

# 基于响应面法的单向压紧制孔工艺参数优化\*

## Parameters Optimization of Automatic Skin-Side Pressed Drilling Process Based on the Response Surface Methodology

南京航空航天大学机电学院 徐溶蔚 王 珉 陈文亮

**[摘要]** 目前,轻型自动化制孔系统已在航空制造领域得到广泛应用。针对其关键应用技术单向压紧制孔工艺,提出了一种基于响应面法(RSM)的参数优化方法。以中机身与中后机身的对接结构为例,构建四阶响应面模型并验证了该方法的有效性,采用自适应退火算法进行参数优化,给出参数推荐值。该方法仅通过少量样本点的有限元分析,即可构建可靠的响应面,避免优化迭代过程中的有限元仿真分析,大大提高计算效率和精度。

**关键词:** 飞机装配 自动化制孔 参数优化 响应面法 自适应模拟退火法

**[ABSTRACT]** Currently, the light-weight automatic drilling system has been widely used in aircraft manufacturing. The automatic skin-side pressed drilling process is the key technology to control the interfacial burr and chip. This paper presents the parameter optimization of automatic skin-side pressed drilling process based on the response surface methodology (RSM). The constructed method of response surface is described by the case study on the joint structure of middle-fuselage and middle-after fuselage section. And the result verifies the effectiveness of the method. The parameters are optimized to achieve the rational value of parameters by using adaptive simulated annealing method. This method can construct reliable response surface through a few samples simulated by finite element, and can avoid the finite element simulation in every iterative optimization. So it can greatly improve the computational efficiency and accuracy.

**Keywords:** Aircraft assembly Automatic drilling Parameter optimization Response surface methodology Adaptive simulated annealing method

目前,自动钻孔技术已经广泛应用在航空制造领域,如F-16飞机的垂尾壁板、C-130飞机的梁腹板、F-35飞机机翼上壁板、A380机翼壁板等<sup>[1]</sup>。在钻削力

的作用下,飞机薄壁结构件的贴合面会产生分离,从而产生与出口毛刺性质相似的贴合面毛刺。贴合面毛刺的控制是自动化制孔工艺中的关键技术,对结构件的装配质量、精度、效率有很大的影响。目前主要通过局部施加压紧力来克服贴合面的分离,从而有效减少贴合面毛刺的产生和切屑的进入<sup>[2]</sup>。然而,过大的压紧力会导致工件的变形,这就对单向压紧工艺提出了更高的要求。因此,在航空制造领域广泛使用自动钻孔系统的发展趋势下,要获得高质量、高精度的飞机装配件,必须充分考虑自动化制孔过程中各工艺参数对贴合面间隙的影响规律,并给出各工艺参数的推荐值,即实现单向压紧工艺的优化设计。

在制孔工艺参数优化方面,国内外学者目前多针对不同材料的单层工件进行试验研究。如Rajmohan等<sup>[3]</sup>针对Al356/SiC-云母混合金属基复合材料,对轴转速、进给速度、钻头类型等进行了参数优化,改进了钻削工艺的性能;金浩等<sup>[4]</sup>选用不同的钻头材质及切削参数对玻璃钢复合材料夹层结构进行钻削试验,分析各因素对钻削力的影响,给出切削参数推荐值;宋中权等<sup>[5]</sup>对夹层结构复合材料进行单因素钻削试验,分析钻削参数对轴向力的影响规律及出口垫板对分层的影响,提出提高孔出口加工质量的方法。另一方面,响应面法(Response Surface Methodology, RSM)作为近似模型的一种,将随机性仿真和确定性仿真问题结合起来,大大提高了计算效率,在航空制造领域已经得到了广泛的应用。如鲍诺等<sup>[6]</sup>将响应面与优化方法相结合,以GARTEUR飞机模型为算例,获得了精确的结构力学模型;杨艳慧等<sup>[7]</sup>以航空发动机涡轮盘锻件为研究对象,应用响应面法和有限元数值模拟对锻造过程预成型问题进行了多目标优化设计;Breitkopf等<sup>[8]</sup>将MLS(Moving Least Square)方法与RSM相结合对板料成形过程进行了优化。

针对飞机薄壁装配件的单向压紧制孔工艺,本文提出一种利用响应面替代有限元模型进行参数优化的方法。

### 1 基于单向压紧制孔工艺的响应面模型构建

飞机装配件通常存在多层零部件叠加的情况,其中

\* 上海飞机制造有限公司基金项目(NS2010137)资助。

主要包含蒙皮等刚度比较差的薄壁结构件、框架等刚度较好的薄壁支撑件、铆钉等装配件。考虑到蒙皮等薄壁结构的表面曲率偏差的影响,贴合面会存在一定的间隙并会在钻削力的作用下进一步扩大,从而进入切屑并形成毛刺,降低飞机的疲劳寿命。传统自动化钻铆设备钻孔时采用双向压紧的方式避免贴合面毛刺的问题,但飞机部件对接时由于开敞性差等问题无法进行双向压紧。考虑到现用框架刚度好可以承受一定载荷,目前普遍使用的是在蒙皮一侧局部施加压紧力的方式,即单向压紧技术。该方法能够很好地控制飞机装配件的贴合面间隙,即有效减小贴合面毛刺的形成和切削进入,但其工艺参数的优化仍需进一步研究。

### 1.1 单向压紧制孔工艺

单向压紧制孔工艺涉及的参数众多,其主要包含钻削、压紧、预装配3方面。其中,钻削参数主要是指刀具材料、钻孔直径、主轴转速等,其主要表现形式是钻削力;压紧参数即指局部压紧力的位置、范围以及数值等;预装配参数是指预装配紧固件的位置以及预紧力的大小等。由于预装配紧固件的位置是离散参数,需要单独研究,故而,本文主要以贴合面间隙为评价指标,针对钻削力 $F_d$ 、单向压紧力 $F_p$ 以及预紧力 $F_{pre}$ 3个工艺参数进行优化。

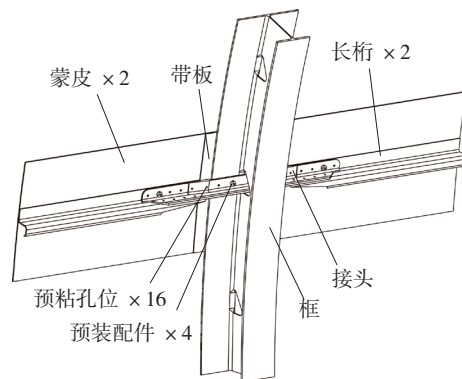
框上对接结构是单向压紧工艺应用的一个典型示例,如图1(a)所示。该结构是依据圣维南原理和实际工况,从某支线飞机中机身与中后机身对接处的典型位置抽取出来的。本文将采用螺栓螺母代替穿心夹作为预装配件,针对图1(a)中五角星位置的蒙皮与带板贴合面进行单向压紧制孔工艺的优化。其中,钻削力施加在带板上的相应位置,直径为3mm;单向压紧力施力环位于蒙皮上的相应位置,内外径分别为10mm、20mm,如图1(b)所示;预紧力为螺栓螺母的作用力,预装配位置如图1(a)所示。

响应面模型的构建包括样本点试验设计、响应值计算以及回归分析,本文以框上对接结构为例,在钻削力50~250N、单向压紧力300~1100N以及预紧力100~300N范围内,以试验设计方法获取样本点,采用有限元仿真分析方法获得贴合面间隙值,通过最小二乘法对样本点进行回归分析,构建响应面模型。

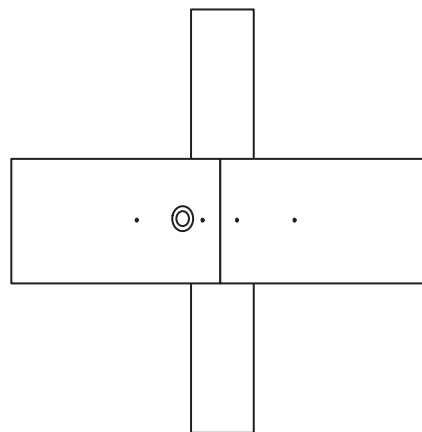
### 1.2 单向压紧制孔试验设计

目前,常见的试验设计方法主要有全因子法、正交试验法、中心组合设计法、Box-Behnken设计法、最优拉丁超立方设计法等。中心组合法扩展了设计空间并得到高阶信息,能够给响应表面近似模型提供样本数据,具有设计简单、试验次数少、预测性好等优点。

本文采用的中心组合设计(Central Composite



(a) 几何模型



(b) 分析模型

图1 框上对接结构数模

Fig.1 Model of jointed frame structure

Design, CCD)方法是将2水平全因子设计进行扩充,改为3水平全因子设计,在保证中心组合的可旋转性的基础上添加了试验点,从而构建出更为可靠地响应面模型。针对钻削力、单向压紧力以及预紧力3个参数,采用3水平(-1,0,1)的全因子设计,将各工艺参数的3个水平分别选在中心和边界位置,根据式(1)进行轴点设计,将设计空间扩展到参数的极限位置,其相应的水平值如表1所示。

$$\begin{aligned} F_2 &= F_0 + (F_1 - F_0) \times \alpha \\ F_{-2} &= F_0 - (F_0 - F_{-1}) \times \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_{-1}$ 分别对应各个参数的0、1、-13个水平, $F_2$ 、 $F_{-2}$ 为设计后的轴点水平。 $\alpha$ 为比例因子: $\alpha < 1$ 时,轴

表1 单向压紧工艺参数及水平

工艺参数	水平				
	-2	-1	0	1	2
钻削力 $F_d$ /N	50	100	150	200	250
单向压紧力 $F_p$ /N	300	500	700	900	1100
预紧力 $F_{pre}$ /N	100	150	200	250	300

点位于全因子设计内部;  $\alpha > 1$  时, 轴点位于全因子设计外部;  $\alpha = 1$  时, 轴点位于全因子设计表面的中心。

### 1.3 贴合面间隙响应值计算

利用 ABAQUS 软件对框上对接模型进行有限元建模, 其中蒙皮、带板、螺栓及螺母采用六面体网格单元, 框、长桁以及接头采用四面体网格单元, 网格模型如图 2 所示。经过创建材料和截面属性、设置载荷、定义接触面及边界条件等过程, 对框上对接结构进行有限元分析, 从而获得相应工况下的贴合面间隙值, 如表 2 所示。详细过程可以参见文献 [9]。

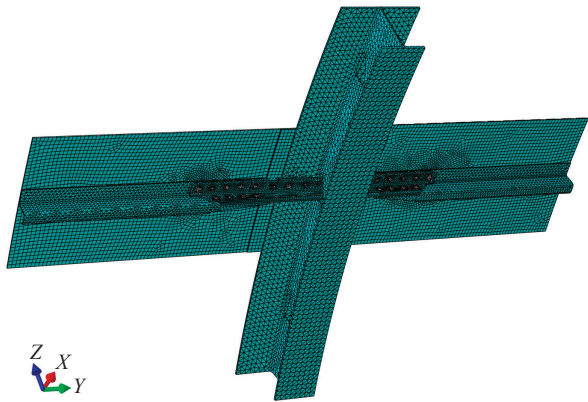


图2 框上对接结构有限元网格模型  
Fig.2 Finite element mesh model of the jointed frame structure

### 1.4 响应面模型建立

针对上文所述的 33 个样本点, 构建精度更高的四阶多项式响应面近似函数, 其构造形式如式 (2) 所示。采用  $\hat{\delta}$  表示构建的响应面;  $F_d$ 、 $F_p$ 、 $F_{pre}$  表示钻削力、单向压紧力和预紧力;  $\beta_i$  为多项式的待定系数, 用最小二乘法拟合求解, 如式 (3) 所示;  $\varepsilon_i$  表示随机误差项。

$$\delta = \hat{\delta} + \varepsilon = F_{33 \times 16} \beta + \varepsilon$$

$$\hat{\delta}_i = \beta_0 + \beta_1 F_d F_p + \beta_2 F_d F_{pre} + \beta_3 F_p F_{pre} + \sum_{i=1}^4 (\beta_{3i+1} F_d^i + \beta_{3i+2} F_p^i + \beta_{3i+3} F_{pre}^i), \quad (2)$$

$$\beta = (F_{33 \times 16}^T F_{33 \times 16})^{-1} F_{33 \times 16}^T \delta, \quad (3)$$

式中:  $F_{33 \times 16} = \begin{pmatrix} 1 & A & B & C & D & E \end{pmatrix}$ ,

$$A = \begin{pmatrix} F_{1d} F_{1p} & F_{1d} F_{1pre} & F_{1p} F_{1pre} \\ F_{2d} F_{2p} & F_{2d} F_{2pre} & F_{2p} F_{2pre} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{33d} F_{33p} & F_{33d} F_{33pre} & F_{33p} F_{33pre} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} F_{1d} & F_{1p} & F_{1pre} \\ F_{2d} & F_{2p} & F_{2pre} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{33d} & F_{33p} & F_{33pre} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} F_{1d}^2 & F_{1p}^2 & F_{1pre}^2 \\ F_{2d}^2 & F_{2p}^2 & F_{2pre}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{33d}^2 & F_{33p}^2 & F_{33pre}^2 \end{pmatrix},$$

表2 响应面样本点及其仿真试验结果

试验点	$F_d / N$	$F_p / N$	$F_{pre} / N$	$\delta / \mu.m$
1	100	500	150	2.46312
2	100	500	200	2.43494
3	100	500	250	2.41396
4	100	700	150	2.34977
5	100	700	200	2.35371
6	100	700	250	2.33879
7	100	900	150	2.37924
8	100	900	200	2.36423
9	100	900	250	2.35063
10	150	500	150	4.30276
11	150	500	200	4.08380
12	150	500	250	4.05804
13	150	700	150	3.79098
14	150	700	200	3.73189
15	150	700	250	3.70848
16	150	900	150	3.62323
17	150	900	200	3.60911
18	150	900	250	3.58733
19	200	500	150	6.65143
20	200	500	200	6.47063
21	200	500	250	6.38565
22	200	700	150	5.62770
23	200	700	200	5.40864
24	200	700	250	5.37117
25	200	900	150	5.10158
26	200	900	200	5.04835
27	200	900	250	5.00354
28	150	700	100	3.84237
29	150	300	200	6.70180
30	250	700	200	7.65025
31	150	1100	200	3.54841
32	50	700	200	1.36425
33	150	700	300	3.67940

$$D = \begin{pmatrix} F_{1d}^3 & F_{1p}^3 & F_{1pre}^3 \\ F_{2d}^3 & F_{2p}^3 & F_{2pre}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{33d}^3 & F_{33p}^3 & F_{33pre}^3 \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} F_{1d}^4 & F_{1p}^4 & F_{1pre}^4 \\ F_{2d}^4 & F_{2p}^4 & F_{2pre}^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{33d}^4 & F_{33p}^4 & F_{33pre}^4 \end{pmatrix},$$

$$\delta = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_{33} \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{16} \end{pmatrix}, \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{33} \end{pmatrix}.$$

通过均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 相对值和校正的决定系数  $R_{adj}^2$  检验响应面对样本数据

的拟合程度,相应公式及计算值如式(4)、(5)所示。

$$\text{RMSE} = \frac{1}{k\bar{\delta}} \sqrt{\sum_{i=1}^k (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}, \quad (4)$$

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{k-1}{k-n-1}(1-R^2) \\ = 1 - \frac{k-1}{k-n-1} \times \frac{\sum_{i=1}^k (\delta_i - \hat{\delta}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (\delta_i - \bar{\delta})^2}, \quad (5)$$

式中,  $k$  为样本点个数,  $n$  为因素个数,  $\hat{\delta}_i$  为响应面计算值,  $\delta_i$  为有限元计算值,  $\bar{\delta}$  为有限元计算结果的平均值。

根据表3中的  $F_d$ 、 $F_p$ 、 $F_{\text{pre}}$  以及  $\delta$  的数值,建立初步响应面模型,如式(6)所示。根据式(4)、(5)计算该响应面模型的  $\text{RMSE}=0.06777<0.2$ , 满足误差要求且接近于0, 这表明响应面的误差非常小;  $R_{\text{adj}}^2=99.7\%>90\%$  且接近于1, 这表明响应值的变化有99.7%来源于3个工艺参数, 即响应面与原模型相似度很高。

$$\hat{\delta} = 14.566109 + 0.020965F_d - 0.081591F_p + 0.022947F_{\text{pre}} + \\ 2.01261 \times 10^{-4}F_d^2 + 1.57890 \times 10^{-4}F_p^2 - \\ 1.90040 \times 10^{-4}F_{\text{pre}}^2 - 3.44693 \times 10^{-5}F_dF_p - \\ 1.77200 \times 10^{-5}F_dF_{\text{pre}} + 3.30925 \times 10^{-6}F_pF_{\text{pre}} - \quad (6) \\ 3.51588 \times 10^{-7}F_d^3 - 1.29451 \times 10^{-7}F_p^3 + \\ 6.26064 \times 10^{-7}F_{\text{pre}}^3 + 2.56770 \times 10^{-10}F_d^4 + \\ 3.96243 \times 10^{-11}F_p^4 - 7.19830 \times 10^{-10}F_{\text{pre}}^4$$

## 2 响应面模型有效性验证

最优拉丁超立方设计(Optimal Latin Hypercube Design, Opt LHD)可以人为控制试验次数,且具有非常好的空间填充性和均衡性,比较适合设计检验样本点。故而,本文采用最优拉丁超立方设计检验样本点,将各工艺参数的边界位置( $F_{-1} \sim F_1$ )作为抽样范围,仿真分析各样本点,获得相应的贴合面间隙值  $\delta$ , 根据式(4)、(5)计算6个检验样本点的响应值  $\hat{\delta}$ , 有限元分析值与响应面计算值的差值  $\Delta\delta = \delta - \hat{\delta}$ , 其具体数值如表3所示。

从表3中可以看出, 均布在抽样范围的6个点的响应值与有限元分析值都非常接近, 其最大偏差不超过2% ( $0.08745/4.46222=1.96\%$ ), 即响应值与有限元分析

表3 响应面检验样本点及其试验结果

	$F_d/\text{N}$	$F_p/\text{N}$	$F_{\text{pre}}/\text{N}$	$\delta/\mu\text{m}$	$\hat{\delta}/\mu\text{m}$	$\Delta\delta/\mu\text{m}$
1	100	820	230	2.32900	2.36796	-0.03896
2	140	740	150	3.45929	3.42760	0.03169
3	120	500	190	3.04005	3.09592	-0.05587
4	160	660	250	4.04543	4.05704	-0.01161
5	200	580	170	6.01782	6.03487	-0.01705
6	180	900	210	4.46222	4.37477	0.08745

值非常接近。另一方面, 将检验样本点代入式(4)、(5), 计算得  $\text{RMSE}=0.01296<<0.2$ ,  $R_{\text{adj}}^2=99.833\% \rightarrow 1$ , 也验证了该响应面与原模型非常接近。

从上述验证过程可以看出, 使用响应面替代有限元模型的方法是非常可靠的。故而, 可以得出结论该响应面模型可以非常好地描述各因素与响应值之间的真实关系, 即可以应用该模型代替有限元仿真模型进行工艺参数的优化设计。

## 3 单向压紧工艺参数优化

单向压紧工艺参数优化的核心是针对构建的四阶响应面模型, 在满足毛刺高度要求和边界约束的前提下, 给出钻削力  $F_d$ 、单向压紧力  $F_p$  和预紧力  $F_{\text{pre}}$  3个参数的推荐值, 使得贴合面间隙值  $\delta$  达到最小值。根据本例的实际工况, 目标函数为式(6), 约束条件为贴合面间隙  $\delta \leq 0.127\text{mm}$ , 边界条件为钻削力 100~200N、单向压紧力 500~900N、预紧力 150~250N, 优化初始点设为钻削力 200N、单向压紧力 900N、预紧力 250N, 其优化模型如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & F(F_d, F_p, F_{\text{pre}}) \\ \text{s.t.} \quad & F(F_d, F_p, F_{\text{pre}}) = \hat{\delta} \\ & F(F_d, F_p, F_{\text{pre}}) \leq 0.127\text{mm} \\ & F_d \in [100\text{N}, 200\text{N}] \\ & F_p \in [500\text{N}, 900\text{N}] \\ & F_{\text{pre}} \in [150\text{N}, 250\text{N}] \end{aligned} \quad (7)$$

D.V.  $F_d, F_p, F_{\text{pre}}$

自适应模拟退火算法模拟热力学中的退火过程, 以一定的步长搜索所给的目标函数, 如果相邻连续5次满足收敛准则(可行解和目前为止的最优解之差)都比  $10\text{E}-8$  小, 则优化终止。与其他算法不同的是, 该方法不要求每一步搜索都满足  $F(\hat{\delta}_{i+1}) < F(\hat{\delta}_i)$ , 而可以允许  $F(\hat{\delta}_{i+1}) \geq F(\hat{\delta}_i)$  以一定的概率  $\exp(-(F(\hat{\delta}_{i+1}) - F(\hat{\delta}_i))/t_k)$  出现, 从而使其跳出局部最优解找出全局最优解。本文采用该方法得到优化极值点钻削力 100N、单向压紧力 621.07N、预紧力 225.03N 及对应的贴合面间隙最小值  $2.21\mu\text{m}$ 。

## 4 结论

针对用于控制贴合面毛刺的单向压紧工艺, 本文提出了利用响应面替代飞机薄壁装配件有限元模型进行参数优化的方法。将该方法应用于某支线飞机中机身与中后机身对接处的框上对接结构, 通过少量样本点的有限元分析, 获得相应的响应值, 构建可靠的响应面。在毛刺高度小于  $0.127\text{mm}$  的约束条件下, 采用自适应模

(下转第74页)

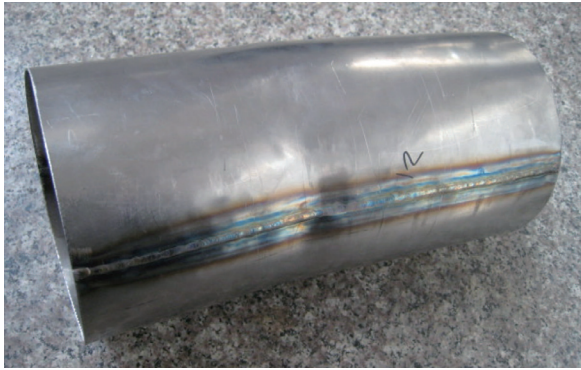


图5  $\delta 1.0\text{mm}$  导管焊接件形貌  
Fig.5 Macrostructure of  $\delta 1.0\text{mm}$  welded tube

由于  $\delta 1.0\text{mm}$  管与  $\delta 1.5\text{mm}$  管对接时要求保证内径一致,而两管厚度上存在差异,依据标准要求按照薄件  $\delta 1.0\text{mm}$  选用了焊接工艺参数。

焊接前,为了有效地固定试验件的位置和防止焊件的变形,对接头进行了定位焊。定位焊点对称分布且长度为  $5\text{mm}$ 。定位焊所用的焊接工艺参数见表 2 中  $\delta 1.0\text{mm}$  的焊接工艺参数。

焊接时,先给半管对接保护工装通以纯氩保护气  $5\text{s}$ ,使用表 3 中  $\delta 1.0\text{mm}$  的焊接工艺参数进行焊接。熄弧时,采用衰减焊接电流的方法缩小熔池以修整弧坑。在熔池尚未凝固前,焊枪持续给熔池供以保护气体,防止焊缝产生热裂纹和气孔。

焊后,对焊缝进行目视检查、X 光检查, X 光结果为合格。管管对接环焊缝样貌见图 6。



图6 环焊缝形貌  
Fig.6 Macrostructure of circumferential weld

### 3 结论

(1) 焊接前对待焊处  $20\text{mm}$  范围内进行打磨处理,并对接头端头进行刮削处理,保证对接间隙  $\leq 0.2\text{mm}$ ,阶差  $\leq 0.3\text{mm}$ ,粗糙度  $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$ ,并用丙酮擦拭待

焊处、工装和焊丝;

(2) 焊接时,焊缝正、反面通保护气体进行保护,同时采用小电流、高速度进行焊接;

(3) 焊接优化的焊接工艺,对 GH4169 合金导管进行焊接,其焊接接头质量良好,无焊接缺陷。

### 参考文献

- [1] 郭建亭,周兰章,袁超,等. 我国独创和独具特色的几种高温合金的组织 and 性能. 中国有色金属学报, 2011, 21(2):237-250.
- [2] 付伟东. 航空工业中钢与高温合金的焊接应用. 中国科技纵横, 2009, 11:304-305.
- [3] 韩光伟,邓波杨,玉军,等. 海洋环境下不同低膨胀高温合金腐蚀抗力的比较研究. 钢铁研究学报, 2011, 23(2):21-24.
- [4] 刘芳,孙文儒,杨树林. Al 含量对 GH4169 镍基合金组织及其稳定性的影响. 金属学报. 2008, 44(7):791-798.
- [5] 秦昕,张彦华,熊林玉. GH4169 合金焊接接头高温疲劳裂纹扩展性能试验研究. 材料工程, 2009, 7:36-38.
- [6] 杨军,楼松年,严隽民,等. GH4169 高温合金惯性摩擦焊接头晶粒分布特征. 焊接学报, 2001, 22(3):33-35. (责编 小城)

(上接第 71 页)

拟退火优化算法对响应面进行参数优化,得出结论: 钻削力  $100\text{N}$ 、单向压紧力  $621.07\text{N}$ 、预紧力  $225.03\text{N}$ ,此时贴合面间隙达到最小值  $2.21\mu\text{m}$ 。该方法避免了优化迭代过程中每次调用有限元程序,提高了计算效率和精度。

### 参考文献

- [1] 毕树生,梁杰,战强,等. 机器人技术在航空工业中的应用. 航空制造技术, 2009(4):34-39.
- [2] 曾长,王珉,陈文亮,等. 飞机总装自动化制孔预装配紧固件安装位置优化. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S): 9-14.
- [3] Rajmohan T, Palanikumar K, Kathirvel M. Optimization of machining parameters in drilling hybrid aluminium metal matrix composites. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2012(22): 1286-1297.
- [4] 金浩,程寓,高超,等. 玻璃钢复合材料夹层结构钻削试验研究. 机械设计与制造, 2011(4):133-135.
- [5] 宋中权,程寓,高超,等. 夹层结构复合材料钻削试验研究. 机床与液压, 2011, 39(1):40-43.
- [6] 鲍诺,王春洁,赵军鹏,等. 基于响应面法的结构动力学模型修正. 振动与冲击, 2013, 32(16):54-58.
- [7] 杨艳慧,刘东,贺子延,等. 基于响应面法 (RSM) 的锻造预成形多目标优化设计. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 1019-1024.
- [8] Breitkopf P, Naceur H, Rassineux A, et al. Moving least squares response surface approximation: formulation and metal forming applications. Comput Struct, 2005(83): 1411-1428.
- [9] 王珉,薛少丁,蒋红宇,等. 飞机大部件对接自动化制孔单向压紧力分析. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S): 553-558. (责编 深蓝)