

考虑焊点不确定性的车身点焊结构疲劳寿命优化

刘志成¹ 姜 潮¹ 李 源² 白影春¹

1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

2. 国防科学技术大学,长沙,410082

摘要:基于区间优化的方法,构建了考虑焊点不确定性的 TS、MTS 两种点焊结构的疲劳寿命不确定性优化模型。采用修正的 Manson-Coffin 公式作为点焊结构的疲劳寿命计算公式,同时考虑工艺中焊枪落点的不确定性,将焊点的位置坐标作为区间变量,通过对焊点坐标进行区间优化,获得结构疲劳寿命最大时的焊点坐标。给出了相应标准焊接结构试样疲劳寿命的上下界,为工程实际中点焊结构的疲劳寿命极限的分析及最优设计提供了计算工具。

关键词:点焊结构;焊点不确定性;结构疲劳寿命;区间优化

中图分类号:U463.82

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2015.18.024

Fatigue Life Optimization for Spot-Welded Structures of Vehicle Body Considering Uncertainty of Welding Spots

Liu Zhicheng¹ Jiang Chao¹ Li Yuan² Bai Yingchun¹

1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,

Hunan University, Changsha, 410082

2. National University of Defense Technology, Changsha, 410082

Abstract: Fatigue life interval optimization analysis model with two types of welded structures: tensile-shear (TS) and modified tensile shear (MTS) spot welded joints would be constructed based on interval optimization method, considering uncertainty of the welding spots. Using the modified Manson-Coffin formula as fatigue life calculation method of spot welded structures, taking consideration of the characteristics that the uncertainty of welding torch placement during the process, the positions of the welding spots were treated as interval variables. By interval optimization of welding spot coordinates, maximum fatigue life and best welding spot coordinates of the two types of welded structures could be obtained. Further more, corresponding upper and lower fatigue life bounds of the standard sample welded structures were also demonstrated. A computing tool with function of analysis and optimal design of the fatigue life was provided, which could be applied on spot welded structures in engineering practices.

Key words: spot welded structure; uncertainty of welding spot; structure fatigue life; interval optimization

0 引言

点焊工艺被广泛应用于白车身、工程机械、发

动机外壳、电子元件等结构的连接中^[1-2],焊点位置的分布方式对点焊结构的强度以及疲劳寿命有着重要影响。随着车身轻量化设计要求的不断提高,车身材料逐渐被厚度薄、强度高的高强钢所替代。目前,关于点焊结构的疲劳强度的分析主要针对点焊工艺参数如点焊接头的强度、点焊接头的电流大小等方面进行考虑,而对点焊结构疲劳

收稿日期:2014-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172096);国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51222502);全国优秀博士论文专项基金资助项目(201235);湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1016)

shaping Inconel625 Powder Disk under Hot Iso-static Pressing[J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(19):2675-2680.

[15] 王学滨. 基于实测剪切应力及局部应变的 Ti-6Al-4V 绝热剪切带的峰值温度估算[J]. 材料与工程, 2013,42(2):320-324.

Wang Xuebing. An Assessment of the Peak Temperature in the Adiabatic Shear Band of Ti-6Al-4V Based on the Measured Shear Stress and Local Strain[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013,42(2):320-324.

[16] Stefansson N, Semiatin S L. Mechanisms of Globularization of Ti-6Al-4V during Static Heat Treatment. Mater. Trans. A, 2002,34:691-698.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:黄 俊,男,1990 年生。华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室硕士研究生。研究方向为热等静压近净成形。薛鹏举,男,1973 年生。华中科技大学材料科学与工程学院博士。魏青松,男,1975 年生。华中科技大学材料科学与工程学院副教授、博士研究生导师。史玉升,男,1962 年生。华中科技大学材料科学与工程学院教授、博士研究生导师。

寿命的优化主要从点焊连接的参数如搭接长度、焊点的布置方式、焊点的间距等角度出发进行考虑。Xu 等^[3]利用有限元方法,研究了壳-梁、壳-杆、实体-梁、实体-杆单元不同模型下的点焊结构的疲劳强度。Pan 等^[4]采用实验与数值模拟的方式对点焊结构的疲劳寿命进行了对比,发现基于应变的 Manson-Coffin 疲劳寿命计算方式与实验所得的数据有着较好的拟合效果。文献[2,5]从点焊工艺参数如焊接电流、焊点直径大小、布置密度等角度出发,对点焊结构的静强度进行了分析与优化。姜潮等^[6]对电阻点焊焊装夹具定位点进行了优化设计。Ertas 等^[7]基于实体-梁单元的模式,采用单纯形法对单焊点、双焊点试样的焊点分布方式进行了优化。以上学者的研究工作分别从点焊工艺参数、焊装夹具的定位精度以及焊点的分布形式等角度出发对点焊结构进行了分析优化,均没有考虑焊点不确定性因素的影响。工程实际中存在着大量焊装夹具的设计精度、工艺、焊枪落点等不确定性因素,这些因素导致了焊点位置的不确定性,而焊点位置的不确定性耦合对车身点焊结构的疲劳强度及疲劳寿命有着非常重要的影响。

本文将焊点分布位置及其不确定性因素相结合,提出了一种点焊结构疲劳寿命优化分析方法。将焊点坐标作为区间设计变量,点焊结构疲劳寿命作为目标函数,对拉伸-剪切(TS)、修正的拉伸-剪切(MTS)型两种点焊试样进行区间不确定性优化分析。获得了两种点焊结构的焊点最优分布位置及疲劳寿命区间。

1 典型点焊结构及其疲劳寿命模型

根据点焊结构实际受力的情况,目前点焊结构标准试样主要分为正拉型(CP)、修正的正拉型(MCP)、拉伸-剪切型(TS)、修正的拉伸-剪切型(MTS)试样,这4种试样的主要几何尺寸参数如图1和图2所示。焊点及附近的热影响区为焊接结构应力集中的地方,是最危险部位,所以应将焊点附近区域的疲劳寿命作为点焊结构的疲劳寿命进行分析讨论。考虑车身点焊结构往往承受多轴载荷的实际特点,本文主要以 TS、MTS 两种类型试样为对象进行研究。

目前结构疲劳寿命预测模型主要有基于应力的疲劳寿命预测方法和基于应变的疲劳寿命预测方法^[8-10]两种。因基于应变的疲劳寿命理论所预测的点焊结构疲劳寿命曲线可以更好地逼近通过实验所得点焊结构疲劳寿命曲线^[4],故本文采用

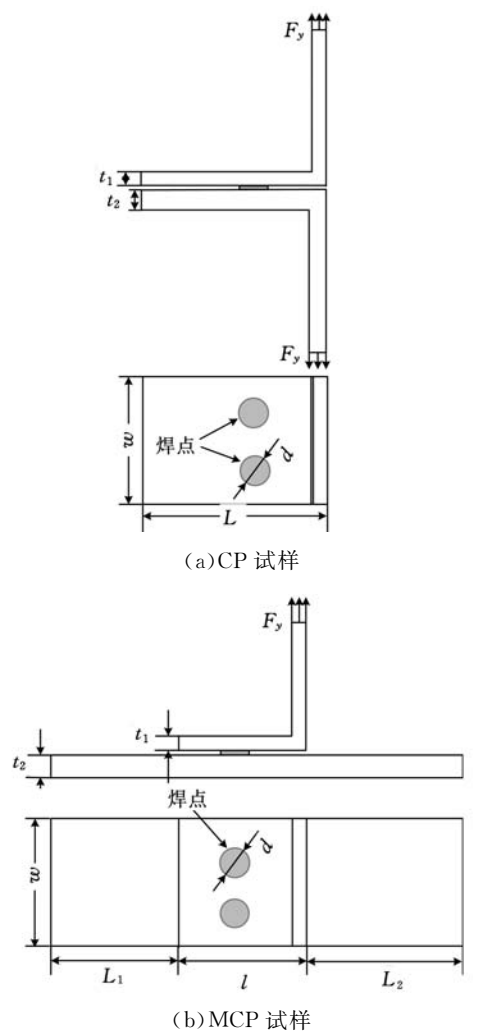


图1 双焊点 CP 点焊试样与 MCP 点焊试样

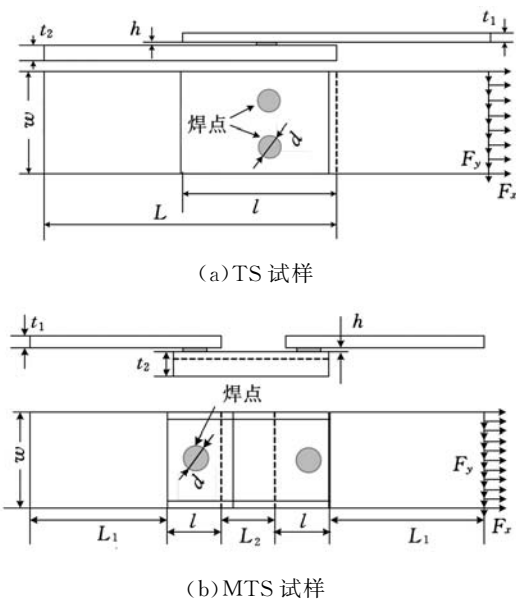


图2 双焊点 TS 点焊试样与 MTS 点焊试样

基于应变的疲劳寿命计算公式。在基于应变的疲劳寿命分析理论中,修正的 Manson-Coffin 公式综合考虑了弹性应变及塑性应变两部分对结构疲劳寿命的影响,可以较客观地描述焊点处的应变

状态。故本文采取该公式计算点焊结构疲劳寿命,其表达式为

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

式中, $\Delta \epsilon$ 为总应变; $\Delta \epsilon_e$ 、 $\Delta \epsilon_p$ 分别为弹性应变与塑性应变; E 为弹性模量; σ'_f 、 ϵ'_f 分别为材料疲劳强度系数与疲劳延性系数; b 、 c 分别为材料疲劳强度指数与疲劳延性指数,可通过对疲劳寿命试验数据及式(1)的拟合得到; N_f 为疲劳寿命。

工程中结构往往承受多轴应力、应变载荷,因此在利用上述基于应力或应变的疲劳寿命公式时,必须把处于多轴状态下的应力或应变依照一定的准则等效为单轴应力、应变状态。目前处理多轴疲劳问题的方法主要为不同的基于应力或应变的临界面法则,具体又可分为最大主应力、最大主应变法则,最大剪应力、最大剪应变法则等。因本文采用修正的 Mason-Coffin 疲劳寿命理论方法,故需要利用相应的应变等效法则将多轴应变等效为单轴形式,常用的等效法则如下:

(1) 最大主应变法则:

$$\epsilon_{qn} = \epsilon_{a1} \quad (2)$$

(2) 最大剪应变法则:

$$\epsilon_{qn} = \frac{\epsilon_{a1} - \epsilon_{a3}}{1 + \nu} \quad (3)$$

(3) 八面体剪应变法则:

$$\epsilon_{qn} = \frac{\sqrt{(\epsilon_{a1} - \epsilon_{a2})^2 + (\epsilon_{a2} - \epsilon_{a3})^2 + (\epsilon_{a3} - \epsilon_{a1})^2}}{\sqrt{2}(1 + \nu)} \quad (4)$$

其中, ϵ_{qn} 为不同等效准则下的等效应变, ϵ_{a1} 、 ϵ_{a2} 、 ϵ_{a3} 为变化的主应变幅值,且 $\epsilon_{a1} > \epsilon_{a2} > \epsilon_{a3}$, ν 为泊松比,本文采用八面体剪切应变作为多轴状态下的等效应变。

2 点焊结构疲劳寿命优化建模

2.1 设计变量的选取

点焊多用于薄板(厚度在 0.5 ~ 3 mm 范围内)结构中,属于压焊的一种。焊点作为连接板材的桥梁,同时也是整个结构应力集中点,工程中一般认定焊点附近区域是点焊结构的危险区域,对承受交变载荷的点焊结构的影响更加明显,因此,分析焊点的疲劳强度对整体结构有着至关重要的作用。焊点影响点焊结构的因素为焊点的排列方式和焊点的分布位置。由于薄板结构在厚度方向尺寸远小于其他两个方向的尺寸,故可将点焊结构转化为平面来考虑^[11],焊点排列方式在焊接手册中有明确的规定^[12],本文从焊点分布位置出发,将焊点的坐标 (x, y) 作为设计变量。

2.2 目标函数及约束条件的确定

本文将点焊结构的疲劳寿命 N_f 作为目标函数:

$$\min_{x,y} f(x, y) = -N_f(x, y) \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$$

式中, m 为焊点个数。

点焊工艺中,规定焊点直径 d 与板厚 t 的关系如下:

$$d = 4\sqrt{t} \quad (6)$$

如图 3 所示,阴影部分表示点焊搭接区域, l 为搭接长度, B 为板宽, S_{ij} 为相邻焊点 i 、 j 的间距。由几何条件可知,作为设计变量的焊点坐标 (x_i, y_i) 的约束条件如下:

(1) 在 x 方向有

$$-\frac{1}{2}(l-d) < x_i < \frac{1}{2}(l-d) \quad (7)$$

(2) 在 y 方向有

$$-\frac{1}{2}(B-d) < y_i < \frac{1}{2}(B-d) \quad (8)$$

(3) 点焊工艺规定相邻焊点间距为

$$S_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 2d \quad (9)$$

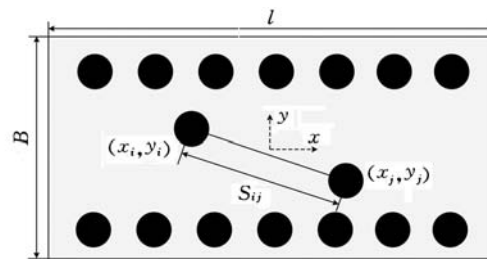


图 3 点焊搭接区域示意

综上所述,基于焊点坐标的点焊结构疲劳寿命优化模型建立如下:

$$\left. \begin{aligned} \min_{x,y} f(x, y) &= -N_f(x, y) \\ \text{s. t.} \\ -\frac{1}{2}(l-d) &< x_i < \frac{1}{2}(l-d) \\ -\frac{1}{2}(B-d) &< y_i < \frac{1}{2}(B-d) \\ S_{ij} &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 2d \\ i, j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3 区间不确定性优化

由于电阻点焊夹具精度、焊枪落点的稳定性、设计精度要求及外界等综合因素的影响,焊点坐标很多时候难以准确落在设计点,从而产生不确定性。这种不确定性因素的耦合可能引起点焊结构的整体强度、疲劳寿命的计算结果产生较大偏差。对于焊点坐标,不同焊接工艺、不同点焊机器

人、不同夹具下所得到的焊点坐标的波动性比较大,不易给定精确的值。这些参数因为工作环境、加工程序、精度要求等因素的千变万化,同样难于确定其服从某种类型的概率分布函数。传统基于概率不确定性的分析方法难以对其进行有效处理。但是,对于这些参数,根据一般的经验和现有样本,得到其可能的变化区间却较为容易。为此,本文引入区间分析方法,实现薄板点焊结构的关键参数的不确定性度量。采用区间分析方法时,只要知道点焊结构不确定性坐标参数 x 和 y 的上下边界:

$$\left. \begin{aligned} x_i^l &= [x_i^L, x_i^R] = \{x_i \mid x_i^L \leq x_i \leq x_i^R\} = \\ &\{x_i \mid x_i^c - x_i^w \leq x_i \leq x_i^c + x_i^w\} \\ y_i^l &= [y_i^L, y_i^R] = \{y_i \mid y_i^L \leq y_i \leq y_i^R\} = \\ &\{y_i \mid y_i^c - y_i^w \leq y_i \leq y_i^c + y_i^w\} \\ i &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中,上标 L、R 分别表示区间、区间左边界和区间右边界;上标 c 和 w 分别表示区间参数 x_i^l, y_i^l 的中点和半径。

优化模型中,设计变量也是不确定变量,这就要求约束函数的给定界限不是一个特定值。此时将约束界限也处理为区间,可以较好地在这种过渡状态描述出来,从而可以使薄板点焊结构疲劳寿命的不确定性优化模型与实际情况更为符合。利用区间分析方法处理薄板点焊结构中的不确定性参数后,点焊结构疲劳寿命优化问题(式(10))可转换为如下的区间不确定性优化问题:

$$\left. \begin{aligned} \min_{x^l, y^l} f(x^l, y^l) &= -N_f(x^l, y^l) \\ \text{s. t.} \\ -\frac{1}{2}(l - \frac{3}{2}d) - x_i^w &< x_i^l < \frac{1}{2}(l - \frac{3}{2}d) + x_i^w \\ -\frac{1}{2}(B - \frac{3}{2}d) - y_i^w &< y_i^l < \frac{1}{2}(B - \frac{3}{2}d) + y_i^w \\ -S_{ij}^l &= \sqrt{(x_i^l - x_j^l)^2 + (y_i^l - y_j^l)^2} < -2d \\ i, j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, $-S_{ij}^l$ 为考虑加工不确定性后相邻焊点 $(x_i^l, y_i^l), (x_j^l, y_j^l)$ 间距约束允许的下边界。

根据文献[13-14]提出的区间优化方法可知,通过对 $f(x^c, y^c)$ 进行优化,可提高目标函数在不确定参数下的“平均设计性能”,相应地,式(12)可转换为如下确定性的目标函数:

$$\min_{x^l, y^l} f(x^l, y^l) \rightarrow \min_{x^c, y^c} f(x^c, y^c) \quad (13)$$

通过以上处理,式(12)可转化为如下优化问题:

$$\left. \begin{aligned} \min_{x^c, y^c} f(x^c, y^c) &= -N_f(x^c, y^c) \\ \text{s. t.} \\ -\frac{1}{2}(l - \frac{3}{2}d) - x_i^w &< x_i^c < \frac{1}{2}(l - \frac{3}{2}d) + x_i^w \\ -\frac{1}{2}(B - \frac{3}{2}d) - y_i^w &< y_i^c < \frac{1}{2}(B - \frac{3}{2}d) + y_i^w \\ -S_{ij}^l &= \sqrt{[(\frac{x_i^c + x_i^w}{2}) - (\frac{x_j^c - x_j^w}{2})]^2 + [(\frac{y_i^c - y_i^w}{2}) - (\frac{y_j^c + y_j^w}{2})]^2} < \\ &-2d \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(14)为一传统的确定性优化问题,可通过序列二次规划等常规优化方法进行求解。

4 算例分析

本文选用 JSC980Y 高强度钢作为点焊材料,其相关的力学性能及疲劳参数^[11]分别如表 1、表 2 所示。利用 ANSYS 对点焊结构进行有限元建模分析,以 Beam188 梁单元(Timoshenko beam)模拟焊点,梁单元的长度为薄板之间的间隙。进一步通过在薄板的内表面上的焊点附近建立点焊接触对单元(Target170 与 Conta175)来模拟焊点连接的上下薄板间非线性接触的情况,由于随着焊点距离的增加,焊接所带来的应力集中影响逐渐降低,故本文接触区域半径选择为焊点半径的 4 倍^[3,15-17]。考虑到点焊工艺中,焊接热影响区(HAZ)周围及远端金属的微观晶相组织并没有明显的硬化及热处理效应,故文中忽略焊接工艺对材料的弹性模量,泊松比及疲劳强度系数、指数,疲劳延性系数、指数等材料参数的影响。利用 Beam188 单元模拟焊点在两块薄板的内表面建立点焊接触对的同时,也需要对焊点周围区域进行网格细化,以模拟焊点附近区域的应力集中效应^[18-20]。每个算例均分为两个载荷步进行加载,具体加载情况见表 3。

表 1 JSC980Y 力学性能参数

弹性模量 (GPa)	名义屈服应力 $S_{0.2}$ (MPa)	拉伸强度 (MPa)	延展率 (%)
205	665	984	15

表 2 JSC980Y 相关疲劳参数

σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c
1252	-0.067	0.5	-0.53

表 3 加载方式

拉伸剪切载荷	x	y
载荷步 1(100 子步)	0~4.5 kN	0~(-4.5) kN
载荷步 2(100 子步)	4.5~(-4.5) kN	-4.5~(4.5) kN

考虑白车身点焊设计规范中点焊加工精度及焊装夹具的设计精度等因素^[12],本文将焊点加工

误差取为 1.00 mm, 即区间半径 x_i^w, y_i^w 均取为 1.00 mm。

4.1 算例一

本算例中的几何模型为双焊点 TS 试样。试样同时承受轴向拉压与径向剪切载荷, 见图 4a。如图 4b 所示, 此时, 焊点附近区域为危险区域。尺寸参数如下: $d = 4 \text{ mm}, t_1 = 1 \text{ mm}, t_2 = 1.2 \text{ mm}, h = 0.2 \text{ mm}, L = 120 \text{ mm}, B = 40 \text{ mm}, l = 50 \text{ mm}$; 焊点初始坐标为: 焊点 1(-20 mm, -10 mm), 焊点 2(-20 mm, 10 mm)。结构承受轴向循环交变应力, 应力比 $R = -1$, 加载模式为比例加载。由 FEM 分析, 最大应力时初始坐标下的薄板沿 x 方向应力状态如图 4b 所示。通过计算可得该 TS 结构初始的疲劳寿命区间为 $[4.2 \times 10^5, 4.5 \times 10^5]$ cycles, 此时区间设计变量中点范围为: $-23 \text{ mm} \leq x_i^c \leq 23 \text{ mm}, -18 \text{ mm} \leq y_i^c \leq 18 \text{ mm}, i = 1, 2$ 。

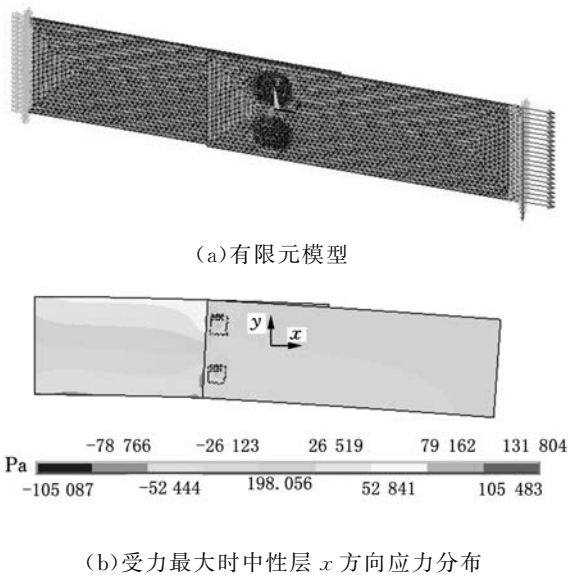


图 4 JSC980Y 薄板 TS 双焊点拉伸-剪切有限元分析

4.2 算例二

算例二采用双焊点的 MTS 试样, 试样同时承受循环拉压、剪切载荷, 加载模式见图 5a。如图 5b 所示, 焊点附近区域同样为应力集中区域, 且同样是结构危险区域。尺寸参数为: $d = 4 \text{ mm}, t_1 = 1 \text{ mm}, t_2 = 1.2 \text{ mm}, h = 0.2 \text{ mm}, L = 80 \text{ mm}, L_2 = l = 40 \text{ mm}, B = 40 \text{ mm}$ 。焊点初始坐标为: 焊点 1(-40 mm, 0), 焊点 2(40 mm, 0)。此时结构承受轴向循环交变拉-压应力、横向交变剪应力, 应力比 $R = -1$, 加载模式为比例加载。由 FEM 分析, 最大应力时初始坐标下的薄板沿 x 方向应力状态如图 5b 所示, 通过计算可得该 MTS 结构初始疲劳寿命区间为 $[12.5 \times 10^5, 16.8 \times 10^5]$

cycles。此时区间设计变量中点范围为: $-58 \text{ mm} \leq x_1^c \leq -18 \text{ mm}, 18 \text{ mm} \leq x_2^c \leq 58 \text{ mm}, -18 \text{ mm} \leq y_i^c \leq 18 \text{ mm}, i = 1, 2$ 。

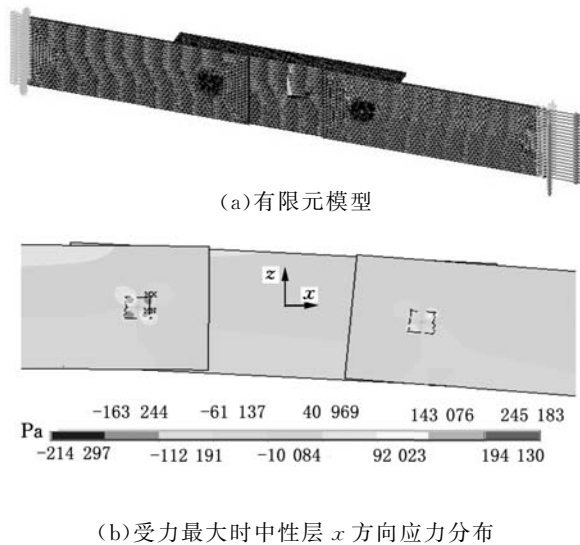


图 5 JSC980Y 薄板 MTS 双焊点拉伸-剪切有限元分析

由图 4、图 5 不难看出, 两个算例中焊点附近区域均为结构应力集中区域, 结构危险点处于焊点附近, 利用式(7)~式(14)分别对上述两个算例进行区间优化转换, 在区间设计变量的中点处利用序列二次规划的方法执行双焊点结构疲劳寿命的区间优化分析。记 N_{10}^1 为初始结构疲劳寿命, 经过一定次数的迭代, 得到焊点最优坐标 (x^c, y^c) 及最优焊点处点焊结构疲劳寿命的 N^1 区间围。

4.3 结果分析

将算例一、算例二点焊结构的初始疲劳寿命区间、优化焊点坐标及优化后的结构疲劳寿命区间进行归纳整理, 结果见表 4。由表 4 可知, 首先, 在相同的加载模式下, 对于 MTS 模型, 由于结构弯曲刚度的增加, 其疲劳寿命得到一定程度的提高, 因此, 在车身点焊结构中, 几何尺寸、工艺参数等细节因素对结构疲劳寿命有着至关重要的影响, 合理结构与工艺设计方案可以极大地提高点焊结构的疲劳强度与寿命。最重要的一点, 对于算例一和算例二来说, 执行区间优化后结构疲劳寿命与初始结构疲劳寿命相比, 有了很大幅度的提高, 点焊结构疲劳性能有了很大的改善, 说明焊点分布位置对点焊结构的疲劳寿命有着很重要的影响。进一步对表 4 进行分析, 对考虑焊点不确定性的 TS、MTS 试样模型的疲劳寿命进行对比, 发现无论优化前还是优化后, 结构疲劳寿命上下界都相差数万次甚至数十万次, 这表明考虑焊点不确定性对于点焊结构疲劳寿命的评估有重要的实际意义。

表 4 优化结果

	N_{10}^I (cycles)	(x_i^f, y_i^f) (mm)	N^I (cycles)
算例一	[4.20×10^5 , 4.50×10^5]	点 1(-3.50±	[9.45×10^5 , 9.72×10^5]
		1.00, 2.00±1.00)	
算例二	[12.50×10^5 , 16.80×10^5]	点 1(-42.80±1.00,	[24.52×10^5 , 29.74×10^5]
		-4.60±1.00)	
		点 2(46.30±1.00, 3.50±1.00)	

5 结论

本文综合考虑了焊点分布位置及其不确定性对点焊结构疲劳寿命的影响,以车身常用 JSC980Y 型高强钢为研究对象,构建了双焊点的 TS、MTS 点焊标准试样疲劳寿命最大化的区间不确定性优化分析模型。由优化前后的点焊结构的疲劳寿命区间的结果易知,基于焊点坐标不确定性参数下的点焊结构疲劳寿命区间分析不仅改善了结构的疲劳寿命,而且给出了结构疲劳寿命的波动范围,提高了点焊结构的疲劳可靠性。

参考文献:

- [1] 曾庆洋. 商用车驾驶室白车身焊点布置及疲劳寿命分析[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [2] 罗朋. 热镀锌双相钢 DP780 电阻点焊接头微观组织与力学性能的研究[D]. 长春:吉林大学,2012.
- [3] Xu S, Deng X. An Evaluation of Simplified Finite Element Models for Spot-welded Joints[J]. Finite Element in Analysis and Design, 2004, 40(9/10): 1175-1194.
- [4] Pan N, Sheppard S. Spot Welds Fatigue Life Prediction with Cyclic Strain Range[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(5): 519-528.
- [5] Florea R S, Bammann D J. Welding Parameters Influence on Fatigue Life and Microstructures in Resistance Spot Welding of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Materials and Design, 2013, 45: 456-465.
- [6] 姜潮, 韩旭. 电阻点焊焊装夹具定位点的优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 192-197.
Jiang Chao, Han Xu. The Optimization of Resistance Spot Welding Jig Anchor Point[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 192-197.
- [7] Ertas A, Sonmeza F O. Parametric Study on Fatigue Strength of Spot-weld Joints[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Material, 2008, 31(9): 766-776.
- [8] Ahmadi S R. Fatigue Life Prediction of Friction Stir Spot Welds Based on Cyclic Strain Range with Hardness Distribution and Finite Element Analysis[J]. Acta Mechanica, 2012, 223(4): 829-839.

- [9] Nakayama E, Fukumoto M, Miyahara M, et al. Fatigue Strength Prediction of Spot-welded Joints Using Small Specimen Testing [C]//Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures. Alexandroupolis, 2013: 187.
- [10] Karolczuk A. A Review of Critical Plane Orientations in Multi-axial Fatigue Failure Criteria of Metallic Materials[J]. International Journal of Fracture, 2005, 134(3/4): 267-304.
- [11] Hassanifard S. The Prediction of Fatigue Crack Initiation Life in Spot Welds[J]. Strain, 2009, 45(6): 489-497.
- [12] 中国机械工程学会焊接总会. 焊接手册. 第三版. 第三卷. 焊接结构[S]. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [13] 姜潮. 基于区间的不确定性优化理论与算法[D]. 长沙:湖南大学, 2008.
- [14] Jiang C, Han X, Li D. A New Interval Comparison Relation and Application in Interval Number Programming for Uncertain Problems[J]. CMC-Computer Materials & Continua, 2012, 27(3): 275-303.
- [15] Palmonellaa M, Friswellb M I. Finite Element Models of Spot Welds in Structural Dynamics: Review and Updating[J]. Computers & Structures, 2005, 83(8/9): 648-661.
- [16] 杨然. 点焊连接的有限元建模方法研究[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(5): 448-455.
Yang Ran. Study on the Finite Element Modeling Method of Spot Welded Connection[J]. Journal of Automobile Engineering, 2011, 1(5): 448-455.
- [17] Dancette S. A Finite Element Model for the Prediction of Advanced High Strength Steel Spot Welds Fracture [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 87: 48-61.
- [18] Salvinia P. A Spot Weld Finite Element for Structural Modeling [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(8): 645-656.
- [19] Ertas A H, Sonmez F O. Design Optimization of Spot-welded Plates for Maximum Fatigue Life[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(4): 413-423.
- [20] Ni K. Strain Based Probabilistic Fatigue Life Prediction of Spot-welded Joints [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(7): 763-772.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:刘志成,男,1985年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。研究方向为焊接结构的疲劳寿命分析与预测。
姜 潮,男,1978年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士研究生导师。
李 源,男,1983年生。国防科技大学指挥军官基础教育学院讲师、博士。
白影春,男,1987年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。