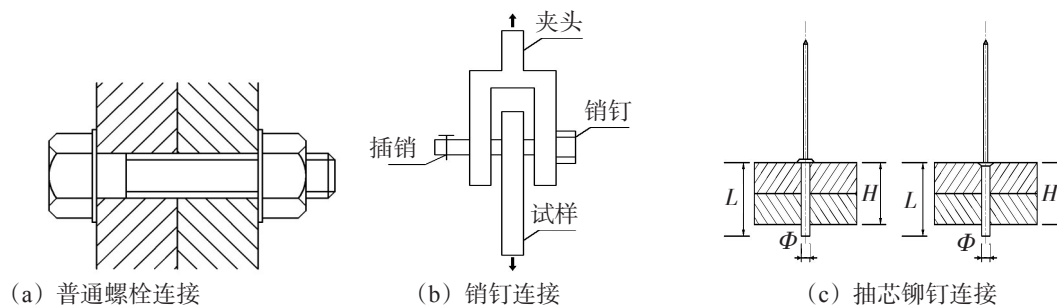


图1 机械连接及连接件示意图
Fig.1 Sketch drawing of mechanical joints and fittings

普通螺栓连接(图1(a))目前在复合材料连接中使用最多,销钉连接(图1(b))和抽芯铆钉连接(图1

收稿日期:2013-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51265012);江西省主要学科学术和技术带头人培养对象计划(20113BCB22010);江西省“赣鄱英才555工程”领军人才培养计划(赣才字[2012]1号)

作者简介:黄志超(1971—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为板料连接技术。

(c))应用普遍,技术成熟。沈帆^[1]通过实验从复合材料铺层顺序、加工方式、制孔工艺、补强以及端头形状等方面研究了复合材料销钉连接。而高锁螺栓也已大量应用在航空航天等领域,且钉孔间配合存在很多公差标准;单面螺纹抽钉干涉配合连接接头在整个装配过程中,膨胀衬套使得在整个夹层厚度上具有均匀的干涉量,确保了复合材料结构在恶劣的载荷条件下结构的完整性。魏景超^[2]、刘风雷^[3]从不同干涉量配合和间隙配合对复合材料层合板单面螺纹抽钉紧固件干涉配合连接结构和高锁螺栓间隙配合连接结构的静挤压强度进行了试验研究,指出适当的干涉量能提高紧固件结构的静挤压强度,过量的干涉却能降低其静挤压强度。

机械连接一般需预开孔,开孔方式不同,孔边应力集中程度也会不同,连接强度就会有差别。何龙^[4]针对复合材料开口孔周围应力集中现象采用ANSYS(融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件)对具有不同强化结构的含孔层合板进行失效过程的数值模拟,认为孔边强化层能有效提高含孔层合板的强度,且铺层角选为 0° 较好,强化层与层合板失效关系紧密,宜选用高性能材料。关志东,黎增山等^[5-7]应用相应的损伤分析方法和失效准则,采用ABAQUS(大型通用有限元分析软件)对复合材料层板开孔拉伸、压缩损伤进行分析,提出合理的预测失效模式和破坏强度的分析模型。

机械连接能传递较大载荷,但很多情况下单钉连接不能满足强度要求,需采用多钉连接,而多钉连接的强度分析比较复杂。GRAY^[8]运用ABAQUS从钉-孔间隙、螺栓扭矩以及摩擦等方面对复合材料单搭接情况下单钉、三钉连接载荷进行了分析;张纪奎^[9]对复合材料-铝合金三钉单搭接进行单向拉伸试验,结合有限元模型研究复合材料-金属三钉单搭接钉载分部情况,并指出金属板配合间隙变化对钉载分布影响很小;刘兴科^[10]采用试验与ANSYS数值分析结合的方法对金属-复合材料三钉双剪连接钉载分配进行研究,试验测量运用应变电测法,有限元分析考察了钉-孔间隙分布、预紧力和摩擦等影响因素,认为初始间隙对钉载分配影响最明显。

机械连接优点很多,连接可靠,技术成熟,但如何提高其连接效率和强度依然存在很大研究空间。

2 胶接

胶接是借助胶粘剂将需要连接的零件连接成不可拆卸的整体,是一种实用有效、方便快捷的连接工艺技术,已广泛应用于复合材料连接,连接形式多样,包括平面形搭接、正交连接等,常见的胶接平面形搭接形式见图2。胶接连接分共固化、共胶接和二次胶接3类,胶接一般指的是二次胶接或者共胶接。KIM^[11]对复合材料单搭接胶接的共固化和二次胶接进行了试验研究,从表面粗糙度、胶层厚度等因素对共固化用胶、共固化不用胶、二次胶接连接性能进行了比较。

胶接连接实用简单,但存在一些明显的缺陷,连接性能易受环境影响,OUADAD^[12]通过试验、模拟分析指出复合材料胶接胶粘剂的吸水率对胶层耐久性、刚度、机械抗阻能力的影响情况,浸泡时间对机械性质影响很大,并且胶粘剂吸湿性与飞机结构胶接的修复效率和修复耐久性有直接关系;连接质量难控制,胶层厚度就是一个主要因素,袁辉^[13]、刘亚文^[14]采用试验、数值模拟、理论分析结合的方法研究胶接接头承载力与胶层厚度的关系,认为胶层厚度不是与连接强度成比例,并提出接头防剥离的控制技术。

随着RTM(树脂传递模塑成型)、RFI(树脂膜渗法)、VARI(真空辅助成型)、三维编织和三维机织等整体化新技术的出现,使被连接构件的数量大大减少,而胶接有零件数目少、结构轻、连接效率高、抗疲劳等突出性能,在复合材料连接中应用越来越多,而且在不断探索更好的连接方式。

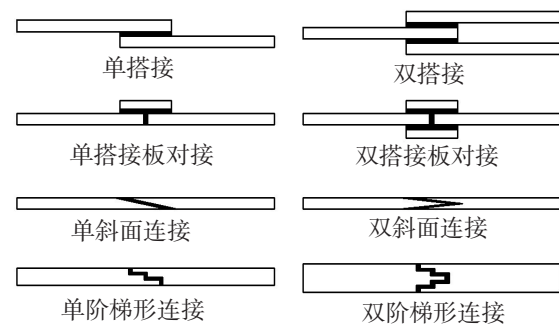


图2 胶接平面形搭接的常见形式
Fig.2 The common forms of planar lap

3 缝合连接

缝合连接是采用缝线进行连接,有两种情况:一种情况是层压板本身是缝合的,即沿厚度方向进行缝合,另一种情况是用缝线将两个或多个被连接构件连接在一起。多被应用于缝合层合板复合材料,缝合连接示意如图3。

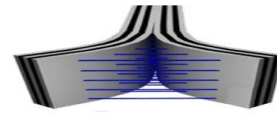


图3 缝合连接
Fig.3 Stitched joint

焦亚男^[15]从缝合方向、搭接长度、缝合密度等方面对三维编织复合材料缝合连接的拉伸性能进行研究,指出搭接长度与试件宽度比值在2.5左右时拉伸性能较好,仅比三维整体编织试件降低25%,缝合方向对拉伸性能影响不明显。毛春见^[16]对缝合复合材料层板进行了低速冲击和冲击后压缩实验,认为缝合层板比未缝合层板有更好的抗冲击性能和冲击后压缩强度,缝合密度越大越好,缝合方向和层板铺层方向也都有影响,特别是增加0°方向铺层时提高效果明显。

缝合连接能明显提高层压板的层间断裂韧性和层间剪切强度,特别是在零件破坏后,缝线可使碎片连接在一起,避免后续更危险的灾难性破坏,有利于阻止损伤扩展。缝合连接属于辅助性连接,通常与RTM、RFI、VARI等工艺一起使用,最主要的优点是采用真空袋固化,压力较低,不使用热压罐成型,因此制造成本低许多,对于推广使用复合材料非常有利。

4 Z-pin连接

Z-pin连接是借鉴缝合技术中不连续缝线方法,在层合板的预浸件中直接嵌入固化好的纤维短棒或金属短棒,再固化预浸件形成层合板的工艺过程。Z-pin连接如图4。

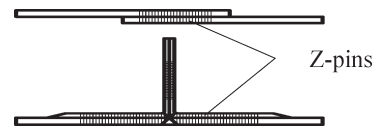


图4 Z-pin连接
Fig.4 Z-pin joint

Z-pin的直径一般在0.2~1.0 mm之间,体分比一般在2%~5%左右,其类型有金属类和非金属类。向复合材料嵌入Z-pin采用整体嵌入式的较多,嵌入Z-pin有两种工艺方法:一种是热压罐法,另一种是由美国Aztex公司提出的超声植入法(ultrasonically assisted z-fibre, UAZ)如图5^[17],UAZ工艺使用方便、灵活,应用广泛。

复合材料Z-pin连接的研究目前很多都是采用T型连接形式,KOH^[17-18]对复合材料T型Z-pin连接有较深入的研究,得到Z-pin体分比、加载角度、连接厚度、外凸缘厚度等因素与Z-pin连接的关系。

Z-pin连接与缝合连接有许多共同特征,而且Z-pin连接设备成本低,可用于较小曲率半径的区域,也能用于夹层结构提高抗压塌和剪切能力;Z-pin连接可用材料较多,没有电化学腐蚀和吸湿问题。缺点是不能与RTM、RFI、VARI等预成型工艺一起使用。

5 混合连接

复合材料混合连接是至少采用两种连接方法将两个或多个被连接构件连接在一起,通常是贯穿厚度

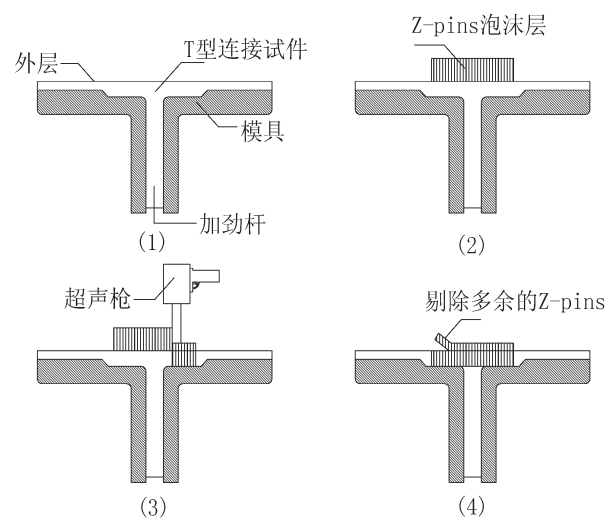


图5 T型连接中Z-pin的UAZ嵌入过程
Fig.5 The UAZ embedding process with Z-pin of T-stiffened panel specimen

的连接与胶接同时使用。最常用的是胶-螺混合连接,已在航空、造船等领域大量应用。Li Gang^[19]对复合材料胶接、螺栓连接及胶-螺混合连接三种连接形式进行了对比研究,发现胶-螺混合连接的强度相比单一连接有很大提高。

根据胶层的固化情况,复合材料胶-螺混合连接一般有两种制作工艺,马毓^[20-21]通过试验研究,得到两种不同制作工艺对接头传力机理和承载力的影响关系,并进一步推导了承载力计算方法,分析了混合连接中胶接、螺栓连接各自的承载情况,提出一些优化胶-螺混合连接的依据。

单搭接接头的连接效率较低,有时不能用于主承力结构,因此混合连接接头常采用双搭接形式。混合连接中胶层和螺钉都能够传递一定的载荷,但胶层与多钉混合连接时复合材料结构的连接性能分析和计算存在较大困难,有待更深入的研究。

复合材料混合连接比较复杂,但能够传递更大的载荷、接头密封性更好,对于结构的破损-安全性、接头的安全裕度以及结构的修补都有很大提高,是今后复合材料连接技术发展的一种趋势。

6 冷碾铆接

20世纪后期,瑞士贝瑞克公司率先将摆动碾压原理运用于铆接技术,开创了铆接技术领域的新革命。冷碾铆接是用铆杆对铆钉局部加压,并绕中心连续摆动直到铆钉成型的铆接方法,根据铆接轨迹的不同,可将其分为摆碾铆接法和径向铆接法。摆碾铆接(图6(a))只是铆头沿着圆周方向摆动碾压;径向铆接(图6(b))原理相对复杂,其铆头运动轨迹呈梅花状,铆头每次都要通过铆钉中心点,即铆头不仅在圆周方向有运动,沿径向也在摆动碾压^[22-23]。

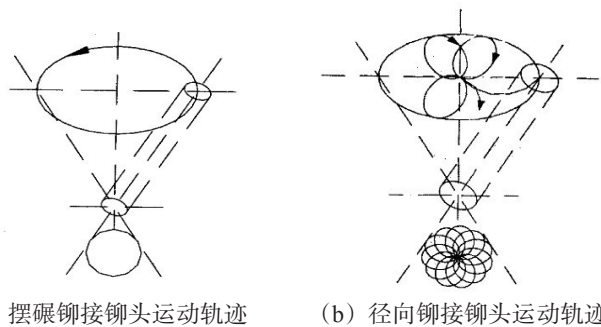
目前关于复合材料冷碾铆接技术的研究很少,但复合材料属脆性材料且各向异性,预开孔孔边应力集中严重,采用传统铆接工艺的性能不太好,而冷碾铆接法可以有效地提高复合材料的铆接质量,这在很多情况下可代替螺栓连接。

与传统的机械连接相比,冷碾铆接需要的摆碾力很小,且使铆钉变形遵从金属自然流向,不会降低材料缺口冲击韧性、延展性,减少了铆钉墩头周围切向拉力过高的危险,更符合复合材料的开孔连接情况^[24]。冷碾铆接应用范围广泛:可铆接低碳钢、中碳钢、不锈钢、铜、铝以及合金等各种铆钉;改变铆头形状,可铆接出各种形状的接头如图7^[25],这对于复合材料连接的复杂多变性更有优势。

7 各种连接形式的比较

前面介绍的复合材料连接形式只有胶接是通过结合面进行连接,其余都是贯穿厚度的连接,贯穿厚度连接的优点是抗剥离应力和劈裂应力强,这也正是胶接形式的主要缺点。冷碾铆接在复合材料连接中应用较少,但冷碾铆接法优势很明显,具有很大的研究前景。各种复合材料连接比较见表1。

1) 传统机械连接法,能够传递较大的载荷,连接技术比较成熟,使用广泛,其综合性能已被广泛认可。



(a) 摆碾铆接铆头运动轨迹 (b) 径向铆接铆头运动轨迹

图6 冷碾铆接的两种形式

Fig.6 The two forms of cold rolling riveting

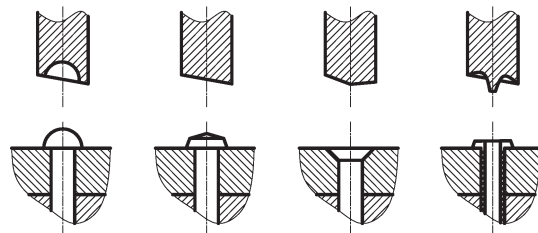


图7 碾压铆接各种适用形状示意图

Fig.7 Schematic diagram of all kinds of suitable shape for roll forming and riveting

2) 胶接和多数混合连接都会使用胶粘剂,其连接接头易受环境影响,虽然混合连接在胶接的基础上有机械连接增加安全裕度,但各连接的协调变形、载荷分配比较复杂,有待探索更好的连接形式。胶接连接方式灵活多变,是较好的辅助连接方法,也能独立承载,已被广泛运用于各领域^[31]。

3) 缝合连接与Z-pin连接使用的连接材料、连接的方式有所不同,但它们的原理类似,都是较密集的贯穿厚度连接方式。缝合连接和Z-pin连接常作为辅助连接手段,提高连接的抗剥离应力,实用且技术比较成熟^[31]。

4) 冷碾铆接法是一种较新型的连接技术,相比传统机械连接,连接强度可能有一定劣势,但冷碾铆接工件上受到的轴向和径向载荷很小,铆钉遵从金属自然流向,针对复合材料开孔后孔边应力集中较大的情况更有利,关键是铆接效率高,适合自动化,有更好的经济效益,冷碾铆接有许多明显的优势,在复合材料连接中有广泛的应用前景。

表1 复合材料各种连接技术比较^[26-34]

Tab.1 Comparison between different joints of composites

性能	传统机械连接	胶接	缝合连接	Z-pin连接	混合连接	冷碾铆接
连接性	一般需预开孔,传递载荷较大	胶粘剂	缝线贯穿连接	Z-pin贯穿连接	至少两种连接的组合	预开孔,所需铆接力小
连接不同材料	能	有影响	能	能	有影响	能
连接镀层材料	能	一般可以	能	能	能	能
外观	较差	好	较好	较差	不好	较好
连接材料厚度	较厚	不太厚	较厚	不太厚	较厚	不太厚
静强度	高	较低	较高	较高	高	较高
疲劳强度	高	低	较高	较低	高	较高
连接效率	较低	较低	较低	较低	低	较高
连接费用	少	较少	较高	较少	较少	少
占用面积	较小	小	较大	较小	较小	较大
投资金额	较低	低	高	较低	较低	较高

8 结论

介绍了传统机械连接、胶接、缝合连接、Z-pin连接、混合连接、冷碾铆接等复合材料的连接技术,以及工作成型原理,并分析了它们的优、缺点及对复合材料连接的适用性。

复合材料的连接质量与连接过程中各种制作工艺、相关影响因素有直接关系,选择何种连接方式,需根据实际要求而定。当承载较大、可靠性要求较高时宜采用机械连接,某些情况下为提高安全裕度,可使用混合连接,或采用缝合连接、Z-pin连接进行辅助连接;当承受剥离载荷较小、环境较好时宜选择胶接形式;冷碾铆接是一种综合性能较好的连接方式,有很多优势,比较满足复合材料连接的相关条件,在复合材料连接工艺中有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 沈帆. 复合材料销钉连接的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [2] 魏景超,贾普荣,矫桂琼. 干涉对复合材料层合板连接系统的极限挤压强度影响[J]. 材料开发与应用,2011,26(3): 66-69.

- [3] 刘风雷,刘丹. 复合材料结构用干涉单面螺纹抽钉紧固系统连接技术[J]. 航空制造技术,2010,52(23):76-78.
- [4] 何龙,李成,朱红红. 连接结构的孔边强化层对复合材料含孔板失效过程的影响[J]. 机械工程学报,2011,47(12):43-47.
- [5] 关志东,黎增山,刘德博,等. 复合材料层板开孔压缩损伤分析[J]. 复合材料学报,2012,29(3):167-172.
- [6] 黎增山,关志东,何为,等. 复合材料层板开孔拉伸损伤分析[J]. 复合材料学报,2012,29(1):169-175.
- [7] 关志东,刘德博,李星,等. 基于界面单元的复合材料层间损伤分析方法[J]. 复合材料学报,2012,29(2):130-134.
- [8] GRAY P J, MCCARTHY C T. A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multibolt composite joints[J]. Composites Part B:Engineering,2010,41:317-325.
- [9] 张纪奎,马志阳,程小全,等. 复合材料三钉单搭连接有限元模拟与钉载分布[J]. 复合材料学报,2012,29(3):179-183.
- [10] 刘兴科,李亚智,刘向东,等. 金属和复合材料多钉连接钉载分配研究[J]. 航空工程进展,2011,2(2):193-198.
- [11] KIM K S, YOO J S, et al. Failure mode and strength of unidirectional composite single lap bonded joints with different bonding methods[J]. Composite Structures,2006,72:477-485.
- [12] OUDAD W, MADANI K. Effect of humidity absorption by the adhesive on the performances of bonded composite repairs in aircraft structures[J]. Composites Part B:Engineering,2012,43:3419-3424.
- [13] 袁辉,刘鹏飞,王景全,等. 胶层厚度对胶连接接头承载力的影响机理与控制[J]. 解放军理工大学学报,2013,14(1):53-57.
- [14] 刘亚文,宋建国,马毓,等. 胶层厚度对双搭接胶连接接头承载力的影响分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2012,38(2):20-24.
- [15] 焦亚男,李嘉禄,韩雪梅,等. 缝合连接三维编织复合材料拉伸性能试验研究[J]. 复合材料学报,2008,25(1):127-132.
- [16] 毛春见,许希武,郑达. 缝合复合材料层板低速冲击及冲击后压缩实验研究[J]. 复合材料学报,2012,29(2):160-166.
- [17] KOH T M, FEIH S, MOURITZ A P. Experimental determination of the structural properties and strengthening mechanisms of Z-pinned composite T-joints[J]. Composite Structures,2011,93:2222-2230.
- [18] KOH T M, FEIH S, MOURITZ A P. Strengthening mechanics of thin and thick composite T-joints reinforced with Z-pins[J]. Composites Part A:2012,43:1308-1317.
- [19] LI GANG, CHEN JIHUA, et al. Static strength of a composite butt joint configuration with different attachments[J]. Composite Structures,2012,94:1736-1744.
- [20] 马毓,李飞,赵启林,等. 复合材料构件机械连接接头破坏模式与机理[J]. 解放军理工大学学报,2010,11(6):658-663.
- [21] 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.
- [22] 刘俊,胡远陆. 冷碾铆接技术及其应用[J]. 汽车与配件,1999,18(23):14-15.
- [23] 梅怡. 梅花状径向铆接机的设计分析[J]. 制造技术与机床,2012,18(9):53-56.
- [24] 黄志超,刘晓坤,占金青. 铝合金板料摆碾铆接与直压铆接比较分析. 中国机械工程,2013,24(9):1233-1239.
- [25] 吴春艳. 碾压铆接技术[J]. 重庆职业技术学院学报,2008,17(2):147-148.
- [26] 刘建超,王铁军,张炜,等. 碳纤维织物复合材料螺柱-柱销连接结构研究[J]. 材料科学与工艺,2007,15(4):473-476.
- [27] 孙其永,李嘉禄,焦亚男. 三维编织物的缝合连接技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2008,34(3):50-52.
- [28] 王晓侠,方超,张亮,等. 复合材料层合板螺栓连接强度实验研究[J]. 中国舰船研究,2011,6(3):88-93.
- [29] 黄志超. 板料连接技术进展[J]. 锻压技术,2006,31(4):119-122.
- [30] 朱爱华,朱成九,卜少磊. 碳纤维布-钢筋混凝土组合方柱的轴压试验[J]. 华东交通大学学报,2009,26(5):15-18.
- [31] 谢鸣九,黎观生,章怡宁. 复合材料连接[M]. 上海:上海交通大学出版社,2011:237-293.
- [32] HUHNE C, ZERBST A K. Progressive damage analysis of composite bolted joints with liquid shim layers using constant and continuous degradation models[J]. Composite Structures,2010,92:189-200.
- [33] NANAYAKKARA A M, FEIH S, MOURITZ A P. Improving the fracture resistance of sandwich composite T-joints by Z-pinning[J]. Composite Structures,2013,96:207-215.
- [34] LIM T S, KIM B C, LEE D G. Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates[J]. Composite Structures,2006,72:58-68.

(下转第29页)

Numerical Simulation of Concrete-filled Double Skin Steel Tube under Compression-Bending-Torsion Loading

Huang Hong, Li Ting, Chen Mengcheng

(College of Civil Engineering and Architecture, East of China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Finite element method is adopted to analyze mechanism of the concrete-filled double skin steel tube (CFDST) and concrete-filled steel tube (CFST) members. The outer steel tube of CFDST and CFST members is square hollow section (SHS), and the inner steel tube of CFDST member is circular hollow section (CHS). This study finds that the ultimate bearing capacity of CFDST under combined compression-bending-torsion load is in accordance with CFST, but the ductility of the CFDST is better. The interaction between steel and concrete in the corner is the largest in the cross section. The longitudinal loads born by steel tubes and concrete of CFDST and CFST versus longitudinal strain relationship curves are substantially the same. The torque born by steel tubes of CFDST is more than that of CFST, and the torque borne by sandwiched concrete of CFDST is less than that borne by core concrete of CFST. The concrete bears 26% ~ 33% torque of the member due to the constraint of steel tubes and prevents the buckling of steel tubes.

Key words: CFDST; CFST; compression-bending-torsion; finite element

(上接第6页)

Development of Composite Connection Techniques

Huang Zhichao¹, Chen Weida¹, Cheng Wenyu¹, Xue Shuguang¹, Lai Jiamei²

(1. Key Laboratory for Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Developments of composite joining techniques are explored in this paper. It mainly discusses principles about the composite connection techniques, such as traditional mechanical joint, adhesive joint, stitched joint, Z-pined joint, combined joint and cold rolling riveting. Meanwhile, related factors which influence the performances of joint are introduced and the advantages, disadvantages and applicability of various joints are compared. The results show that mechanical joint is mature and most widely used. Combined joint is the expansion of mechanical joint, with stitched joint and Z-pined joint often used as auxiliary connection, adhesive joint becoming mature gradually. Cold rolling riveting has not been researched fully, so it has broad application prospect in composite joint process. Different joints have the corresponding conditions and requirements, thus the quality of joint performance involves many complex factors.

Key words: composite connection; mechanical joint; adhesive joint; stitched joint