

基于刚度补强的机加工工艺凸台设计方法研究

骆金威, 易元, 邱世广, 刘元吉

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 以梁弯曲变形力学模型为基础,建立了包含工艺凸台的单一开敞型矩形槽腔腹板刚度计算方法的数学模型,推导了开敞型矩形槽腔腹板连接工艺凸台时槽腔中心位置及槽口中心的刚度计算表达式。在此基础上,采用数值计算的方法分析了工艺凸台对槽几何中心位置及槽口中心刚度补强的效果,以及工艺凸台的尺寸对刚度补强的效果。计算结果表明,当在开口槽的槽口中心设置工艺凸台时,槽口边缘的补强刚度与工艺凸台的宽度尺寸近似线性关系,槽口边缘的补强刚度对凸台长度尺寸非常敏感,随着凸台长度尺寸的减小,凸台对槽口边缘的刚度补强效应非常显著,工艺凸台对腹板几何中心的刚度增强作用几乎可以忽略不计。

关键词: 弯曲变形; 数学模型; 工艺凸台; 槽腔腹板; 刚度

Research on Design Method of Machining Process Convex Based on Stiff Reinforcement

LUO Jinwei, YI Yuan, QIU Shiguang, LIU Yuanji

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

[ABSTRACT] Based on the mechanical model of bending deformation of the beam, a mathematical model for calculating the stiffness of the ventral plate of a single open rectangular groove cavity including a process convex platform is established. On the basis of this, the numerical calculation method is used to analyze the effect of the process convex table on the geometric center position of the groove and the stiffness of the groove center, and the effect of the size of the process convex table on the stiffness reinforcement. The calculation results show that when a process convex platform is set up in the center of the slot of the opening slot, the reinforcement stiffness of the groove edge is approximately linear with the width dimension of the process convex platform, and the reinforcement stiffness of the groove edge is very sensitive to the length size of the convex platform. With the reduction of the length of the convex platform, the stiffness reinforcement effect of the convex platform on the edge of the groove is very significant, and the stiffness enhancement effect of the convex platform on the geometric center of the ventral plate is almost negligible.

Keywords: Bending deformation; Mathematical model; Process convex table; Groove ventral plate; Stiffness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.04.082

飞机结构件主要包括框、梁、肋、壁板等类型,其中框和梁类零件是结构最大、所占比例最高的飞机结构件,而框、梁类零件最典型的特征就是槽腔结构。槽腔结构又分封闭性槽腔和开敞型槽腔(图1)^[1],封闭性槽腔由于四周封闭,整体刚度较好,在实际加工过程中一般不会出现因刚度不足引起的质量问题,而开敞型槽腔由于有一个或几个方向失去支撑,且一般分布在零件的边缘,是零件加工过程中因刚性不足而发生质量问题的主要结构,实际加工过程中开敞槽腔边缘部分经常发生弹刀、拉刀及表面质量不合格等质量问题。因此,加工过程中需要在开敞型槽腔腹板边缘设计相应的工艺凸

台来补强局部刚性,从而保证加工质量。

然而,在日趋讲究生产效率和加工成本的今天,过量的工艺凸台会增加机床的加工时间和后续钳工的打磨时间。因此,当前迫切需要一种能够定量分析工艺凸台的设计对零件局部刚性影响的方法,这对于平衡零件的加工质量和零件加工的经济性有着十分重要的作用。

目前,对于零件装夹、工艺凸台设计及零件刚性评价主要两种方法。一种是通过神经网络或其他优化算法建立装夹与变形之间的关系模型。Harman等^[2]通过切削试验构建零件尺寸与刚性的关系,基于多种约束条件,评价了飞机接头零件的刚性。Tang等^[3]提出了多

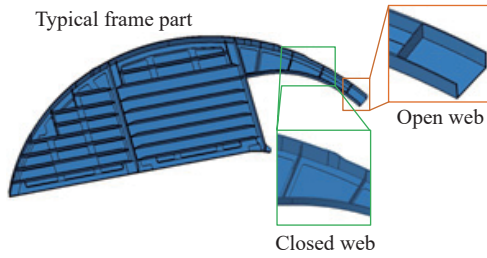


图1 典型框架类飞机结构件腹板示意图

Fig.1 Schematic diagram of webs for typical aircraft frame part

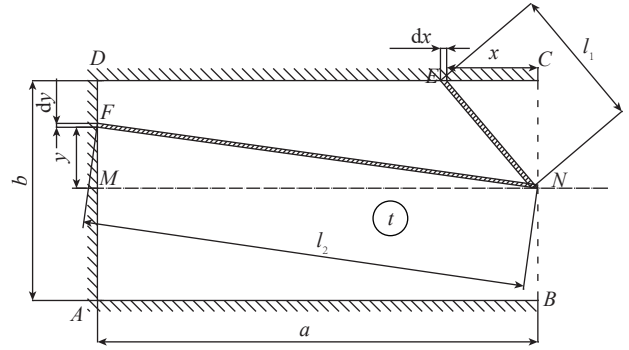


图2 开敞矩形腹板结构示意图

Fig.2 Structural diagram of open rectangular web

因素耦合作用下加工变形预测模型,并对框架零件加工变形进行预测。秦国华等^[4]建立了尺寸与自由度之间的关系模型,据此提出了定位合理性的判定方法。辛民等^[5]建立了基于BP神经网络的铣削加工变形与铣削参数关系的预测模型,反映铣削参数与加工变形之间的关系。优化算法建立的零件刚性预测模型大多以试验数据作为样本,进行大量修正才能应用于工况复杂的结构件制造,而飞机结构件是典型的多品种小批量生产模式,导致优化算法的求解结果与实际的一致性较差。

另一种是有限元仿真分析法。Kaye等^[6]仿真分析了飞机机翼零件的加工刚性,提供刚性评价结果,为切削参数选择提供依据。武凯等^[7]通过建立封闭型腹板铣削加工受力有限元模型,结合切削试验,研究了薄壁腹板加工变形的基本规律,提出了相应的变形控制工艺措施。董辉跃等^[8-9]为减少零件变形,仿真模拟了装夹位置、装夹顺序和加载方式对框类薄壁零件变形的影响。金秋等^[10]针对弧形薄壁件铣削加工过程,建立了考虑瞬态铣削力的工件变形有限元模型优化夹紧点位置。虽然有限元仿真已经应用于预测薄壁结构件加工变形,但是飞机结构件种类繁多,模型结构复杂,导致计算量极大,对资源配置要求很高,且有限元方法需要专业技术人员进行建模和仿真分析,故其工程实用性较差。

为精确分析工艺凸台对零件刚度补强的效果,必须建立相应的计算模型,龚清洪等^[1]基于弯曲变形理论,构建了计算开敞型矩形腹板刚度最弱点的计算模型。本文在此基础上,构建了包含工艺凸台的单一开敞性腹板槽腔刚度的刚度计算模型,推导了开敞型槽腔腹板连接工艺凸台时槽腔中心位置及槽口中心的刚度计算表达式。在此基础上,采用数值计算的方法分析了工艺凸台对槽中心位置及槽口中心刚度补强的效果,以及工艺凸台的尺寸对刚度补强的效果。图2所示为开敞矩形腹板结构示意图。

1 包含工艺凸台的开敞性腹板刚度计算模型

根据文献[1],在没有工艺凸台的情况下,开敞性矩

形腹板刚度最弱点的刚度位于槽口中心位置,其计算模型推导如下:

根据悬臂梁弯曲变形理论,其最大挠度为:

$$\omega = \frac{F^3}{3EI} = \frac{F}{\frac{3EI}{l^3}} = \frac{F}{K_i} \quad (1)$$

其中, F 表示梁受到的集中载荷; K_i 表示梁的抗弯刚度。

因此,悬臂梁可以用 $K_i = \frac{3EI}{l^3}$ 表示梁的最弱抗弯刚度。

其中, E 为材料的杨氏模量; I 为梁的截面惯性矩; l 为悬臂梁的长度。

显然,梁的最弱抗弯刚度与梁截面惯性矩 I 成正比,与刚度最弱点到约束点距离 l 的3次方成反比。

矩形腹板 $ABCD$ 的一段 BC 开口,腹板的厚度为 t ,由几何结构可知,当集中载荷作用在开口的中点 N 时, N 点的变形量最大,根据该腹板特征结构,该腹板可微分成两种类型的悬臂梁,一种是以长度方向为固定端 (CD 方向), N 点为自由端的梁 EN ,另一种是以宽度方向 (AD 方向) 为固定端, N 点为自由端的梁 FN ,这两种梁 N 点的抗弯刚度分别为:

$$K_{N1} = 3 \cdot \frac{EI}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3} = 3 \cdot \frac{E}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3}$$

$$\frac{1}{12} t^3 \cdot dx = \frac{1}{4} \cdot \frac{Et^3}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3} \cdot dx$$

$$K_{N2} = 3 \cdot \frac{EI}{(\sqrt{a^2 + y^2})^3} = 3 \cdot \frac{E}{(\sqrt{a^2 + y^2})^3} \cdot \frac{1}{12} t^3$$

$$dy = \frac{1}{4} \cdot \frac{Et^3}{(\sqrt{a^2 + y^2})^3} \cdot dy \quad (2)$$

其中, a 为示槽腔的长度; b 为槽腔的宽度; x 为第1类悬臂梁的根部到槽腔开口端的距离; y 表示第2类悬臂

梁的根部到槽腔中轴线的距离; dx 、 dy 分别表示两类悬臂梁的宽度; t 为悬臂梁的高度(槽腔腹板的厚度)。

对式(1)和(2)分别沿其梁的固定端边界积分得:

$$K_{Nb} = \frac{Et^3}{4} \cdot \int_0^a \frac{1}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3} \cdot dx = \frac{Et^3}{4}$$

$$\frac{8a}{b^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} = Et^3 \cdot \frac{2a}{b^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} \quad (3)$$

$$K_{Na} = \frac{Et^3}{4} \cdot \int_0^{b/2} \frac{1}{(\sqrt{a^2 + y^2})^3} \cdot dy = \frac{Et^3}{4}$$

$$\frac{b}{a^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} \quad (4)$$

由对称性可知:

$$K_N = 2K_{Nb} + 2K_{Na}$$

$$= Et^3 \cdot \left(\frac{4a}{b^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} + \frac{b}{2a^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} \right) \quad (5)$$

1.1 开敞槽槽口中点的抗弯刚度

为有效地补强槽口处的刚度,工艺凸台一般设计在开口槽口的中间,如图3所示,若工艺凸台的长度为 m ,宽度为 n ,厚度与腹板的厚度相等,按上述计算方法,工艺凸台对槽开口中心 N 点处的补强刚度可表示为:

$$K_{Nm} = 2 \times \frac{Et^3}{4} \cdot \int_0^{n/2} \frac{1}{(\sqrt{m^2 + y^2})^3} \cdot dy = \frac{Et^3}{2}$$

$$\frac{n}{m^2 \cdot \sqrt{4m^2 + n^2}} \quad (6)$$

因此,带有工艺凸台时,开口槽中心 N 点的总体抗弯刚度可表示为原刚度与补强刚度之和,计算公式如下:

$$K_N = 2K_{Nb} + 2K_{Na} + 2K_{Nm}$$

$$= Et^3 \cdot \left(\frac{4a}{b^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} + \frac{b}{2a^2 \cdot \sqrt{4a^2 + b^2}} + \frac{n}{2m^2 \cdot \sqrt{4m^2 + n^2}} \right) \quad (7)$$

1.2 开敞槽中心的抗弯刚度

当在开口槽中心处设置工艺凸台时,整个开口槽刚性的最弱点有可能会发生转移,根据矩形槽腔结构的特点,当槽开口处的刚度得到补强以后,最弱点的刚度可能会转移到槽的几何中心位置,因此,须对设置工艺凸台后的矩形中心进行刚度计算,如图4所示,矩形槽中心的刚度可表示为3种不同类型的微分悬臂梁在几何中心 O 点处的刚度之和,其中前两种是几何中心的原始刚度,后一种是几何中心的补强刚度,则 O 点的抗弯刚度在3种微分悬臂梁下的表达式分别为:

$$K_{O1} = 3 \cdot \frac{EI}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3} = 3 \cdot \frac{E}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3}$$

$$\frac{1}{12} t^3 \cdot dx = \frac{1}{4} \cdot \frac{Et^3}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3} \cdot dx \quad (8)$$

$$K_{O2} = 3 \cdot \frac{EI}{(\sqrt{(a/2)^2 + y^2})^3} = 3 \cdot \frac{E}{(\sqrt{(a/2)^2 + y^2})^3}$$

$$\frac{1}{12} t^3 \cdot dy = \frac{1}{4} \cdot \frac{Et^3}{(\sqrt{(a/2)^2 + y^2})^3} \cdot dy \quad (9)$$

$$K_{O3} = 3 \cdot \frac{EI}{(\sqrt{(a/2 + m)^2 + z^2})^3}$$

$$= 3 \cdot \frac{E}{(\sqrt{(a/2 + m)^2 + z^2})^3} \cdot \frac{1}{12} t^3 \cdot dz$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \frac{Et^3}{(\sqrt{(a/2 + m)^2 + z^2})^3} \cdot dz \quad (10)$$

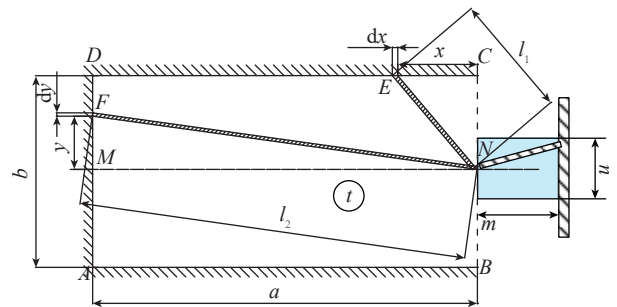


图3 带工艺凸台的开敞矩形腹板槽口中心刚度结构示意图
Fig.3 Structural diagram of open rectangular web with false boss (edge center)

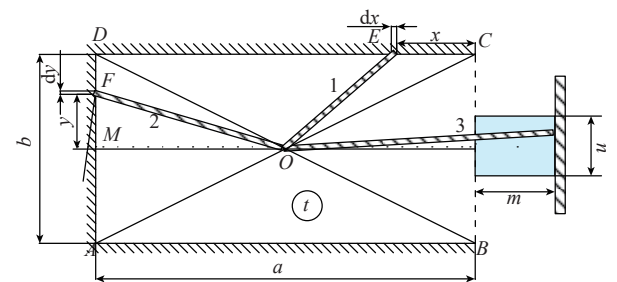


图4 带工艺凸台的开敞矩形腹板几何中心刚度计算示意图
Fig.4 Structural diagram of open rectangular web with false boss (geometry center)

式(8)、(9)、(10)分别沿槽边界和凸台边界积分得:

$$K_{O1} = \frac{Et^3}{4} \cdot \int_0^{a/2} \frac{1}{(\sqrt{(b/2)^2 + x^2})^3} \cdot dx = \frac{Et^3}{4} \cdot \frac{4a}{b^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} = Et^3 \cdot \frac{a}{b^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (11)$$

$$K_{O2} = \frac{Et^3}{4} \cdot \int_0^{b/2} \frac{1}{(\sqrt{(a/2)^2 + y^2})^3} \cdot dy = \frac{Et^3}{4} \cdot \frac{4b}{a^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} = Et^3 \cdot \frac{b}{a^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (12)$$

$$K_{O3} = \frac{Et^3}{4} \cdot \int_0^{n/2} \frac{1}{(\sqrt{(a/2 + m)^2 + z^2})^3} \cdot dz = \frac{Et^3}{4} \cdot \frac{n}{(\frac{a}{2} + m)^2 \cdot \sqrt{4 \cdot (\frac{a}{2} + m)^2 + n^2}} \quad (13)$$

因此,当在开口槽开口中心设置工艺凸台时,腹板中心的刚度 K_O 的计算公式如下:

$$K_O = 4K_{N1} + 2K_{N2} + 2K_{N3}$$

$$= 2Et^3 \cdot \left(\frac{2a}{b^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{b}{a^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{Et^3}{2} \left(\frac{n}{(\frac{a}{2} + m)^2 \cdot \sqrt{4 \cdot (\frac{a}{2} + m)^2 + n^2}} \right) \right) \quad (14)$$

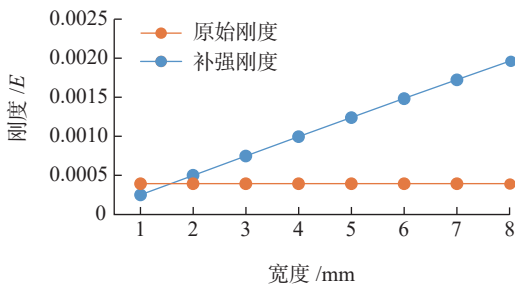
2 计算结果

2.1 槽口中点的刚度计算结果

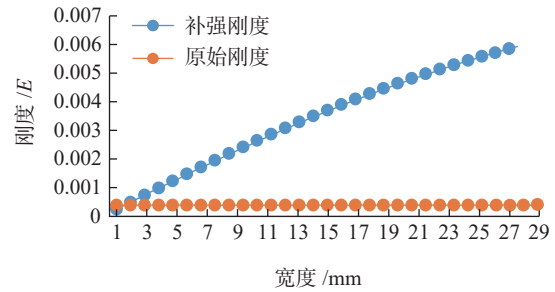
为直观地反映工艺凸台对刚槽开口处的刚度及槽中心刚度的影响,分别以工艺凸台的长度 m 、宽度 n 为变量进行数值计算,假定槽的长度 $a=300\text{mm}$ 、宽度 $b=200\text{mm}$,腹板厚度 $t=2\text{mm}$,计算得到腹板开口中心的原始刚度 $K_N=0.00394E$,分别以 m 、 n 为变量进行计算。

(1)若凸台的长度 $m=20\text{mm}$,以宽度 n 为变量计算腹板槽口的补强刚度,根据计算结果,以腹板宽度为横坐标,槽口中心的补强刚度为纵坐标绘制曲线图,如图5所示。

(2)若凸台的宽度 $n=20\text{mm}$,以长度 m 为变量来计算腹板的补强刚度,根据计算结果,以腹板长度 m 为横坐标,槽口中心的补强刚度为纵坐标绘制曲线图,如图6所示。



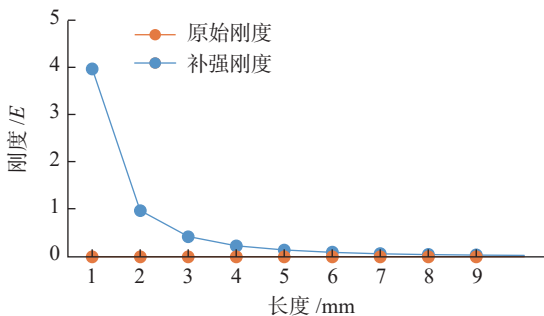
(a) 凸台宽度 $n=1\sim 10\text{mm}$



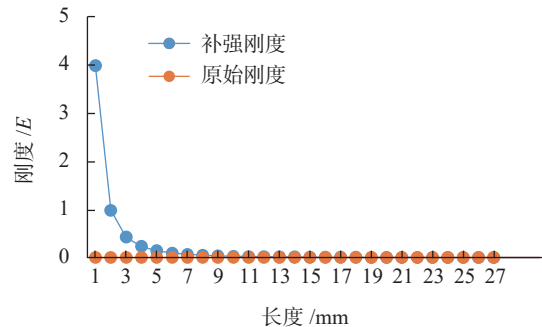
(b) 凸台宽度 $n=1\sim 30\text{mm}$

图5 腹板槽口中心刚度与腹板宽度尺寸之间的关系

Fig.5 Relationship between stiffness of edge center and ventral plate width size



(a) 凸台长度 $m=1\sim 10\text{mm}$



(b) 凸台长度 $m=1\sim 30\text{mm}$

图6 腹板槽口中心刚度与腹板长度尺寸之间的关系

Fig.6 Relationship between stiffness of edge center and ventral plate length size

显然,当在开口槽中间设置工艺凸台时,对槽口中间最弱刚度点的刚度有比较明显的补强作用,当凸台的长度不变时,补强的刚度与宽度尺寸的关系近似线性关系;当凸台的宽度不变时,补强的刚度对长度方向的尺寸变化非常敏感,在宽度 $n=20\text{mm}$ 的情况下,凸台的长度 $m=10\text{mm}$ 时,补强的刚度接近槽口中心的原始刚度,当凸台的长度从 10mm 逐渐减小到 5mm 的过程中,刚度的增强效应不明显,但是当长度从 5mm 逐渐减小时,刚度的增强效应则十分显著,几乎以数量级的单位增长。

2.2 槽几何中心的刚度计算结果

仍假定槽的长度 $a=300\text{mm}$, $b=200\text{mm}$ 、腹板厚度 $t=2\text{mm}$, 计算得到腹板开口中心的原始刚度 $K_N=0.00394E$, 分别以 n 、 m 为变量进行计算, 根据计算结果, 绘制相应的曲线, 如图 7 所示。

计算结果表明, 在腹板槽口设置工艺凸台对腹板几何中心的刚度增强作用几乎可以忽略不计。

2.3 两处刚度与工艺凸台尺寸的关系

增加工艺凸台后, 在同一坐标系下绘制槽几何中心

总刚度和槽口中心总刚度与工艺凸台尺寸之间的关系, 如图 8、9 所示。

计算结果表明, 在槽口边缘处设置工艺凸台时有很大的概率会使槽腹板最弱刚度从槽口中心处转移到槽几何中心。

3 结论

以上计算结果表明, 当在开口槽的槽口中心设置工艺凸台时, 不论是凸台长度方向的尺寸还是凸台宽度方向的尺寸均对槽口边缘中心的刚度有明显的补强作用, 但是补强的效果却有较大的差异。

(1) 槽口边缘的补强刚度与工艺凸台的宽度尺寸近似线性关系, 但是, 增加工艺凸台的宽度会明显增加后续钳工打磨的工作量。

(2) 槽口边缘的补强刚度对凸台长度尺寸非常敏感, 随着凸台长度尺寸的减小, 凸台对槽口边缘的刚度补强效应非常显著, 且工艺凸台长度方向的尺寸对加工工作量和后续钳工打磨量的影响都很小, 但工艺凸台长

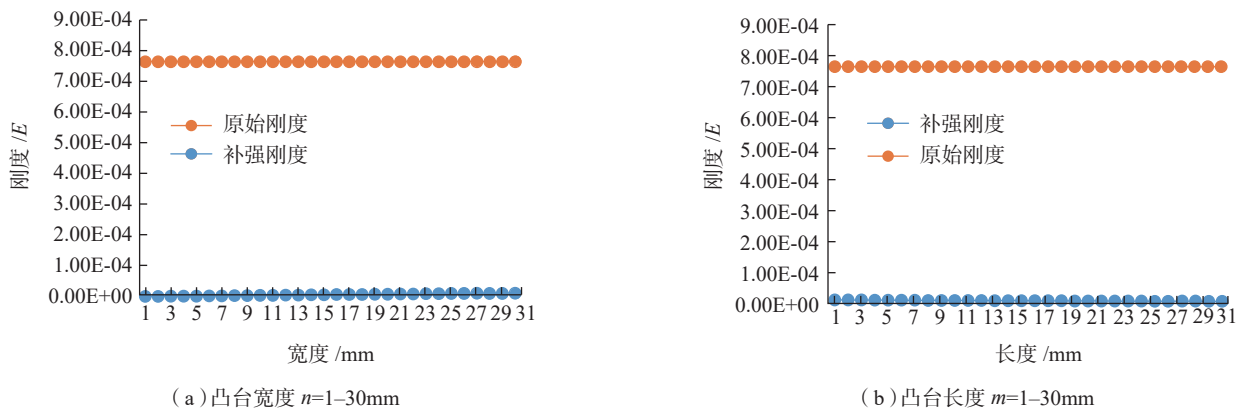


图7 槽腹板几何中心刚度与工艺凸台尺寸之间的关系
Fig.7 Relationship between stiffness of geometry center and false boss size

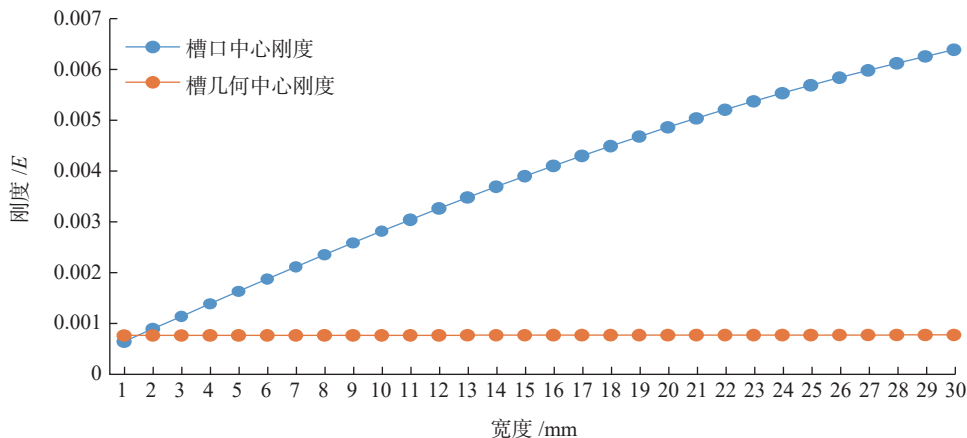


图8 槽腹板刚度与凸台宽度之间的关系
Fig.8 Stiffness changes with width size

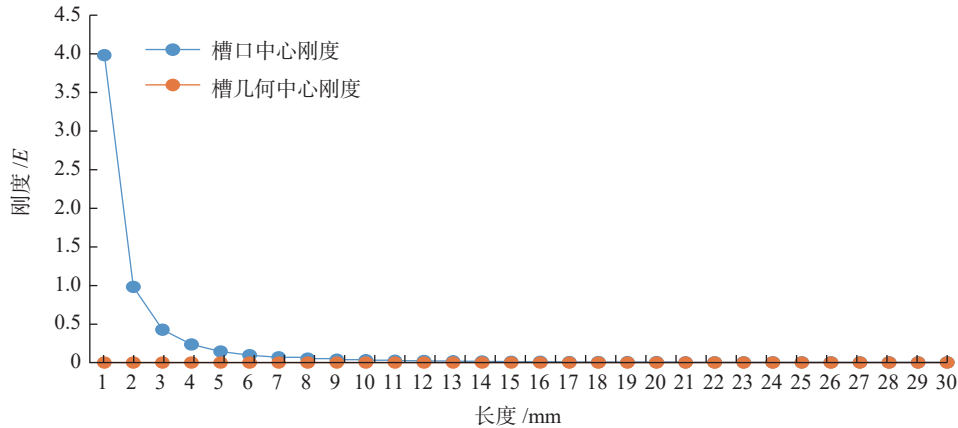


图9 槽腹板刚度与凸台长度之间的关系

Fig.9 Stiffness changes with length size

度方向尺寸较小时,会限制加工的空间。

因此,从补强槽口边缘中心刚度的角度来看,在保证加工顺利进行的情况下,设计工艺凸台时应优先考虑缩短工艺凸台的长度,减少工艺凸台的宽度,工艺凸台的长度可设置为 $(d+2\text{mm})$,工艺凸台的宽度可设置为 $(1.5\sim 2)d$, d 为加工该部位的刀具直径。

相对于槽口中心,槽口设置工艺凸台对槽几何中心腹板刚度的补强作用有限,几乎可以忽略不计。且在槽口边缘增加工艺凸台之后,槽腹板刚度对最弱区域可能会发生转移,从槽口边缘中心转移到槽几何中心,从这个角度来说,工艺凸台主要的作用是增强槽口边缘的刚度,而对槽的整体刚度影响甚小,因此,当这个槽腔中心的刚度无法满足加工要求时,无法通过设计工艺凸台来补强刚度。

参考文献

- [1] 龚清洪,牟文平,骆金威.基于梁弯曲理论的飞机结构件腹板刚性评价模型[J].制造技术与机床,2018(7):117-123.
GONG Qinghong, MOU Wenping, LUO Jinwei. Rigid evaluation model for aircraft structural parts web based on beam bending theory[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(7): 117-123.
- [2] HARMAN A B, WANG C H. Improved design methods for scarf repairs to highly strained composite aircraft structure[J]. Composite Structures, 2006, 75(1/2/3/4): 132-144.
- [3] TANG Z T, YU T, XU L Q, et al. Machining deformation prediction for frame components considering multifactor coupling effects[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1/2/3/4): 187-196.
- [4] 秦国华,张卫红,李玉龙.一种全新的夹具定位方案计算方法[J].测试技术学报,2008,22(3):236-240.
QIN Guohua, ZHANG Weihong, LI Yulong. A new algorithm of fixture locating scheme design[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(3): 236-240.

- [5] 辛民,解丽静,王西彬,等.基于人工神经网络的铣削加工变形预测模型[J].兵工学报,2010,31(8):1130-1133.

XIN Min, XIE Lijing, WANG Xibin, et al. Prediction model for milling deformation based on artificial neural network[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(8): 1130-1133.

- [6] KAYE R, HELLER M. Finite element-based three-dimensional stress analysis of composite bonded repairs to metallic aircraft structure[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006, 26(4): 261-273.

- [7] 武凯,何宁,廖文和,等.薄壁腹板加工变形规律及其变形控制方案的研究[J].中国机械工程,2004,15(8):670-674.

WU Kai, HE Ning, LIAO Wenhe, et al. Study on machining deformations and their control approaches of the thin-web in end milling[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(8): 670-674.

- [8] 董辉跃,柯映林.铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟[J].浙江大学学报(工学版),2004,38(1):17-21.

DONG Huiyue, KE Yinglin. Finite element simulation for optimal clamping scheme of thin-walled workpiece in milling process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(1): 17-21.

- [9] 董辉跃,柯映林,吴群,等.基于残余应力分布的框类零件装夹方案优选的有限元模拟[J].航空学报,2003,24(4):382-384.

DONG Huiyue, KE Yinglin, WU Qun, et al. Finite element model for optimal clamping scheme of frame shape workpiece based on residual stress distribution[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 382-384.

- [10] 金秋,刘少岗.薄壁弧形件铣削加工装夹方案的优化[J].工具技术,2007,41(12):54-57.

JIN Qiu, LIU Shaogang. Optimization of fixture scheme for milling thin-walled arc workpiece[J]. Tool Engineering, 2007, 41(12): 54-57.

通讯作者: 骆金威,高级工程师,研究方向为数字化工艺设计、飞机制造工艺有限元仿真, E-mail:250584871@qq.com.

(责编 阳光)