

陈振,王乔木,黄志强,等.考虑焊后热处理的可控震源平板疲劳寿命预测研究[J].安全与环境学报,2025,25(4):1359-1369.

CHEN Z, WANG Q M, HUANG Z Q, et al. Stress response analysis and fatigue life prediction of baseplate with seismic source, considering post-weld heat treatment[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(4): 1359-1369.

考虑焊后热处理的可控震源平板疲劳寿命预测研究*

陈振¹,王乔木¹,黄志强¹,张森吉¹,敬爽¹,郝磊²,帅军¹

(1 西南石油大学机电工程学院,成都 610500;2 中国石油集团东方地球物理公司,河北涿州 072751)

摘要:为提高可控震源平板(Seismic Vibrator Baseplate,SVB)在激振过程中应力响应与疲劳寿命预测的准确性,研究综合考虑了SVB的焊接残余应力和焊后热处理问题,并按照焊接、热处理和SVB激振的顺序进行了数值模拟分析。分别构建了SVB焊接模型与SVB-大地耦合模型,并对模型进行了验证。使用MARC软件对SVB进行了焊接模拟和热处理分析,并对焊接热处理后的SVB进行了应力响应分析。此外,基于数值分析结果,应用Miner理论,通过修正S-N曲线对SVB的疲劳寿命进行了预测。研究结果显示:经过热处理后,SVB的整体应力显著减小且分布更加均匀。最大应力从689.1 MPa下降至400.2 MPa,应力释放超过41.92%,显著提高了SVB的疲劳强度。在激振时,SVB的应力增加且分布不均匀。其中,SVB齿尖处的最大应力上升至595.6 MPa,SVB齿焊缝区域的应力达到434.4 MPa。通过修正S-N曲线法计算得到SVB的疲劳寿命为9.57 a,与现场统计的8.71 a相比,误差为9.87%。研究可为SVB的结构设计与寿命优化提供理论依据和参考。

关键词:安全工程;横波可控震源平板;有限元分析;疲劳寿命预测;修正S-N曲线

中图分类号:X941 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6094(2025)04-1359-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.1222

0 引言

2024年,我国石油对外依存度高达72%,这严重威胁国家能源安全,迫切需要加快我国油气资源的勘探开发进程,因此大力发展以可控震源为代表的勘探装备显得尤为重要。可控震源具有高效可控、适用地形广泛和绿色环保等优点,已成为陆地石油勘探的首要激发设备。其中,焊接平板是可控震源振动器与大地耦合的关键部位^[1],具有十分重要的地位(图1)。

目前,在可控震源领域,学者开展了以下研究。Wang等^[2]针对可控震源的能量下传、分布与耗散问题开展了研究。2024年,Huang等^[3]首次对比分析了横波、纵波和扭转可控震源在近地场的辐射波场和辐射能量,并建立了可控震源辐射特性评价体系。Jiang等^[4]针对可控震源的信号畸变问题进行了研究,并试图解决高噪声问题。Chen等^[5]针对地震反演成像分辨率较低的问题开展了研究,并提出了一些新的成像技术。除此之外,Peng等^[6]探究了地面粗糙度、加载频率、SVB质量对SVB输出力的影响。

2021年,Peng等^[7]进一步探究了SVB-地面系统的应力分布、位移响应、塑性变形,并建立了量化标准来评估SVB的性能。2016年,黄志强等^[8]建立了以SVB的变形、脱耦、与大地接触力和能量传递率为指标的SVB性能评价体系,为学者后续的研究打下了基础。李刚等^[9]进一步分析了激振过程中SVB的动刚度和动阻尼的变化。然而,这些研究主要侧重于可控震源的能量与波场、信号畸变与降噪和力学特性研究,少有学者关注SVB的疲劳寿命研究。

为此,在上述分析与研究的基础上,赵仕英^[10]对震源振动器系统进行了失效分析,通过专家评估和故障树分析确定结构的最易失效区域,并用有限元分析计算其疲劳寿命。2016年,Huang等^[11]通过有限元和疲劳可靠性分析相结合的方法来研究SVB的疲劳行为,并首次利用Miner理论和S-N曲线预测了SVB疲劳寿命,但未修正的S-N曲线预测精度不高,且误差较大。之后,Chen等^[12]开展了SVB三点弯曲疲劳试验,并通过疲劳试验参数修正了SVB的S-N曲线,以更精确地预测SVB的疲劳寿命。2021年,Chen等^[13]又提出了一种结合S-N曲

* 收稿日期:2024-07-22

作者简介:陈振,副教授,博士,从事油气装备疲劳行为、可靠性设计和安全评价及理论等研究,117976897@qq.com。

基金项目:四川省科技厅自然科学基金面上项目(2024NSFSC0094);页岩气评价与开采四川省重点实验室资助项目(YSK2022013)

线和断裂力学理论的 SVB 疲劳可靠性-模糊综合分析模型,并围绕疲劳影响因素开展了疲劳寿命预测与优化研究。但是,这些研究均未考虑 SVB 的焊接残余应力。因此,2023 年,Chen 等^[14]将焊接残余应力纳入 SVB 的疲劳分析中,建立了激振载荷与焊接残余应力耦合的疲劳损伤模型,但该研究并未考虑 SVB 焊接后的热处理问题。

研究显示,鲜有学者关注 SVB 结构在焊接及热处理后的力学特性变化,这导致 SVB 的疲劳寿命预测与实际情况存在较大误差,从而增加了工程事故的风险。因此,本文基于可控震源工作原理,结合焊接与动力学理论,采用 MARC 有限元软件进行数值模拟研究,以期分析 SVB 在焊接热处理后的应力响应,并基于数值分析结果,通过修正 S-N 曲线预测 SVB 疲劳寿命。

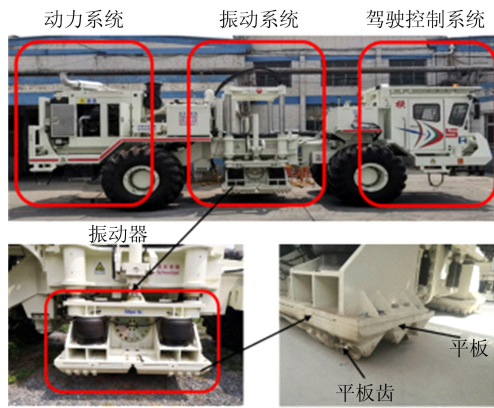


图 1 横波可控震源的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of shear wave seismic source

1 模型构建

1.1 焊接模型

1.1.1 三维模型与网格划分

SVB 由 3 个等边三角齿与板焊接组成,1/3 SVB 长 750 mm、宽 185 mm。为了减少焊接仿真的计算量以及提高计算效率,本文取 1/3 的 SVB 进行焊接模拟。在进行网格划分时,需要综合考虑计算精度和计算效率间的平衡。SVB 是规则几何体,因此采用数值稳定性和收敛性较好的六面体网格,同时底

板在厚度方向上具有超过 5 层的网格单元。远离焊缝区域的网格尺寸为 5 mm,靠近焊缝区域则采用 1 mm 加密网格以确保足够的求解精度^[3]。板与焊缝填充区域的网格共节点设置,有助于保证良好的仿真效果。三维模型见图 2(a),网格划分见图 2(b)。

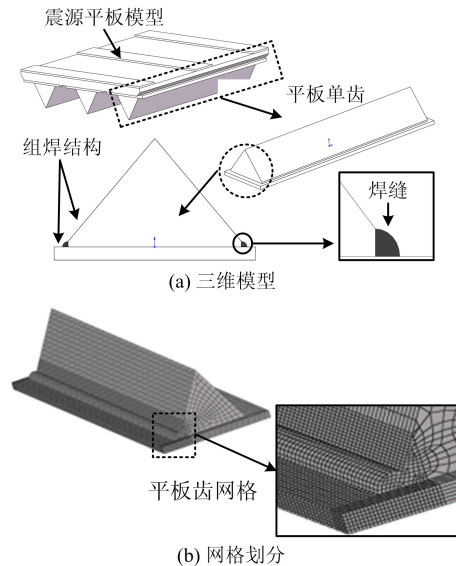


图 2 震源平板的三维模型及网格划分

Fig. 2 3D model and meshing of SVB

1.1.2 焊接热源

当热源输入相同时,SVB 的焊接温度场在焊缝两侧呈对称的椭圆形分布,这与 Goldak 提出的双椭球焊接热源理论模型高度吻合。因此,本文结合 SVB 尺寸与实际焊接工况,建立了优化后的双椭球热源理论模型(图 3),优化后的热源模型参数见表 1。

1.1.3 焊接工艺参数与初始条件

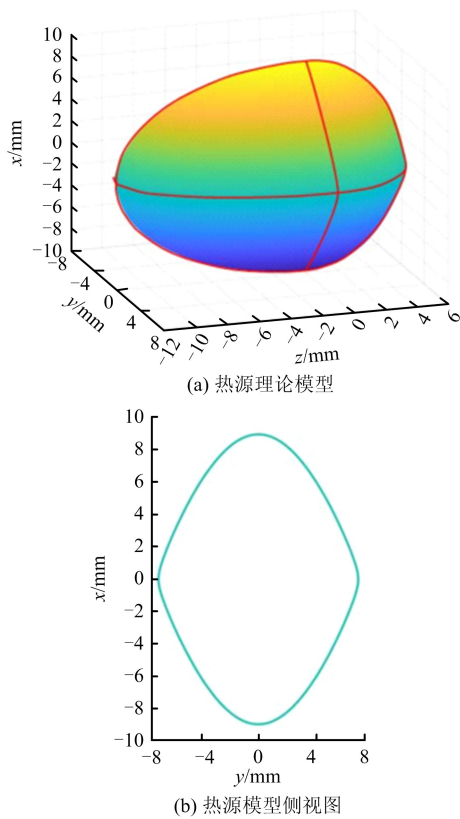
焊接材料选用与 45 钢 SVB 性能相似的 J507 碱性焊条^[15]。为避免周围空气对熔池、母材金属的有害作用,同时减小焊接过程的氧化烧损,本文选取的焊接方式^[16]为熔化极惰性气体保护焊(Metal Inertia Gas Welding, MIG),焊接工艺参数见表 2。用 MARC 进行焊接模拟时,需在前处理设置中添加求解的初始与边界条件。焊件初始温度设置为 20 °C,同时对焊件设置合理的位移约束,避免在焊接过程中发生

表 1 焊接热源模型参数

Table 1 Parameters of welding heat source model

$q_f / (W \cdot mm^{-3})$	a_f / mm	b / mm	Q / W	$q_r / (W \cdot mm^{-3})$	a_r / mm	c / mm
44	3	4	4 004	36.7	6	2

注: q_f 和 q_r 分别为前、后椭球热源模型的内部焊接热流密度; a_f 、 a_r 、 b 和 c 均为双椭球热源的形状参数; Q 为焊接热功率。



x 为熔池长, y 为熔池宽, z 为熔池深。

图 3 双椭球热源优化模型

Fig. 3 Optimization model of double ellipsoid heat source

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process

焊接材料	焊接电压/V	焊接电流/A	焊接速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
J507 碱性焊条	26	220	5

过度形变,确保计算收敛。

1.1.4 模型验证

高温是焊接过程的主要驱动力,温度场是研究残余应力的基础^[17]。因此,可通过焊接温度的变化规律来验证焊接模型与焊接过程的准确性^[18]。图 4(a)为 SVB 焊缝纵向节点的热循环曲线。其中, N1 为起焊节点, N5 为焊接终点, N2、N3 和 N4 为起焊和终焊节点间间隔距离相等的点。N1 ~ N5 在焊接过程中的温度变化趋势随焊接热源的引入和离开呈现相似的变化规律,在时间上出现滞后性,这与真实焊接相符。图 4(b)为 SVB 焊缝横截面节点的热循环曲线。节点 A 处于焊缝内,节点 B、C、D、E 分别与节点 A 的距离为 4 mm、8 mm、12 mm 和 20 mm。各节点随着焊接热源的引入和离开在时间上呈现同步

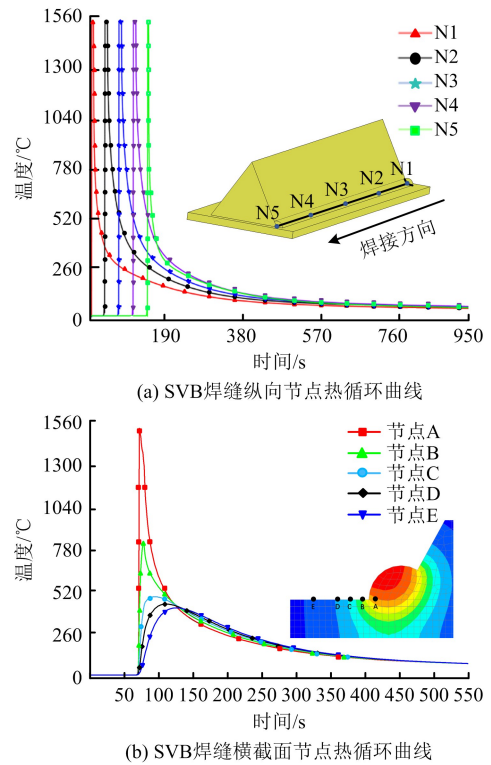


图 4 焊缝节点的热循环曲线

Fig. 4 Thermal cycle curve of weld joint

的急剧升高和降低的温度变化趋势,不同的是各节点的升温速率和冷却速率受热源距离影响而有所差异。综合上述分析,SVB 焊接模型符合实际焊接工况,具有有效性与可靠性。

1.2 平板-大地激振模型

1.2.1 三维模型与网格划分

依据可控震源的工作原理和假设的大地条件,建立 SVB-大地耦合模型,见图 5(a)。其中,圆柱形大地高 6 m、直径 9 m。为了提高分析精度和计算效率,对 SVB 局部的网格进行加密,对振动器及其余部件的网格进行适当稀疏。SVB 采用数值稳定性和收敛性较好的六面体网格,设置 SVB 的网格尺寸为 5 mm,SVB 齿采用加密的过渡六面体网格,网格最小尺寸为 3 mm^[3]。SVB 到振动器的其余部位采用过渡四面体网格,网格最小尺寸为 20 mm。大地与 SVB 接触的半径为 1.5 m 的近地表半球形空间区域采用过渡四面体网格,网格最小尺寸为 20 mm,大地其余部分采用网格尺寸为 20 ~ 50 mm 的过渡四面体网格。同时,网格共节点设置,有助于保证良好的仿真效果,网格划分见图 5(b)。

1.2.2 材料设置

在可控震源激振时,SVB 与大地均发生弹性变

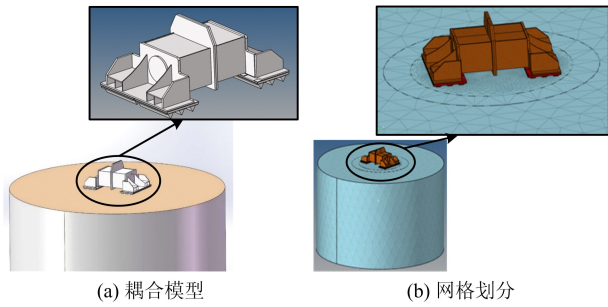


图5 震源平板-大地耦合模型与网格划分

Fig.5 SVB-ground coupling model and mesh division

形,其中SVB为45钢,大地为硬质土,材料具体参数见表3^[19]。

表3 模型材料参数

Table 3 Parameters of model material

部件	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比
振动器与SVB	7 890	2.09 × 10 ¹¹	0.269
大地	1 800	2.00 × 10 ⁷	0.250

1.2.3 载荷与边界条件

在实际作业时,可控震源的振动器主要受到两种载荷作用,载荷施加位置见图6(a),载荷加载曲线见图6(b)与(c)。考虑SVB在激振时可能会出现脱耦和变形,将SVB齿与大地间设置为面面可分离接触,摩擦系数为0.3^[3]。大地相较于SVB为无限大实体,因此对大地模型四周与底面施加完全固定约束。为了真实模拟大地半无限空间体,还需对大地施加无反射边界条件^[20]。

1.2.4 模型验证

利用弹性波在大地中的理论与仿真传播速度进行对比,验证模型的正确性。

(1) 理论波速。

大地半无限空间体为均匀、各向同性和理想的弹性介质,弹性波在大地中的传播满足波动方程,见式(1)。

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+u)}} \quad (1)$$

式中 v_s 为弹性波理论波速, m/s; ρ 表示大地材料密度, kg/mm³; G 表示大地剪切模量, Pa; E 表示大地弹性模量, Pa; u 表示大地泊松比。

(2) 仿真波速。

根据SVB-大地仿真计算结果,提取SVB下方大地深度为0.5 m和1 m的节点A、B的时间-Y向位移曲线,见图7。仿真波速的计算见式(2)。

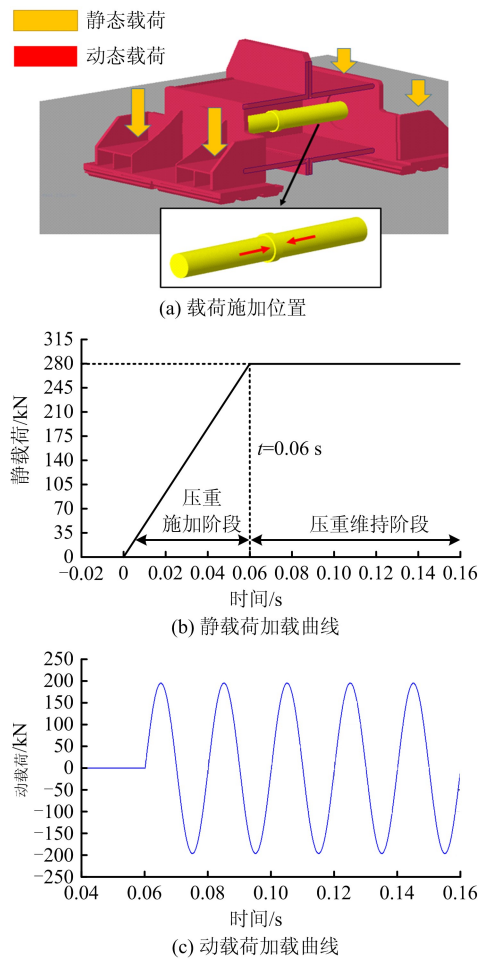


图6 横波可控震源的载荷加载

Fig.6 Load loading of shear wave seismic source

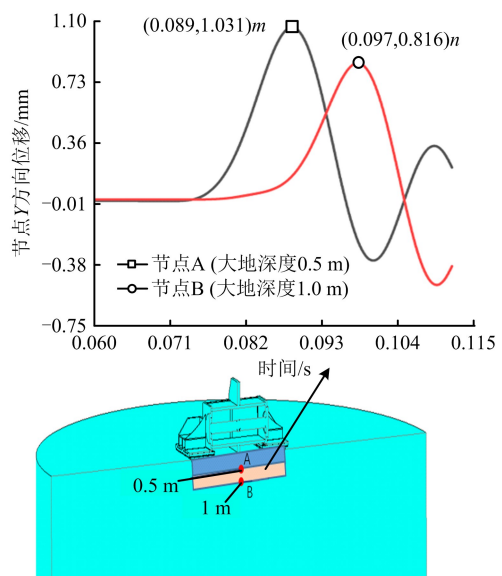


图7 大地节点的时间-Y向位移曲线

Fig.7 Time-Y displacement curve of the ground node

$$v = \frac{X_{AB}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中 X_{AB} 表示节点 A、B 间的距离, m; Δt 表示节点 A、B 到达波峰的时间差, s。

为了避免单一计算带来的偶然性,计算不同大地弹性模量下的地震波仿真波速和理论波速,对比结果见图 8。由图 8 可知,理论波速与仿真波速的曲线基本一致,最大误差为 6.76%,表明仿真结果具有较高的准确性,可以用于对真实工况下 SVB-大地激振的模拟。

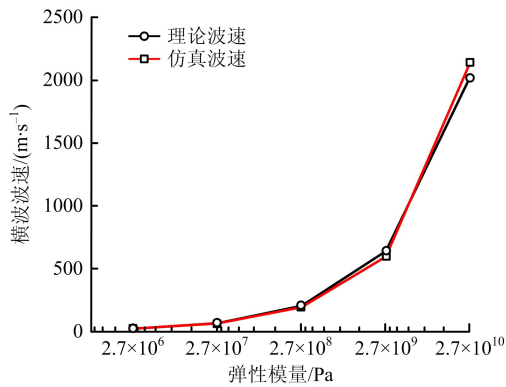


图 8 震源平板-大地模型的理论/仿真波速对比
Fig. 8 Comparison of theoretical/simulated wave velocity of SVB-ground model

2 数值模拟结果分析

2.1 可控震源平板残余应力分析

2.1.1 平板焊后热处理

查阅金属热处理手册^[21],经过对比优选确定 SVB 热处理方案为:在加热炉内以 5 °C/min 的加热速率将焊接平板从 20 °C 加热到 600 °C,加热过程持续 116 min;在炉内保温 2 h 后,焊件随炉温自然冷却至 20 °C。整个热处理过程持续 1 810 min,并在 MARC 软件中进行模拟。

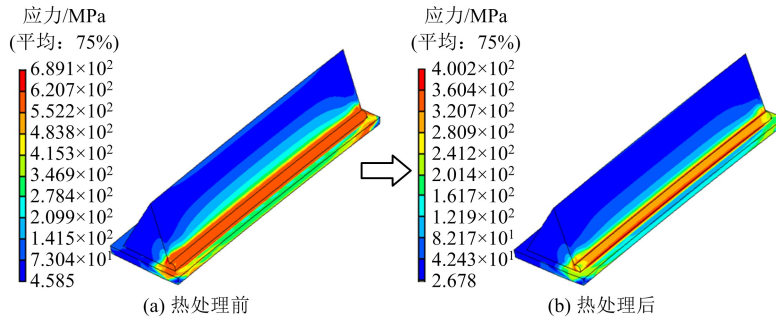


图 9 震源平板热处理前后的应力云图

Fig. 9 Stress cloud diagram of SVB before and after heat treatment

2.1.2 平板热处理前后应力场分析

图 9 为 SVB 热处理前后的残余应力分布。热处理后 SVB 的应力较大区域仍在 SVB 齿焊缝区域,但 SVB 整体应力下降,最大应力从 689.1 MPa 下降到 400.2 MPa,应力释放 41.92% 以上。

(1) 焊缝横截面节点应力对比分析。

为进一步分析热处理前后焊缝及其附近区域的残余应力变化规律,沿焊缝长度方向截取 SVB 齿 5 个横向危险截面(CS1、CS2、CS3、CS4 和 CS5),并提取危险截面的焊趾、焊根及附近节点的残余应力,取点见图 10,绘制沿横截面路径节点的应力曲线见图 11。通过对比应力曲线发现,热处理前后横截面残余应力的变化趋势基本一致,从 SVB 边缘到三角齿面,残余应力曲线均表现出先增后减的变化特征。热处理后焊缝区域的应力波动减小,焊根与两条焊趾处的应力峰值消失,整体应力分布更加均匀。但是,热处理后 SVB 焊缝区域的应力峰值位置发生了变化,从热处理前的焊根和焊趾处转移到了距离 SVB 焊趾左侧 10 mm 处和三角齿面焊趾右侧 2 mm 处。

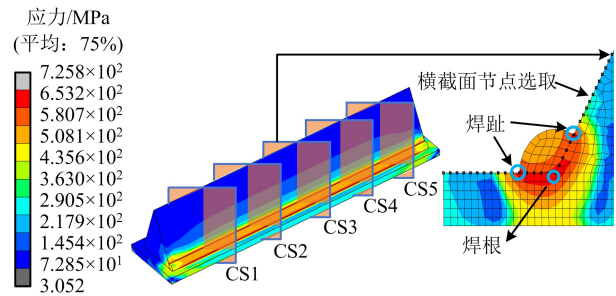


图 10 焊缝横截面路径节点的选取

Fig. 10 Selection of weld cross-section path nodes

(2) 焊缝纵向路径节点应力对比分析。

图 12 为提取热处理前后沿焊缝长度方向上的残余应力曲线。比较可知,热处理前后焊缝纵向残余应力的整体变化趋势基本一致。具体而言,残余

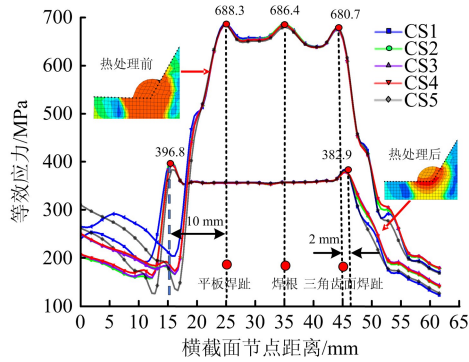


图 11 横截面路径节点热处理前后的应力曲线
Fig. 11 Stress curve of cross section path node before and after heat treatment

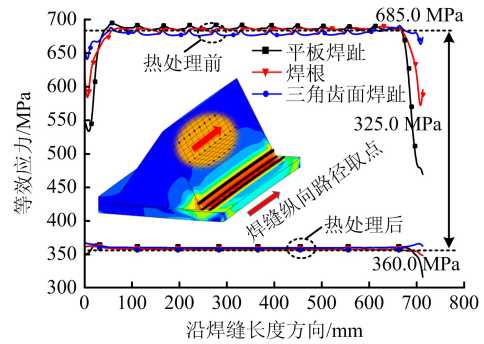


图 12 焊缝纵向路径节点热处理前后的应力曲线
Fig. 12 Stress curve of weld longitudinal path node before and after heat treatment

应力均值从 685.0 MPa 下降到 360.0 MPa, 应力释放 47.44%。在热处理后, 焊缝路径的整体应力曲线波动进一步减小, 焊缝区域的残余应力被均匀化, SVB 的疲劳强度得到了提高。

2.2 可控震源平板应力响应特性分析

2.2.1 平板焊接残余应力预加载

在激振仿真前, 需要将焊接热处理后的残余应力作为初始条件施加在 SVB 上。在 MARC 软件中可实现分析工况的传递, 建立的 SVB 预加载分析流程见图 13。

2.2.2 平板激振前后应力场分析

通过仿真模拟计算, 得到了 SVB-大地模型在 50 Hz 激振频率下的综合应力响应, 图 14 为 SVB 激振前后的等效应力云图。在激振后, SVB 应力集中在 SVB 齿焊缝区域与 SVB 齿尖处, 与激振前相比,

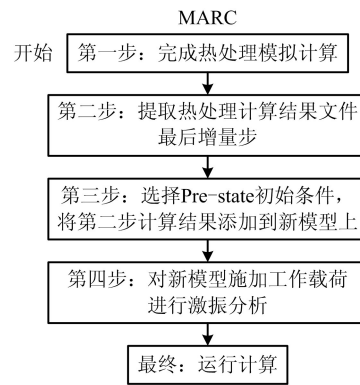


图 13 焊接残余应力预加载与激振分析流程
Fig. 13 WRS pre-loading and excitation analysis process

焊缝区域的应力分布变得不再均匀。整体而言, 激振后 SVB 应力增加, 最大应力从 400.2 MPa 上升到

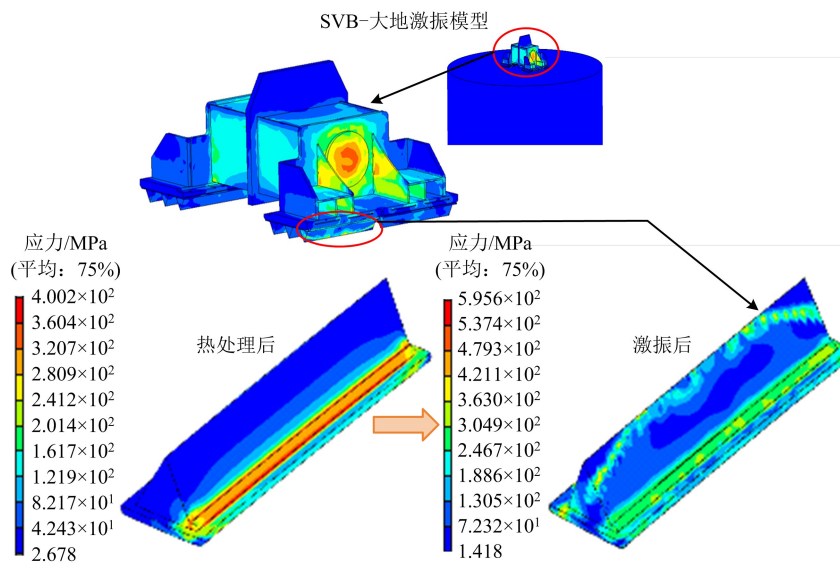


图 14 震源平板激振前后的应力云图
Fig. 14 Stress cloud diagram of SVB before and after excitation

595.6 MPa,位于 SVB 齿的尖端,这是因为激振时齿尖处应力集中。尽管焊缝区域的应力有所增加,但仍未曾超过 45 钢的屈服强度。

(1) 焊缝横截面节点应力对比分析。

进一步分析热处理区域在激振前后应力变化规律,沿焊缝长度方向截取平板 5 个横向危险截面 (CS1、CS2、CS3、CS4 和 CS5),并提取 5 个截面的焊趾、焊根及附近节点的焊接残余应力(参考图 10)。横截面路径节点激振前后的应力曲线见图 15。通过对比应力曲线可知,激振后 SVB 齿横截面整体的综合应力变化趋势基本保持一致。然而,在焊缝区域,激振后的综合应力整体上升,从 396.7 MPa 增至 434.4 MPa,增幅达 9.50%。此外,该区域应力分布不均匀,呈现较大波动。激振后 SVB 齿最危险的位置仍然位于 SVB 焊趾左侧 10 mm 区域。

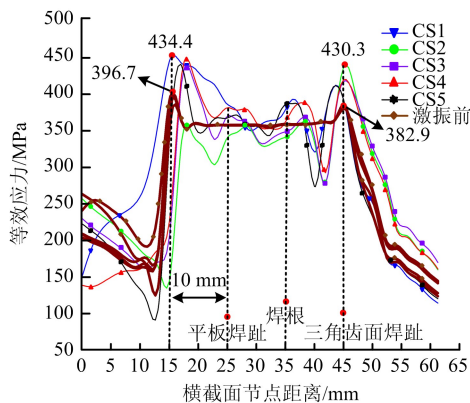


图 15 横截面路径节点激振前后的应力曲线
Fig. 15 Stress curve of cross section path node before and after excitation

(2) 焊缝纵向路径节点应力对比分析。

提取激振前后焊缝纵向节点综合应力曲线,见图 16。由曲线分析可得,激振后焊根与焊趾沿焊缝纵向的综合应力出现了较大的波动。其中,中间区域应力有所降低,而两端区域应力波动较大,出现了峰值应力。激振后的最大等效应力为 430.2 MPa,增加了 19.50%。因此,SVB 焊趾为激振后 SVB 焊缝中应力最大与最危险部位。

3 可控震源平板疲劳寿命预测

3.1 疲劳累积损伤理论

在不考虑结构的疲劳裂纹扩展时,疲劳累积损伤理论被认为是预测疲劳寿命最成熟、最理想和最简单的理论之一。SVB 的损坏失效是多级不同应力水平下的循环载荷逐渐累积造成的疲劳损伤。根据

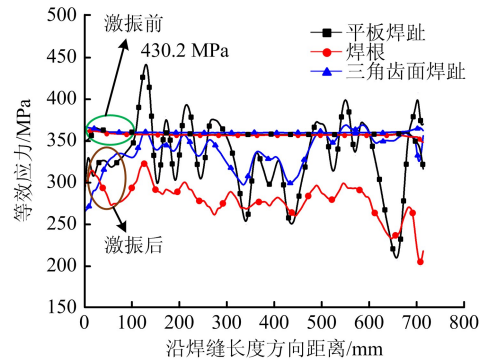


图 16 焊缝纵向节点激振前后的应力曲线
Fig. 16 Stress curve of weld longitudinal joint before and after excitation

Miner 理论,SVB 在多级应力作用下的损伤量 D 可表示为式(3)。运用 Miner 疲劳累积损伤理论可确定 SVB 最危险位置——焊缝处的疲劳寿命,见式(4)。

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

式中 n_i 表示第 i 级应力下的实际循环次数, N /次; N_i 表示 SVB 材料在第 i 级应力下对应的疲劳寿命, N /次。

$$L_F = \frac{1}{1/N_1 + 1/N_2 + \dots + 1/N_m} = \frac{1}{\sum_{j=1}^k 1/N_j} \quad (4)$$

式中 L_F 为应力 F 对应的循环次数或疲劳寿命, N /次; $\sum_{j=1}^k 1/N_j$ 为一次循环载荷下 SVB 的损伤量。

3.2 可控震源平板 $S-N$ 曲线的确定

3.2.1 平板材料的 $S-N$ 曲线

在工程中,长期以来的疲劳试验发现,应力水平 S (MPa) 与循环次数 N 之间有幂函数关系[式(5)],在双对数坐标系中, S 与 N 可表示为式(6)。

$$C = S^m \cdot N \quad (5)$$

$$\lg N = \lg C - 7.3144 \lg S \quad (6)$$

式中 C 与 m 为 SVB 试件的材料常数。

本文采用成组法对 45 钢板状疲劳试件在 9 级应力下进行单轴拉压疲劳试验,试验采用 MTS810 型疲劳试验机(美国 MTS 系统公司)。试验标准按照 GB/T 3075—2021《金属轴向拉压疲劳试验方法》执行。为保证疲劳试验的准确性,在每个加载工况下测试 4 根试样,试验应力比为 -1 ,加载频率为 5 Hz。疲劳试验数据见表 4。取每组的前两个测试数据作为拟合数据,第三个数据作为校核数据,拟合得到 SVB 试件材料的 $S-N$ 曲线见式(7)。

$$\lg N = 22.5933 - 7.3144 \lg S \quad (7)$$

在本文中,计算得到拟合参数与校核参数间的拟合相关系数 R^2 为 0.68,表明两者间存在中等强度正相关性。同时,拟合误差均方值 E 为 0.011 92,表明拟合得到的 SVB 试件材料的 $S-N$ 曲线具有一定精确性,但基于此进行寿命预测仍显不足。因此,本文对 SVB 试件材料的 $S-N$ 曲线进行了修正,并得到了 SVB 的 $S-N$ 曲线,可用于评估 SVB 疲劳寿命。

表 4 疲劳试件的试验参数

Table 4 Test parameters of fatigue specimens

分组	应力/MPa	lgN 均值	lgS 均值	lgC 均值
组一	270	4.795 5	2.431 4	22.579 7
	275	4.763 4	2.439 3	22.605 4
	278	4.732 4	2.444 0	22.608 8
组二	295	4.528 4	2.469 8	22.593 5
	297	4.504 1	2.472 8	22.591 1
	300	4.480 0	2.477 1	22.598 5
组三	320	4.268 1	2.505 1	22.591 4
	322	4.237 0	2.507 9	22.580 7
	328	4.196 7	2.515 9	22.598 9

3.2.2 平板修正 $S-N$ 曲线

全尺寸 SVB 的 $S-N$ 曲线难以通过试验获取。因此,文献[13]使用了修正 $S-N$ 曲线替代 $S-N$ 曲线来预测 SVB 的疲劳寿命。在双对数坐标系中,修正公式可表示为式(8)。

$$\lg N = \lg C - m \lg \sigma_{-1D} - m \lg K \quad (8)$$

式中 σ_{-1D} 为在应力比为 -1 下的修正对称循环应力幅, $K = Q/\epsilon + 1/\beta - 1$ 为 SVB 修正系数,其中 Q 为有效应力集中系数^[22], ϵ 为尺寸系数, β 为 SVB 表面状态系数, C 与 m 为材料常数。通过查阅文献[23-24]并推导计算,得到 SVB 的相关修正系数值,见表 5。因此,得到 SVB 修正 $S-N$ 曲线见式(9)。

$$\lg N = 22.5933 - 7.3144 \lg \sigma_{-1D} - 7.3144 \lg 2.40 \quad (9)$$

表 5 震源平板 $S-N$ 曲线修正系数取值

Table 5 Value of correction coefficient of SVB $S-N$ curve

尺寸系数 ϵ	表面状态系数 β	有效应力集中系数 Q	SVB 修正系数 K	材料常数 $\lg C$	材料常数 m
0.782	0.85	1.74	2.40	22.593 3	7.314 4

3.3 可控震源平板疲劳寿命计算

以提取的 SVB 齿焊缝危险截面 CS1 为例,计算 SVB 危险截面节点的疲劳寿命。图 17 为危险节点的综合应力-时间曲线。由图 17 可知,非对称交变循环应力在 0.1 s 内循环了 5 次,每个周期的幅值与均值均不相同,可视为对应的 5 级应力。但 SVB 在综合应力下承受的是变幅非对称循环载荷。因此,运用 Miner 累计损伤理论预测 SVB 的疲劳寿命时,需要对各级综合应力幅进行修正。将图 17 中各级应力通过 Goodman 公式修正后代入 SVB 修正 $S-N$ 曲线公式,可以分别计算得到各级应力水平下的总循环数 N_i ,再结合 Miner 累计损伤理论,可以分别计算出每级应力水平的损伤量 D_i ,其计算结果见表 6。

5 个周期内的总的损伤量 D 可表示为式(10)。

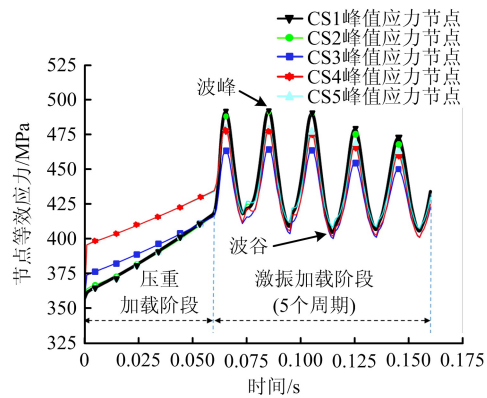


图 17 危险节点的综合应力-时间曲线

Fig. 17 Comprehensive stress-time curve of dangerous nodes

表 6 多级循环应力下的循环次数和损伤量

Table 6 Number of cycles and damage under multi-stage cyclic stress

修正对称循环应力 S /MPa	循环次数 N /次	损伤量 D
102.89	1.24×10^6	8.07×10^{-7}
116.95	4.85×10^5	2.06×10^{-6}
117.76	4.62×10^5	2.17×10^{-6}
98.28	1.73×10^6	5.77×10^{-7}
90.14	3.26×10^6	3.06×10^{-7}

$$D = \sum_{i=1}^5 D_i = 5.92 \times 10^{-6} \quad (10)$$

平均1个周期的损伤量 \bar{D} 可表示为式(11)。

$$\bar{D} = D/5 = 1.18 \times 10^{-6} \quad (11)$$

当达到疲劳破坏的临界损伤时,总损伤量可近似为1。因此,在该应力水平下的循环总数可表示为式(12)。

$$N_F = \frac{1}{\bar{D}} = 8.47 \times 10^5 \quad (12)$$

本文计算得出 SVB 危险截面 CS1 的工作寿命为 9.41 a。但仅以 SVB 焊缝危险截面 CS1 计算疲劳寿命不具有代表性,因此用相同的方法计算 SVB 焊缝其余 4 个焊缝危险节面 CS2、CS3、CS4 和 CS5 对应的疲劳寿命,计算结果见表 7。最终得到 SVB 最危险位置焊缝处的疲劳寿命预测值[式(13)]为 9.57 a。

表 7 不同截面危险节点的疲劳寿命
Table 7 Fatigue life of dangerous nodes with different sections

其余横截面节点	循环次数 N /次	每个周期平均损伤量	疲劳寿命/a
CS2	8.55×10^5	1.17×10^{-6}	9.50
CS3	8.75×10^5	1.14×10^{-6}	9.72
CS4	8.71×10^5	1.15×10^{-6}	9.68
CS5	8.59×10^5	1.16×10^{-6}	9.54

$$\bar{L}_F = \frac{\sum_{i=1}^5 L_F}{5} = 9.57 \quad (13)$$

据东方地球物理勘探公司提供数据,阿尔及利亚 8619 队在 BAHAR EL HAMAR-3D 项目施工中同时期投入了 15 台横波可控震源,其中 7 台震源车因 SVB 损坏达到服役末期,其寿命统计结果见表 8。由表 8 可知,SVB 的损坏位置集中在焊接区域,这与数值模拟分析得出的 SVB 最危险位置一致,从侧面验证了数值分析的准确性。现场统计得到 SVB 的平均寿命为 8.71 a,预测寿命为 9.57 a,预测结果与统计结果相比较,误差为 9.87%,表明计算的 SVB 疲劳寿命具有较高的预测精度,具有一定的参考价值。实际工作寿命要短于预测寿命,这主要归因于复杂的实际工况条件,包括震源工作的环境温度、地形条件等不确定性因素的显著影响。

表 8 可控震源平板在施工现场的疲劳寿命统计结果

Table 8 Statistical results of fatigue life of SVB in construction site

震源车编号	损坏区域	疲劳寿命/a
BAH-E-M2	齿板焊接脱落	8.37
BAH-E-M4	齿板焊接开裂	9.03
BAH-E-M5	齿板焊接脱落	8.63
BAH-E-M6	焊接开裂破坏	8.70
BAH-E-M9	齿板焊接脱落	8.83
BAH-E-M11	齿板焊接开裂	8.69
BAH-E-M13	焊接开裂破坏	8.71

4 结论

SVB 在激振分析中较少考虑自身的焊接残余应力与焊后热处理,本文分别构建了 SVB 焊接模型与 SVB-大地耦合激振模型,并进行了数值模拟分析和疲劳寿命预测研究,结论如下。

(1) 通过模型验证,焊接模型与 SVB-大地耦合激振模型可以实现对焊接和激振过程的有效模拟,数值仿真的结果具备有效性。

(2) 经过热处理后,焊后平板的整体应力降低,分布更加均匀,最大应力从焊接后的 689.1 MPa 下降到热处理后的 400.2 MPa,应力释放 41.92% 以上,SVB 的疲劳强度得到显著提高。但 SVB 焊缝区域的应力峰值位置发生了变化,从热处理前的焊根和焊趾转移到了距离 SVB 焊趾左侧 10 mm 处和三角齿面焊趾右侧 2 mm 处。

(3) SVB 在激振后,整体应力增加,最大应力从热处理后的 400.2 MPa 上升到 595.6 MPa,位于 SVB 的齿尖处。焊缝区域的应力从 396.7 MPa 上升至 434.4 MPa,且应力分布有较大波动。

(4) 基于疲劳累计损伤理论,通过疲劳试验得到的修正 S-N 曲线预测得到 SVB 疲劳寿命为 9.57 a,与现场统计得到的平均寿命 8.71 a 相比,误差为 9.87%,预测结果具有一定参考价值。这一研究更符合可控震源的激振实际,可为 SVB 的使用与维护、结构与寿命优化提供理论依据和指导,具有重要工程价值。

参考文献 (References):

- [1] 欧倩茹. 横波可控震源振动器激发效果与平板齿结构设计[D]. 成都:西南石油大学, 2019: 3-4.

- OU Q R. Excitation effect of vibroseis with shear wave vibroseis and design of plate tooth structure [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019: 3-4.
- [2] WANG H, WANG C, LIU Y, et al. Influencing factors of shear wave radiation of a dipole source in a fluid-filled borehole[J]. *Energies*, 2022, 15(18): 6789.
- [3] HUANG Z Q, SHUAI J, HAO L, et al. Investigation of radiative characteristics in the near field for shear, vertical and torsional vibroseis source[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 180: 108628.
- [4] JIANG J J, YU X, ZHANG J, et al. Improving vibrator structure to eliminate vibration noise [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5/6/7/8): 1741-1747.
- [5] CHEN Y, SAAD O M, SAVVAIDIS A, et al. Deep learning for p-wave first-motion polarity determination and its application in focal mechanism inversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5917411.
- [6] PENG X, HUANG Z, HAO L. Modeling of nonlinear interaction and its effects on the dynamics of a vibrator-ground system [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 132: 924-933.
- [7] PENG X, HUANG Z, LOPEZ-QUEROL S, et al. Nonlinear 3D finite element analysis of a shear-wave vibrator-ground interaction system [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 141: 106520.
- [8] 黄志强, 李刚, 丁雅萍, 等. KZ-28型可控震源振动器平板性能有限元分析[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(11): 1673-1678.
- HUANG Z Q, LI G, DING Y P, et al. Finite element analysis for dynamic performances of KZ-28 vibroseis vibrator baseplate [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016, 35(11): 1673-1678.
- [9] 李刚, 徐光明, 黄志强, 等. 扫描信号激振下振动器-大地耦合动刚度和动阻尼研究[J]. *工程设计学报*, 2021, 28(4): 450-457.
- LI G, XU G M, HUANG Z Q, et al. Research on vibrator-ground coupling dynamic stiffness and dynamic damping under excitation of sweep signal [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2021, 28(4): 450-457.
- [10] 赵仕英. 可控震源振动器失效分析及重锤密封性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017: 9-20.
- ZHAO S Y. Failure analysis of vibrator and study on hammer sealing performance [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017: 9-20.
- [11] HUANG Z Q, CHEN Z, LI Q, et al. Fatigue reliability analysis for vibroseis baseplates [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2016, 39: 1503-1516.
- [12] CHEN Z, ZHOU Y, JING S, et al. Study on damage mechanism and fatigue life prediction of seismic vibrator baseplate [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2019, 26(6): 658-665, 674.
- [13] CHEN Z, LI T, XUE X, et al. Fatigue reliability analysis and optimization of vibrator baseplate based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127: 105357.
- [14] CHEN Z, ZHANG S J, NIE S L. Numerical simulation study on welding residual stress of baseplate teeth of the shear wave seismic vibrator [J]. *International Core Journal of Engineering*, 2023, 9(10): 169-174.
- [15] 伊士科. 焊接材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- YI S K. Welding material manual [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [16] LIU S, WU Z, ZHOU W, et al. A review of welding simulation methods for large components [J]. *Progress in Natural Science-Materials International*, 2023, 33(5): 551-568.
- [17] ZHENG H, JIE Z, ZHANG L, et al. Fatigue crack growth and life assessment of full penetration U-rib welded joints considering residual stresses [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 195: 111426.
- [18] JIE Z, WANG K, LIANG S. Residual stress influence on fatigue crack propagation of CFRP strengthened welded joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 196: 107443.
- [19] 李刚. 可控震源振动器-大地耦合振动与频宽拓展研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018: 31-32.
- LI G. Research on the vibrator-ground coupling vibration and bandwidth extension [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018: 31-32.
- [20] HAUKE G, CAROLIN B, JASON V. Modeling ultrasonic waves in elastic waveguides of arbitrary cross-section embedded in infinite solid medium [J]. *Computers & Structures*, 2015, 149: 61-71.
- [21] 范逸明. 简明金属热处理工手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- FAN Y M. Concise manual for metal heat treatment [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology

- Press, 2003.
- [22] AROLA D, WILLIAMS C L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 24: 923 – 930.
- [23] ZHAO S B. Anti-fatigue design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1997.
- [24] ZHAO Y X, GAO Q, WANG J N. A unified method for estimating the $S-N$ curve of probabilistic design of three commonly used stress-life models [J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(1): 42 – 52.

Stress response analysis and fatigue life prediction of baseplate with seismic source, considering post-weld heat treatment

CHEN Zhen¹, WANG Qiaomu¹, HUANG Zhiqiang¹, ZHANG Senji¹, JING Shuang¹, HAO Lei², SHUAI Jun¹

(1 Department of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2 Bureau of Geophysical Prospecting, China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, Hebei, China)

Abstract: To enhance the accuracy of stress response and fatigue life predictions for the Seismic Vibrator Baseplate (SVB) during the excitation process, this study incorporates Welding Residual Stress (WRS) and post-weld heat treatment. Numerical simulations were conducted in a sequential manner, following the processes of welding, heat treatment, and SVB excitation. In this paper, we developed a welding model for the SVB and a coupling model between the SVB and the ground. These models were validated using thermal cycle curves of the weld nodes and elastic wave velocity curves of the ground, respectively. The MARC finite element software was utilized to simulate the welding process and analyze the post-weld heat treatment of the SVB. Subsequently, the residual stresses resulting from the heat treatment were applied as a preload to the SVB, and the stress response was analyzed. Finally, using the results from the numerical analysis, the fatigue life of the SVB was predicted by adjusting the $S-N$ curve according to Miner's theory. The study findings indicated that the overall stress level of the SVB was significantly reduced and more evenly distributed following heat treatment. The maximum stress value decreased from 689.1 MPa to 400.2 MPa, resulting in a stress reduction of over 41.92%, which significantly enhanced the fatigue strength of the SVB. During excitation, the stresses in the SVB increased significantly and were unevenly distributed. Notably, the maximum stress at the tip of the SVB teeth reached 595.6 MPa, while the stress in the weld region of the SVB teeth peaked at 434.4 MPa. The calculated fatigue life of the SVB is 9.57 a, showing a 9.87% deviation from the field statistic of 8.71 a. The findings of this study provide a theoretical foundation and valuable reference for the structural optimization and lifespan enhancement of the SVB.

Key words: safety engineering; seismic vibrator baseplate; finite element analysis; fatigue life prediction; modified $S-N$ curve