

大型复合材料 Invar 钢模具型板预成形适应性研究^{*}

郝 巨¹, 李明祥¹, 范喜祥¹, 郭琪琪¹, 黄朝炎², 胡 勇²

(1. 中航飞机股份有限公司, 西安 710089;

2. 武汉理工大学交通学院, 武汉 430063)

[摘要] 针对 Invar 钢模具型板形状复杂多样, 传统加工方法效率低、质量低等缺点, 借鉴双曲面船体外板成形加工经验, 对活络方形压头非对压技术在 Invar 模具型板预成形加工上的适应性进行了研究。对 Invar 钢的材料特性、形状特点、成形工艺进行了分析, 成形结果表明活络方形压头非对压技术结合大吨位油压机能够有效地加工 Invar 钢模具型板, 成形精度满足 Invar 钢模具型板预成形生产要求。

关键词: 复合材料; Invar 钢模具; 成形工艺; 活络模具; 双曲面板

Research on Suitability of Large Scale Composite Invar Alloy Mould Plate Preforming

HAO Ju¹, LI Mingxiang¹, FAN Xixiang¹, GUO Qiqi¹, HUANG Chaoyan², HU Yong²

(1. AVIC Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China;

2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

[ABSTRACT] In view of the complexity and diversity of Invar alloy mould plate shape, the low efficiency and low quality of traditional processing methods, on the basis of actual production and referring to the experience of ship hull plates forming process, the adaptability of the rotary square punch and non-pair stamping technology on Invar mould plate forming was studied. The material characteristics, shape characteristics and forming process of Invar alloy are analyzed, and it is indicated that the rotary square stamping punch combined with the large tonnage oil press can effectively form the Invar alloy mold plate, and the forming error is less than the production demand.

Keywords: Composite; Invar alloy mould; Forming process; Adjustable die; Double curvature plate

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.074

Invar 钢是一种镍铁合金, 具有膨胀系数小, 强度、硬度不高, 导热系数低, 塑性、韧性高等特点^[1]。主要用于显示器用荫罩^[2]、复合件模具^[3]、LNG (液化天然气) 运输船的保温层^[4]等。随着碳纤维复合材料在航空业大量应用, Invar 钢在制作碳纤维复合材料模具上具有独特的优势^[5]。其中, 模具型面是由 Invar 钢中厚板通过单点压力机等压力设备预成形装配焊接后再用数控机床加工而成。传统的压力机成形方法具有型面切割较小、精度低、效率低等问题, 而切割块较小又会导致焊缝长度大, 出现缺陷的概率也增大; 精度低会导致需要用较厚的板来预成形, 数控加工工作量大, 且型面厚度不均匀, 影响总体质量。在此背景下, 采用更高效率和质量的 Invar 钢板材成形工艺十分必要。

活络方形压头非对压技术是一种新型双曲面板材成形加工技术^[6-8], 能够显著提高双曲面板材的加工效率, 特别适合中厚板的成形加工, 目前已在船厂得到应用^[9]。本技术最初是为船舶建造中的双曲面外板成形加工设计的, 故能较好地适应船体外板的加工。对其他材质和形状的板材成形做过一些试验, 包括铝合金板、钛合金板等, 试验表明该技术的适应性较好。但要用于其他材质的实际生产, 仍需要进行一定的论证, 本文将解决该技术在 Invar 钢模具型板预成形上的应用情况。

1 Invar 钢力学性能对活络方形模具的适应性

国产 Invar 钢材料的主要力学性能如表 1^[10] 所示。可知, Invar 钢具有很好的塑性, 屈服强度小于船用高强度钢, 而船用高强度钢能够很好地适应方形活络模具加工, 从材料屈服强度看, Invar 便于使用活络模具加工。根

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51379167)。

据《黑色金属硬度和强度换算表(GB117274)》可知, Invar 钢的硬度当与船用合金钢 AH36 相近,从现有的加工效果看, AH36 合金钢用活络方形模具加工能较好地控制压痕。

皱折与板材的局部失稳有关,一般而言,失稳与弹性模量及剖面模量成正比,与支撑点跨距成反比。在活络方形模具的简化力学模型中,支撑点跨距与压头大小有关,对某个特定设备,在不考虑弯曲形状的前提下,这一值是确定的,剖面模量与板材的厚度的三次方成正比,也即厚度对起皱的影响最为敏感。Invar 钢的弹性模量大约为普通船用钢板的 2/3,本文研究对象的厚度为 19.05mm。方形活络模具对超过 6mm 厚的船用钢即能很好地控制起皱现象,故此项目的起皱能得到很好地控制。

回弹问题只涉及到加工效率,在加工精度方面是可以克服的,故回弹不直接影响其适应性。

2 Invar 钢模具型板的形状特点对活络方形模具的适应性

本项目所依托的设备船舶三维数控弯板机是主要针对船体外板加工的设备,通常而言,船体外板具有曲率小、曲面光滑等特点。与之相应, Invar 钢模具型板形状则没有这么规则,板的大小差别很大,部分形状局部曲率较大,甚至有些型板存在较为明显的折弯现象(图 1)。这些都给弯板机加工模具型板带来了一定的困难。

2.1 局部折弯问题

针对局部折弯问题,将有 3 种解决方案:

(1) 考虑到 Invar 型板厚度方向有相当的余量,若局部不光顺的地方能够在 3mm 范围内对线型作一定修改,进而转化为光滑曲面,将首先选择采用此方法;

(2) 板材冲压成形后,对部分区域用油压机进行修整;

(3) 形状较大,不便于油压机加工时,将不同区域切分开处理。

2.2 加工形状过大

加工形状较大,一般有两种情况:(1)局部曲率较大;(2)整体上拱高过大。

弯板机在设计时即会考虑加工的理论极限调形半径,如图 2 所示。

通过计算可知理论极限调形半径:

$$R_{\min} = \left(d - \frac{d}{2} \cos \alpha \right) \tan \left(\frac{\pi - \alpha}{2} \right) - \frac{t}{2} \quad (1)$$

式中, d 为压头中心间距; α 为压头最大转角; t 为板厚,主要影响为压头大小及转角,板厚的影响很小。表 2 为一些压头大小及转角的计算值。

在实际生产中,不可能用弯板机去加工如此小的曲率,主要有以下几点原因:

(1) 工业上曲度特别大的厚板,一般为单向曲度板,或者为直纹面板。一般用折弯机、辊弯机或者油压机加工。双曲度板的曲度一般不会太大。

(2) 当板材曲率过大时,一方面所需要的成形力大幅增加,而压头的倾斜角度增大,又使得压头的有效冲击力减小;另一方面平面压头对曲面的拟合误差较大,故此时的矛盾不再是能够调形的问题,而是冲击力及冲压后板材的光顺性问题。

(3) 当局部曲率过大时,由于板幅很大,板材的拱高很容易超过限制拱高,导致无法冲压。如若仅考虑极限形状处的弯曲,则可计算如图 2 所示板材的拱高 H :

$$H = \left(\frac{B}{2} - d + \frac{d}{2} \cos \alpha \right) \tan \alpha \quad (2)$$

式中, B 为板材在成形基准面上的投影宽度。以某型压头大小为 100mm × 100mm 的弯板机为例,若加工板的投影宽为 1000mm,则板材的拱高达 515mm,再加上板厚的影响,将超过上下模的有效行程 520mm。而实际上,弯板机加工的绝大多数板的板宽超过 1000mm,而且曲率不可能只集中于中间部位。故一般而言,弯板机加工的板材形状受拱高和折弯形状的限制超过调形曲率限制。

表1 国产Invar钢(4J36)主要力学性能

Table 1 Main mechanical properties of domestic Invar steel (4J36)

抗拉强度 s_y /MPa	屈服强度 s_s /MPa	伸长率 d /%	密度 ρ /($g \cdot cm^{-3}$)	硬 HB	弹性模量 E /GPa
440	241	40	8.1	124	123

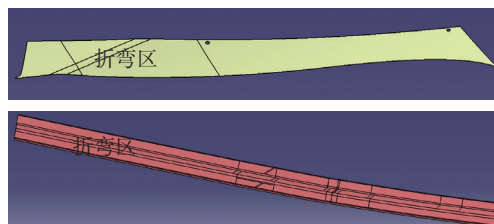


图1 某两模具型板折弯区

Fig.1 Bending area of two mold plates

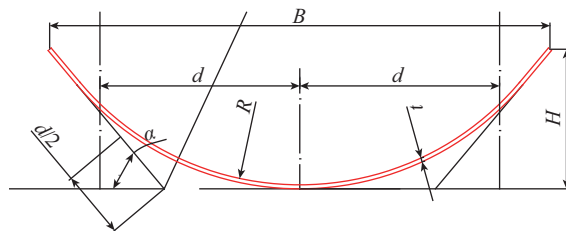


图2 理论极限弯曲半径示意图

Fig.2 Schematic diagram of theoretical limit bending radius

如图3所示,以某模具型板加工为例,加工设备的最大有效行程为520mm,考虑到板材存在回弹,实际所能加工成形的拱高要较520mm小。故对拱高过大的Invar钢模具型板,需采用分块的方法进行加工。图3所示模型的主型面,该型板的最大拱高有694mm,无法整体冲压成形,此时,需要对型板进行切分。在型板中部将型板分为1、2两块板后,其最大拱高分别为86.5mm与216mm,即可满足加工要求。图3中3、4部分为折角部分,也需要单独成形。

2.3 板材大小

从金属板料的弹塑性成形原理看,冲压成形实质上是板料受双向弯矩作用而产生的弯曲成形。为简化问题,以梁受弯矩作用为例。如图4所示,其中上部分为三支点原理图,中间部分为弯曲变形图,下部分为弯矩图。可以看出,中间受力点处,梁受到的弯矩最大,最先开始产生弹塑性变形,而越往两支点方向,梁受到的弯矩越来越小。只有当弯矩超过一定数值 M_t 时,梁才能保持变形形状的弹塑性变形。

因此,弯板机加工的板材在最大主曲率方向必须保证一定的宽度,否则就无法成形加工。另一方面,最大主曲率方向压头过少的话也容易造成曲面不光顺,因此,弯板机所能成形加工的最小板材在最大主曲率方向至少有5个压头宽度。

另外,考虑节省材料,下料时板边缘不留余量或余量较小,如板材边缘处曲率较大,基于三支点弯曲的原理及方形压头限制,边缘处将无法加工到位,必须用油压机修形。

3 多种成形方法在 Invar 模具型板上的综合应用

中厚板材成形加工的方法很多,一般应用较为广泛的有辊弯机、水火弯板、油压机和三维数控弯板机(活络方形压头可调模具),几种方法的加工特点存在差别。

辊弯机:主要加工单曲度板或者双曲度板的最大主曲率方向加工,加工效率高,成形质量好,但不能加工面积过小的板。

水火弯板:一般需配合辊弯机使用,最大主曲率方向由辊弯机加工,主要针对纵向曲度不大、板幅较大的板材成形加工。水火弯板具有成形效率低,加工环境恶劣,对材料存在一定破坏等缺点。Invar 由于热膨胀系数较小,采用水火弯板的方法较其他材料效率更低,故除极少数修整外,不建议使用。

油压机:主要针对板幅较小,板厚较厚,局部曲率过大,局部存在折弯等突变形状,或者不能高温成形的板材,也可用于矫形。油压机成形的适应性较好,但油

压机成形效率最低,难以加工两个方向曲率都较大的板材,对板材表面有一定破坏。图5为油压机成形具有折弯形状的板材。

三维数控弯板机:采用活络方形非对压技术,可有效抑制压痕与起皱,特别适用于有一定板幅、光顺的双曲度板材加工,加工效率高,加工质量好,对板材的破坏小,配合辊弯机使用效率更高,是目前正在推广的新型板材成形加工方法。图6为三维数控弯板机分段加工6000mm×1000mm×19.05mm的鞍形板。

Invar钢模具型板具有形状差别大、大小差别大等特点,因此,可针对不同形状分别采用油压机和三维数

表2 极限弯曲半径 R_{min} 与压头大小、旋转角度之间的关系 (板厚19.05mm)

Table 2 Relationship of limit bending radius and head size rotation angle (19.05mm thickness)

旋转角度 / (°)	极限弯曲半径 R_{min} /mm			
	60mm 压头	80mm 压头	100mm 压头	125mm 压头
30	117	159	202	255
35	102	140	177	224
40	92	126	160	202
45	84	115	146	185
50	77	106	136	172

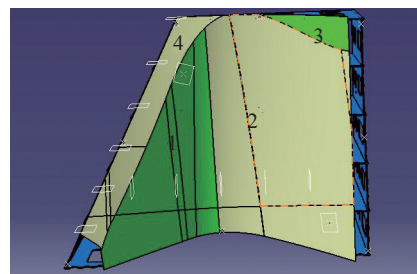


图3 某模具型面的分割

Fig.3 Segmentation of a mold surface

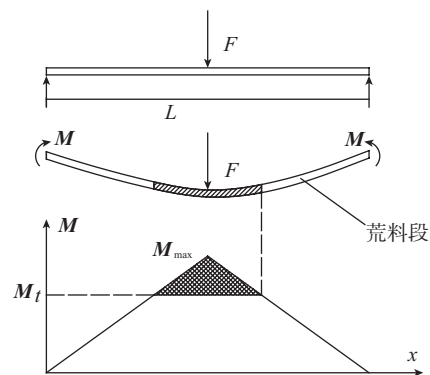


图4 梁的受弯变形

Fig.4 Bending deformation of beam

控弯板机两种方法加工。

4 成形加工实例

目前,采用三维数控弯板机结合油压机已成功加工了大小、形状不等的 21 块 Invar 钢模具型板,其中 13 块已焊接成模具。装配效果表明,采用三维数控弯板机并结合油压机的方法能够明显提高板材成形精度和成形表面质量,成形误差控制在 2mm 以内,在预成形型板与框架装配时,不需要单点压力机强行矫形,大大提高了装配效率和装配质量。

根据图 7 所示的模具型板来说明其加工工艺过程。

4.1 下料及边缘加工

零件形状如图 7 所示,采用研发的双曲面厚板展开软件对型板零件进行展开,得到套料图。除轮廓外,展开图还包含结构线、检验线等信息。采用高压水切割进行下料,并采用坡口机开具焊接工艺坡口。为消除误差,



图5 油压机成形加工

Fig.5 Forming process by hydraulic press



图6 三维数控弯板机加工

Fig.6 Forming process by 3D CNC bending machine



图7 三维数控弯板机加工的板材

Fig.7 Plate was processed by 3D CNC bending machine

除焊接边外,其他成形边预留 5mm 左右加工余量。

4.2 零件形状控制及公差要求

由 CATIA 模型得到板材的横向截线形状如图 8 所示,再由横向截线绘制各档检验样板图(图 9)。零件尺寸为 1995mm × 1279mm;最大拱高为 111mm;横向曲率较大,纵向曲率小,最大曲率处在板材右侧,稍带扭曲;板材与框架贴合,公差要求缝隙 ≤ 2mm。

4.3 加工过程

通过分析零件形状特点可知,该零件板幅够大,形状光滑,适合三维数控弯板机成形。但由于曲率最大处在板材右边缘,弯板机难以成形到位,需要油压机进行修形。故加工工艺为先用三维数控弯板机进行成形加工,再用油压机进行边缘修形。

三维数控弯板机加工过程如图 10 所示,先选取需冲压加工的零件,将板坯准备好,经过曲面调形计算得到各支柱压头处的高度,在伺服电机控制下,下模进行调形,形成冲压的下模。上模各压头在液压缸作用下,冲压成形型板。上模压头抬起,型板回弹,再采用测量装置测量成形面,并与理论面对比,计算回弹量和误差。

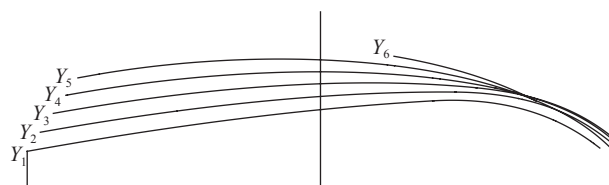


图8 板材横向截线

Fig.8 Transversal section of sheet

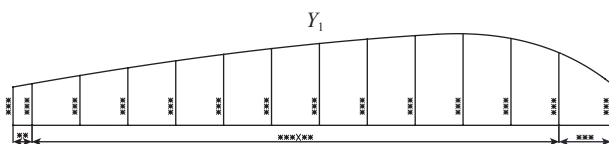


图9 检验样板图

Fig.9 Template drawings

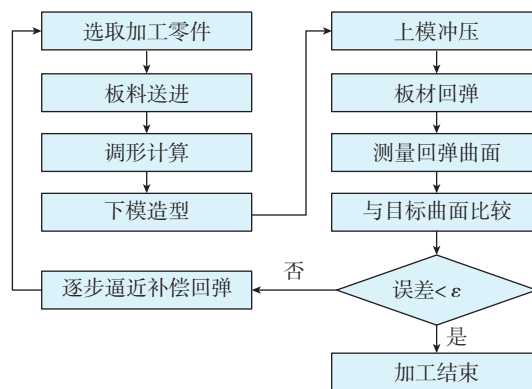


图10 数控弯板机加工过程

Fig.10 CNC bending machine process

若误差比较大,则通过逐步逼近方法补偿回弹,再调形、冲压,重复以上步骤,直到误差在容许范围内。

对曲度比较大的边缘部分,三维数控弯板机也无法理想成形,再可改用大吨位油压机进行修形,如图 11 所示。修形过程中,可随时采用木样板检验其成形精度,如图 12 所示,直到满足要求为止。

4.4 加工结果

加工后的零件如图 12 所示,能够较好地贴合焊接框架,最大缝隙不超过 2mm,满足加工精度要求。



图11 边缘修形
Fig.11 Edge modification

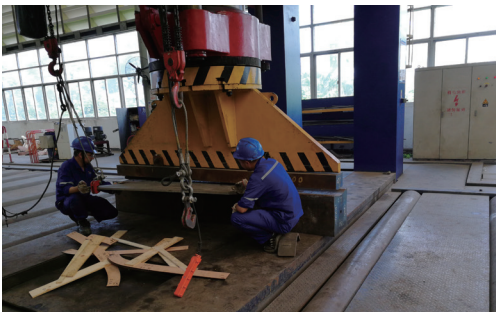


图12 木样板检验加工精度
Fig.12 Working accuracy check by template

5 结论

本文介绍了活络方形压头非对压技术在 Invar 模具型板预成形上的应用。对 Invar 模具型板的材料力学性能、形状对活络方形压头非对压技术的适应性进行了研究,并分析了多种双曲度板材成形方法的特点及其在 Invar 模具型板预成形方面的适用性。成形结果表明,利用具有活络方形压头非对压技术的三维数控弯板机,再配合大吨位油压机可快速、高质量预成形 Invar 模具型板,可满足型板预成形生产需求。

参考文献

- [1] SHIGA M. Invar alloys [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 1996, 1(3): 340-348.
- [2] 裴大国,陈瑶,罗中友,等. 73cm 彩管殷钢荫罩翘曲量超差分析 [J]. 显示器件技术, 2002(4): 20-23.

PEI Daguo, CHEN Yao, LUO Zhongyou, et al. Analysis of overwarping of 73cm color tube Invar alloy shadow mask[J]. Display Device Technology, 2002(4): 20-23.

[3] 李细锋,陈楠楠,李佼佼,等. 温度与应变速率对 Invar 36 合金变形行为的影响 [J]. 金属学报, 2017,53(8): 968-974

LI Xifeng, CHEN Nannan, LI Jiaojiao, et al. Effect of temperature and strain rate on deformation behavior of Invar 36 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(8): 968-974.

[4] 胡祎萌,张浩,郭风祥,等. LNG 运输船用低温材料的发展 [J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1391-1393.

HU Weimeng, ZHANG Hao, GUO Fengxiang, et al. Development of low temperature materials for LNG carriers[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(7): 1391-1393.

[5] 黄钢华,张冬梅,晏冬秀,等. Invar 钢模具制造工艺研究 [J]. 航空工程进展, 2011, 2(4): 485-488.

HUANG Ganghua, ZHANG Dongmei, YAN Dongxiu, et al. Manufacturing technology research on Invar alloy mould[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(4): 485-488.

[6] 王呈方,胡勇,李继先,等. 三维曲面船体外板成形加工的新方法 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010(3): 431-434.

WANG Chengfang, HU Yong, LI Jixian, et al. A novel forming method for 3D ship hull forming[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010(3): 431-434.

[7] 王呈方,焦和桐,胡勇,等. 方形压头可调活络模具板材曲面成形装置: ZL200910014794.6[P]. 2009-03-12.

WANG Chengfang, JIAO Hetong, HU Yong, et al. Square pressure head adjustable flexible die sheet surface forming device: ZL200910014794.6[P]. 2009-03-12.

[8] 苏绍娟,胡勇,王呈方. 船体三维曲面外板成形工艺方法研究进展 [J]. 中国造船, 2012, 53(2): 211-216.

SU Shaojuan, HU Yong, WANG Chengfang. Research progress of three-dimensional plate forming methods for ship hull[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(2): 211-216.

[9] 袁萍,王呈方,胡勇,等. 大型船舶三维数控弯板机的研制 [J]. 中国造船, 2014, 55(2): 122-131.

YUAN Ping, WANG Chengfang, HU Yong. Development of large plate bending machine for shipbuilding with three-dimensional numerical control[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(2): 122-131.

[10] 刘凯,黄钢华,张博明. Invar 钢性能测试与分析 [C]// 第十四届中国科协年会. 石家庄, 2012.

LIU Kai, HUANG Ganghua, ZHANG Boming. Invar alloy performance testing and analysis[C]//The 14th China Association for Science and Technology Annual Meeting. Shijiazhuang, 2012.

通讯作者: 胡勇,教授,从事先进制造技术研究, E-mail: y.hu@163.com。

(责编 大漠)