

复合材料结构装配过程中的 制孔和连接

Drilling and Linking During Composites Structure Assembly Process

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 徐福泉 高大伟



徐福泉

高级工程师、工程硕士，毕业于北京航空航天大学飞行器制造专业，从事过飞机装配夹具设计、模具设计、先进复合材料结构制造，曾参与多个型号的工艺装备设计、制造，H425、EC120、大飞机等国内型号的复合材料研制，以及波音、空客、霍尼韦尔等公司的复合材料结构件转包生产。

复合材料结构装配综述

先进复合材料可以创造出尺寸大、结构复杂、可整体成型的复合材料机体结构的同时，减少了零件的数量，减少了连接用紧固件数量，减少了装配工装和装配操作工序的工作量。但不管怎样，由于设计、工艺、检查和维修等制约因素的影响，连接装配过程必不可少。因此复合材料零

国内飞机型号的研制已逐步加大复合材料用量，也必然会在复合材料结构装配问题。加强复合材料装配相关技术的研究，对于提高飞机制造水平，加快和促进复合材料在国内航空制造业的应用具有重要作用。

件仍然需要参与装配，包括复合材料零件之间的装配，以及复合材料零件同其他类型零件之间的装配。与金属结构相比，复合材料连接紧固件数量少了，但质量要求更高了，从其他文献中的数据以及实际估算，装配总成本与零件总成本基本相当。

复合材料装配过程比较复杂，装配过程包括了不同的装配级别和多个步骤：如直升机尾部的装配，分三级进行：第一级是框、梁、肋及加强件等的定位装配；第二级是与蒙皮间的定位，间隙调整，加胶膜，钻孔、紧固件安装，胶接固化后的修整；第三级是协调互换部位的加工和协调孔的钻制，安装接头、平尾和上垂尾等部件，进行密封和电搭铁安装等等。

本文主要介绍基本的加工和装配操作，重点在复合材料零件制孔及常用的几种连接方式。

复合材料结构装配的特点

飞机复合材料零件装配与金属

零件装配相比，具有以下的特点：

(1) 受复合材料零件原材料、制造工艺方法以及材料本身特性限制，复合材料零件厚度、平面度、角度等尺寸和形位公差较机加零件大，因此在装配设计时需要考虑一定的补偿方法。

(2) 紧固件与复合材料零件间的电化学反应，尤其是碳纤维复合材料与铝或镀镉的紧固件相接触时，但玻璃纤维或芳纶不导电，因此不会产生电化学反应。

(3) 复合材料属脆性材料，断裂延伸率为1%~3%，对装配间隙敏感，间隙在0.2mm~0.8mm应使用液体垫片，大于0.8就应使用固体垫片，否则易造成树脂碎裂、局部分层等损伤。

(4) 大多复合材料零件由很多层材料铺叠而成，单层面内强度远大于层间强度，制孔时易出现出口处孔边缘纤维劈裂。

(5) 复合材料与金属零件同时制孔时，如从复合材料钻向金属，易造

成金属屑损伤复合材料孔壁的情况。

(6) 复合材料层间强度低, 易冲击性分层, 不宜采用带有冲击力的装配方法, 如锤铆。

(7) 复合材料零件不益采用过盈配合(间隙配合的强度只占基体完整强度的 20%~50%), 易造成孔壁四周损伤, 或采用小过盈量(1%~2%)配合, 且必须使用金属衬套。

复合材料连接失效的形式

复合材料结构在连接装配后, 可能存在 6 种损坏模式, 如图 1 所示。

(a) 零件剪切破坏, 可能由于边距不够或在载荷方向的纤维比例过大, 使垂直于载荷方面强度不够。

(b) 零件断裂破坏, 可能宽度不够或在垂直于载荷方向的纤维比例过大, 使载荷方向的强度不够。

(c) 零件角破坏, 可能边距不够或 45° 方向纤维少。

(d) 零件孔边破坏, 孔周分层及基本压碎, 这是 6 种损坏形式中可能危害最小的一种。

(e) 紧固件拉脱, 可能由于镗窝太深(一般窝深不能超过总厚的 $2/3$, 剩余部分不能小于 0.5mm) 或钉头太小; 装配间隙没有处理好。

(f) 紧固件失效, 钉的夹紧长度选择不当; 夹紧力不够; 装配间隙没有处理好。

复合材料结构的制孔

航空用复合材料主要以碳纤维和玻璃纤维为主, 玻璃纤维可加工性较好, 主要用在飞机的表面零件上; 碳纤维用于飞机承力结构, 但其加工性不好, 制孔的问题主要出现在碳纤维复合材料零件中。因此本节主要以碳纤维复合材料为主, 讨论制孔问题。复合材料制孔要比一般金属制孔困难, 主要因为复合材料对温度敏感、易劈裂分层以及对刀具磨损严重, 如图 2 所示。

钻孔劈裂或分层主要出现在制

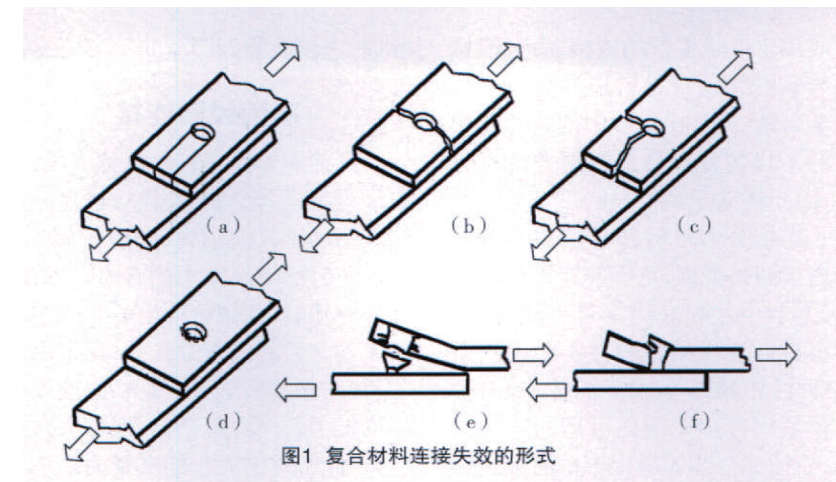


图1 复合材料连接失效的形式

孔的出端, 也可能出现在制孔的入端。如出现在制孔的入端, 则可以认为钻孔时进给量偏大, 因此操作人员在钻头刚接触零件时减慢进给速度是非常必要的, 可减少入端劈裂或分层; 如出现在制孔的出端, 则可以认为进给力太大, 可能的原因是在将要钻透时的进给量太大或刀具变钝等原因, 因此选择适当的刀具并保持良好的刀具状态, 以及在将要钻透时, 应减慢进给速度, 可减少出端劈裂或分层。

当复合材料零件采用单向带制造时, 钻孔劈裂或分层尤为严重, 因此为减少钻孔时的损伤, 在零件上下各加一层织物将大有益处。

钻孔温度不能大于基体的玻璃化温度, 为避免钻孔时零件的温度过高, 典型的钻孔参数为 $2000\sim 3000\text{r}/\text{min}$, 每转进给量为 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ (按经验值)。但须注意在进刀时和出刀时, 要减缓进给速度、加大转速。当复合材料与金属同时制孔时, 要注意金属材料的特点, 以及金属材料碎屑对于复合材料孔的磨削作用。为了有效减少金属材料碎屑对于复合材料孔的磨削作用, 可采用钻孔+铰孔的工艺方法。为提高钻孔质量, 可采用一些更好的钻孔工具, 如自动进给且自动往复

回缩的啄式钻, 将此工具前端定位在钻模板的衬套上, 可以保证钻孔的位置和垂直度。此类工具有的可以调节进给速度和啄钻次数。

一般情况下在钻孔后要进行镗窝工序, 镗窝同钻孔过程相似, 一是要注意镗窝深度, 不能使余下部分太薄; 二是注意镗窝后的圆角(如图 3 示), 此圆角可用带圆角的镗窝钻直接制成或在镗窝后用专用工具打磨形成。

更为先进的制孔方法采用自动钻孔设备, 由计算机控制, 无需钻模板, 针对不同材料, 自动控制钻孔转速和进给量, 并可将钻孔+铰孔+镗窝一次完成。

复合材料结构的连接

目前, 飞机复合材料结构件之间主要采用机械连接方式。普通铆钉

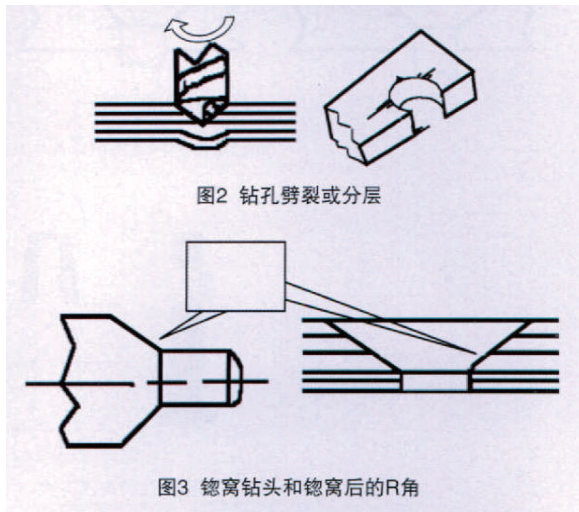


图2 钻孔劈裂或分层

图3 镗窝钻头和镗窝后的R角

一般用于钣金零件的连接,由于铝材料与碳纤维复合材料接触会产生电化学腐蚀,且铆接过程中的震动及铆钉的不均匀膨胀会造成复合材料分层,因此锤铆受到了限制。

连接分为可拆卸连接和不可拆卸连接两种类型,可拆卸连接相对简单,本节中主要介绍不可拆卸连接。不可拆卸连接的紧固件主要用到高锁螺栓、锁紧螺栓、抽铆钉等,前两种连接紧固件用于两面可达的连接情况,而抽铆钉能够适用于单面可达的情况。

在进行连接装配之前,要检测夹紧长度,根据夹紧长度来选择紧固件的长度。只有合适长度的紧固件,才能保证预定的夹紧力和结构性能要求。如选择的抽铆钉短,则不易形成良好的镦头,不能完成铆接过程或铆接质量很差;如选择的抽铆钉长,则铆钉松动,不能产生夹持力。

复合材料的连接也与常规金属连接不同,需要特殊的紧固件和连接工具,并容易出现连接问题,如基体碎裂、分层等故障。在安装紧固件时用的力矩过大,会造成分层;钉头安装时的倾斜会形成应力集中点,也会产生分层;将要连接的零件间存在间隙,未采用垫片调整或垫片厚度不够,在安装完成后会使钉头下面的局部区域变形过大,而产生分层和基体

碎裂,主要故障如图4所示。

高锁螺栓连接

高锁螺栓由芯钉和螺母组成,一般采用高强合金制造,连接过程需用到专用的工具高锁枪,如图5(a)所示。芯钉的螺纹端头侧有内六方孔。连接操作时,高锁枪伸出的六方芯子插入到芯钉的内六方孔内,用于固定芯钉,防止芯钉转动;此时高锁枪的螺母扳手转动螺母,直到螺母头断裂分离,此时预定大小的夹紧力施加在复合材料零件表面。对于少量的高锁螺栓连接,也可用手动工具完成。

锁紧螺栓的连接

锁紧螺栓也是常见的连接紧固件,也由芯钉和螺母两部组成,连接过程需用到专用的工具,如图5(b)所示。与高锁螺栓不同,锁紧螺栓的芯钉没有螺纹,而是一些环形沟槽。依靠工具强大的压力,将螺母压在复合材料零件的表面,同时芯钉断裂;螺母塑性变形挤进芯钉沟槽内,防止松动,具有良好的耐震动性能。此连接不适于较薄的复合材料零件,由于连接时压力很大,对较薄的复合材料零件会产生损伤。

抽芯铆接

抽芯铆接适用于仅单侧可达的

区域的连接,如封闭盒段的连接。抽芯铆钉仅需从零件一侧插入,就可以将多个夹层铆接在一起,具有安装速度快、效率高、成本低等优点,在飞机上应用非常广泛。抽芯铆钉由铆体和钉芯两部分组成,连接过程需用到专用的工具。抽芯铆钉是一种高强度的铆接紧固件,钉芯在铆接完毕后能够坚固的锁在铆体里不会松动,有较大的钉芯保持力。如图5(c)所示。安装工具抓取钉芯移动,当钉芯所承受的拉力达到预定的断钉力时,钉芯在预定的断点处断裂。钉芯钉头被拉进铆体,铆体盲端径向膨胀变形,形成一个强大、紧凑、可靠的连接,将铆接工件夹持成一个整体。

复合材料的干涉连接

复合材料干涉连接会造成分层和基体碎裂,因此复合材料零件不适合于干涉铆接。但在增加金属衬套之后,由于金属衬套分散了可能的集中载荷,使复合材料零件连接的干涉量可达到0.15mm。因此,现在所用的复合材料的干涉连接,都在孔内增加了金属衬套。复合材料的干涉连接不能提高连接的疲劳强度,但具有连接刚度更好、使孔内局部分层和损伤的情况减少等优点。当与金属连接的时候,孔径相同时不用分别铰孔。

结束语

复合材料结构装配是复合材料应用中的重要环节。目前,复合材料结构装配在应用技术和自动化等方面,与国外主要飞机制造商之间还有一定的差距。国内飞机型号的研制已逐步加大复合材料用量,也必然会存在复合材料结构装配问题。加强复合材料装配相关技术的研究,对于提高飞机制造水平,加快和促进复合材料在国内航空制造业的应用具有重要作用。

(责编 侧卫)

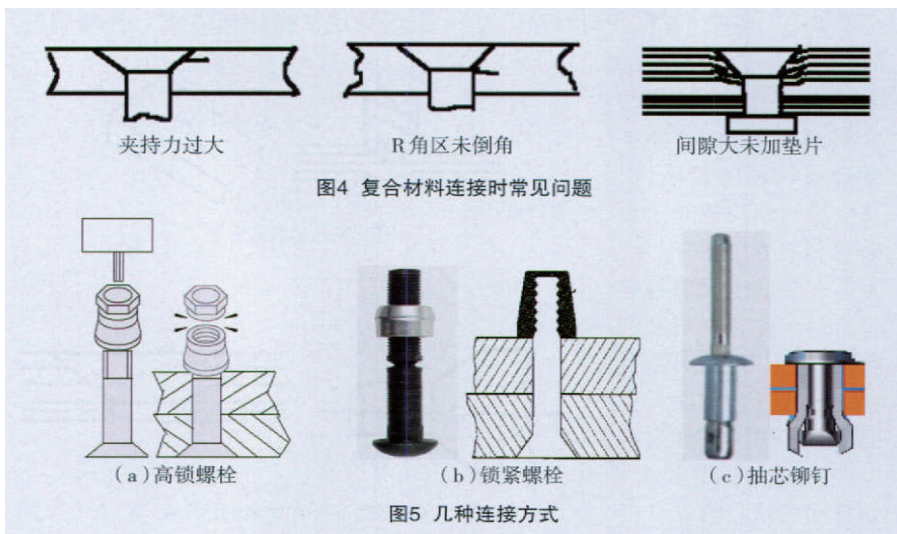


图4 复合材料连接时常见问题

图5 几种连接方式