

# 面向飞机自动化装配的单向压紧制孔毛刺控制技术

## One-Side Pressed Burrless Drilling Technology for Aircraft Automatic Assembly

南京航空航天大学机电学院 王珉 薛少丁 陈文亮  
上海飞机制造有限责任公司航空制造技术研究所 陈磊 蒋红宇



王珉

博士,中国商飞博士后,南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系教师。主要从事飞机装配工艺、自动化装配系统、信息系统开发与应用等方面的研究。

飞机结构连接采用的主要方法是机械连接,一架大型飞机上大约有150万~200万个铆钉和螺栓。传统的飞机装配是采用手工装配的方法,其制孔过程是先对装配件钻初孔,之

采用自动化制孔技术不仅仅是对传统工艺的自动化改造,而是进行装配工艺的整体提升,传统手工装配工艺中,拆开去毛刺和涂胶固化过程,都无法简单实现自动化,因此先进自动化装配技术采用无毛刺制孔工艺和湿胶装配方法,以真正实现自动化制孔工艺。

后拆开去毛刺,然后涂胶固化,最后扩铰孔。对于飞机装配的制孔量来说,这种方法的质量和精度都不尽人意,效率低,使得飞机装配的周期和成本占用飞机制造中较大比例。

为了满足现代飞机高寿命的要求(世界上许多先进飞机的疲劳寿命已达到8万飞行小时)并降低装配周期,首先要保证机械连接的质量和效率,因此需要采用先进自动化装配系统来提高装配的质量、精度和效率。国外先进飞机制造商广泛采用了自动化制孔和铆接等自动化装配技术,大大提高了机体结构的疲劳寿

命和装配生产率。我国大型运输机和大型客机项目要想达到高质量、高安全性、高效率等指标,也必须大量采用先进的自动化装配技术,使主要机体结构的装配以自动制孔和自动铆接工艺为主,取代手工作业方式。

采用自动化制孔技术不仅仅是对传统工艺的自动化改造,而是进行装配工艺的整体提升,传统手工装配工艺中,拆开去毛刺和涂胶固化过程,都无法简单实现自动化,因此先进自动化装配技术采用无毛刺制孔工艺和湿胶装配方法,以真正实现自动化制孔工艺。需要说明的是,本项

目所说“无毛刺”是指毛刺高度满足要求(不同的供应商规定有所不同,一般阈值在 0.1~0.15mm 之间),从而不需要额外的去毛刺工序<sup>[1-2]</sup>。

### 单向压紧自动化制孔毛刺控制技术的研究意义和研究进展

国内外当前主要的自动化装配系统主要分为大型自动化装配系统和轻型自动化装配系统,其中大型自动化装配系统主要形式有 C 型自动托架式钻铆系统、D 型自动托架式钻铆系统、龙门式自动钻铆系统等。大型自动化装配系统有精度高、效率高、成本高和柔性一般的特点,为了平衡效率、成本、柔性之间关系,当前轻型自动化装配系统得到了前所未有的发展。

当前比较通用的轻型自动化装配系统主要有基于工业机器人的自动装配系统、柔性轨道自动化装配系统、自主移动式轻型自动化装配系统 3 种。无论是哪种形式都面临着和传统大型自动化钻铆设备(如 C 型自动钻铆机)不同的单向压紧的应用环境。这使单向压紧的无毛刺制孔工艺成为轻型自动化装配系统能够发挥效率所必须解决的问题,也是其工程应用所要解决的技术难点。

当前国内相关厂所都在研制和引进轻型自动化装配系统,如成都飞机制造有限公司引入宝捷工业机器人自动化制孔系统、航空制造工程研究所研制柔性轨道自动制孔系统等,这些系统的研制和应用,为本研究提供了迫切的需求和广泛的应用背景。

飞机装配无毛刺的要求主要体现在零部件夹层位置,也就是连接的 2 个(或多个)零部件之间不允许有毛刺和切屑。传统的制孔方法在制初孔后要把零件拆开去毛刺,严重影响了装配的效率和自动化。而从目前掌握的资料看,对装配贴合面毛刺问题的理论研究几乎无人关注,

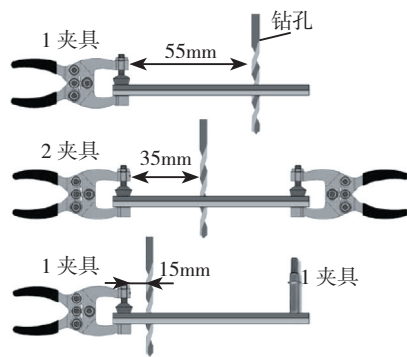
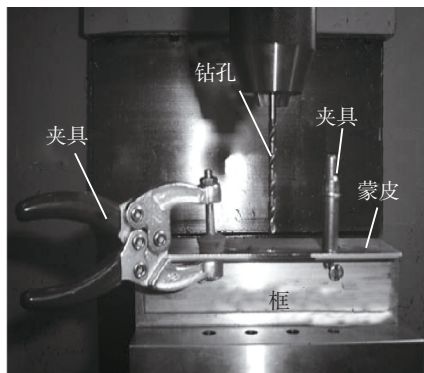


图1 Melkote制孔试验情况和夹紧情况

这与国外飞机装配大量应用自动化装配工艺和系统呈鲜明的对比。目前对装配界面毛刺研究的资料极少, Melkote 等<sup>[3]</sup>对蒙皮和框装配的制孔作了部分试验研究,对刀具等参数作了一定的分析。但是试验的压紧方案(见图 1)与自动化装配差距较远。

应用上,大型自动化装配系统如 C 型自动钻铆机采用双向压紧制孔的局部,从而避免夹层处毛刺的产生和切屑进入,但是由于轻型装配系统的应用刚刚起步,属于自动化装配技术应用前沿,单向压紧情况下夹层处毛刺的控制技术在国外最新机型如波音 787、A350 中得到应用,但是由于产品和技术上的保密,难以获得相关参考。另外,通过与国外设备供应商沟通了解到的信息来看,目前最主要的技术手段还是通过试验来确定相关工艺参数。

因此,对单向压紧情况下装配界面和出口处钻削毛刺主动控制技术的研究和解决,对于飞机自动化装配技术的发展和应用会起到决定作用,特别是国内各飞机制造主机厂所先后采购或开发轻型自动化装配系统。本研究将为轻型自动化装配系统有效的工程应用提供技术支持和应用保障,是十分急需和必要的。

### 单向压紧自动化制孔装配贴合面毛刺主动控制技术

装配贴合面毛刺产生的情况和

出口毛刺一样,如果不加特殊处理,会有 2 个问题:一是即使采用最优的工艺参数实现无毛刺较困难(飞机零部件主要为薄壁结构,刚性差是其重要特点);二是制孔时钻头轴向力使装配界面分离,无法保证切屑不进入。业界普遍采用的有效减少装配贴合面毛刺的方法是,通过局部施加压紧力来克服夹层界面分离,使装配的零件在制孔时“成为”一体,避免界面处出现出口毛刺,从而达到目标要求。可以说解决装配界面毛刺问题,压紧力比其他影响因素更重要。传统典型的自动钻铆设备采用双向压紧的方式,如图 2 所示,可以提供比较可靠的压紧力。这时压紧力只需克服轴向进给力和零件公差引起的不贴合,即可满足要求。

对于单向压紧的情况应用环境变得复杂,要接近双向压紧的效果关键看制孔出口端的支撑。本文将典型的连接结构可以分为产品结构本身有支撑的和没有支撑 2 种情况,分别进行研究。

(1) 产品结构本身有支撑的情况。

典型的情况就是机身段框上对接,连接部位由框本身提供法向支撑。这种方式通过施加相应的压紧力和法向支撑的法向反力组合作用,产生一定的“双向”压紧效果,以满足无毛刺制孔的要求,但是由于支撑结构的强度、刚度、精度等因素的影

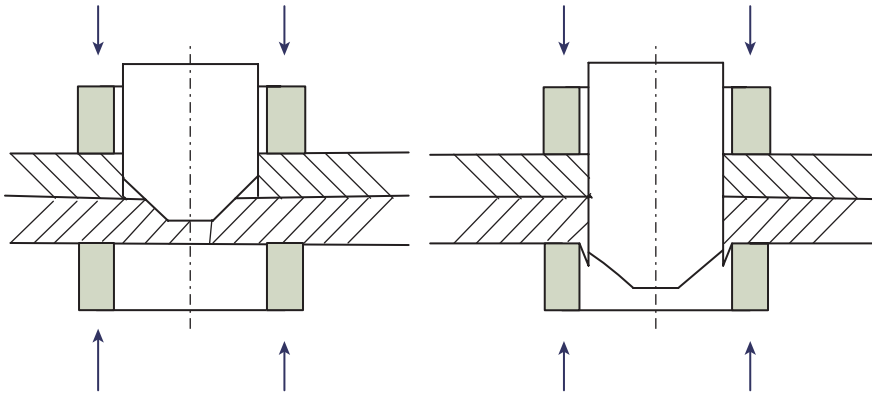


图2 通过局部施加压紧力解决界面毛刺问题

响,对压紧力的要求和双向压紧有所不同。

需要注意的是,框上对接的长桁接头,并没得到框的支撑(位于框的下部),对其研究可以作为没有支撑情况来处理。

(2)产品结构本身没有支撑的情况。

典型的情况就是机身段框间对接,连接部位本身没有提供足够法向支撑(长桁等构件变形过大,起不到支撑的效果)。纵向壁板拼接也有类似情况。

这种方式主要考虑2种方案解决。

方案1:考虑在工装上增加内型板提供支撑。这种方案与有支撑的情况基本一样。不同之处主要有:此方案可以根据压紧力的要求设计或选用相应刚度的内型板进行支撑;此方案受工装结构(如开敞性)的影响,往往不能很好地适用于一些已有生产线。

本方案和产品有支撑的情况类似,通过有限元计算方法,分析典型结构在允许的产品容差范围内,考虑产品的变形情况,计算需要施加的压紧力。不同的是:由于飞机的薄壁结构特点,内型板的支撑效果往往比依靠产品自身结构支撑的效果要好,可以近似看成刚性支撑;内型板不会正处于所要制的孔正下方,而是偏一

定距离,这样产品的变形需要分析。

方案2:考虑增加预装配临时紧固件的数目来提供支撑。

上一个方案有2个问题,一是要改变原来工装以增加内型板,二是没法用在纵向壁板拼接等情况。而增加预装配临时紧固件这种方法可以在原有工装上应用,通过在一定距离内增加预装配铆钉来提供一定压紧力支撑,如图3所示。可以先从50%数量的预装配铆钉开始,逐步过渡到

20%以下。

本部分研究方案是,分析单向压紧时预装配紧固件的支撑作用和变形,计算不同类型的紧固件对支撑的影响,如临时铆钉(包括实心钉、POP钉等)、穿心夹(可以更好地提供压紧力,但会影响自动化效率)。

### 单向压紧自动化制孔毛刺主动控制技术的解决方案

考虑到有限元分析和试验方法的优缺点,本文将2种方法结合起来,低成本地解决工程问题,如图4所示。具体如下:

(1)采用理论分析和有限元模拟的方法,分析单向压紧时产品变形、支撑结构(如框、内型板)变形以及临时紧固件的影响,为合理的工艺参数(包括压紧力)提供理论依据。

例如,分析了某支线飞机中机身和中后机身框上对接上部一处带板和框的贴合情况,如图5所示。

从分析情况看,在500N的压紧

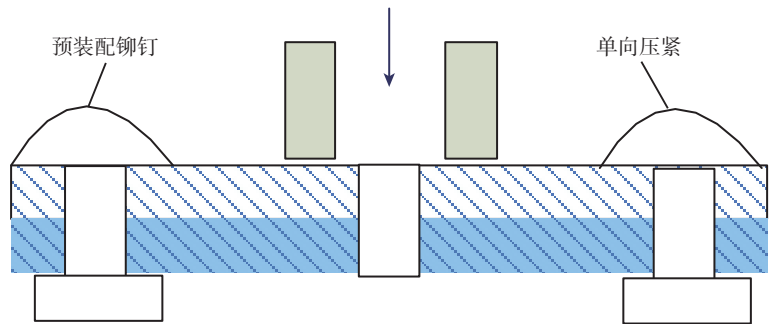


图3 预装配铆钉提供支撑

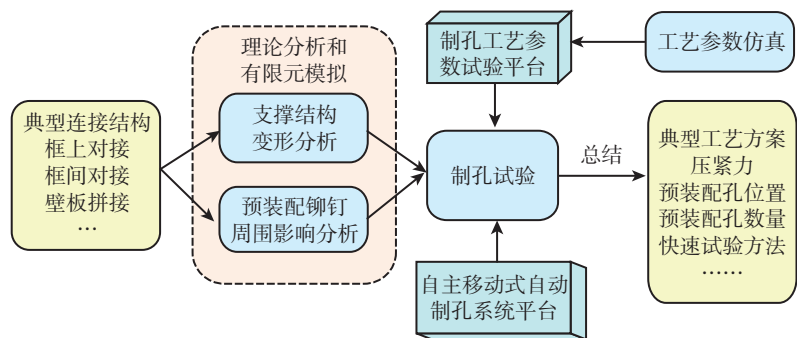


图4 单向压紧自动化制孔毛刺主动控制技术的解决方案

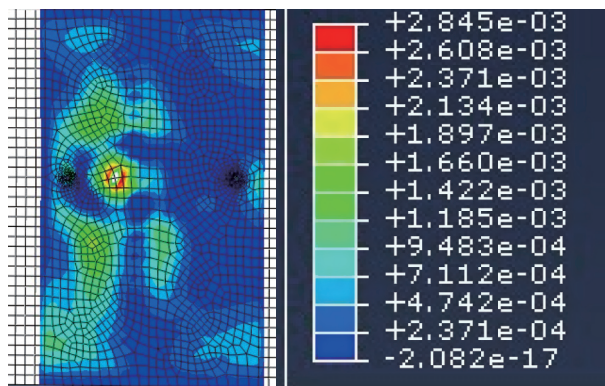


图5 框上对接某处带板和框的贴合情况FEM分析结果

力作用下,制孔轴向力在 250N 时,2 层贴合面最大距离仅小于 0.003mm,而实际制孔位置的距离约为 0.0019mm,比毛刺高度小于 0.13mm 的要求好 2 个数量级,足够满足要求。

同样,框和长桁接头贴合面的闭合情况最差,最大距离为 0.017mm,也可以满足要求。

(2) 根据理论分析和有限元模拟的结果,在试验件上试验和验证单向压紧制孔工艺。

(3) 总结归纳典型结构工艺参数选择方法、快速试验方法和推荐值。

考虑到试验成本,课题组首先作了平面试验件的制孔试验,有限元分析结果表明,同样支撑条件下,平面试验件的比带曲率的实际试验件贴合面闭合情况差 20% 左右(见图 6),可以说偏保守。测量结果带板和框贴合面毛刺约 0.05~0.1mm,

满足要求。与分析结果差别主要原因为:(a) 上述理论分析没考虑产品本身表面波纹度等误差;(b) 有限元分析本身精度,往往分析出来的刚度比实际略大;(c) 测量误差的影响。如何解决上述问题,特别是产品本身容差问题时下一步研究的重点之一。飞机容差由于不确定性,为分析具体产品提供了不一致性。本文认为按照分析部位容差的极限值进行研究,分析出极限状态下所能采用的工艺参数,然后按照概率方法或蒙特卡洛法对分析部位进行研究,分析出各种概率条件下能采用的工艺参数;最后根据以上分析结果,对容差对工艺参数影响进行敏感性分析,确定最优结果。

从目前的分析来看,长桁接头和框的贴合距离较大,如果考虑实际容差较大的情况,有可能无法保证无毛刺要求,在容差较大时,可考虑长桁接头制孔后,先进行单独拆开去毛刺

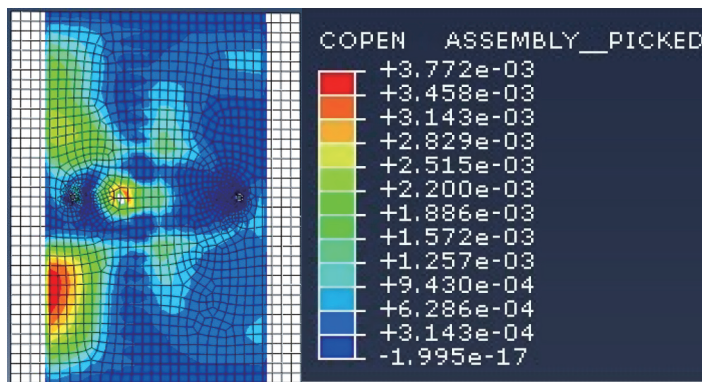


图6 解决方案中平面试验件节点闭合情况分析

的工序,再装高锁螺栓(过盈配合可保证各层孔同心),再完成其他部分的制孔,由于大部件不需要分开,是能够满足工艺要求的。详细的工艺方法需要在针对具体结构,进一步分析后确定。

## 应用建议

自动化装配技术的发展趋势和应用现状,决定了必须尽快对单向压紧自动化制孔技术进行深入研究,以便更好地在工程实际中进行高效应用。

笔者的研究认为:

(1) 当前轻型自动化制孔系统在国内外都得到重视,并取得巨大发展,这使得单向压紧自动化制孔工艺成为急需解决的问题,必须有效控制毛刺高度,才能有效应用这些先进的自动化装配系统。

(2) 参照国外业界的经验,有限元分析是解决单向压紧自动化制孔工艺的重要手段。针对具体的产品结构,抽象出制孔部位的有限元模型,深入地分析压紧力对制孔部位贴合面的影响,有助于大量减少试验数量,甚至对常用的结构最终可以完全取代试验。

(3) 同样压紧力和钻削力条件下,预装配钉的位置和数量对于贴合面贴合情况和毛刺高度有重大影响,因此可以成为重要的优化参数。

## 参考文献

- [1] 蒋红宇. 面向自动化装配的大型客机结构工艺性设计初探. 航空制造技术, 2009 (14): 52-54.
- [2] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术. 航空制造技术, 2009 (14): 61-64.
- [3] Melkote S N, Newton T R, Hellstern C, et al. Interfacial burr formation in drilling of stacked aerospace materials. Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2nd-3rd April, 2009, University of Kaiserslautern, Germany, 89-98.

(责编 侧卫)