

基于套裁的复合材料铺叠料片排版技术研究

刘 兰,曹之鹏,胡业勤,庞 婧

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司复合材料加工厂,成都 610092)

[摘要] 从实际生产经验出发,探索了提高材料利用率的方法。通过对矩形和异形铺叠料片算法分析,制定了最佳放置策略规则。通过对蒙皮余量的修改工艺性验证后,对余量设置提供了参考依据,创造性地提出了通用零件余量设定原则,减少由于余量设置不精确造成的浪费。通过套裁方案的实施,切实有效地减少了材料的浪费,提高了原材料的利用率。

关键词: 复合材料;套裁;计划管理;工艺设计;排版规则

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.15.053



刘 兰

硕士,工程师,研究方向为复合材料数字化、自动化制造。

近几年,低碳高效能源制造在国内外航空航天等制造业中越来越受重视,成飞公司也制定了很多的节能减排绿色生产发展目标。低碳高效能源制造的关键方向之一是提高原材料的利用率。其中,以提高材料利

用率为目标的下料管理系统有利于制造企业在生产计划管理、制造过程管理、设备占有率管理、材料利用率管理、物流管理以及冻库管理等方面实现高效绿色低碳制造的目标。综合来看,提高材料利用率可以带来良好的经济效益和有效的低碳效应,有利于复合材料制造的发展^[1-2]。

由于复合材料原材料价格昂贵,每降低1%的复合材料使用量,带来的成本效益是非常显著的,因此,基于套裁的复合材料铺叠料片排版技术是提高原材料利用率降低生产成本及节能减排的关键。以方向舵蒙皮为例,每架份使用CYCOM 970/PWC T300 3K ST碳布预浸料总重量约120kg,现有材料利用率约62.5%左右;若利用率提升1%,则每架份可节省费用约3000元,同时减少危废弃物排放345.6kg。民机转包项目生产批架次多,一年节省下来的费用相当可观^[3-4]。

料片排版主要是指在指定幅宽

的原材料上排放根据零件外形、铺层设计、工艺制造要求等裁切成的不同角度和规格的料片。本文主要研究在保证料片纤维方向、工艺设计条件及余量要求情况下,最大限度地提高材料利用率的方法^[5-7]。

在实际生产中,零件的外形、铺层设计、工艺要求等决定了二维展开后铺叠料片的形状,铺叠料片的复杂程度直接影响排版后原材料的利用率。一般人工排版方法容易产生大量的边角余料,并且生成的程序在下料过程中走刀顺序处于无序状态,从而使得生产率低,设备的空置占有率高,使得下料环节成为生产瓶颈。排料优化问题从数学计算复杂性理论上来看,属于具有最高计算复杂性的一类问题。因此通过一些优化算法,比如动态规划、遗传算法、模拟退火算法等求解势必导致计算复杂或者根本无解。从最早研究排料优化问题开始,虽然经历几代人的努力,但迄今尚无成熟的理论和有效的数

值计算方法。异形件排样优化问题普遍存在于复材零件的设计制造生产中,但由于其排样件形状相对不规则,排样规律难寻,加大了问题求解难度。

套裁的研究

实际生产中对原材料消耗巨大,为提高材料利用率,对二维排版问题中的套料和料片精确展开优化问题进行研究,并结合实际工程应用进行了验证。现以二维料片套料,以及围绕其进行的生产计划管控等为基础介绍降本思路、方法和相关案例,探索提高材料利用率的方法。

1 精确展开工艺方案优化

改进前零件工艺余量设置方案:一般铺层扩展到抓紧条区域内边缘,全铺层扩展到抓紧条位置外,超过零件装配余量 1~2 倍,部分铺层余量完全铺盖整个抓紧条,如图 1 所示。

全铺层余量全部超出抓紧条区域的工艺设置是为了防止蜂窝芯在热压罐固化成型的热膨胀过程中进行滑移,以及保证固化成型后零件前缘位置孔隙率值在标准范围内。经过多次试验验证,保证蜂窝芯的位置不发生移动的关键因素是:蜂窝芯下最后 1 层 0° 或者 90° 和蜂窝芯上第 1 层 0° 或者 90° 的全铺层在抓紧条上固定。45° 全铺层由于是斜向

膨胀收缩,对蜂窝芯的位置移动影响不大,所以对此类铺层可设置零件装配余量。前缘位置翻过 R 角的余量不能取消,但可以减少到刚到转边位置。经过多次试验验证,改进后的零件工艺余量设置方案为:除蜂窝芯下最后 1 层 0° 或者 90° 和蜂窝芯上第 1 层 0° 或者 90° 的全铺层的余量设置到抓紧条区域,其余铺层余量由抓紧条区域回收至零件的装配余量线。所有铺层的 R 区位置余量全部减少,蜂窝芯下最后 1 层 0° 或者 90° 和蜂窝芯上第 1 层 0° 或者 90° 的全铺层设置为 0.05m,其余为 0.038m。对余量进行工艺改进后,单张蒙皮直接节省材料近 7m。

通过对大量试验的实际数据收集,制定了工艺余量的制定原则:(1) 保证得到零件的最终精度;(2) 考虑机械加工方法、设备加工范围;(3) 应考虑固化成型过程中的变形(部分零件根据制造常见缺陷,可以根据故障范围局部设置余量);(4) 考虑蜂窝在固化成型过程中的位移;(5) 考虑零件的大小尺寸、装夹、定位和夹紧;(6) 在保证零件质量的前提下,选择最优余量设置以求缩短加工时间,减少材料损失率以降低成本。

2 套料问题研究及排版标准化

套料问题是寻找一种把众多铺叠料片排放在一张整的材料上,以求得铺叠料片排样率最高,或者材料的

损失率最小的方法。进行套料的工艺要求及约束条件有:

(1) 任意两个铺叠料片不能重叠。

(2) 铺叠料片均不能超出材料边界(排除毛边尺寸、避开封边线位置等)。

(3) 铺叠料片排放后要满足一定的下料工艺。

(4) 单个铺叠料片是否能进行旋转,需要根据设计和工艺要求及材料属性而定。例如单向带预浸料、缎纹织物预浸料只能旋转 180° 进行排版;平纹织物预浸料可旋转 90° 或者 180°;胶膜、表面膜等无定义方向的材料则可以任意旋转角度。

(5) 根据不同复合材料特性,料片之间是否需要设置间隙。例如织物预浸料之间可以不设置间隙,而单向带预浸料根据材料特性以及背衬的材质设置 5~10mm 的间隙,也可以设置共边来取消间隙。

表 1 归纳了铺叠料片的几种类型。

本文讨论的套料排版是指零件通过 CATIA CPD 软件或者通过 FIBERSIM 软件经过展开分析后生成的二维料片的排版。二维料片的排版通常安装形状可以分为矩形料片套料排版(简称矩形件套排)和异形件料片的套料排版(简称异形件套排)。对可以适用于下料机进行裁切的材料都

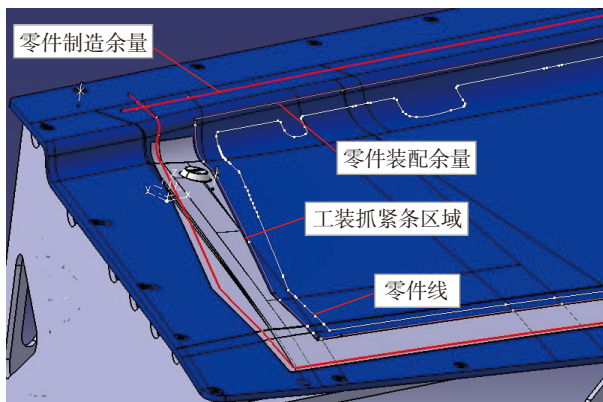


图1 余量示意图
Fig.1 Margin diagram

表1 铺叠料片类型
Table 1 Type of ply

类型	具体表现
形状	规则图形(矩形、正方形、柳条形)
	不规则图形
数量	单一料片
	批量料片
约束	有材料方向,限制固定角度
	无定义
间隙	指定料片间间隙
	无间隙

适用本方法,常见的材料有单向带预浸料、织物预浸料、胶膜、铜网等。

2.1 矩形件套排的特性分析和规则

矩形件套排是复合材料制件生产中完成许用值及材料力学复试最常见的排版图形,最大的特点就是待排铺叠料片全都是矩形,数量大,尺寸种类少,进行套排时存在很强的规律性。矩形件排料,就是将所有的料片放置在材料可用范围的某个位置上。国内外的专家学者提出很多种放置策略,有占脚法、沿边法、先四周后中心法等。经大量的工程试验,借用自动下料机 Cutwork 工程软件的使用,目前掌握的占角法最佳放置策略规则如下。

第1步:选择左下角放置(包含横放、竖放两种排放形式,横切、竖切两种切割方式);

第2步:面积越大越先放置;

第3步:矩形件的长宽比例越大越先放置;

第4步:选择面积最小的料片;

第5步:将长或宽相同或相近的料片等边相邻排放。

肋柱即是典型的矩形件套料排版,如图2所示。

2.2 异形件的套料特性分析和排版原则

在实际生产中,异形件套料是最常见的套料之一,异形件套料是指将所有不规则的铺叠料片放置在材料可用范围的某个位置上,并确保料片之间不重叠,使得材料剩余面积最大。其最大的特点是待排的铺叠料片形状多种多样,套排时没有规律性,如图3所示。

异形件套料面对的第1个困难是几何问题,其主要在于如何确定不同几何体之间的位置关系。尽管异形零件的任意多边形在形状上各不相同,但按照形状大致可以分为凹形多边形,凸形多边形以及两者的组合共3类。在实际生产过程中,1个台面套料的长度基本上由大的铺叠料

片排放决定(不考虑下料机床的长度),小的铺叠料片很容易摆放在空白处的等待点。把所有的铺叠料片分为两个组:一组为大铺叠料片;一组为小铺叠料片。先把大的铺叠料片进行排版,再寻找空白处进行小料片的排版,不停迭代,改进套料,直到套料长度没有比之前的套料长度长为止。因此,异形件套料排版要考虑的因素有:大铺叠料片的排放位置、小铺叠料片的总数、凹凸两种类型料片的比例和所有待排料片的原始方向以及旋转后的方向等。

与矩形件相比,异形套料不仅异形件本身可能为任意多边形,而且套料位置具有任意性,它有两大显著特点:异形件形状上的不规则性,涉及到多边形计算。异形件旋转角度的变化,任何一个小的角度变化都可能形成不同的套料效果。复合材料零件碳布预浸料的旋转角度一般有 90° 、 180° 两种,单向带预浸料旋转角度只能是 180° ,胶膜和表面膜材质的料片旋转角度是任意的。

(1) 铺叠料片的共边处理方法。

在铺叠料片下料时,如果两个零件有相同的直边,切割时就只需要切一刀,很明显这样既可以节省材料,又提高了生产效率。对于相同的铺叠料片,如果该铺叠料片有直边,那么这些相同的料片就可以套排成共边形式。对于不同的铺叠料片,如果有直边,同样可以搜寻其他的铺叠料片的直边,用于共同切割,共边切割方法如图2所示。

(2) 铺叠料片的旋转处理方法。

在进行零件套裁前,首先选择相同铺叠料片或者面积相识的铺叠料片进行组合。组合算法为:先固定1个铺叠料片,第2个铺叠料片按照 0° 、 180° 方位进行组合,以面积利用率最高为目标(图4)。

(3) 异形件零件套排原则。

起始位置:通常情况下,料片的排版从材料的左下角开始作为第1个铺叠料片的放置位置,对于特殊要求,也可以从材料的其他位置开始排料(图5)。

零件面积:一般情况下从最大

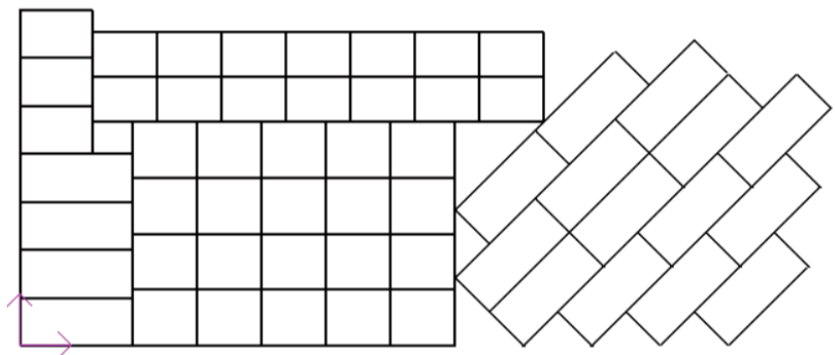


图2 肋柱矩形件套料

Fig.2 Nesting drawing of rib column rectangle

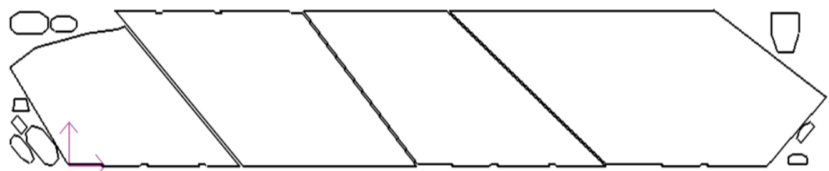


图3 蒙皮套料图形

Fig.3 Diagram of skin nesting

面积的铺叠料片开始排料,遵循此原则,铺叠料片在材料上进行排料之前,先按照铺叠料片的大小进行排序,然后以此顺序进行排料。

内轮廓套排:当第1个铺叠料片按起始位置要求及最大面积原则放置到材料上之后,首先要对该零件的内轮廓区域进行套排,如图6所示。

3 设备占有率管理的优化

排版完成后,需要对图形的运行轨迹进行设定,如图6所示,为提高材料利用率,序号相连的两块料片在排版时,可能会被放在相互距离较远的位置,如P1-1与P1-2。而默认的切割顺序,是从序号小的料片依次向序号大的料片进行切割,导致了如下排版的10张料片,切割顺序为P1-1 → P1-2 → P2-1 → P2-2 → … → P5-1 → P5-2。

使用设备试运行,演示后形成的刀具空行程如图7中细灰色线条所示。

在CUTWORK软件中导入完成排版的DXF图形,可以将切割顺序设置为顺时针切割、逆时针切割、按部件切割,或者手动点选样片顺序来达到重新设计切割顺序的目的。本示例采用手动点选的设置方法设置切割顺序,设置完成后,空行程如图8细灰色线条所示。

通过对切割路径的优化,调整设备运行轨迹,减少下料机设备的运行时间,提高了设备的使用效率,减少能源消耗,也达到绿色节能减排的要求。

4 生产计划管理的优化

在实际生产中的套料下料排版图大多指不同零件组合成一个排版图的方式,其中零件的组成直接受生产计划、风险库存等影响。在进行套料编制时需要根据生产计划安排和占用特殊设备的运行周期和时间,对项目所有在制零件进行套排计划。

工艺人员将每日的下料程序导入软件平台中,计划员根据生产计划将“JOB TRAVELLER”工作表(包括Job order: XXXXX, part

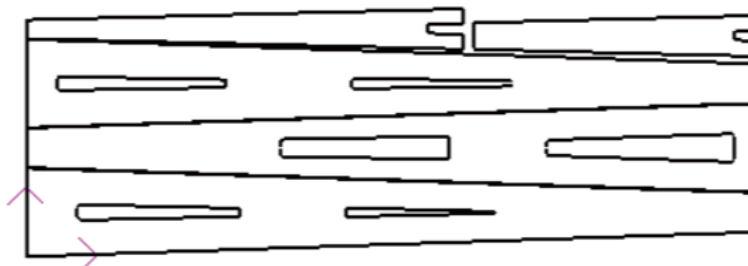


图4 铺叠料片旋转组合图示

Fig.4 Rotation combination diagram of ply

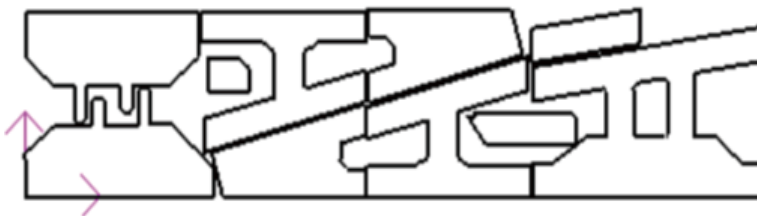


图5 异形料片排版

Fig.5 Layout of special-shaped ply

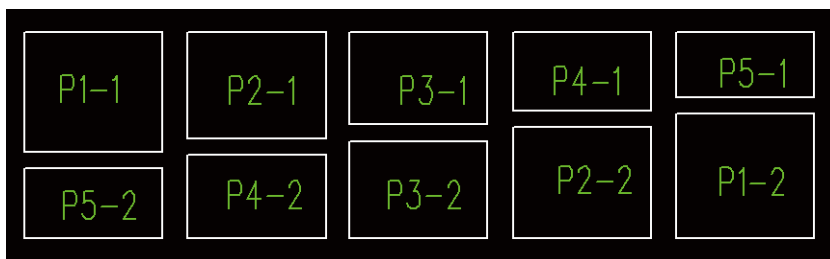


图6 料片位置示意图

Fig.6 Location diagram of ply position

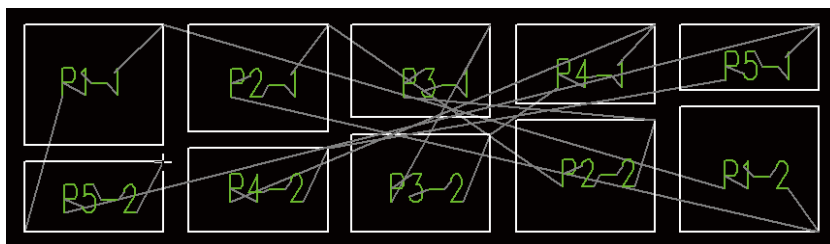


图7 刀具轨迹

Fig.7 Tool path

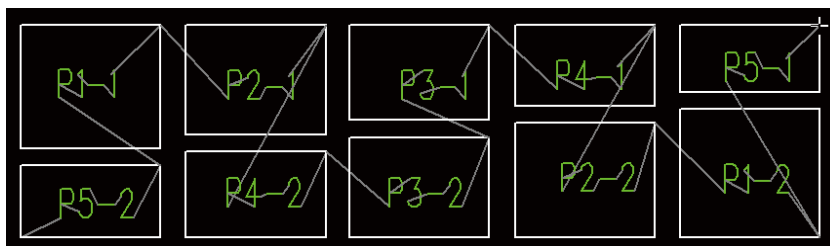


图8 更改后的刀具轨迹

Fig.8 Tool path after change

number:XXXXXX,Part Name:XXXXXX, Material part number/Core thickness, Oper, Batch/Lot#, Block#, Foam Serial#, Batch Log#, Roll# / P.O.#, Expir. date / Reval date, Expose date/ Time, Operator stamp/Date)置于净化间,下料操作人员根据每日“JOB TRAVELLER”工作表进行下料操作,开工前核实下料程序信息与软件平台中程序的一致性,确认无误后进行下料操作。人员在操作下料时负责填写“JOB TRAVELLER”上的批/卷号、材料外置时间信息。

套料计划最核心的依据是零件材料类型,不同零件的相同材料可以放在一个下料图中进行排版,然后根据零件标识进行分包。零件标识由两部分组成:零件信息和料片信息。零件信息表示该料片所属零件身份,便于下料后分包;料片信息表示该料片的层数、位置等信息。

下料完成后,操作人员根据各个零件编号将同一个零件的料片集中;如果该零件直接用于当前生产,则把料片放置在线棒车上,“JOB TRAVELLER”工作表随着一起流转,转交给铺叠工段使用。如果当前套料未及时使用,则填写套料信息表,送回冻库管理。

结论

本文从实际生产经验出发,探索

了提高材料利用率的方法。通过对矩形和异形铺叠料片算法分析,制定了最佳放置策略规则,总结提炼出了一系列诸如共边处理方法、旋转排版方式、内轮廓套排的新方法。对套裁排版的研究成果可广泛运用到其他机型中。通过对蒙皮余量的修改工艺性验证后,对所有相同构型零件余量设置提供了参考依据,创造性地提出了通用零件余量设定原则。减少由于余量设置不精确造成的浪费。通过套裁方案的实施,切实有效地减少了材料的浪费,同时推动了计划管理、运输过程管理、冻库管理以及库存管理能力的提升。

通过上述降本增效思路及方法的开展和实施,有助于实行精益化管理,减少余料和废料的产生,从而更好地控制生产成本,增加产品利润,提高市场竞争力,同时达到高效低碳制造的目标。

参考文献

- [1] 周玉宇. 基于 Memetic 算法的套料与切割优化方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [2] 陆敏. 多约束条件下的矩形件优化排样研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [3] 邓冬梅, 周来水, 安鲁陵. 复合材料铺层优化排样的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(6): 17-21.
- [4] 王彩虹. 二维不规则多边形自动布局系统的研究与开发[D]. 天津: 河北工业大学, 2002.
- [5] 王金敏, 查建中. 布局问题的模拟退火算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, 10(3): 253-259.
- [6] 邓良才, 吴建军, 张深, 等. 复合材料自动下料优化排样方法[J]. 航空制造技术, 2013, 56(15): 99-102.
- [7] 董志强, 秦月霞, 姜小会. 人工智能技术在排样技术上的发展现状[J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50(2): 80-83.

rectangular parts with multiple constraints[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

DENG Dongmei, ZHOU Laishui, AN Luling. Research on composite laminate packing problem[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(6): 17-21.

WANG Caihong. The research and development of two-dimensional irregular polygons packing system[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2002.

WANG Jinmin, ZHA Jianzhong. A simulated annealing packing algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 1998, 10(3): 253-259.

DENG Liangcai, WU Jianjun, ZHANG Shen, et al. Optimization layout method for composites automatic feeding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(15): 99-102.

DONG Zhiqiang, QIN Yuexia, JIANG Xiaohui. The development status of artificial intelligence technology on nesting problems[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50(2): 80-83.

通讯作者: 刘兰, E-mail: 32056950@qq.com.

Research on Composite Ply Typesetting Based on Packing

LIU Lan, CAO Zhipeng, HU Yeqin, PANG Jing

(Composites Processing Plant, AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] Based on the practical production experience, this paper explores the methods to improve the utilization rate of materials. Based on the analysis of the algorithm of the rectangle and the special shape, the rule of the best placement strategy is established. After the verification of the modification process of the skin allowance, the reference basis for the allowance setting is provided, and the general part allowance setting principle is creatively proposed. Waste is reduced due to imprecise margin setting. Through the implementation of the program, the waste of materials is effectively reduced and the utilization rate of raw materials is improved.

Keywords: Composites; Ply packing; Plan management; Process design; Typesetting rules

(责编 大漠)