DOI: 10.3901/JME.2015.16.113

一种基于平均应力强度因子的焊点疲劳寿命预测方法*

宋凯^{1,2} 钱涛¹ 陈涛¹ 李光耀¹ 袁智军²

(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. 上汽通用五菱汽车股份有限公司 柳州 545000)

摘要: 传统的焊点疲劳仿真分析方法主要有基于力的 LBF 方法和基于应力的 LMS 方法, 针对这两种方法所存在的预测精度不高、建模和计算效率偏低等问题, 提出一种新的焊点疲劳寿命预测方法, 该方法从断裂力学的角度考虑焊点的疲劳失效, 采用一种模块化焊点模型, 通过有限元提取焊点周围各节点的节点力和力矩, 进而推算出焊点裂纹在板厚扩展路径上的平均应力强度因子作为疲劳寿命的评价参量。通过对 HSLA340GI 和 DP600GI 两种高强钢材料、4 种不同厚度的电阻点焊接头进行剪切疲劳试验, 将该平均应力强度因子与试验所得的焊点疲劳寿命数据进行双对数回归分析, 得到一条平均应力强度因子与疲劳寿命的拟合曲线作为焊点的疲劳寿命预测曲线, 并与传统的 LBF 和 LMS 方法进行预测精度的对比分析, 结果表明本文的焊点疲劳寿命预测方法的预测精度高于传统的 LBF 和 LMS 方法。

关键词: 焊点疲劳寿命; 模块化焊点模型; 节点力和力矩; 平均应力强度因子

中图分类号: TG156

A Fatigue Life Prediction Method for Resistance Spot Welds Based on Average Stress Intensity Factor

SONG Kai^{1,2} QIAN Tao¹ CHEN Tao¹ LI Guangyao¹ YUAN Zhijun²

(1. State Key Laboratory of Advanced Designing and Manufacture for Vehicle Body,

Hunan University, Changsha 410082;

2. SAIC-GM-Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545000)

Abstract: The traditional fatigue simulation analysis methods of spot weld joints are mainly LBF method based on force and LMS method based on stress. As the prediction accuracy is not high, modeling and computational efficiency is low and other issues for these two methods, a new fatigue life prediction method for spot welds is proposed, which considers the fatigue failure of spot welds from the point of fracture mechanics. A modular spot weld model is adopted, the node force and moment around the spot weld is extracted through the finite element analysis, then the average stress intensity factor through the crack propagation path is calculated as the evaluation parameters of fatigue life. Shear fatigue test is conducted for two high-strength steel—HSLA340GI and DP600GI, four different thickness resistance spot welding joints, then double logarithmic regression analysis is conducted for the average stress intensity factor and the fatigue life data of spot weld joints, then a curve between the average stress intensity factor and the fatigue life is obtained as the fatigue life prediction curve for spot welds, then comparative analysis of prediction accuracy is conducted among these three method, the results show that the prediction accuracy of fatigue life forecasting method of spot welds in this paper is higher than traditional LBF and LMS methods.

Key words: fatigue life of spot welds; modular spot weld model; nodal forces and moments; average stress intensity factor

0 前言

电阻点焊出现于 20 世纪 50 年代, 是汽车装配中最主要的连接工艺。一般情况下, 典型的白车身

结构通常含有多达 3 000~5 000 个焊点。焊点周围存在较严重的应力集中, 疲劳裂纹易于形成和扩展, 据统计, 大约 80% 的车身疲劳问题和焊点有关。因此, 在设计早期运用计算机辅助分析的手段, 对焊点进行疲劳寿命预测, 对于有效降低生产成本, 缩短汽车设计开发周期, 提高产品的质量有着重要的现实意义^[1]。目前, 焊点疲劳寿命仿真分析方法主要有两种: 一种是基于力的 LBF 法^[2], 这种方法主要建立在德国 LBF 实验室 RUPP 等^[2]的工作基础

* 湖南大学“青年教师成长计划”、湖南省自然科学基金(14JJ3055)、湖南省科技开发计划(2013TT1006)、广西科技计划重大专项(桂科重1348003-5)和中国博士后科学基金(2014M552132)资助项目。20140821收到初稿, 20141224收到修改稿

之上,该方法通过作用在焊核梁单元上的力和力矩,按照一定的数学公式推算焊接板材上的结构应力,然后根据对应的 $S-N$ 曲线计算疲劳寿命。由于该方法焊核梁单元必须在网格节点之间建立,所以对于网格依赖程度较高,导致建模过程中无法精确模拟焊点位置,并且梁单元与被连接板材之间的角度对梁单元的截面力和力矩均有较大影响,从而导致预测精度往往较低。另一种是基于应力的 LMS 法^[3],LMS 公司的 Virtual.Lab.Durability 软件采用一种精细的焊点有限元模型,直接计算焊接板材的局部应力,根据此局部应力结合对应的 $S-N$ 曲线计算疲劳寿命。该方法由于采用精细化的焊点模型,大大增加了网格数量和建模难度,应用于整车的焊点疲劳预测中,建模和计算效率较低。

近年来,国内外很多人尝试用断裂力学理论建立焊点的疲劳寿命预测模型,并且取得了较好的效果。SHI 等^[4-7]提出了一种基于等效应力强度因子的焊点疲劳寿命预测模型,该方法将焊点结构看成一个环状裂纹体,进而根据已有的公式和焊核力、力矩可以得到焊核处的各型应力强度因子,再定义一个等效应力强度因子作为焊点疲劳寿命的评价参量,但该方法与 LBF 法类似,都是以焊核单元上的力和力矩作为输入,只是最终的疲劳评价参量不同,因此在实际工程应用中存在和 LBF 法同样的缺陷;KANG 等^[8-10]采用基于等效结构应力的焊点疲劳寿命预测方法,通过有限元分析获得焊点周边单元的结构应力,结构应力经过板厚和受力模式的校正得到等效结构应力,再由 Paris 公式得到疲劳寿命曲线进行疲劳寿命预测,但该方法由于在进行结构应力的校正时采用了一些经验参数,其预测精度有待验证。本文从断裂力学的角度考虑焊点的疲劳失效,采用了一种模块化焊点模型,通过线弹性有限元分析得到焊点周围各节点的节点力和力矩,再根据做功相等原理推算得到相应节点处的结构应力,由断裂力学理论计算得到各节点处的应力强度因子,进而提出了一种焊点裂纹在板厚扩展路径上的平均应力强度因子 ΔK 作为疲劳寿命的评价参量。将该 ΔK 与焊点疲劳寿命数据进行双对数回归分析可得到一条主 $\Delta K-N$ 曲线,并与传统的 LBF 和 LMS 方法进行预测精度的对比分析,结果表明本文的焊点疲劳寿命预测方法可以有效预测点焊接头的疲劳寿命并且预测精度高于传统的 LBF 和 LMS 方法。

1 基于平均应力强度因子的焊点疲劳寿命预测模型的建立

本文提出的基于平均应力强度因子的焊点疲劳寿命预测方法的流程见图 1。

图 1 基于平均应力强度因子的焊点疲劳预测方法流程图

1.1 焊点有限元建模

为了解决传统焊点建模方法所存在的无法准确模拟焊点位置、建模和计算效率偏低等问题,本文采用了一种模块化焊点建模方法,建立了一种适合进行焊点疲劳仿真分析的模块化焊点模型,具体结构见图 2。有文献研究表明用多个实体单元模拟焊核比较精确,并证明实体单元焊点模型能有效模拟焊点的拉脱失效^[11]。故本文用两层共八个实体单元模拟焊核,并增加了热影响区和母材区,且将各区域的尺寸固定形成一种模块化焊点模型。该模型可以准确模拟焊点实际位置且更加符合焊点的物理几何特征;并且其网格数量大大少于 LMS 焊点模型,因此不会降低建模和计算效率。

焊核使用两层实体单元模拟,每层由四个实体单元组成,形成一个等边八边形,直径取焊核的实际直径,焊核材料假定与母材一致。焊核通过三圈壳单元逐步过渡到 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的基本网格尺寸。第一圈网格定义为焊点热影响区:沿焊点直径方向上的宽度取 2 mm ,焊点热影响区材料厚度、类型与母材一致。其余两圈网格为母材区,其中第三圈单元的外端尺寸为 10 mm ,从而可完成焊点网格尺寸到基本网格尺寸的过渡。由于实体单元节点没有旋转自由度,需要在焊核区上下表面覆盖一层壳单元,以解决壳网格与实体网格节点自由度匹配的问题。在整车建模中只需要将模块化的焊点模型边界单元的节点与被焊接结构单元的相应节点重合即可,提高建模效率。

图2 模块化焊点有限元模型

1.2 疲劳寿命评价参量的建立

1.2.1 LBF 方法的疲劳评价参量

图3所示为典型的LBF点焊接头模型。采用刚性梁单元模拟焊核,则焊核梁单元长度 $0.5(s_1+s_2)$,其中 s_1 和 s_2 分别为板1和板2的厚度,点1和点2分别为梁单元在两层壳单元上的端点,力和力矩按图3坐标系计算。

图3 LBF 点焊接头有限元模型

从有限元结果文件中分别提取点1、点2的力 F_x 、 F_y 、 F_z 和力矩 M_x 、 M_y 、 M_z , 依此可计算得到点1、点2处的结构应力 σ_s (沿焊核圆周方向每 10° 取一个点来计算)。点1处的结构应力 σ_{s1} 可由式(1)得到^[2]

$$\sigma_{s1} = -\sigma_{\max}(F_{x1})\cos\theta - \sigma_{\max}(F_{y1})\sin\theta + \sigma(F_{z1}) + \sigma_{\max}(M_{x1})\sin\theta - \sigma_{\max}(M_{y1})\cos\theta \quad (1)$$

式中, $\sigma_{\max}(F_{x1})=F_{x1}/\pi ds_1$; d 为焊核直径; $\sigma_{\max}(F_{y1})=F_{y1}/\pi ds_1$; $\sigma_{\max}(M_{x1})=K_1(1.872M_{x1}/ds_1^2)$; $\sigma_{\max}(M_{y1})=K_1(1.872M_{y1}/ds_1^2)$ 。当 $F_{z1}>0$ 时, $\sigma(F_{z1})=K_1(1.744F_{z1}/s_1)$; $K_1=0.6s_1^{1/2}$, 作为对弯曲应力梯度效应的补偿; 当 $F_{z1}\leq 0$ 时, $\sigma(F_{z1})=0$ 。点2处的结构应力 σ_{s2} 可由同样的公式得到。

该结构应力 σ_s 即为LBF方法的焊点疲劳寿命评价参量, 再根据对应的 $S-N$ 曲线计算疲劳寿命^[2]。

1.2.2 LMS 方法的疲劳评价参量

图4所示为LMS方法采用的焊点有限元模型。LMS公司的Virtual.Lab.Durability软件采用一种细化的焊点有限元模型以模拟焊核附近的应力集中, 通过有限元分析直接计算焊核四周的局部应力 σ_j ,

该局部应力 σ_j 是基于 von Mises 屈服准则综合考虑第一、第二、第三主应力的等效应力, 其表达式为^[3]

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为有限元分析得到的焊核周围局部位置的第一、二、三主应力, 则该局部应力 σ_j 即为LMS方法的疲劳评价参量, 再根据对应的 $S-N$ 曲线计算疲劳寿命^[3]。

图4 LMS 焊点有限元模型

1.2.3 平均应力强度因子疲劳评价参量的推导

焊点周围各节点在整体坐标系下的节点力和力矩可由线弹性有限元软件直接计算并输出, 再通过坐标变换转化为局部坐标系下的节点力和力矩。图5中 (x, y, z) 为整体坐标系 (x', y', z') 为某节点的局部坐标系。

图5 节点整体和局部坐标系

根据做功相等原理将焊点局部坐标系下的节点力和力矩在整个焊核圆周上平均分布, 得到焊核周围各节点的线性力和力矩, 其转换矩阵如式(3)所示^[9]

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{l_1+l_{n-1}}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & \frac{l_{n-1}}{6} \\ \frac{l_1}{6} & \frac{l_1+l_2}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{l_2+l_3}{3} & \frac{l_3}{6} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{l_{n-1}}{6} & 0 & 0 & 0 & \frac{l_{n-2}}{6} & \frac{l_{n-2}+l_{n-1}}{3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, $F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$ 为节点的节点力; $f_1, f_2, \dots, f_{n-1}$ 为节点的线性力; $l_1, l_2, \dots, l_{n-1}$ 为焊点周围各节点间距。

图 6 为节点 1、2、 $n-1$ 上的节点力和线性力的示意图, 假定节点 1 在 F_1 作用下存在单位位移, 且线性和位移均为线性分布, 则 l_{n-1} 上的线性力、位移分布分别为 $f(x)$ 、 $l(x)$, l_1 上的线性力、位移分布分别为 $f(x')$ 、 $l(x')$, 则根据做功相等原理有

$$F_1 = \int_0^{l_1} f(x)l(x)dx + \int_0^{l_{n-1}} f(x')l(x')dx' =$$

$$\int_0^{l_{n-1}} \left(\frac{f_{n-1}-f_1}{l_{n-1}}x + f_1 \right) \left(1 - \frac{x}{l_{n-1}} \right) dx +$$

$$\int_0^{l_1} \left(\frac{f_2-f_1}{l_1}x' + f_1 \right) \left(1 - \frac{x'}{l_1} \right) dx' =$$

$$\frac{l_1+l_{n-1}}{3}f_1 + \frac{l_1}{6}f_2 + \frac{l_{n-1}}{6}f_{n-1} \quad (4)$$

依此类推有

$$F_2 = \frac{l_1+l_2}{3}f_2 + \frac{l_1}{6}f_1 + \frac{l_2}{6}f_3$$

$\vdots$

$$F_{n-1} = \frac{l_{n-2}+l_{n-1}}{3}f_{n-1} + \frac{l_{n-1}}{6}f_1 + \frac{l_{n-2}}{6}f_{n-2} \quad (5)$$

可将式(4)、(5)组装得到转换矩阵式(3)。节点线性力矩也可由节点力矩通过相同的转换矩阵得到。

图 6 节点力和线性力示意图

由焊点周围各节点的线性力和力矩, 按式(6)、(7)可以得到相应节点处的结构应力^[9]

$$\sigma_m = f_{y'} / \delta \quad (6)$$

$$\sigma_b = 6m_{x'} / \delta^2 \quad (7)$$

式中, σ_m 为结构应力中的膜应力成分; σ_b 为弯应力成分; δ 为母板厚度; $f_{y'}$ 、 $m_{x'}$ 分别为局部坐标系下 y' 、 x' 方向上的线性力和力矩; a 为某一时刻的裂纹长度; l_r 为疲劳断裂临界裂纹长度。焊接钣金的结构应力的组成成分见图 7。

根据断裂力学理论, 由所得的结构应力可经式(8)得到相应的应力强度因子^[12]

图 7 结构应力的组成成分

$$\Delta K = \Delta K_m + \Delta K_b = \sqrt{\pi a} \left[\sigma_m f_m \left(\frac{a}{l_r} \right) + \sigma_b f_b \left(\frac{a}{l_r} \right) \right] \quad (8)$$

式中, $f_m(a/l_r)$ 为应力强度因子相对于膜应力的几何修正系数, $f_b(a/l_r)$ 为应力强度因子相对于弯应力的几何修正系数, 具体表达式如下^[12]

$$f_m \left(\frac{a}{l_r} \right) = \left[1.1214 - 1.6349 \left(\frac{a}{l_r} \right) + 7.3168 \left(\frac{a}{l_r} \right)^2 - \right.$$

$$18.7746 \left(\frac{a}{l_r} \right)^3 + 31.8028 \left(\frac{a}{l_r} \right)^4 - 33.2295 \left(\frac{a}{l_r} \right)^5 +$$

$$19.1286 \left(\frac{a}{l_r} \right)^6 - 4.609 \left(\frac{a}{l_r} \right)^7 \left. \right] / \left(1 - \frac{a}{l_r} \right)^{3/2} \quad (9)$$

$$f_b \left(\frac{a}{l_r} \right) = \left[\sum_{n=0}^{12} C_n \left(\frac{a}{l_r} \right)^n \right] / \left(1 - \frac{a}{l_r} \right)^{3/2} \quad (10)$$

式中, $C_0=1.12152$, $C_1=-3.04057$, $C_2=10.49184$, $C_3=-36.6678$, $C_4=110.099$, $C_5=-255.68184$, $C_6=421.97167$, $C_7=-440.50866$, $C_8=199.37326$, $C_9=123.93056$, $C_{10}=-237.97164$, $C_{11}=136.17068$, $C_{12}=-28.91005$ 。

在循环载荷作用下, 焊点疲劳裂纹首先从焊点两板搭接面的边缘附近萌生, 然后裂纹在板厚及板宽方向同时扩展, 板厚方向裂纹扩展直到贯穿板厚, 接着裂纹在板宽方向快速扩展直至断裂, 并且点焊接头在板厚路径上的裂纹扩展寿命占其整个疲劳寿命的 80% 以上^[4], 因此可以合理假定疲劳断裂临界裂纹长度 l_r 近似等于板厚 δ , 即 $l_r \approx \delta$, 且疲劳裂纹从 $a=0$ 开始萌生直至扩展到 $a=\delta$ 时断裂, 则可取整个裂纹扩展过程中的平均应力强度因子

$$\overline{\Delta K} = \int_{\frac{a}{\delta}=0}^{\frac{a}{\delta}=1} \Delta K d \frac{a}{\delta} = \int_{\frac{a}{\delta}=0}^{\frac{a}{\delta}=1} \sqrt{\pi a} \left[\sigma_m f_m \left(\frac{a}{\delta} \right) + \sigma_b f_b \left(\frac{a}{\delta} \right) \right] d \frac{a}{\delta} \quad (11)$$

经计算得到

$$\overline{\Delta K} = \sqrt{\delta} (32.87\sigma_m + 114.87\sigma_b) \quad (12)$$

则该平均应力强度因子 $\overline{\Delta K}$ 可作为焊点疲劳寿命的评价参量, 为了检验该评价参量 $\overline{\Delta K}$ 能否有效预测焊点的疲劳寿命, 下面将设计焊点的剪切疲劳试验。

1.3 疲劳试验

1.3.1 试验对象

本试验选取两种高强钢材料 HSLA340GI 和 DP600GI 作为试验对象, HSLA340GI 点焊试样的板厚分别为 1.0 mm 和 1.8 mm, DP600GI 试样的板厚分别为 0.8 mm 和 1.5 mm, 两种材料的力学性能参数见表 1。为了保证获得的点焊接头的一致性, 所有试样的几何尺寸都保持一致(图 8), 且焊接钢板都是同种厚度的组合, 焊核直径统一为 7.0 mm。

表 1 HSLA340GI 和 DP600GI 的力学性能参数

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)
HSLA340GI	370	448	32
DP600GI	432	671	22

图 8 试样尺寸

1.3.2 试验方法

由于焊点主要承受剪切载荷, 本试验只关注各个焊点样件的剪切疲劳寿命, 将 HSLA340GI 和 DP600GI 两种材料、4 种板厚组合的点焊样件在 INSTRON-8801 型电液伺服疲劳试验机(图 9)上进行剪切疲劳试验, 试验过程中加载载荷比 $R=0.1$, 加载频率为 10 Hz。

图 9 INSTRON-8801 型电液伺服疲劳试验机

1.3.3 试验结果

图 10 为试验所得的 HSLA340GI 和 DP600GI 两种材料、4 种板厚组合的点焊样件的载荷幅值-疲劳寿命的双对数分布图。从图 10 可以发现, 各个点焊样件的疲劳寿命数据点的分布范围仍然很分散, 分布宽度仍然很宽, 显然无法根据该试验结果对其

他不同材料、厚度的点焊接头的疲劳寿命进行预测。

图 10 疲劳试验所得试样的载荷-寿命双对数分布图

1.4 回归分析

为了验证本文提出的焊点疲劳寿命评价参量 $\overline{\Delta K}$ 的有效性, 需要将有限元分析所得的平均应力强度因子 $\overline{\Delta K}$ 与试验所得的焊点疲劳寿命数据进行双对数回归分析。

首先按照试验的样件尺寸建立模块化点焊接头有限元模型见图 11, 为保持与疲劳试验条件的一致性, 焊核直径取 7.0 mm, 试样一端约束全部 6 个自由度, 另一端施加载荷, 载荷受力点约束除加载方向的全部自由度。材料属性均为线弹性, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

图 11 模块化点焊接头有限元模型

图 12 平均应力强度因子-疲劳寿命的双对数分布图($R^2=0.95$)

将经过有限元分析计算得到的平均应力强度因子 $\overline{\Delta K}$ 与焊点的疲劳寿命数据进行双对数回归分析, 分析结果见图 12, 从图上可以看出, 所有不同

材料、厚度组合的焊点样件的疲劳寿命点都紧密的分布于拟合直线附近, 拟合直线的相关度达到 $R^2=0.95$, 从而证明 $\overline{\Delta K}$ 能够有效预测不同材料、厚度组合的点焊接头的疲劳寿命, 因此可以得到一条主 $\overline{\Delta K}-N$ 曲线如

$$\overline{\Delta K} = 87799N^{-0.2201} \quad (13)$$

用该主 $\overline{\Delta K}-N$ 曲线能够对不同材料、厚度组合的点焊接头的疲劳寿命进行统一评价。

2 预测精度分析

将本文提出的焊点疲劳寿命预测方法与 LBF 和 LMS 方法进行预测精度的对比分析, 分别将 LBF 和 LMS 方法的疲劳评价参量与焊点的疲劳寿命数据进行双对数回归分析, 再根据三种方法所得拟合直线相关度 R^2 的大小来判断其预测精度的高低^[7]。

LBF 方法的点焊接头有限元模型见图 13, 经过有限元分析得到的结构应力与焊点的疲劳寿命数据的回归分析结果见图 14; LMS 方法的点焊接头有限元模型见图 15, 经过有限元分析得到的局部应力与焊点的疲劳寿命数据的回归分析结果见图 16。

图 13 LBF 点焊接头有限元模型

由分析结果可以看出, 本文提出的焊点疲劳寿命预测方法所得的数据点大都较为紧密地分布于拟合直线两侧, 其相关度 R^2 达到 0.95; LBF 和 LMS 方法所得的数据点的分布形式类似, 但其数据点在拟合直线两侧的分布明显更加分散, 数据点的分布宽度明显更宽, 其中 LBF 方法的相关度 $R^2=0.90$, LMS 方法的相关度 $R^2=0.92$ 。因此, 本文提出的焊点疲劳寿命预测方法的预测精度要高于传统的 LBF 和 LMS 方法。

LBF 方法由于采用简化梁单元模拟焊核, 所以不能准确模拟焊核四周不同位置的疲劳寿命分布, 并且其在结构应力计算中采用了一些经验参数, 这些都可能导致其预测精度的降低; LMS 方法采用焊核周围的局部应力作为疲劳评价参量, 综合考虑第一、第二、第三主应力的等效应力对焊点疲劳寿命的贡献, 而点焊接头的疲劳断裂大多是由沿焊接母材板厚方向扩展的张开型裂纹引起的, 因此垂直于母材截面上的拉弯应力才是点焊接头疲劳断裂的主要原因^[13-14], 并且该方法将焊核做刚性化处理, 这

些都可能是降低其预测精度的原因。本文采用一种模块化焊点模型, 该模型更加符合点焊接头实际的物理几何特征; 并以基于断裂力学理论得到的焊点裂纹在板厚扩展路径上平均应力强度因子 $\overline{\Delta K}$ 作为焊点疲劳寿命的评价参量, 且在 $\overline{\Delta K}$ 的计算中仅考虑对点焊接头疲劳断裂起主导作用的垂直于母材截面上的拉弯应力的作用。因此, 本文提出的焊点疲劳寿命预测方法的预测精度较高有其合理性。

图 14 LBF 结构应力与疲劳寿命的双对数分布图($R^2=0.90$)

图 15 LMS 点焊接头有限元模型

图 16 LMS 局部应力与疲劳寿命的双对数分布图($R^2=0.92$)

3 结论

(1) 采用了一种模块化焊点建模方法, 相对于传统 LBF 和 LMS 方法所采用的焊点模型, 该模型可以准确模拟焊点实际位置, 更加符合焊点的物理几何特征, 并且建模和计算效率相较于 LMS 方法有所提高, 运用该模型进行焊点疲劳仿真分析能够

获得更准确的疲劳寿命预测结果。

(2) 采用基于节点力和力矩得到的一个平均应力强度因子 $\overline{\Delta K}$ 作为焊点疲劳寿命的评价参量, 对 HSLA340GI 和 DP600GI 两种材料、4 种板厚组合的电阻点焊接头进行了剪切疲劳试验, 得到了不同焊点样件的疲劳寿命数据, 通过对 $\overline{\Delta K}$ 与焊点疲劳数据进行回归分析, 得到一条主 $\overline{\Delta K}$ - N 曲线, 证明该主 $\overline{\Delta K}$ - N 曲线能够有效预测点焊接头的疲劳寿命。

(3) 将本文提出的焊点疲劳寿命预测方法与 LBF 和 LMS 方法进行了预测精度的对比分析, 得出的结论是本文提出的焊点疲劳寿命预测模型的预测精度最高, 具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] PETER J, MIKAEL F. The engineering prediction of spot-weld fatigue life[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(11): 35-37.
- [2] RUPP A, STOERZEL K, GRUBISIC V. Computer aided dimensioning of spot welded automotive structures[R]. SAE Paper, 950711, 1995.
- [3] DONDDERSA S, BRUGHMANSA M. The robustness of dynamic vehicle performance to spot weld failures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 670-682.
- [4] SHI Yandong, GUO Haiding. Stress intensity factor based spot welds fatigue life prediction model[R]. SAE Paper, 2013-01-0389, 2013.
- [5] HONG T K, ABOLHASSAN K. A fatigue prediction method for spot welded joints[R]. SAE Paper, 2013-01-1208, 2013.
- [6] LEE H, KIM N. Fatigue life prediction of multi spot welded panel structures using an equivalent stress intensity factor[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26: 403-412.
- [7] 许君, 张延松. 双相钢搭接点焊接头疲劳寿命分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(5): 45-48.
XU Jun, ZHANG Yansong. Fatigue life analysis of dual-phase steel spot welding lap joints[J]. Welding Journal, 2008, 29(5): 45-48.
- [8] KANG H T, DONG P, HONG J K. Fatigue analysis of spot welds using a mesh-insensitive structural stress approach[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29: 1546-1553.
- [9] DONG P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of spot welded automotive structures[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 865-876.
- [10] 孙成智, 曹广军. 基于等效结构应力的电阻点焊疲劳寿命预测[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 105-108.
SUN Chengzhi, CAO Guangjun. Fatigue life prediction of resistance spot welds based on equivalent structural stress[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 105-108.
- [11] MALCOLM S, NUTWELL E. Spot weld failure prediction using solid element assemblies[C]//6th European Ls-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, 2007: 47-56.
- [12] TADA H, PARIS P, IRWIN G. The stress analysis of cracks handbook[M]. New York: ASME, 2000.
- [13] 宋占勋, 方少轩. T 形焊接接头根部裂纹应力强度因子研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 87-93.
SONG Zhanxun, FANG Shaoxuan. Research on stress intensity factors for weld root crack of T-butt joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 87-93.
- [14] 陈龙, 蔡力勋. 考虑裂尖疲劳损伤的材料疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 51-56.
CHEN Long, CAI Lixun. Research on fatigue crack growth behavior of materials by considering the fatigue damage near the crack tip[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 51-56.

作者简介: 宋凯, 男, 1981 年出生, 助理研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为汽车车身结构快速优化设计和车身疲劳性能分析。

E-mail: song_kaivip@163.com

钱涛(通信作者), 男, 1990 年出生。主要研究方向为焊点疲劳性能分析与优化。

E-mail: 1083910913@qq.com