

大尺寸透明件注射成型技术的研究进展

陈宇宏

(北京航空材料研究院,北京 100095)

摘要 分析了飞机透明件注射成型技术的基本思路,并传统热弯成型技术进行了比较。介绍了国外飞机透明件注射成型技术的研究与发展经历,以及国内研究进展。

关键词 透明件 聚碳酸酯 注射成型 无骨架

飞机透明件是典型的大尺寸透明件。传统飞机透明件的成型大都建立在板材热弯成型的基础上,整个生产过程十分复杂,有 30 多个主要工序,每个工序都是劳动密集型,生产周期长,因此生产成本极高;同时有许多工序容易对透明件的光学性能和力学性能产生不利影响,例如在热弯成型过程中引进的拉、压应力及骨架连接时钻孔引进的应力集中均会导致透明件失效,因此传统透明件的使用寿命低。

随着先进战斗机的发展需要,传统飞机透明件的高成本、低寿命及维修复杂的缺点暴露无疑。这就促使人们去研究新的成型技术。

透明件的注射成型技术正是在这种背景下得以开发的。此种注射成型是将树脂粒料通过注塑机和成型模具直接成型出制件。其特点是周期短,生产效率高,易实现自动化,设计自由度大,可以制造出外形复杂、尺寸精确可控且可带有镶嵌件的制件,是一种高性能、低成本技术。国外从 20 世纪 80 年代起开始研究透明件的注射成型技术。美国空军(US-AF)于 1985 年提出了直接成型无骨架飞机透明件计划(FTP)^[1-2],其目的是证明飞机透明件注射成型技术的可行性。1997 年开始实施的下一代透明件计划(NGT)的目的是发展透明件注射成型技术^[3-4]。2003 年 12 月第一个安装注射成型飞机透明件的 T-38 教练机实现了首飞。目前注射成型的聚碳酸酯(PC)透明件技术正成为美国新一代透明件技术的核心内容。

国内现役飞机的透明件制备依然采用板材热弯成型方法,对于飞机透明件注射成型技术的研究鲜有报道。笔者从“十五”开始进行了飞机透明件注射成型技术的基础性研究,目前已成型出全尺寸 PC 风挡样件,证明在国内现有条件下,采用注射成型技术可以成型出大尺寸厚壁 PC 透明件,缩短了飞机透明件成型技术方面与国外先进技术的差距。

1 飞机透明件的注射成型技术基础理论

1.1 注射成型

传统飞机透明件的生产过程包括平板制造、平板的层合、平板的热弯成型、边缘修整、钻孔、成型件和骨架的密封及骨架的安装等步骤。其中平板的制造需要先挤出或浇铸出板材坯件,然后抛光制备出航空级板材,整个过程劳动密集、成本高、技术难度大,因此传统飞机透明件技术是一种高

成本、低效率技术。

传统透明件的生产过程还存在许多影响透明件性能和寿命的步骤,例如热弯曲过程中会在制件中引入拉伸和压缩应变与应力;制件边缘的钻孔可成为裂纹源。此外平板热弯成型本身也有技术上的局限性,比如,①无法制成改变厚度的透明件,不利于实现轻量化,而理想的透明件应该是中间薄、边缘厚(即厚度可以“裁减”);②难以成型出外形复杂的制件;③外形尺寸重复性不好等。

采用注射成型技术可以彻底抛弃传统热弯成型方法中所有的繁琐和易于影响制件的步骤,从而降低透明件的成本,提高透明件的性能和寿命。同时,利用注射成型技术可以实现轻量化,减小成型过程中的残余应力,并且可以制造出传统方法难以制造的外形复杂且重复性好、厚度变化和带有边缘锁紧机构(无骨架)的高质量透明件,以满足飞机部件一体化要求。透明件的注射成型和传统热弯成型的过程及特点比较分别见图 1 和表 1。

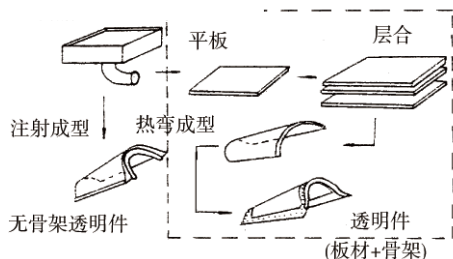


图 1 透明件的注射成型与传统热弯成型过程比较

尽管注射成型的优势明显,但传统注射成型的注塑压力很高,注射过程中易产生分子取向和使凝聚态结构不均匀,难以获得光学质量均匀的透明件。一般来说,传统的注射成型往往只适合于成型尺寸小、薄壁、对光学性能要求不高的制件,而飞机透明件是大尺寸、厚壁的光学级制件。高光学级性能要求制件残余应力小,而成型大尺寸的厚壁制件需要长的注射周期,因此飞机透明件的注射成型是一种低压、长周期的注射成型过程,其特点是:①注塑压力低;②注射周期长;③适合制造残余应力小的厚壁(变厚)制件;④有独特的模温控制系统。

虽然飞机透明件的注射周期比普通注射成型制件的周

表 1 透明件的注射成型和传统热弯成型的特点比较

成型方法		传统热弯成型	注射成型
制造成本		原材料利用率低(约 60%),劳动强度高,生产周期长,成本高	材料耗损低,劳动强度低,生产周期短,成本为传统透明件的 40% ~60%
制件性能特点	外形	不易控制,重复性低;难以制造外形复杂的先进透明件	外形可以精确控制且重复性好,外形的复杂程度不受限制
	厚度	成型时厚度控制十分困难,例如 F-16 飞机透明件的厚度偏差为 17%	可以精确控制透明件各点的厚度
	应力	成型过程中易产生应力,从而影响制件性能	采用合适的注射成型技术,透明件的残余应力很小
	轻量化	制件均匀的厚度不利于轻量化;金属骨架不利于轻量化(飞机透明件)	通过厚度裁剪可减重 5% ~15%,若注射镶嵌连接件(无骨架设计)以替代金属骨架,还可减重 20%
维修		对于飞机透明件,维修复杂,成本高,更换的时间需要数天	对于飞机透明件,若采用无骨架设计,维修简单,成本低,更换透明件只需几小时
寿命		寿命短	寿命长, F-16 飞机注射座舱的寿命周期是传统座舱的 4 倍

期要长,但远低于传统热弯透明件的成型周期(生产一个传统热弯透明件需要数周时间)。图 2 为 NGT 计划中一个工作日(8 h)生产的透明件。由图 2 可见,透明件的注射成型技术可以大大缩短生产周期,降低生产成本。

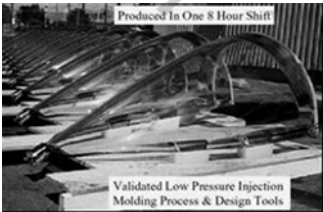


图 2 采用低压注射成型技术 8 h 制造出的透明件

1.2 无骨架

注射成型的优势之一在于引进了无骨架设计,这是由于注射成型可以制造出带有镶嵌件的制件。传统热弯透明件是由热弯成型的透明板材和与其材料不同的骨架结合起来的,而注射成型透明件可以设计成边缘(底梁)加厚且内置镶嵌件的结构,从而不需骨架,即无骨架透明件。采用边缘加厚可提高强度以替代骨架;将镶嵌件设计成具有“插销”功能的结构,以实现透明件与机身的连接。

无骨架透明件不使用骨架,也无需使用透明件与骨架连接、骨架与机身连接所需的密封材料及螺栓、螺母和垫片等紧固件,降低了透明件的件重和成本。同时,传统透明件的骨架安装、检查、整修十分复杂、繁琐,更换一个透明件需要数天。而无骨架透明件仅通过镶嵌件与机身直接相连,安装方便,更换一个透明件只需几小时,大大降低了安装维修所需要的时间和费用。此外,传统透明件在边缘附近的钻孔破坏了材料的连续性,降低了冲击性能,而且会导致应力集

中,从而引发材料的银纹和裂纹,无骨架透明件消除了钻孔和骨架,从而也避免了由此引发的应力集中,有利于提高透明件的性能和寿命。

总之,透明件的注射成型技术省去了传统热弯成型方法中诸多繁琐和易于影响制件的步骤,从而降低了透明件的成本,提高了透明件的性能和寿命。如果设计成无骨架结构,还可以实现轻量化,减小残余应力,并且可以制造出传统方法难以制造的外形复杂、厚度变化的高质量透明件。

2 国外研究与发展状况

美国从 1985 年起就开始发展军用飞机用透明件的注射成型技术,研究历程经历了两个阶段:即 FTP 和 NGT 阶段,见表 2。在经历了十几年的努力后,目前注射成型 PC 透明件技术正成为美国新一代透明件技术的核心内容。

表 2 美国飞机用透明件注射成型技术的发展经历

时间	阶段	目的	标志
1985 ~ 1996	直接成型无骨架飞机透明件计划(FTP)	证明采用注射成型制造飞机用 PC 透明件的可行性	平面验证件、小尺寸锥形件、F-16 飞机前风挡
1997 至今	下一代透明件计划(NGT)	进行两类透明件的装机验证试验,一种为飞机的前风挡;另一种选为风挡座舱一体化透明件	2003 年 12 月第一个安装注射成型透明件的 T-38 教练机实现了首飞

2.1 FTP 计划

1985 年美国空军首次提出 FTP 计划,该 FTP 计划由 Wright-Patterson 空军基地的莱特实验室(Wright Laboratory, WL)负责,其它公司有 Loral(Goodyear Aerospace)、Lockheed、Envirotech 及 UDRI 等单位参加,任务出台后分三个阶段实施。

在第一阶段(1985 年 ~1988 年),证明了注射成型方法适合于生产飞机无骨架透明件的生产。采用低压长周期注射成型技术成型出小型平面和曲面(锥形)样件,通过测试样件性能,确定了注射成型的材料和工艺。

在第二阶段(1988 年 ~1993 年),发展和证实了直接成型无骨架飞机透明件的整体分析和设计能力,该阶段的完成形式是分析设计软件包(ADP)。具体工作是将计算机辅助设计与整个注射成型结合起来,利用计算机辅助工程技术(CAE)-P3/Patran 建立一个可以进行结构、热、光学、模具设计和注射成型工艺参数等分析设计的 ADP。ADP 采用的试验验证件(CFT)是按 F-16 飞机座舱的前半部分设计,具有高性能飞机透明件所需要的复杂几何形状,同时还具有加厚的底梁和底梁内置的镶嵌件(插销)结构,即无骨架结构特征。所成型的 CFT 达到了以下指标。

(1) 尺寸和厚度 尺寸具有非常好的稳定性,在相似的成型条件、相同的位置厚度变化范围为 0.025 ~0.076 mm。

(2) 光学性能 透光率为 75%,雾度为 5.8%,但角偏差和光学畸变比传统热弯透明件严重。

(3) 力学性能 从 CFT 实验件取样测得的拉伸弹性模

量、断裂伸长率、韧性和冲击性能等都与挤出板材相似。

(4) 耐环境性能 从 CFT 实验件取样测试结果表明,其耐环境性能与挤出板材相当。

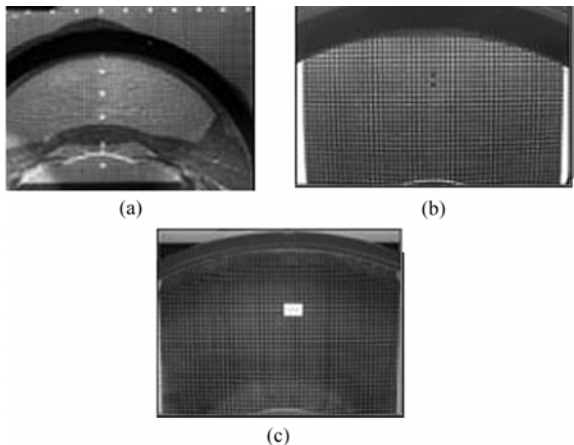
在第三阶段(1993 年~1996 年),用 ADP 设计透明件和模具,并选用最佳成型工艺生产用于外场的全尺寸标准件。实际上小批量试生产了 F-16 飞机前风挡,连续成型了 160 个透明件,证明采用注射成型技术可以连续生产高质量的透明件。

2.2 NGT 计划

由于 FTP 计划执行得十分成功,而 FTP 适应了先进飞机对透明件的整体设计要求,同时也是一种低成本、高性能技术,因此从 1995 年起美国军方、政府(包括 Aircraft System Program Offices, Major Operating Commands 及 Aeronautical Systems Center Headquarter 等)和多家企业(包括波音公司、传统飞机透明件生产商和注射产品生产商等)联合起来,以 Wright Laboratory 为主负责单位,计划实施 NGT,但正式启动时间为 1997 年 8 月。NGT 的目的是验证注射成型无骨架透明件技术的有效性,以满足先进攻击机未来战斗任务所需要的整体设计要求。

NGT 的应用目标包括 F-15、F-22 和 JSF(F-35) 等飞机。NGT 包括两类透明件的装机验证试验,一种选择飞机的前风挡,实际选择 T-38 飞机;另一种选用风挡座舱一体化的透明件,如 F-22 飞机。

NGT 原计划的执行时间为 1995~1999 年,但实际完成时间却大大推后,这是由于注射成型透明件的光学畸变不能满足 F-16、F-22 飞机的要求。1993 年成型出的 F-16 飞机前风挡虽然证明了大尺寸飞机透明件的可成型性和连续成型时的稳定性,但在光学性能尤其是光学畸变上存在问题。NGT 几乎用了近 10 年的时间来突破注射成型透明件的光学性能,通过对成型技术、成型设备、注射模具等方面的技术突破,终于获得了光学性能满足飞机要求的 PC 透明件。图 3 分别为 1993 年、2000 年和 2003 年成型的 F-16 飞机前风挡(网状方格的清晰度表明光学质量的好坏)。由图 3 可



a—1993 年成型; b—2000 年成型; c—2003 年成型

图 3 注射成型 F-16 飞机前风挡光学畸变改进过程

知,注射成型透明件的光学性能是逐渐提高的。

2003 年 1 月第一个光学性能完全符合飞机要求的注射成型无骨架透明件(F-16 飞机前风挡)终于问世。该部件在 2003 年第 31 届结构塑料年会上展示并获得最高奖(见图 4)。2003 年 12 月安装注射成型前风挡的 T-38 教练机实现了首飞(见图 5)^[5]。



图 4 F-16 飞机前风挡



图 5 安装注射成型前风挡的 T-38 教练机实现了首飞

NGT 另一个重要应用目标是研制风挡座舱一体化的透明件,最终应用目标为 F-22 飞机透明件,见图 6。F-22 飞机透明件的体积和件重是目前飞机中最大的,单件重达 160 kg,同时具有适应隐身需要的复杂外形,采用板材成型工艺时工艺复杂、成品率低、周期长;根据 NGT 计划,如果采用注射成型,则可通过厚度裁减和无骨架设计,使 F-22 飞机透明座舱减至 90 kg,可见注射成型技术的优势十分明显。早在 1997 年 NGT 计划就选择了 F-22 飞机风挡座舱一体化透明件作为验证平台(见图 7),于 2003 年注射成型的 F-16 飞机前风挡的光学性能达到要求后,NGT 立刻转入 F-22 飞机透明件的注射成型研究,根据计划,安装注射成型飞机



图 6 注射成型飞机风挡座舱一体化透明件的计划应用目标——F-22 飞机



图 7 NGT 计划研制的注射成型风挡座舱一体化透明件

透明件的 F-22 飞机在 2004 年底进行飞行试验^[6-8]。

飞机透明件的注射成型技术从 1985 年发展至今已有 20 多年的时间,它是制造透明件的一种革命性技术,是一种典型的高性能、低成本技术。目前是国外下一代透明件技术的核心内容,并有望迅速进入使用阶段。

3 我国飞机透明件的研究状况

目前,我国制备飞机透明件依然采用板材成型技术。关于飞机透明件注射成型技术的研究,除北京航空材料研究院以外,未见其它单位报道。

“九五”期间,笔者开始对注射成型无骨架透明件技术进行基础性探索研究,研制出带有无骨架特征的曲面样件。该样件主视区的厚度为 7 mm,边缘增厚至 18 mm,透明件的锥角为 28°,见图 8。由此可初步证明,注射成型无骨架透明件技术需用的材料、工艺装备、模具材料和加工手段国内均有解决途径。

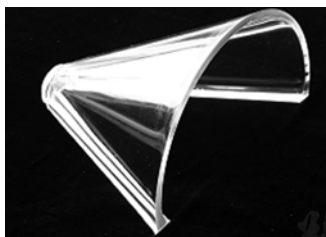


图 8 无骨架特征的注射成型曲面样件

“十五”期间,笔者开始研究大尺寸透明件的注射成型技术,在注射成型 CAE 技术的基础上,研制出带模温控制系统的大尺寸镜面级注塑模具,成型出全尺寸风挡,见图 9 和图 10。目前初步解决了大尺寸透明件的可注射成型性问题,但注射透明件的光学性能还不能完全满足飞机的要求,期待在以后的研究中解决。

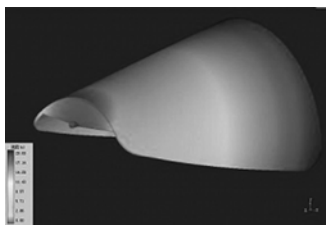


图 9 全尺寸风挡的注射成型模拟

4 结语

飞机透明件的注射成型技术是制造透明件的一种革命

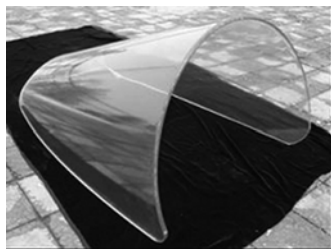


图 10 全尺寸注射成型风挡

性技术,是一种典型的高性能、低成本技术,是下一代透明件技术的核心内容。国外历经 20 余年的时间进行了研究,目前已完成装机飞行验证试验,即将进入使用阶段。而国内目前的研究还处在初级阶段,透明件光学性能的改进技术和无骨架技术是下一步研究的重点。飞机透明件的注射成型技术需要将大型注射成型设备技术、大尺寸光学级注塑模具加工技术和注射成型 CAE 技术等有机结合在一起,是一个复杂的系统技术。鉴于国内的探索研究已取得进展,建议抓住时机,深入研究,将我国的透明件技术推进到一个新的阶段。

参考文献

- [1] Pinnell W R. Development of directly formed and frameless aircraft transparency technology[C]. Conference on Aerospace Transparent Materials and Enclosures, 1993: 1088 - 1110.
- [2] Griffiths A. Moulding the world[J]. Materials World, 2006, 14 (11): 35 - 36.
- [3] James E Fritz. Analyzing explosive of the next generation transparency (NGT) [C]. Proceedings of the 1997 35th Annual Symposium Safe Association, 1997: 138 - 141.
- [4] Frank G J, Pinnell W R. Mechanical properties evaluation of directly formed transparency materials[C]. Conference on Aerospace Transparent Materials and Enclosures, 1993: 1149 - 1161.
- [5] Gannon A J, Gentner F C, Schopper A W, et al. Will canopy-embedded mild detonating cord affect aircrew visual performance, NTIS - ADA329401[R], 1997.
- [6] Mccarty R E. Next generation transparency(NGT) program[C]. DDR&E Affordability Task Force Conference, 1998.
- [7] Materials World Group. Living it large injection moulding aircraft canopies[J]. Materials World, 2003, 11 (8): 19 - 20.
- [8] Forrest Day. Injection molding aircraft transparencies[C]. 31st Annual Conference and Design Recognition of the SPI Structural Plastics Division, 2003.

PROGRESS IN RESEARCH OF INJECTION MOLDING TECHNOLOGY FOR AIRCRAFT TRANSPARENT PART OF LARGE SIZE

Chen Yuhong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT The theory of injection molding technology for aircraft transparent part was analyzed, and this technology was compared with conventional bent-from-sheet method. The progress of injection molding technology for aircraft transparent part at home and abroad was introduced.

KEYWORDS transparent part, polycarbonate, injection molding, frameless