

文章编号:1672-9331(2019)01-0079-06

汽车悬架承载梁焊接结构疲劳分析

吴道俊

(厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要: 为了有效地评估悬架承载梁的疲劳寿命,研究了焊接结构的疲劳测试与分析方法,提出了与 CAE 相结合的载荷谱测点合理布置原则。基于应变测试技术,合理布置测点,采集承载梁关键点的道路载荷谱,将三向应变花的载荷数据合成和获取动态 signed VonMises 应力;基于焊接结构的等级划分理论,研究了焊接结构性能相关的参数构成,最终确定了悬架承载梁结构的 S-N 曲线;基于雨流计数方法和损伤累计理论,实现了疲劳寿命的预估,获取了实车室内可靠性试验中悬架承载梁的考核结果;基于损伤评价理论进行了与室内可靠性试验结果的对比,形成了一套完整的基于实测载荷谱数据的焊接结构疲劳分析方法。研究结果表明,该疲劳分析方法和流程能够有效预测焊接结构的疲劳寿命。

关键词: BS7608 标准; 悬架承载梁; 焊缝; 焊接疲劳; CAE

中图分类号: U467.3

文献标识码: A

Fatigue analysis method for welded structure of suspension bearing beam

WU Dao-jun

(Xiamen Kinglong United Automotive Industry Co. Ltd., Xiamen 361023, China)

Abstract: In order to evaluate the fatigue life of the suspension bearing beam, fatigue testing and analysis methods for welded structures are studied. Combined with CAE, the principle of load spectrum point placement is put forward. Based on the strain testing technology, the road load spectrum of the key points of the bearing beam is collected to obtain the dynamic stress. Dynamic signed VonMises stress is synthetised from strain rosette data. The SN curve of the suspension bearing beam structure is determined based on the theory of welded structure classification. The parameters related to welding structure performance are studied. And the fatigue life prediction is finished based on the theory of rain flow counting and damage accumulation. Compared with the reliability test result in laboratory, the result is good. A complete set of fatigue analysis method for welded structures based on measured load spectrum data is formed. It is proved that the fatigue analysis method and process can effectively predict the fatigue life of welded structures.

Key words: BS7608 standard; suspension bearing beam; weld seam; welding fatigue; CAE

收稿日期:2018-10-29

基金项目:福建省企业技术创新专项资金项目(闽经信计财[2016]411号)

通讯作者:吴道俊(1985-),男,福建三明人,厦门金龙联合汽车工业有限公司高级工程师,博士,主要从事整车及零部件道路载荷谱采集与分析、道路模拟与耐久试验、结构强度试验与疲劳分析。E-mail: wudaojun217@126.com

随着客车工业的发展以及用户的要求越来越高,可靠性、安全性已成为客车产品品质的重要指标。客车悬架承载梁是悬架系统最重要的承载件之一,承载梁中部与车桥连接,两个端部与车身通过气簧相连,承受着来自车身、车桥的极大动态载荷,是整车中受力最大的结构件之一;加之其连接支座与梁体之间存在焊接结构,所以悬架承载梁应考虑的焊接结构疲劳问题^[1]是整车可靠性、安全性的重要影响因素。

由于焊接工艺自身的特点,如细节和微观组织的改变等因素^[2],焊接结构的疲劳强度常常远低于母材的疲劳强度,因此焊接结构成为整体结构的薄弱环节^[3]。而以往针对金属材料结构的疲劳分析理论已不再适用于焊接结构^[4]。

在汽车结构设计及分析中,其疲劳耐久性能如何,关键在于其中的焊接结构的疲劳强度。因此,研究焊接结构的疲劳寿命分析与预测方法,在产品投放市场之前有效地预估疲劳寿命,提早进行结构改进,就显得特别重要。

近年来,通过 CAE(Computer Aided Engineering)分析计算焊接结构的疲劳寿命的方法得到了一定的发展^[5-7]。但是对于动态应力分析,CAE 分析手段存在一定的挑战^[8]。由于受有限元模型的精度影响较大,特别是焊趾附近的网格尺寸对焊接结构动态应力的影响十分敏感^[2],进而对疲劳寿命的影响更加明显。而且网格单元类型、网格大小等的选择和判定因人而异,没有统一的标准,因此 CAE 焊接疲劳分析手段存在局限性。此外,CAE 疲劳分析中所必须的动态载荷,需通过多体动力学进行分解和获取,在精度上受限于多体动力学模型及其边界条件的精度。

而通过试验和实测手段获取精确的载荷响应信号,基于焊接结构分级理论、通过大量试验获取的焊接结构 S-N 性能曲线,已经涵盖了局部应力集中、尺寸与形状、残余应力等的影响,对焊接疲劳分析精度具有更加重要的意义。

作者结合 CAE 确定悬架承载梁的危险点,进行动态应变测试和 signed VonMises 应力时间历程计算;基于雨流计数和焊接结构等级理论,实现结构疲劳寿命预测。并结合室内可靠性试验结果对方法进行有效性评价,以形成一套完整的基于实测载荷谱数据的焊接结构疲劳分析方法。

1 悬架承载梁动态应变、应力测试

1.1 焊接结构的载荷分布特点

焊接结构中,在远离焊趾的一段距离,载荷呈线性增长;在接近焊趾区域($0.4t$),应力集中影响很大,导致越接近焊趾处载荷呈非线性急剧增长(如图 1 所示)。为了更好地描述和评价焊接结构的疲劳载荷,采用名义应力进行疲劳寿命计算。

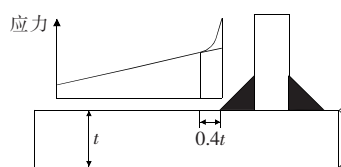


图 1 焊缝附近区域应力分布

Fig. 1 Stress distribution near weld area

1.2 悬架承载梁测点的选取与测试

悬架承载梁规格:矩形钢管 $120\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,厚度 7 mm ;母材为 Q345。

载荷谱测点应为设计开发中的关注点,选取原则为:①结合设计经验和结构试验经验;②联合 CAE 分析评估危险点位置;③结合以往的用户使用和可靠性试验断裂历史位置;④标杆车型或零部件的关注点位置。综合考虑以上原则,将承载梁的根部(梁体中部),即推力杆的固定板在梁上的焊缝区域设为关注区域,同时结合 CAE 分析结果(如图 2 所示),最终明确承载梁根部的前上焊缝处为最关注危险点位置。

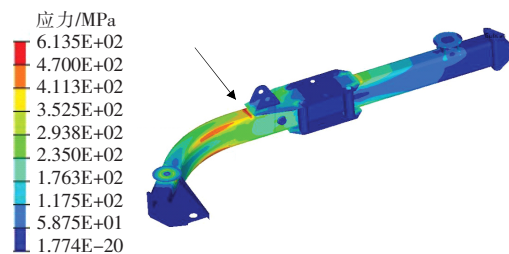


图 2 悬架承载梁 CAE 分析危险点位置

Fig. 2 Suspension bearing beam dangerous location

测试承载梁危险点的应力信息,由于存在弯扭组合作用力,其主应力状态不易预知,故采用三向应变花进行测试,以获取全面、精确的受力状态(如图 3 所示)。随后对应变花进行保护胶封装,

并固定好数据线路,连接 eDAQ 数据采集器(如图 4 所示)。

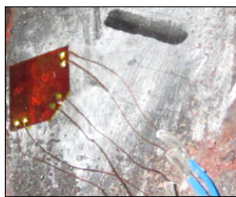


图 3 应变贴装

Fig. 3 Strain arrangement

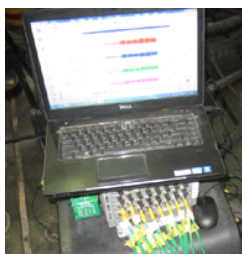


图 4 应变通道及采集器

Fig. 4 Strain channels and collector

采用六立柱道路模拟试验台,在室内提供整车可靠性试验工况。在实车运行中,采集承载梁关注点位置的应变信号。考虑该梁承受的静态载荷,在测试动态信号之前先将车身顶起,在车桥及悬架处于自由放置状态下,此时确定为应变为零的状态,对测试通道调零后再开始采集数据。随后,将车身放下,整车进入正常行驶状态。运行整个可靠性工况循环,测试获取的应变花各通道的信号。

2 载荷数据分析

2.1 主应力计算及 PSD(Power Spectral Density) 分析

实测获取的三向应变花信号如图 5 所示。计算该处的的主应力,计算公式为:

$$\sigma_1 = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{1 - \mu} + \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (2\epsilon_{45} - \epsilon_x - \epsilon_y)^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{1 - \mu} - \frac{1}{1 + \mu} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (2\epsilon_{45} - \epsilon_x - \epsilon_y)^2} \right] \quad (2)$$

计算 VonMises 应力,依据 σ_1 的符号确定 signed VonMises 应力的符号,获取相应载荷时间历程(如图 6 所示)。

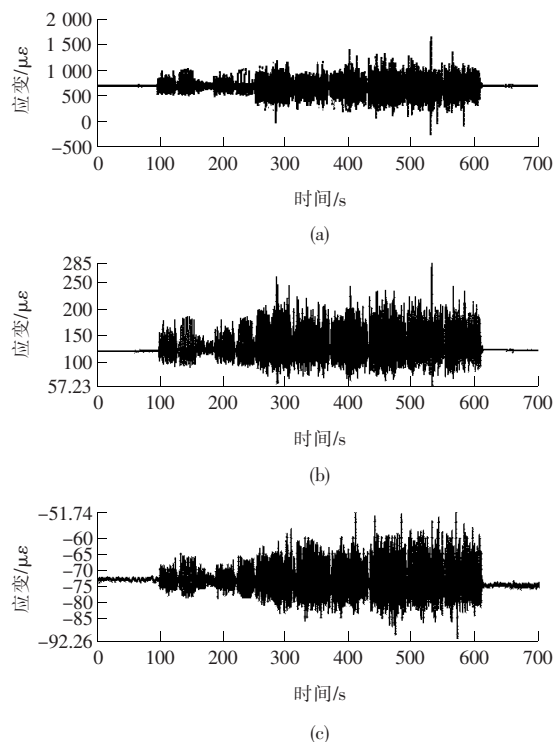


图 5 承载梁危险点应变花信号

Fig. 5 The strain signal

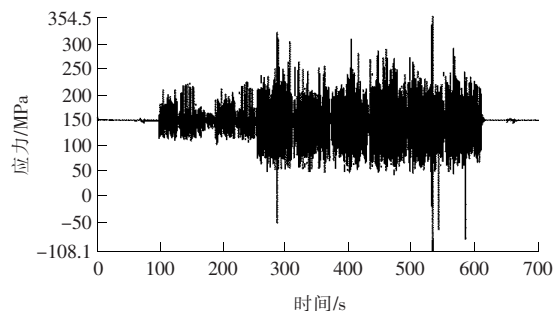


图 6 承载梁危险点 signed VonMises 应力

Fig. 6 Signed VonMises stress

计算得到的悬架承载梁 signed VonMises 应力载荷谱的功率谱密度(PSD)如图 7 所示,其计算结果对更全面了解载荷谱的频域分布情况有着重要的指导意义。从图 7 可以看出,应力载荷谱 PSD 主要分布在 0.6~2 Hz,此外还有 9~11 Hz 左右的载荷成分。载荷的主要频域分布与客车簧下质量系统和簧上质量系统的偏频有关,由质量分布与弹簧、轮胎刚度等因素决定。

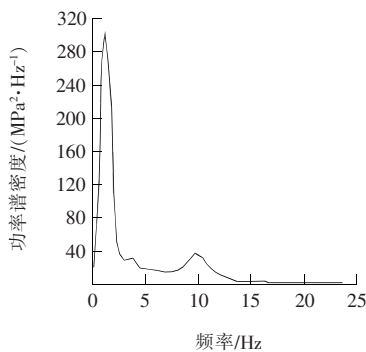


图7 应力载荷谱的功率谱密度(PSD)

Fig. 7 PSD of stress spectrum

2.2 雨流计数

由于道路载荷谱数据具有随机性,无法直接计算疲劳损伤,故需对其进行分析处理,分解为各个对疲劳作用有效的载荷循环^[9]。雨流计数法是目前最为广泛应用的载荷计数方法,它具有良好的物理理论支撑。当应力应变响应曲线经历封闭环时,就会产生相应的损伤,这就构成了基本的损伤事件过程。变幅载荷曲线的雨流计数结果与应力—应变响应曲线中的封闭环具有一一对应的关系,说明雨流计数法是一种行之有效的载荷计数方法。

将雨流计数结果进行分级和相应计数,形成雨流矩阵(如图8所示),可选取“变程—均值”的雨流矩阵呈现。雨流矩阵是掌握载荷谱在幅值域的分布信息的重要手段。

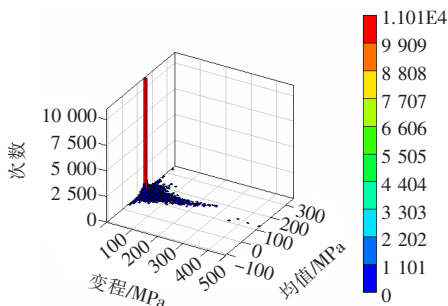


图8 雨流矩阵

Fig. 8 Rain flow matrix

3 焊接结构疲劳性能等级与性能曲线

由于材料的性能发生改变,焊接结构的疲劳性能与母材的疲劳性能相比发生了很大的改变,因此在工程分析中需区别对待。基于焊接结构的细节特征对其进行分类,建立焊接接头疲劳性能

的分级方法,为焊接接头的疲劳强度评价奠定了基础^[10]。

英国的 BS7608 标准^[11]考虑了焊接接头几何尺寸、受力方向、制造方法等因素,将焊接结构划分为 B、C、D、E、F、F2、G 等多个等级。基于大量的疲劳试验结果数据,提出了各对应焊接等级的 S-N 曲线。基于加载过程中的名义应力进行焊接结构疲劳寿命计算。

3.1 焊接结构 S-N 曲线

对于某一等级的焊接结构,在恒幅载荷下,应力变化范围 S_r 和寿命的循环次数 N 之间的关系,即为焊接结构的 S-N 曲线^[11]。英国 BS7608 标准中涉及的焊接结构 S-N 曲线方程为:

$$\log N = \log C_0 - d\sigma - m \log S_r. \quad (3)$$

式中: N 为焊接结构的疲劳寿命(循环次数); C_0 为与平均 S_r - N 曲线相关的常数; d 为低于平均值的标准偏差数目; σ 为 $\log N$ 的标准偏差; m 为 S-N 曲线斜率的倒数; S_r 为应力变化范围;不同的焊接结构等级对应不同的 C_0 、 σ 、 m (如表1所示)。

表1 S-N 曲线参数

Table 1 S-N curve parameters

接头类别	C_0	m	σ	S_0
B	2.343E15	4.0	0.182 1	100
C	1.082E14	3.5	0.204 1	78
D	3.988E12	3.0	0.209 5	53
E	3.289E12	3.0	0.250 9	47
F	1.726E12	3.0	0.218 3	40
F2	1.231E12	3.0	0.227 9	35
G	0.566E12	3.0	0.179 3	29
W1	0.250E12	3.0	0.214 0	21

令

$$\log C_d = \log C_0 - d\sigma. \quad (4)$$

则有

$$S_r^m N = C_d. \quad (5)$$

不同的 d 值对应不同的 S-N 曲线参数。如果 $d=0$,则对应的 S-N 曲线为平均值 S-N 曲线;如果 $d=2$,则对应的 S-N 曲线为标准 S-N 曲线。 d 值与名义失效概率关联(如表2所示),失效概率可根据焊缝质量、疲劳裂纹的严重程度和疲劳裂纹被定位的容易程度等进行确定。

表 2 名义概率因素

Table 2 Nominal Probability Factors		
名义失效概率/%	d	备注
50.00	0.0	平均值曲线
31.00	0.5	
16.00	1.0	
2.30	2.0	标准设计曲线
0.14	3.0	

在 BS7608 中,寿命为 $N = 10^7$ 次周期循环时所对应的应力变化范围为 S_0 。BS7608 标准认为,应力范围低于 S_0 时,对疲劳损伤仍然有贡献。当施加的应力范围变化时,在 S - N 曲线上,以 $N = 10^7$ 次周期循环为拐点,此点之前曲线斜率为 m 的倒数,此点之后斜率为 $(m+2)$ 的倒数,损伤比分别为:

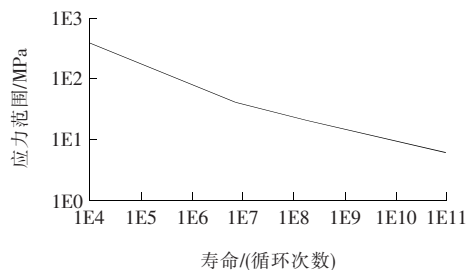
$$\text{当 } S_r \leq S_0 \text{ 时, } \frac{n}{N} = \frac{n}{10^7} \left(\frac{S_r}{S_0} \right)^m. \quad (6)$$

$$\text{当 } S_r \geq S_0 \text{ 时, } \frac{n}{N} = \frac{n}{10^7} \left(\frac{S_r}{S_0} \right)^{m+2}. \quad (7)$$

式中: n 为被评估点应力变化范围发生的次数。

3.2 悬架承载梁焊接结构 S - N 曲线的确定

结合本研究分析对象,最终确定焊接结构等级为 G 级,选取失效概率为 50%,最终确定 m 和 S_0 。考虑相关修正,确定相应的 S - N 曲线如图 9 所示。这为后续疲劳寿命计算提供了数据前提。

图 9 G 级焊接结构的 S - N 曲线Fig. 9 S - N curve of G class welded structure

4 线性累积损伤与疲劳寿命理论

基于线性累积损伤理论,焊接结构承受的各级应力产生的损伤是相互独立的,因此可以将计算得出的每一应力变化范围级别相应的损伤按照线性进行累积。对于变幅疲劳,所有应力范围等

级参与疲劳损伤的计算公式^[12]为:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots + \frac{n_n}{N_n}. \quad (8)$$

结合载荷谱所对应的里程数,由线性累积损伤准则可以获取结构件相应的寿命(里程)。

5 疲劳寿命预测结果

基于动态测试获取的应力谱,同时结合焊接结构 S - N 曲线,最终计算疲劳损伤累积并得到悬架承载梁危险点的疲劳寿命为 314 次循环。同时获取实车后续进行的室内可靠性试验信息,样件的该危险点位置在试验 514 次循环时发生断裂故障(如图 10 所示)。如表 3 所示,预测寿命与实车可靠性试验的寿命比值为 0.62,符合国际认可的 0.5~2 倍的疲劳寿命预测精度要求,即该疲劳寿命预测的方法和结果均达到良好的精度。同时,预测结果比实际可靠性试验结果更加严苛或保守,对设计结果的评价具有预警功能,对产品开发及设计改进起到了重要的指导作用。

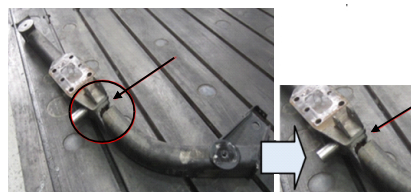


图 10 悬架承载梁室内可靠性试验结果

Fig. 10 Indoor reliability test results of suspension bearing beam

表 3 疲劳寿命预测及可靠性试验结果

Table 3 Life prediction and reliability results

预测损伤	预测寿命/ (循环次数)	试验寿命/ (循环次数)	预测/试验
3.12E-03	321	514	0.62

6 载荷变化范围和路面类型对疲劳损伤的影响

如图 11 所示,对比雨流矩阵和损伤矩阵可以看出,不同的载荷变化范围产生不同的疲劳损伤,其中大的载荷变化范围对应的损伤值较大,对损伤起到重要的贡献。

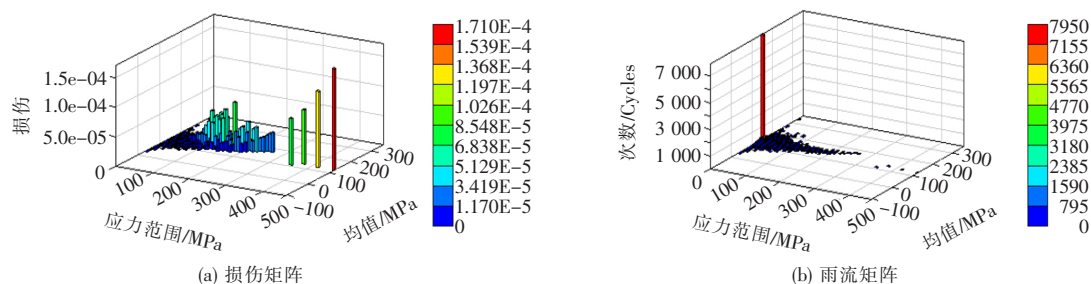


图 11 损伤矩阵和雨流矩阵

Fig. 11 Rain flow matrix and damage matrix

计算载荷谱的损伤历程,结果如图 12 所示。由图 12 可以看出不同路段的损伤分布,疲劳损伤主要发生在石块路段(251~610 s),它对承载梁的损伤贡献大;其次是扭曲路(130~160 s、220~250 s)和长波路(100~130 s、190~220 s)。计算石块路的损伤及贡献比例,结果如表 4 所示。由表 4 可见,石块路段几乎贡献了整个试车循环的所有损伤。

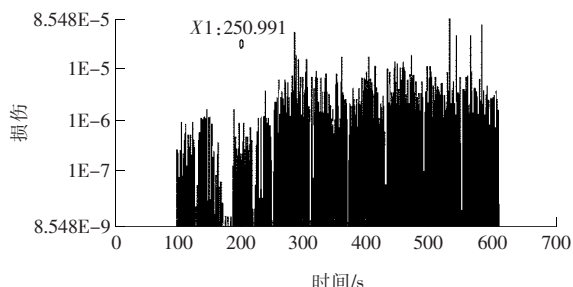


图 12 载荷谱的损伤时间历程

Fig. 12 Damage time history of load spectrum

表 4 悬架承载梁石块路损伤及贡献

Table 4 Damage and contribution

石块路损伤	总损伤	损伤贡献/%
3.05E-03	3.12E-03	97.8

7 结论

1) 研究了悬架承载梁结构的应力载荷谱测试方法,考虑了包含静载的测试方法,其他汽车簧下结构件的应力载荷谱采集可参照进行。

2) 结合 CAE 静态分析结果,进行了基于应变的载荷谱测试及主应力计算,以及雨流计数和基于焊接结构疲劳理论的寿命计算,形成了一整套基于实测数据的悬架承载梁焊接结构疲劳寿命计

算与预测的方法和流程。

3) 解析了随机载荷谱有效载荷循环和路段对疲劳损伤的影响和贡献。石块路是考核悬架承载梁的重要路面。

本研究相关的研究和分析结果,可为汽车产品设计优化和工艺改进提供验证手段和改进依据,在产品开发周期中具有重要的意义。

〔参考文献〕

- [1] 朱剑峰,张君媛.汽车减振器支架焊缝疲劳寿命优化设计[J].汽车工程,2017,39(7):802-806.
ZHU Jian-feng, ZHANG Jun-yuan. Optimal design of fatigue life for the welds in vehicle shock absorber bracket[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(7): 802-806.
- [2] 兆文忠,李向伟,董平沙.焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M].北京:机械工业出版社,2017.
ZHAO Wen-zhong, LI Xiang-wei, DONG Ping-sha. Theory and method of fatigue design for welded structures[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2017.
- [3] 张凤,李健,李鹤.振动环境下焊缝疲劳寿命的预测及分析[J].机械设计与制造,2014(11):228-231.
ZHANG Feng, LI Jian, LI He. Forecast and analysis of the weld fatigue life under vibration environment [J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(11): 228-231.
- [4] 兆文忠,李季涛,方吉.轨道车辆焊接结构抗疲劳设计过程中的认识误区[J].大连交通大学学报,2016,37(5):1-7.
ZHAO Wen-zhong, LI Ji-tao, FANG Ji. Misunderstanding in anti-fatigue design process of railway vehicles welded structure[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016, 37(5): 1-7.

(下转至第 110 页)

- [7] 李社新,金晶.非结构网格离心泵全流场数值模拟研究[J].机械科学与技术,2016,35(2):210-215.
LI Du-xin, JIN Jing. Numerical simulation of the whole flow field of unstructured grid centrifugal pumps[J]. Mechanical Science and Technology, 2016, 35(2): 210-215.
- [8] 傅飞,黄志来.基于CFD的某型号离心泵流场数值模拟[J].装备制造技术,2017(12):101-103,133.
FU Fei, HUANG Zhi-lai. Numerical simulation of flow field of a certain type of centrifugal pump based on CFD[J]. Equipment Manufacturing, 2017(12): 101-103, 133.
- [9] 刘雪垠,廖功磊,肖夏,等.离心泵流场仿真有限元分析优化[J].机械,2016,43(12):6-9.
LIU Xue-yin, LIAO Gong-lei, XIAO Xia, et al. Flow field simulation and finite element analysis optimization of centrifugal pump [J]. Mechanical, 2016, 43(12): 6-9.
- [10] 成晓伟,蔡国建,梁杰.多级离心泵全三维流场仿真计算[J].水泵技术,2017(4):23-25,31.
CHENG Xiao-wei, CAI Guo-jian, LIANG Jie. Full three-dimensional flow field simulation calculation of multistage centrifugal pump [J]. Water Pump Technology, 2017(4): 23-25, 31.
- [11] 黄书才,穆春玉,杨勤,等.船用离心泵内部流场的数值模拟及试验分析[J].船海工程,2017,46(2):157-160.
HUANG Shu-cai, MU Chun-yu, YANG Qin, et al. Numerical simulation and experimental analysis of internal flow field of marine centrifugal pumps[J]. Marine Engineering, 2017, 46(2): 157-160.
- [12] 孟根其其格,谭磊,曹树良,等.离心泵蜗壳内非定常流动特性的数值模拟及分析[J].机械工程学报,2015,51(22):183-190.
MENG Gen-qi-qi-ge, TAN Lei, CAO Shu-liang, et al. Numerical simulation and analysis of unsteady flow characteristics in a centrifugal pump volute[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 183-190.
- [13] 李永乐,胡钟兵,许文静,等.单级双吸输油泵全流场的数值模拟与试验分析[J].流体机械,2015,43(8):11-15.
LI Yong-le, HU Zhong-bin, XU Wen-jing, et al. Numerical simulation and experimental analysis of the full flow field of single-stage double-suction pump[J]. Fluid Mechanics, 2015, 43(8): 11-15.

(上接第84页)

- [5] 刘刚,唐柳伦,黄一.基于场强法的焊接接头疲劳寿命影响因素研究[J].船舶力学,2014,18(1-2):158-164.
LIU Gang, TANG Liu-lun, HUANG Yi. A study on the influence factors of fatigue in welded joints based on field intensity approach[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(1-2): 158-164.
- [6] 王文静,白锦仪,刘伟.基于热点应力法的焊接结构疲劳评估[J].北京交通大学学报,2017,41(6):82-87.
WANG Wen-jing, BAI Jin-yi, LIU Wei. Fatigue assessment of weld structure based on the hot spot stress method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(6): 82-87.
- [7] 耿新宇,米彩盈.基于ANSYS的焊接结构疲劳强度分析[J].电焊机,2013,43(7):42-46.
GENG Xin-yu, MI Cai-ying. Study on analyzing fatigue strength of welding structure based on ANSYS [J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(7): 42-46.
- [8] 方吉,兆文忠,朴明伟.基于模态叠加法的焊接结构疲劳寿命预测方法研究[J].振动与冲击,2015,34(5):186-192.
FANG Ji, ZHAO Wen-zhong, PIAO Ming-wei. Fatigue life prediction of welded structures based on modal superposition method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 186-192.
- [9] 武文超,方毅博,宁倩.基于雨流法的汽车底盘件疲劳耐久试验方法研究[J].汽车技术,2013(12):46-49.
WU Wen-chao, FANG Yi-bo, NING Qian. Research on fatigue durability test method for automobile chassis components based on rain-flow counting method[J]. Automobile Technology, 2013(12): 46-49.
- [10] 张彦华.焊接结构疲劳分析[M].北京:化学工业出版社,2013.
ZHANG Yan-hua. Fatigue analysis of welded structures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 98-106.
- [11] BS 7608, 2014+A1:2015 Guide to fatigue design and assessment of steel products[S]. London: The British Standards Institution, 2015.
- [12] 贾杰,熊晓燕.振动筛焊接结构的疲劳寿命分析[J].煤矿机械,2013,34(10):103-105.
JIA Jie, XIONG Xiao-yan. Fatigue analysis of weld mainframe of vibrating screen[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(10): 103-105.