

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2022.10.020

# 液压泵滑靴双金属扩散焊性能稳定性验证研究

张峰, 刘姿, 管博文

(国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007)

**摘要:** 针对某批次液压泵滑靴铜层出现掉块、剥落等问题,对液压泵的使用可靠性进行了评估研究。分析了滑靴铜层剥落的内在原因与滑靴双金属扩散焊层孔隙有关,采用工业CT技术检测扩散焊层孔隙并制定检测要求;选定缺陷最大的滑靴作为研究样本,仿真分析其扩散焊界面缺陷处的应力分布和损伤判据,并通过220 h耐久试验验证。结果表明:试验泵运行良好,性能稳定,分解后检测样本滑靴扩散焊界面缺陷试验前后稳定无变化,确认该批次液压泵安全可靠,可以继续使用。为液压泵工程应用研究提供了部分参考。

**关键词:** 滑靴;双金属扩散焊;工业CT;耐久试验

中图分类号:TH137 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2022)10-0149-08

## Performance Stability of Bimetal Diffusion Welding of Hydraulic Pump Slipper

ZHANG Feng, LIU Zi, GUAN Bo-wen

(Notional Machinery Factory in Wuhu, Wuhu, Anhui 241007)

**Abstract:** Aiming at the problems of falling blocks and peel off slipper copper of hydraulic pumps, the reliability of hydraulic pump is evaluated. The analysis shows that the peel off are related to the pores of bimetal diffusion welding layer of sliding shoe. Using industrial computerized tomography technology to detect the pores of diffusion welding layer and formulate detection requirements. The slip shoe with the largest defect is selected as the research sample, and simulation analysis the stress distribution and damage criterion of diffusion welding layer. The results of 220 h endurance test show that the test pump's performance is stable and has no wear. The size and position of the large pores in diffusion welding layer is stable, which has no change. The study determined that this batch of hydraulic pumps are safe and reliable and can be used continuously. The study provides a reference for the engineering application research of hydraulic pump.

**Key words:** pump slipper, bimetal diffusion welding, industrial computerized tomography, endurance test

### 引言

双金属扩散焊接技术已广泛应用于液压泵的生产制造,如液压泵滑靴头采用锡青铜和结构钢的扩散焊工艺,提高了原合金铜材质滑靴整体强度,避免易被拉脱问题,既满足摩擦副的匹配要求,又提高了滑靴的疲劳强度。表面铜层保证使用过程中的减磨特性,基体钢材增加零件强度、韧性等力学性能,大大提高液压泵的润滑性能和使用寿命<sup>[1-3]</sup>。

液压泵工作过程,柱塞通过旋转和轴向运动在转子内吸油和排油,而柱塞头部的滑靴起支撑和减磨作

用。液压油被封存在滑靴封油槽内,使滑靴与斜盘之间形成一层油膜,减少摩擦副间摩擦损失,提高机械效率。液压泵高速运转过程中,若滑靴扩散焊铜层掉块、剥落,会快速破坏滑靴与斜盘间油膜的稳定,使液压泵摩擦迅速升温失效<sup>[4]</sup>。实际某型液压泵已发生多起

收稿日期:2022-02-28 修回日期:2022-03-28

基金项目:装备预先研究领域基金项目(80904010201)

作者简介:张峰(1989—),男,安徽灵璧人,工程师,硕士,主要从事航空飞机液压、救生系统附件修理等技术工作。

滑靴剥落、掉块引起的磨损故障,该批次液压泵已全面停用,造成重大的经济损失,对该批次液压泵的使用可靠性进行评估具有重要意义。

目前,对于滑靴扩散焊的使用可靠性内容研究较少,主要是对扩散焊的生产工艺控制、扫描成像方法、受力与减磨措施等方面的研究<sup>[5-7]</sup>。本研究通过分析滑靴扩散焊铜层剥落机理,确定扩散焊界面缺陷的影响,并对停用批次液压泵滑靴进行了内部缺陷检测方式的对比验证,制定滑靴工业CT检测的要求,筛选出内部缺陷最大的样本泵进行耐久试验。通过检验含有最大缺陷液压泵的使用可靠性,给出该批次其他液压泵的使用判据,该方法从工程应用上给出了一种从扩散焊性能方面验证液压泵使用可靠性的方法,加深了对液压泵制造过程的理解,为液压泵工程应用研究提供部分参考。

## 1 液压泵滑靴扩散焊层剥落机理

### 1.1 滑靴扩散焊层剥落的微观形貌分析

图1为某失效滑靴铜层剥落情况,剥落主要集中在密封带一侧,剥落区域有平行的沟槽特征。图2为剥落区域微观形貌,可以看到剥落表面光滑,无明显的断裂特征和剪切摩擦特征。图3为滑靴轴向切割剖面,放大发现合金铜层边缘有裂纹向界面延伸,材料从中心向边缘挤压,剥落区域基本在基体与铜层焊接交界处。

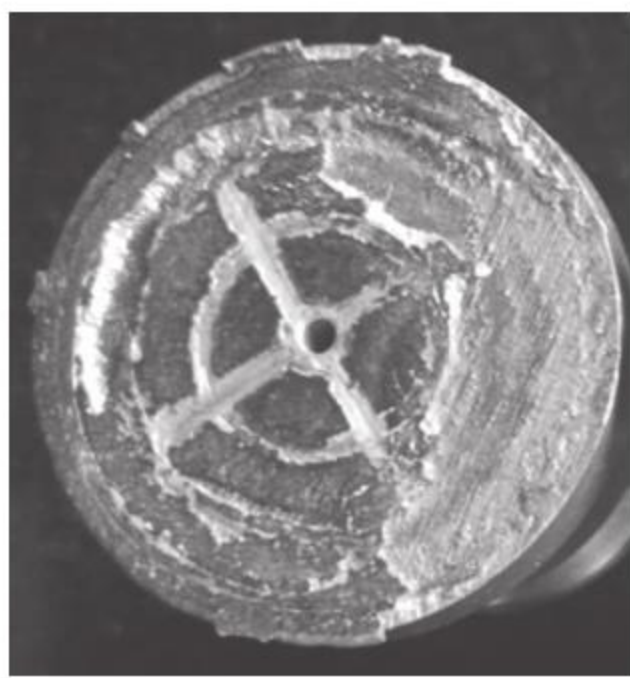


图1 柱塞扩散焊层剥落情况

Fig.1 Spalling of diffusion welding layer of plunger

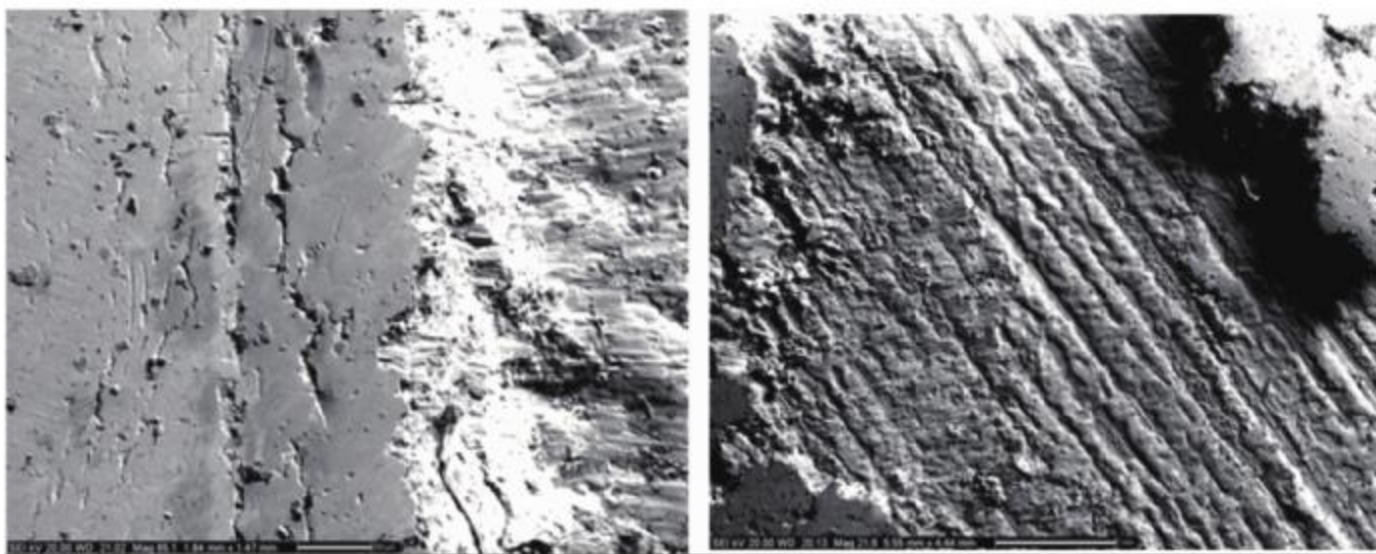


图2 滑靴剥落区域表面

Fig.2 Surface of shoe peeling area

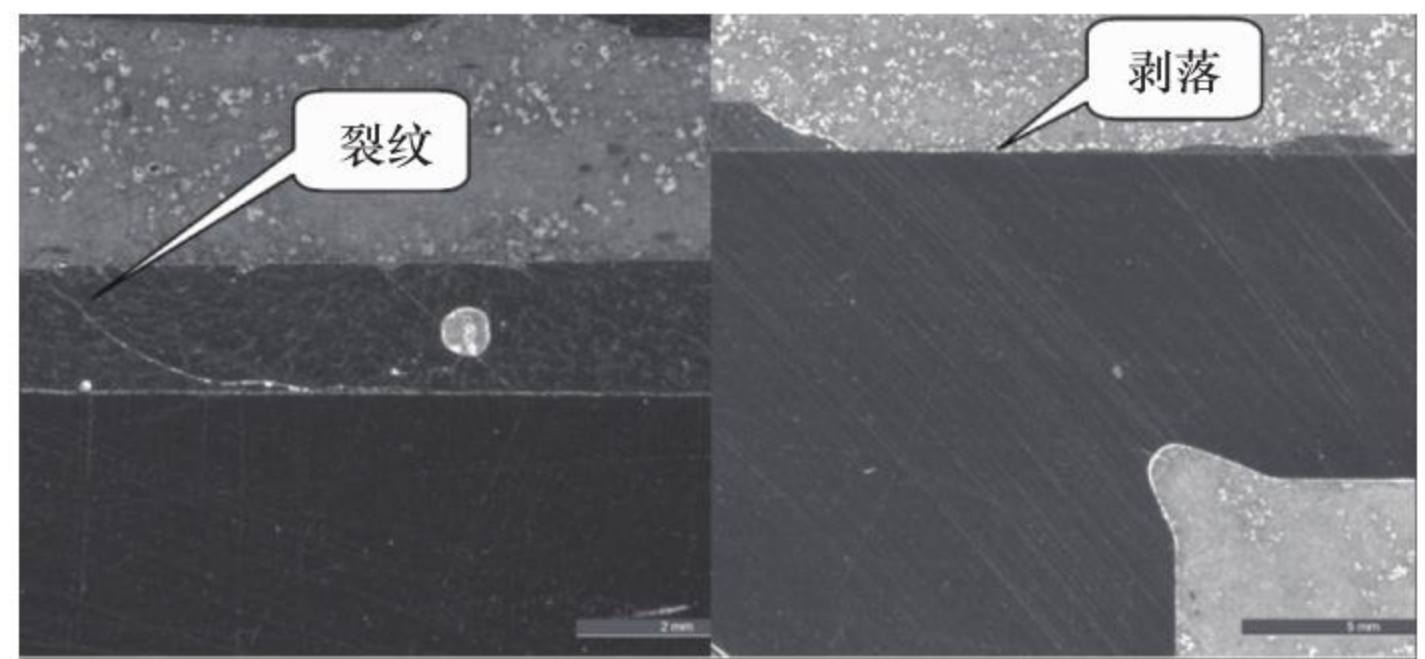


图3 滑靴轴向剖面

Fig.3 Axial profile of sliding shoe

### 1.2 滑靴扩散焊层剥落的金相分析

滑靴裂纹断面如图4所示,成片剥落区域铜层大部分沿基体界面处断裂分离,说明剥落接近基体;铜层与基体界面的灰色相为基体向铜层扩散过渡区;界面有大量线状裂纹分布,分布区域与脱落部位基本一致。滑靴断面微观检查显示,裂纹断面平整,滑靴裂纹扩展深度均匀,滑靴断面有明显摩擦痕迹,有可见疲劳特征。

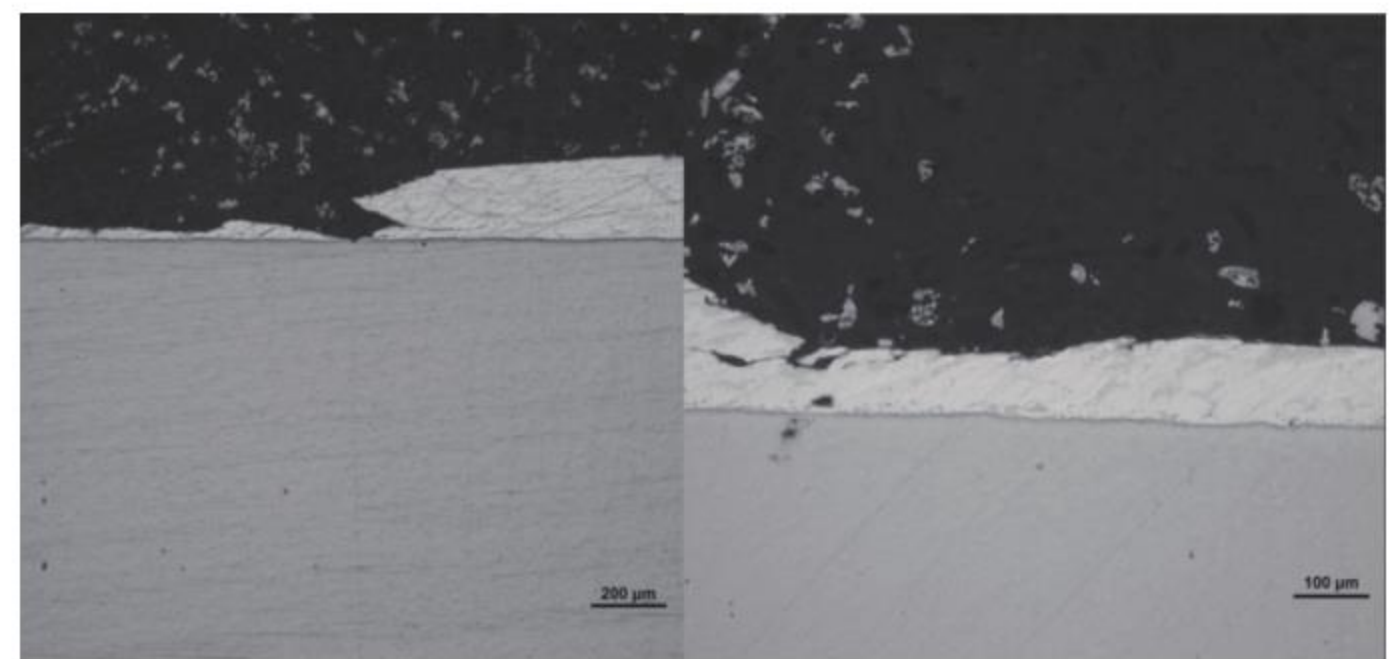


图4 滑靴裂纹断面

Fig.4 Slip shoe crack profile

### 1.3 滑靴扩散焊层剥落的机理分析

滑靴铜层在扩散焊界面处大面积剥落,且有规则的平行沟槽特征;滑靴实际工作过程摩擦剪切应力较小;铜层沿基体界面剥落,说明滑靴扩散焊接合面处结合力较弱;微观检查滑靴铜层剥落区域截面扩散焊层有大量线状缺陷,表明扩散焊处有较多缺陷或孔隙;结合滑靴工作受力情况,说明扩散焊铜层结合强度较低,易发生疲劳剥落,即扩散焊界面大量线状裂纹或孔隙缺陷影响扩散焊的结合力,导致铜层剥落。这与文献[8]滑靴扩散焊层气孔、夹渣、缩松等缺陷会恶化结合面的性能,使液压泵使用过程中出现故障的结论一致。

## 2 液压泵滑靴扩散焊缺陷的检测及样本选择

### 2.1 滑靴扩散焊内部缺陷检测方法

扩散焊层厚度较小,界面上含有大量形状不一的

小孔隙,由于缺陷尺寸大于扩散焊厚度,扩散焊界面位置缺陷可看成气孔、未焊接,故需要验证其可靠性。为有效检测出扩散焊层孔隙大小、位置,对金属内部缺陷无损检测方法进行对比,如X射线、超声波、工业CT扫描<sup>[9-11]</sup>。图5为超声波扫描与工业CT扫描内部缺陷效果对比。对比显示,工业CT扫描以二维断层图像或三维立体图像形式呈现,清晰、准确、直观展示被测物体的内部结构、组成、材质及缺陷状况。经过综合分析对比,选用工业CT扫描可满足检测需求。

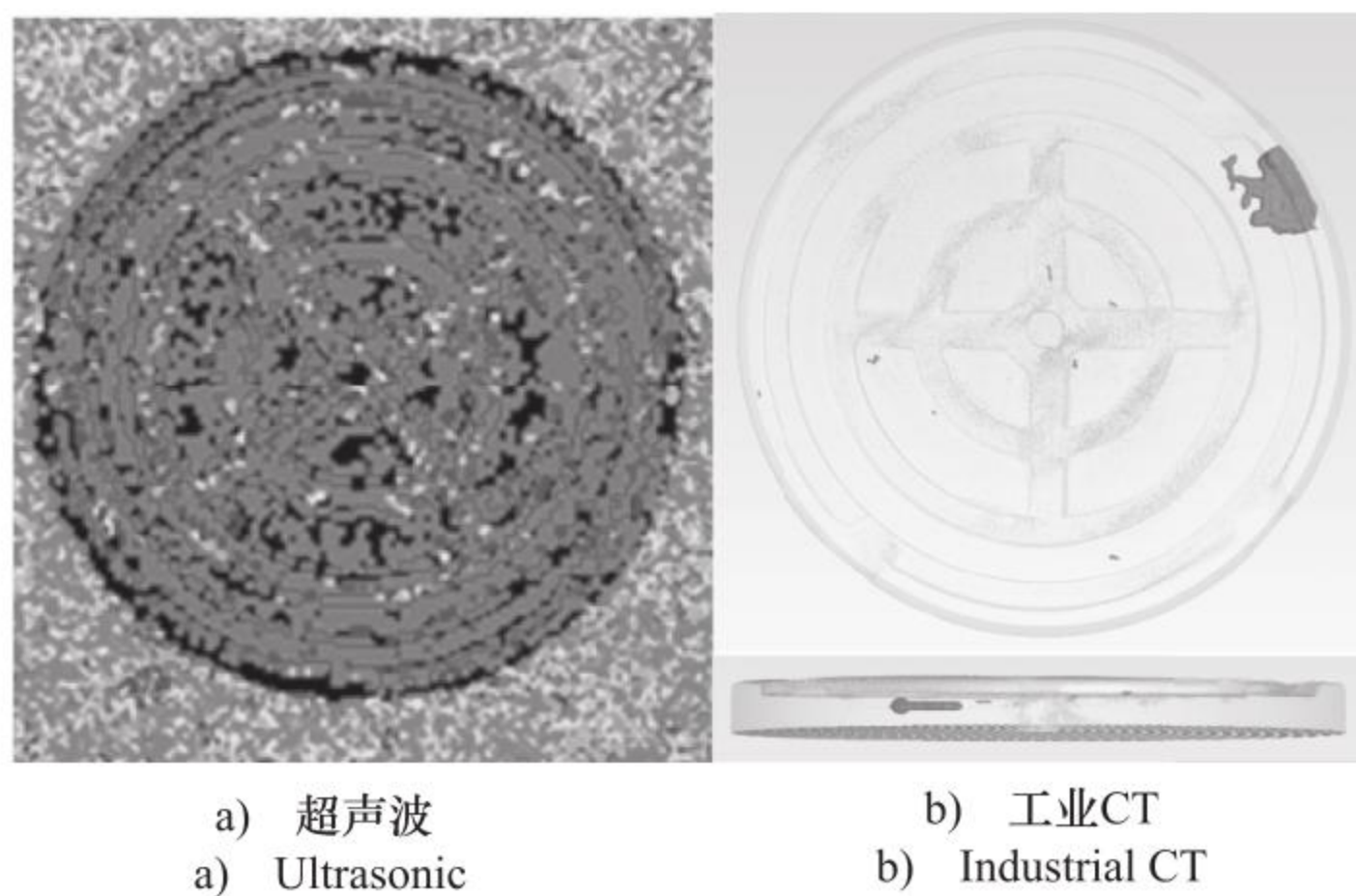


图5 超声波与工业CT扫描滑靴缺陷对比  
Fig.5 Defect detection effect of ultrasonic and industrial CT

## 2.2 关于滑靴工业CT检测要求

工业CT可以检测到滑靴内部缺陷的位置、大小、分布情况并三维可视化呈现。扫描时需要性能影响较小的孔隙进行筛选以提高扫描效率,在制定滑靴工业CT检测要求时,参考了液压泵设计制造过程关于扩散焊零件表面质量判断标准以及文献[12-13]相关内容,结合产品材质、形状、大小和工业CT设备检测精度要求,忽略等效直径0.15 mm以下的孔隙,扫描时选取尺寸大于0.15 mm以上的缺陷,并将缺陷等效直径大于1.0 mm定义为超标缺陷。工业CT实验方法依据GB/T 29070—2012,基于23 μm扫描分辨率检测滑靴内部缺陷,关于孔隙的检测要求如下:

- (1) 扫描统计等效直径大于0.15 mm所有孔隙;
- (2) 若内部缺陷最大尺寸小于1.0 mm,标记最大尺寸及尺寸相近孔隙的大小、位置;
- (3) 若内部缺陷最大尺寸大于1.0 mm,标记所有尺寸大于1.0 mm和相近的孔隙大小、位置,标记长度大于1 mm的裂缝或裂纹的长度和位置。

## 2.3 柱塞滑靴工业CT检测结果及样本选择

对某批次20台液压泵180件柱塞滑靴进行工业

表1 柱塞大孔隙统计结果

Tab.1 Statistical results of plunger macropores

泵件号	柱塞编号	界面孔隙总面积/mm <sup>2</sup>
XX138	44-7	11.40
XX143	57-7	22.01
XX144	60-9	15.78
XX174	104-9	23.30

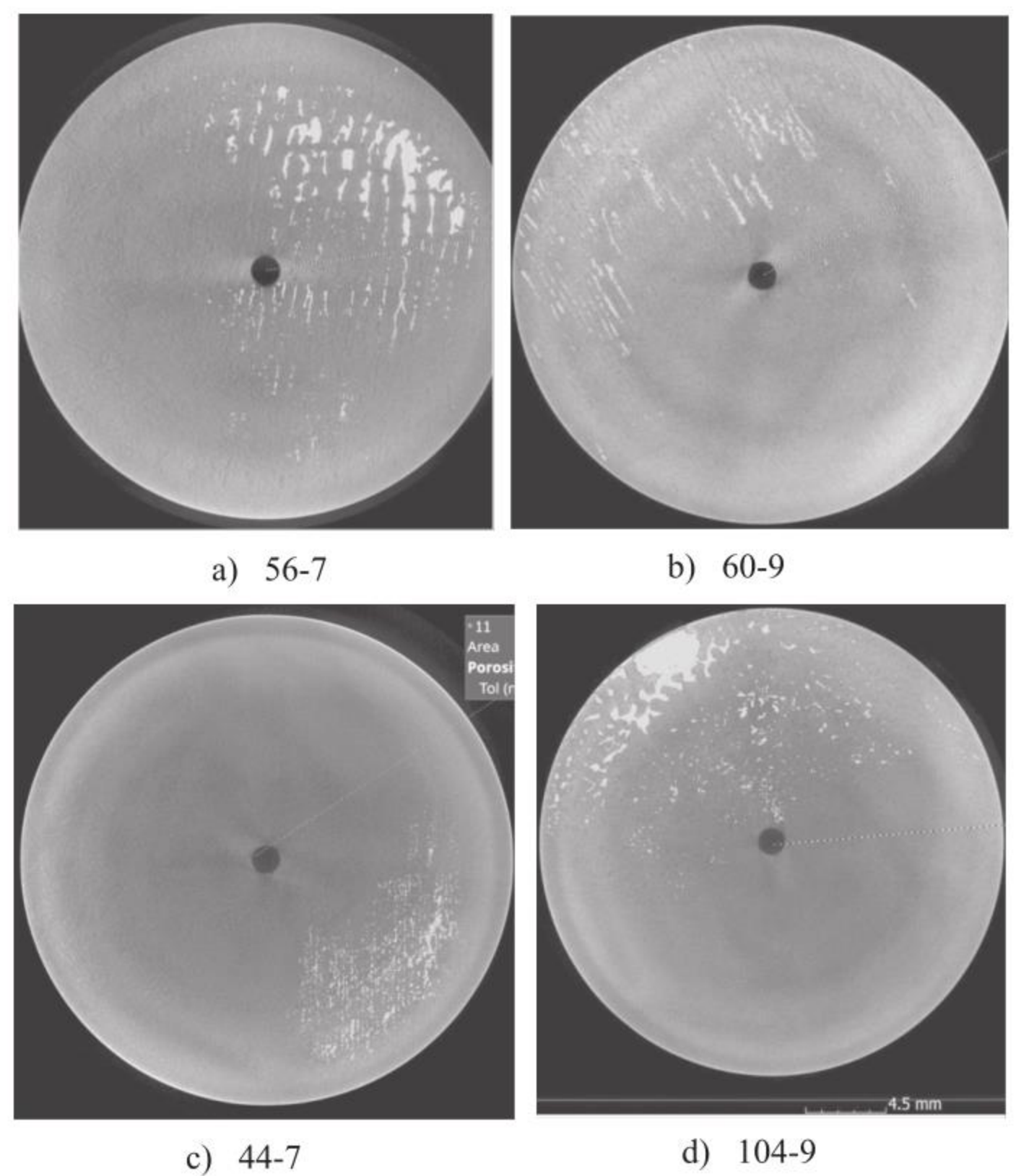


图6 柱塞内部大缺陷  
Fig.6 Large internal defects of plungers

CT检测,利用CT设备自带的VG软件进行CT扫描数据分析,统计滑靴扩散焊层及附近较大缺陷总面积如表1所示,大缺陷形状、位置如图6所示。

由表1和图6可知,编号104-9柱塞滑靴扩散焊界面孔隙面积最大,且孔隙多集中在边缘一侧,有成片大面积孔隙存在(相当于未焊合区域),与图1故障滑靴相似。其他滑靴扩散焊界面处虽有大孔隙,但多数呈离散状分布,接合面焊接孔隙情况质量比104-9柱塞相对较好,选择104-9柱塞对应的液压泵为最大缺陷样本,进行仿真分析,寿命试验验证。

## 3 柱塞扩散焊性能仿真验证

### 3.1 有限元模型

如图6所示,柱塞104-9内部缺陷面积最大,且集

中在一侧,孔隙靠近边缘越大,靠近圆心孔越小,在滑靴圆面上放射状。为最大程度模拟孔隙缺陷对滑靴整体影响,可将104-9柱塞内部缺陷集合到一处孔隙,主体位置与柱塞104-9一致,则最终缺陷如扇形。根据文献[14],双金属扩散焊渗透厚度在0.1 mm左右。滑靴预制缺陷建模时,可预制一个面积为23.3 mm<sup>2</sup>,主体位置与104-9相近的扇形,以结合面为基准,向铜层挖出0.1 mm的缺陷,模型如图7所示。

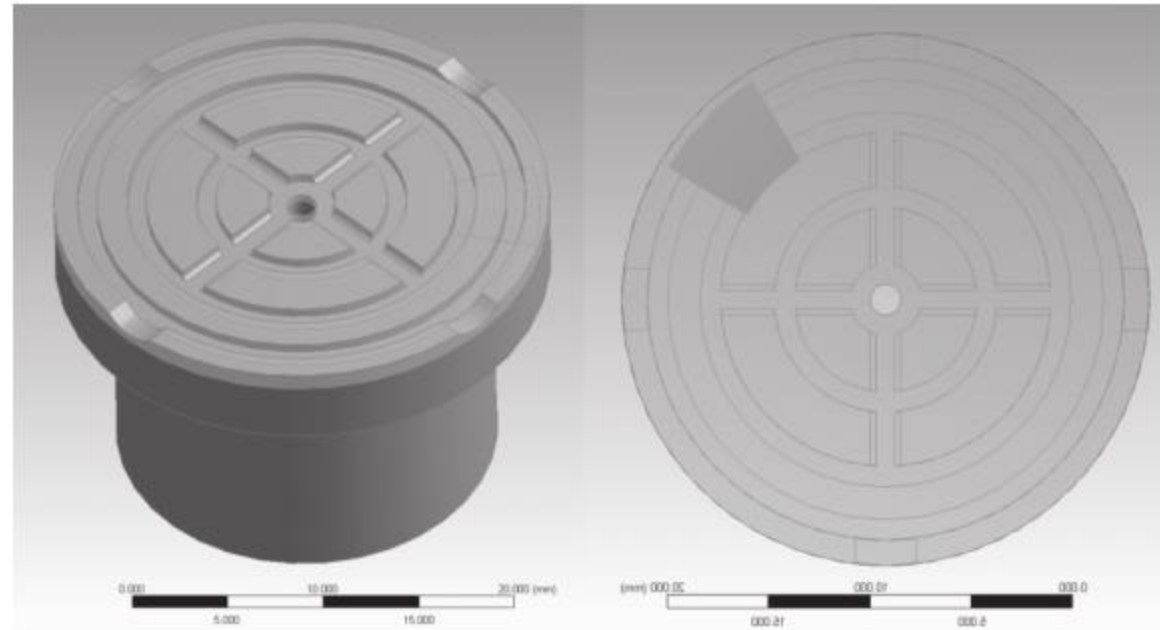


图7 预制滑靴缺陷模型

Fig.7 Defect model of slipper

3.2 材料特性及载荷计算

滑靴铜层为ZQSn10-2-3,基体钢材为12Cr2Ni4A,根据航空材料手册其材料属性如表2所示。根据文献[14]和QJ 3251—2005《铜及铜合金与钢真空扩散焊技术要求》,扩散焊结合面断裂参数如表3所示,其中 $\rho$ 为密度, $E$ 为弹性模量, $\nu$ 为泊松比, $\sigma_b$ 为抗拉强度, $\varepsilon$ 为应变系数。

表2 滑靴材料属性表

Tab.2 Material property sheet of slipper

材料	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$E/GPa$	$\nu$	$\sigma_b/MPa$	$\varepsilon$
12Cr2Ni4A	7.85	210.0	0.290	1100	0.02
ZQSn10-2-3	8.69	113.4	0.335	270	0.05

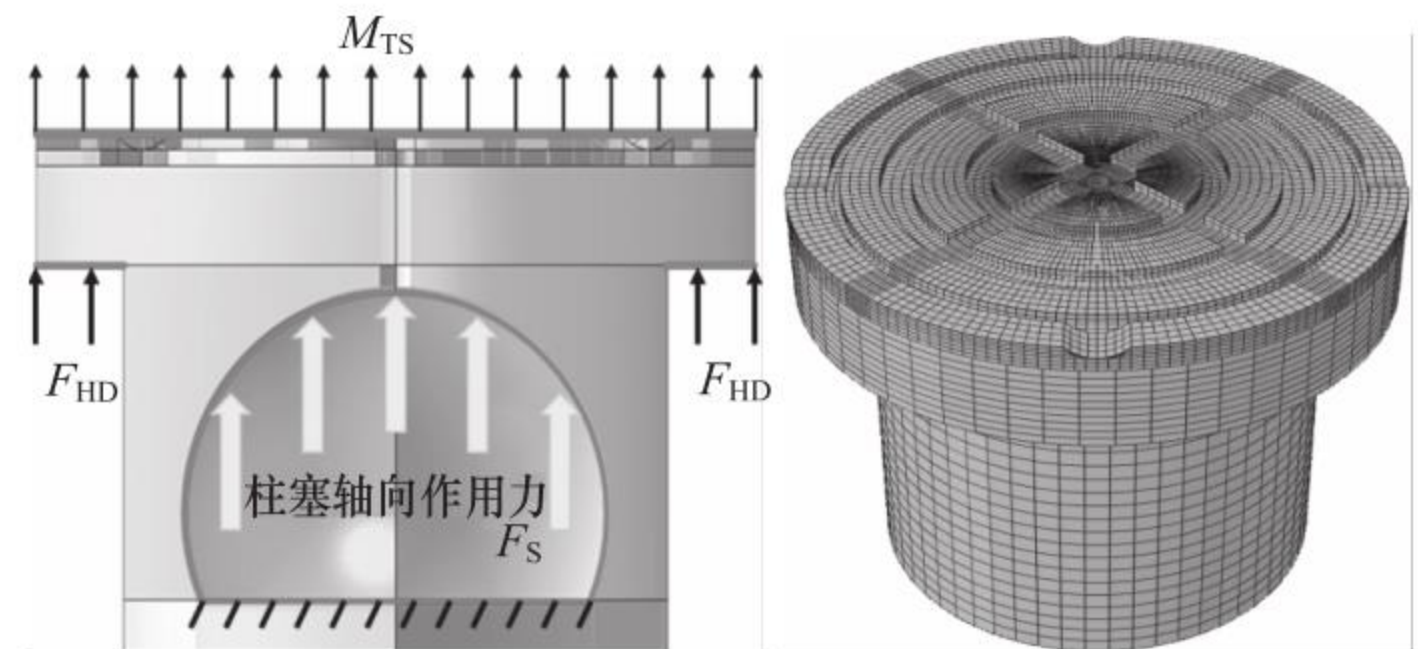
表3 扩散焊结合面断裂参数

Tab.3 Fracture parameters of diffusion welding joint surface

抗拉强度 MPa	抗剪强度 MPa	拉脱力 kN · cm <sup>-2</sup>	接触刚度 GPa
260	210	17 ~ 19	210

图8a为滑靴运动过程的受力边界,根据液压泵产品技术规范和斜盘式柱塞泵相关设计与计算公式,结合液压泵尺寸参数,滑靴的载荷计算如表4所示,其中 $F_{DP}$ 为轴向柱塞作用力, $F_{DP,x}$ 为相切与斜盘方向作用

力, $F_{DP,y}$ 垂直于斜盘方向作用力, $F_{ap}$ 为轴向柱塞直线运动惯性力, $F_{HD}$ 为单个柱塞回程盘弹簧压紧力, $M_{sx}$ 为惯性力矩, $M_{TS}$ 为摩擦力矩, $p_s$ 为泵工作压力,图8b为滑靴网格划分情况。



a) 滑靴受力边界  
a) Stress boundary of slipper  
b) 网格划分  
b) Mesh generation

图8 滑靴受力与网格划分

Fig.8 Stress and mesh generation of slipper

表4 载荷计算结果

Tab.4 Load calculation results

参数	数值	参数	数值
$F_{DP}/N$	8167.9	$F_{DP,x}/N$	7889.6
$F_{DP,y}/N$	2114.0	$F_{ap}/N$	251.5
$F_{HD}/N$	127.8	$M_{sx}/N \cdot m$	1.75
$M_{TS}/N \cdot m$	0.13	$p_s/MPa$	25.19

3.3 仿真分析

扩散焊界面处缺陷可靠性验证可依据工作工况下对含有缺陷的柱塞滑靴静应力分析来确定。由于滑靴铜层与基体钢材的化学成分和力学性能存在明显差异,扩散焊结合界面应是整体受力薄弱区域。仿真采用内聚力单元模拟扩散焊冶金结合层,损伤演化判据选择二次张拉准则;预制滑靴扩散焊界面缺陷采用生死单元技术,缺陷厚度指派为0.01 mm。如图9所示,预制缺陷位于滑靴界面左下角,围成缺陷的径向边界分辨标记为径向路径1和2;围成缺陷的周向边界分辨标记为周向路径1和2;图中白色水平直线表示周向转动角度的起始位置,以上路径主要用于有限元结果后处理的数据提取。

图10为滑靴扩散焊界面Mises应力分布云图,缺陷边界位置出现明显应力集中,应力最大值约为143 MPa。界面缺陷位置周围应力梯度等高线分布较为密集,2条径向路径周围应力呈对称分布,越靠近圆心处应力集中程度越严重。图11为滑靴扩散焊界面

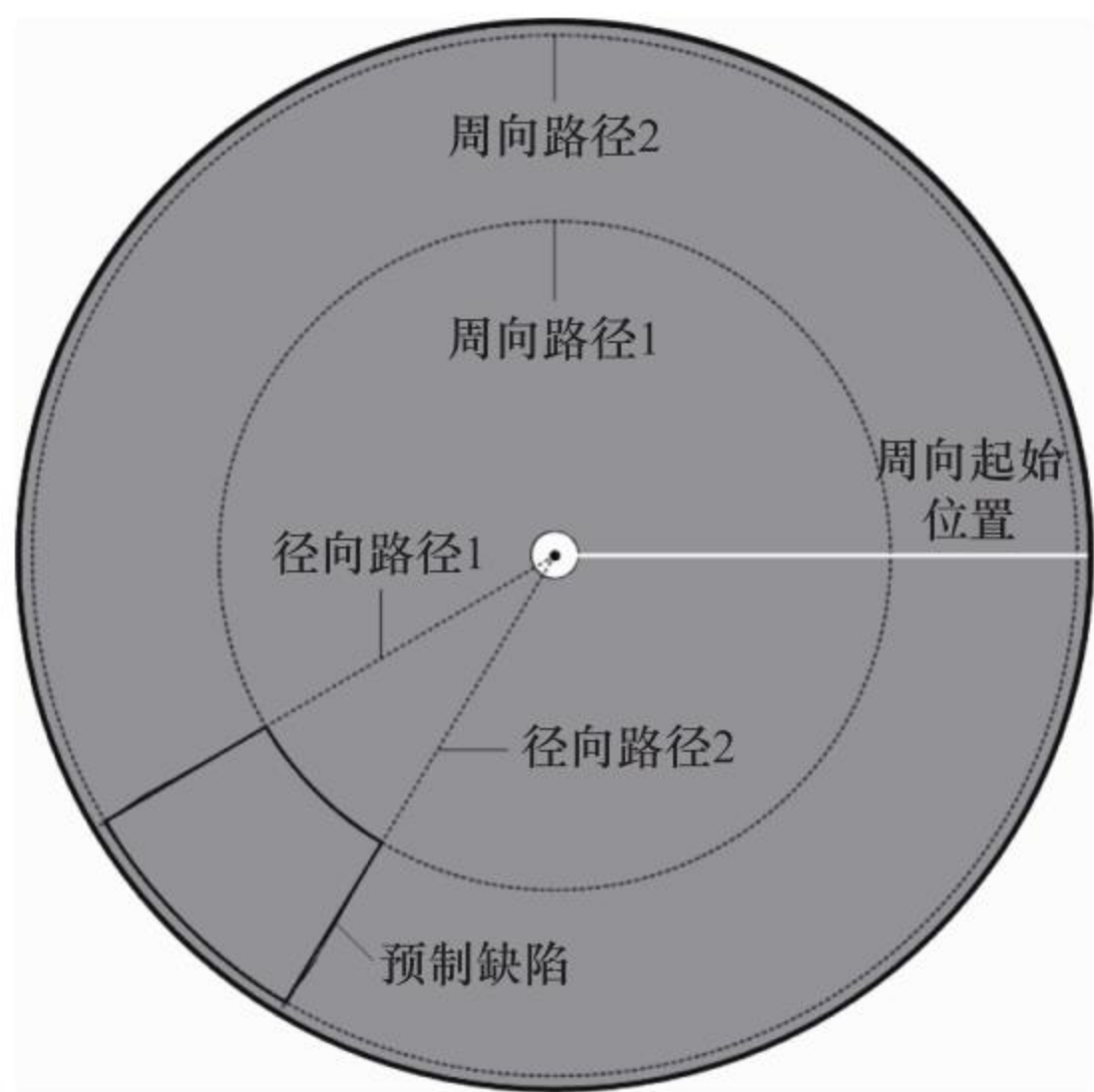


图 9 包含预制缺陷的滑靴界面

Fig.9 Slip shoe diffusion welding interface with defects

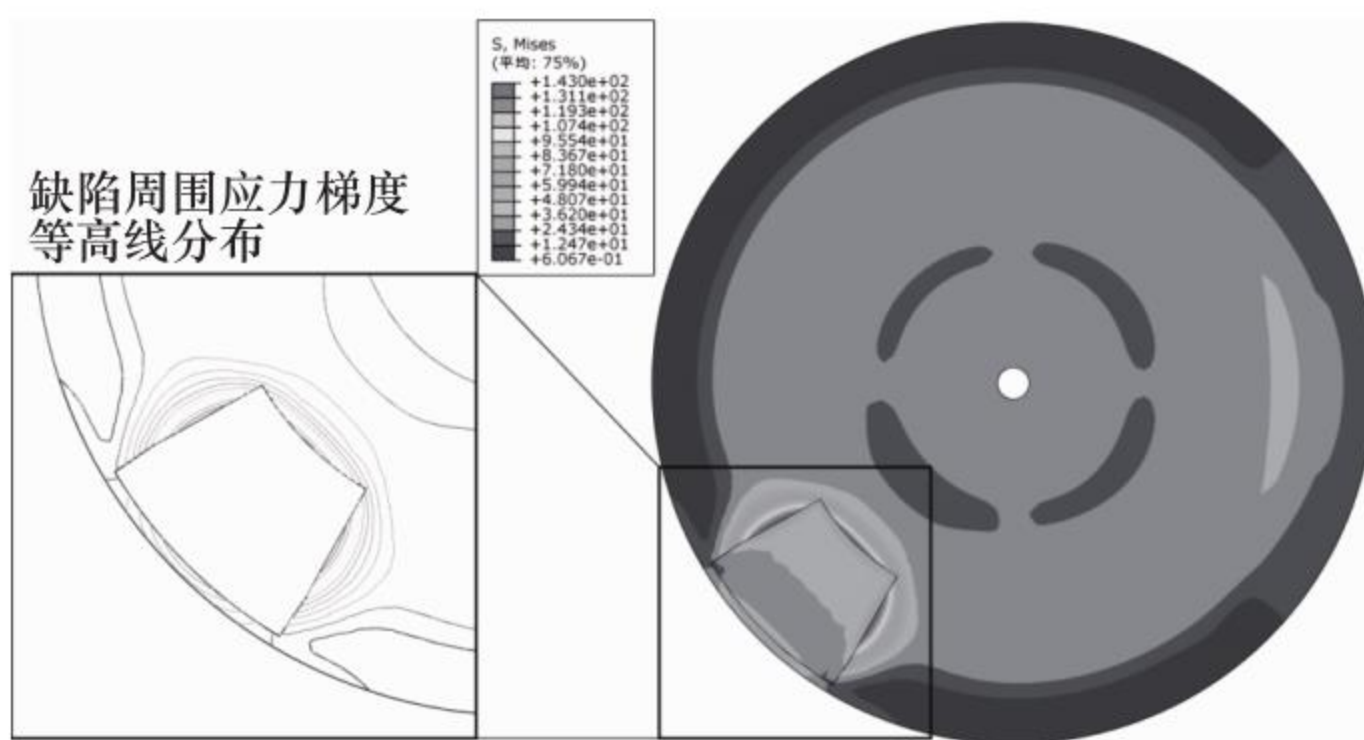


图 10 扩散焊界面应力场分布云图

Fig.10 Stress distribution of diffusion welding interface

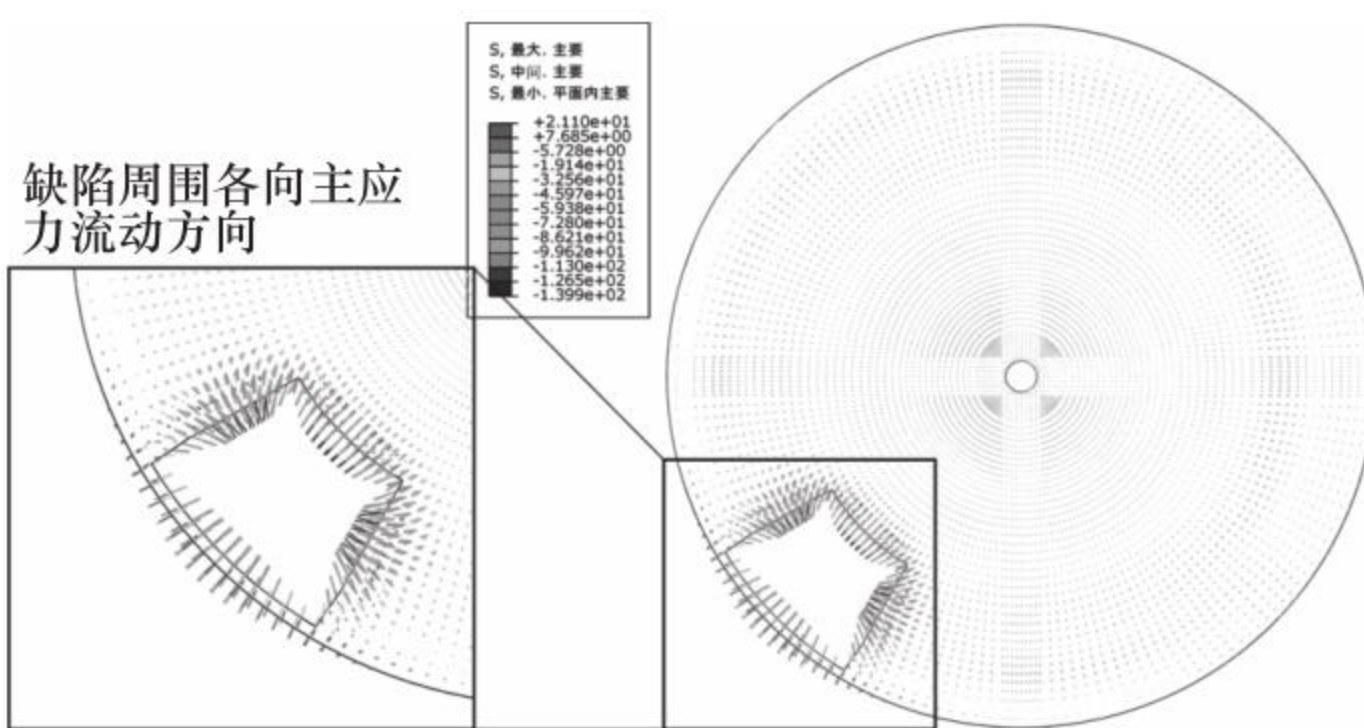


图 11 扩散焊界面主应力流动方向

Fig.11 Stress flow direction of diffusion welding interface

主应力流动方向,界面缺陷位置类似低洼地势,各向主应力从四周向缺陷位置流动,越靠近圆心流动速度越快,与图 10 应力集中和应力梯度等高线分布密度现象对应。

对于滑靴扩散焊界面的径向路径 1 和 2 以及周向路径 1 和 2,绘制沿路径归一化长度的应力数据曲线,

框线表示界面缺陷位置,如图 12 所示,横坐标  $R$  表示从圆心沿径向路径向缺陷边界的程度,径向路径 1 和 2 的应力数值整体较为接近,曲线在框线前存在轻微波动,应力数值在 20 ~ 30 MPa;在框线内上升达到峰值 115.7 MPa,路径 2 的应力峰值略微大于路径 1。

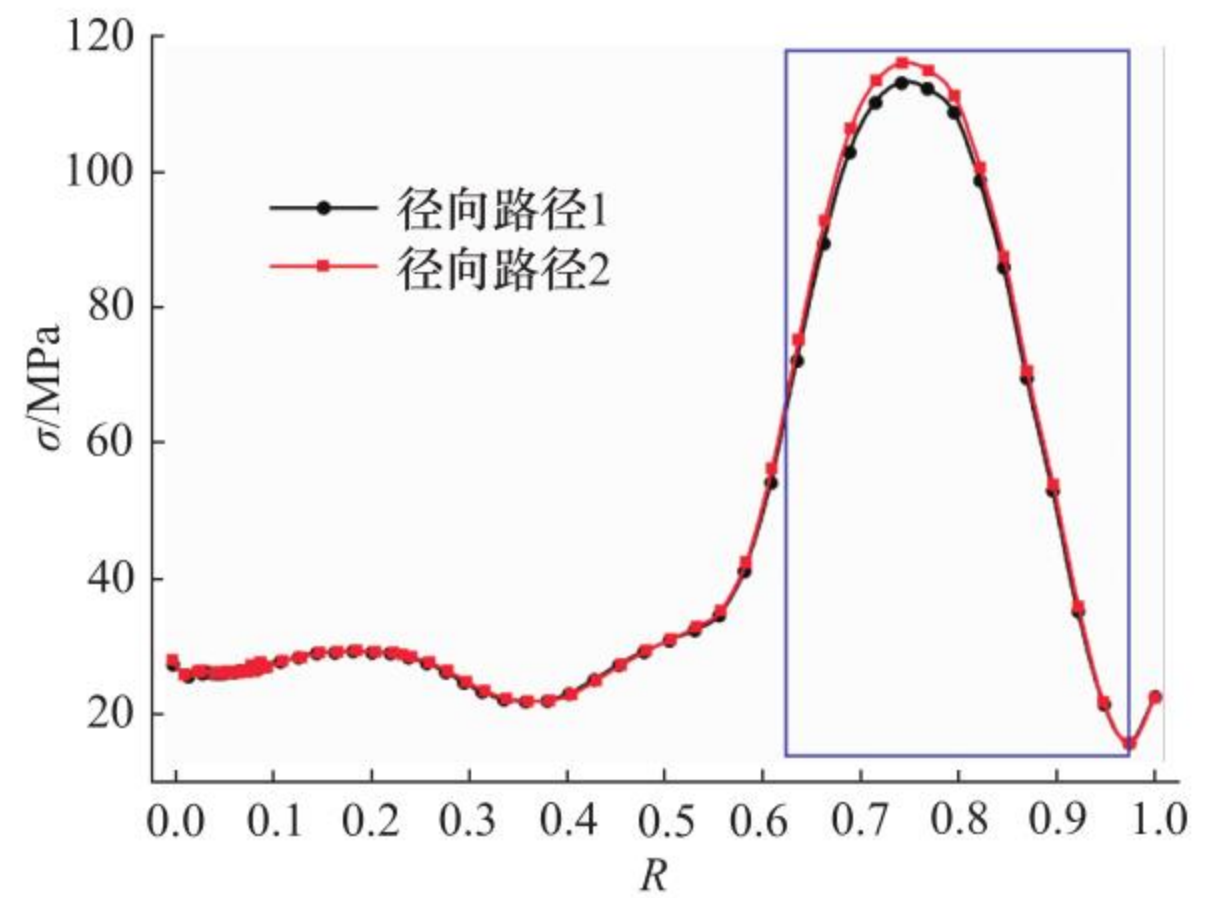


图 12 缺陷边界径向路径 Mises 应力数值

Fig.12 Mises stress value of radial path of defect boundary

如图 13 所示,横坐标  $\varphi$  表示从起始位置沿周向路径一周的程度,周向路径 1 靠近圆心,其应力数值整体大于路径 2;在框线之前,路径 1 的应力数值在 23 MPa 左右,路径 2 的应力数值在 2 MPa 左右;在框线内,路径 2 比路径 1 提前到达峰值,路径 2 峰值约为 83.1 MPa,路径 1 峰值约为 135.1 MPa,二者存在明显的相位差;框线之后,路径 2 应力数值逐渐上升至 20 MPa 左右。图 13 表明,缺陷越靠近圆心,边界台阶位置的应力集中现象越明显,由于受到切向力和倾覆力矩的作用,缺陷位置的应力分布存在一定程度的顺时针偏置情况。

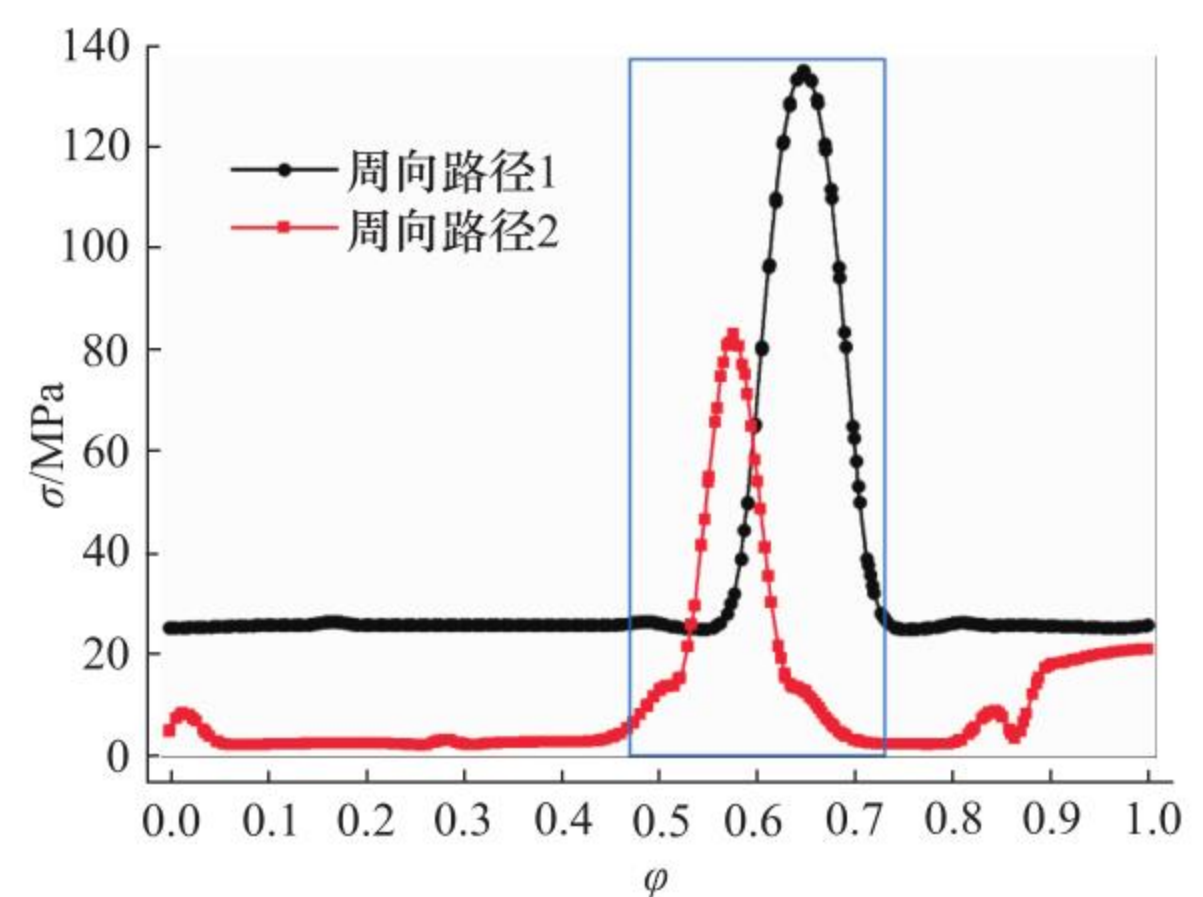


图 13 缺陷边界周向路径 Mises 应力数值

Fig.13 Mises stress value of circumferential path of defect boundary

### 3.4 损伤判据分析结果

图14是滑靴界面内聚力单元的二次损伤判据数值  $Q_{ua}$  分布云图,界面损伤程度分布云图(包括等高线图)与应力分布云图具有良好一致性,同样界面缺陷边界的台阶位置(包括2条径向边界和2条周向边界)损伤程度最为严重,损伤判据最大数值为0.046,约为5%,表明静载条件下滑靴界面产生的损伤有限,不会造成材料性能的大幅度退化,从而形成宏观损伤或者裂纹。

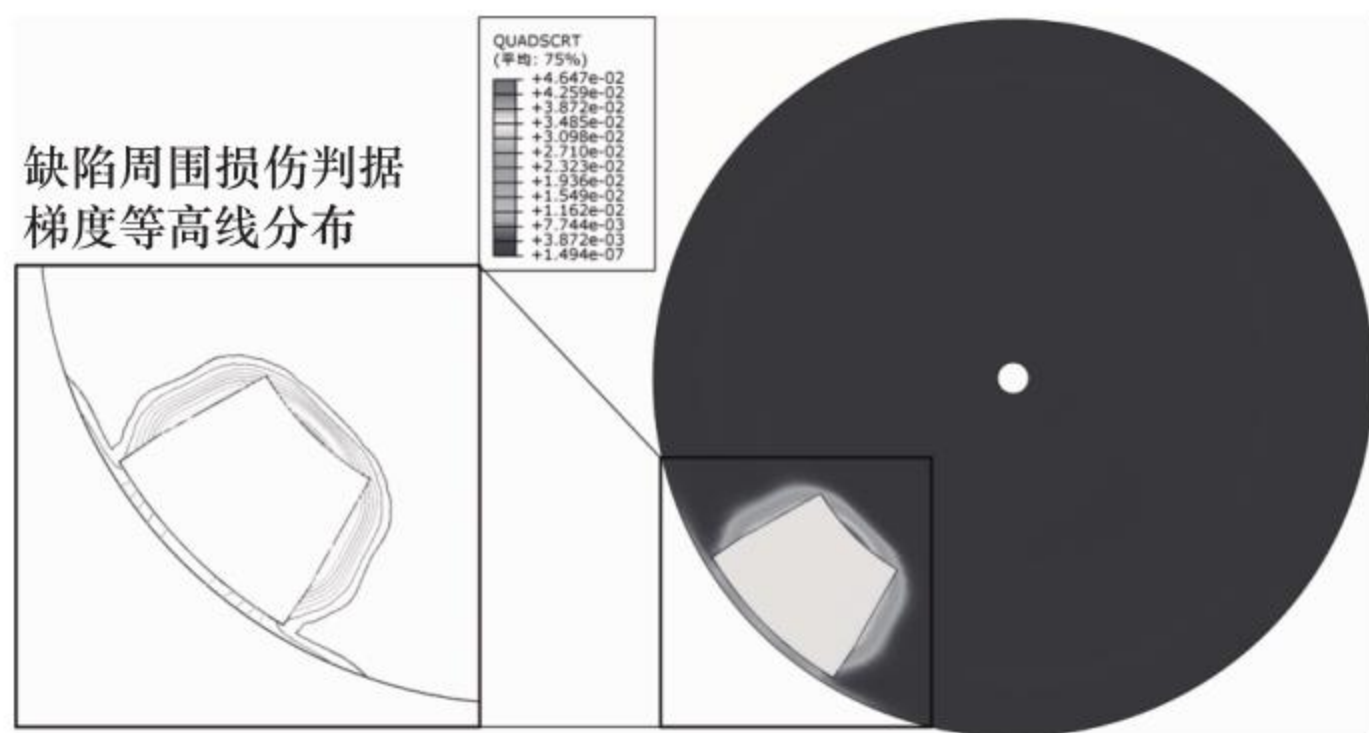


图14 滑靴界面损伤判据数值分布云图

Fig. 14 Numerical distribution for damage criterion of diffusion welding interface

同理,绘制沿路径归一化长度的二次损伤判据数值  $Q_{ua}$  曲线,如图15所示,径向路径1和2损伤数值整体较为接近,在缺陷位置之前数值基本为0;到达缺陷位置时,框线内2条曲线同时上升达到峰值0.0275,并且路径2的损伤数值峰值略微大于路径1。由图16可知,框线之前,2条路径的损伤数值都维持在0左右;框线内,路径1的曲线峰值(约为0.0463)明显大于路径2(约为0.0295),路径2在路径1前,二者存在明显的相位差。

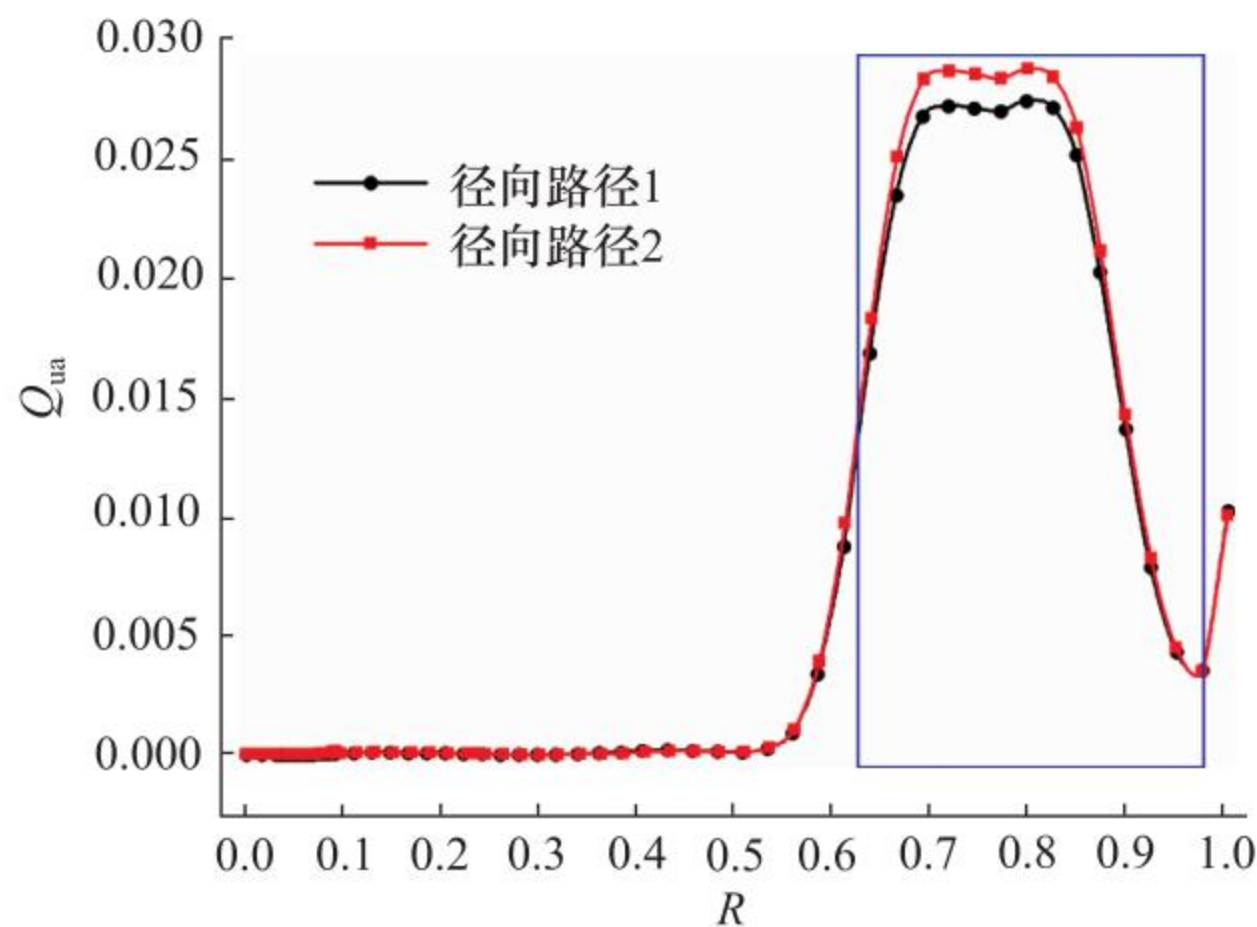


图15 扩散焊结合层 Mises 应力分布

Fig. 15 Mises stress value of diffusion welding interface

综上所述可以确定,滑靴扩散焊界面的损伤程度与应力之间存在紧密联系,云图分布和数值曲线都具有很好的 consistency。因此在静载条件下,认为滑靴扩散焊界面的应力大小是造成扩散焊材料损伤主要原因。结合仿真结果可知,损伤退化远小于抗拉和抗剪强度,能够满足使用强度要求。

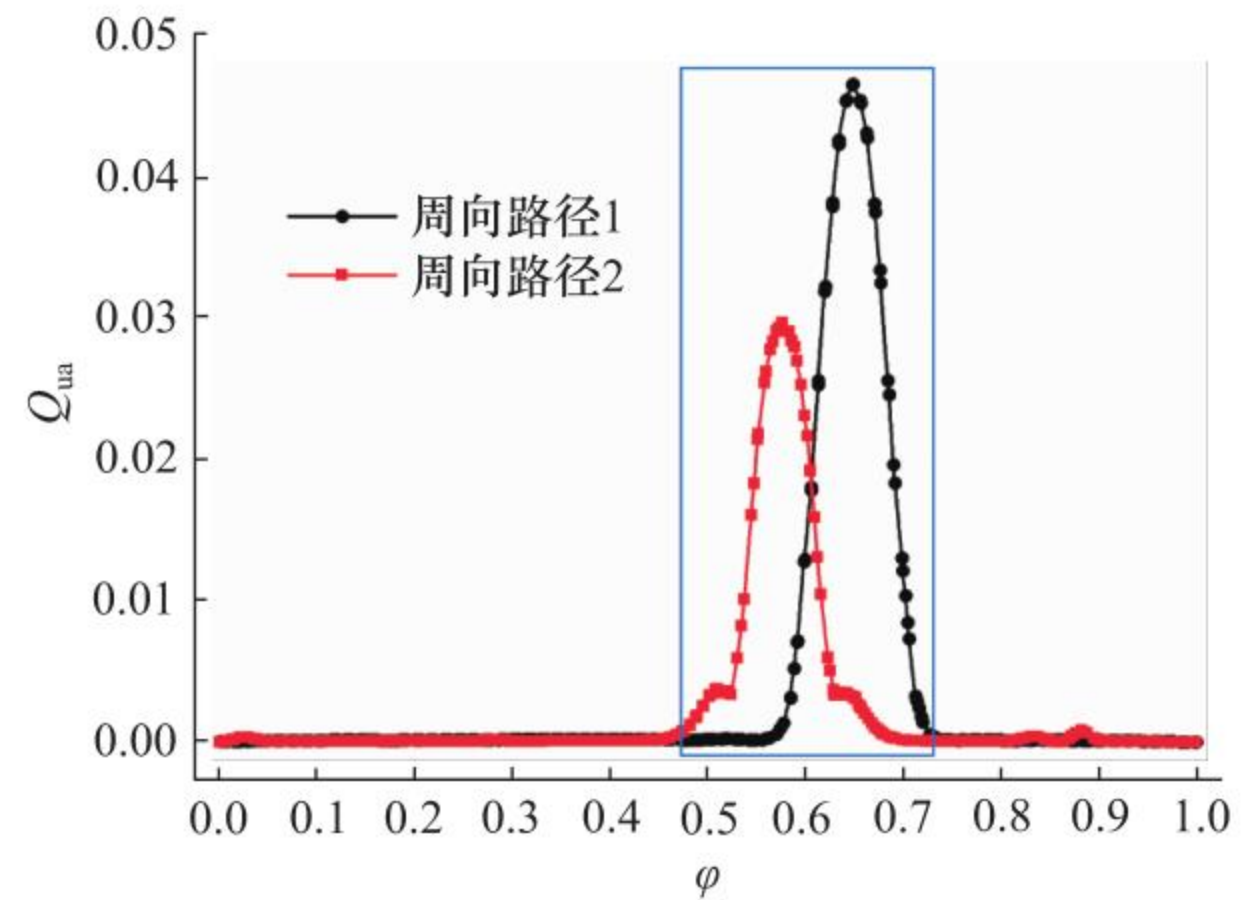


图16 扩散焊结合层损伤判据分布

Fig. 16 Damage criterion of diffusion welding interface

## 4 试验验证

### 4.1 验证方法

仿真分析了样本滑靴扩散焊界面缺陷处的应力分布和损伤判据,确定样本滑靴性能稳定,满足液压泵运转条件强度要求,可以将试验泵进行装配试验验证。液压泵恢复装配后,试验验证方法需要严格按照产品鉴定检验要求进行,但需要对恢复装配的样本泵进行常规性能检验、工作性能及耐久试验可靠性的验证。耐久试验具体试验状态和试验要求参照产品制造技术相关规范,根据产品阶段1100 h寿命计算,耐久试验需要试验验证220 h。

### 4.2 耐久性试验

样本泵常规性能试验合格后,按照规定耐久试验载荷谱开展耐久试验,按照表5每隔20 h记录供油量  $Q_s$  和回油量  $Q_r$ 。液压泵的供油量反映产品性能;回油量体现摩擦副的微观磨损,磨损量大导致回油量增大。如图17所示,在出口压力稳定为27.1 MPa时,液压泵经过1100 h翻修期,供油量趋于稳定;回油量在20~40 h耐久试验(相当于正常100~200 h工作时间)间有一个明显上升趋势,表明液压泵在该阶段为正常磨合阶段,各摩擦副通过磨合磨损掉表面不平或者微观凸起,说明液压泵正常磨合期在200 h左右。在40~100 h耐久试验中(相当于正常200~500 h工作时

间),回油量缓慢上升,趋于稳定状态,说明该阶段液压泵渡过磨合期,各摩擦副配合在最佳状态。在 100 ~ 220 h 耐久试验(相当于正常 500 ~ 1100 h 工作时间),液压泵回油量逐渐上升,说明液压泵随着使用寿命增加,各摩擦副开始消耗性磨损。

表 5 液压泵的性能参数

Tab. 5 Performance parameters of hydraulic pump

转速 r/min	工作液 温度/°C	出口压力 MPa	供油量 L · min <sup>-1</sup>	回油量 L · min <sup>-1</sup>
4200	125	27.1	≥215	≤25
4200	125	30 ± 1	0	≤25

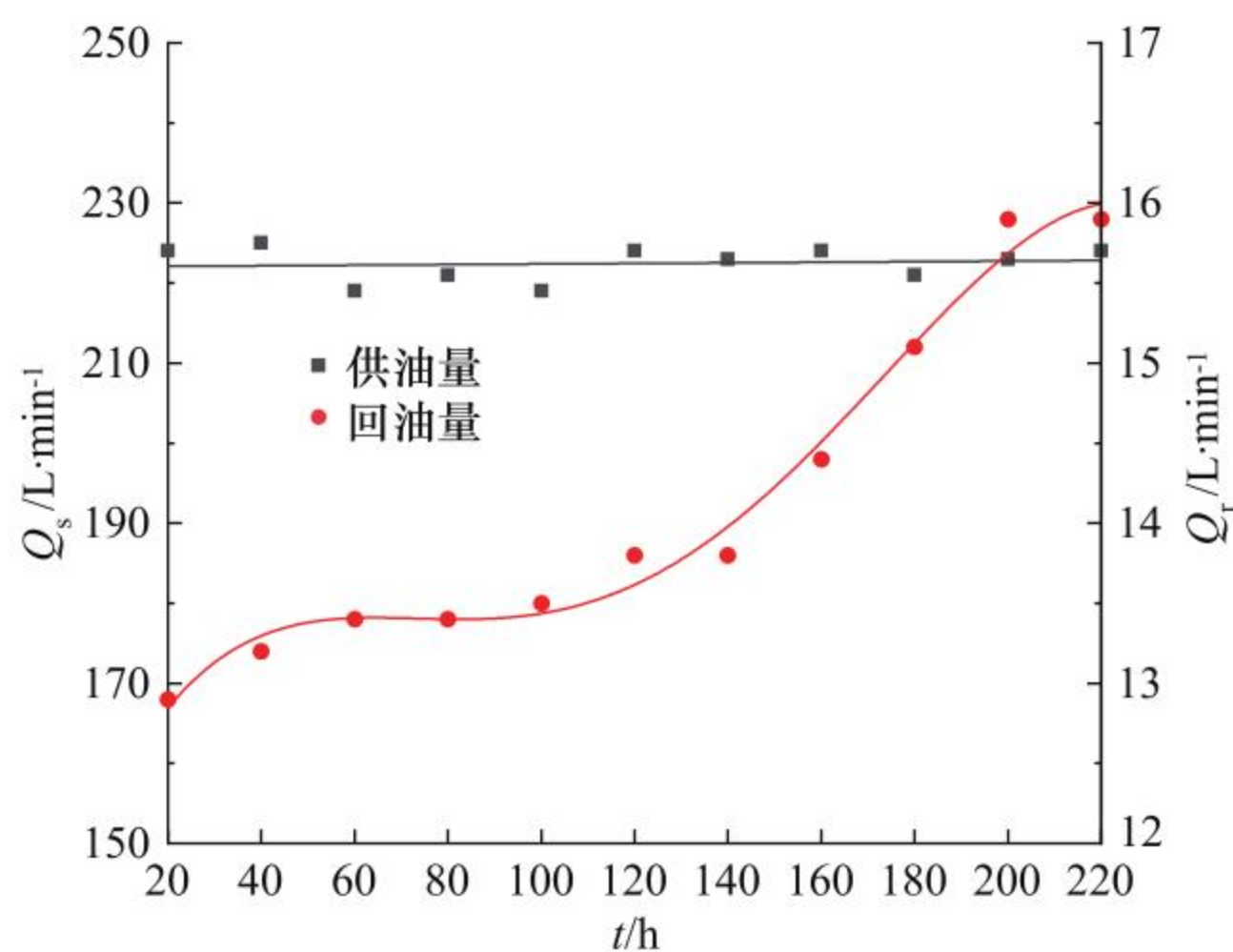


图 17 27.1 MPa 时供油量和回油量的变化图

Fig. 17 Change of oil supply and return in 27.1 MPa

如图 18 所示,在出口压力为 30.0 MPa,供油量为 0 L/min 时,回油量在 20 ~ 40 h 耐久试验间也有明显上升趋势,回油量在 40 ~ 100 h 耐久试验间缓慢上升,在 100 ~ 220 h 耐久试验间明显上升,整体趋势与图 17 相似。

耐久试验结束后再次进行常规性能试验检验,各项性能符合要求;将试验泵进行分解检查,滑靴及其他主要摩擦副表面质量完好;滑靴再次进行工业 CT 检测,验证试验前后变化,如图 19 所示,最大缺陷滑靴几乎无变化。结果表明,试验泵通过 220 h 耐久性试验,试验前后滑靴内部最大缺陷没有扩展和变化,该泵整体性能稳定,使用可靠,进一步说明 104-9 柱塞滑靴的大缺陷不影响液压泵的使用;同理,说明该批次液压泵扩散焊性能稳定,不会因为内部缺陷使扩散焊层脱落,引起液压泵磨损。

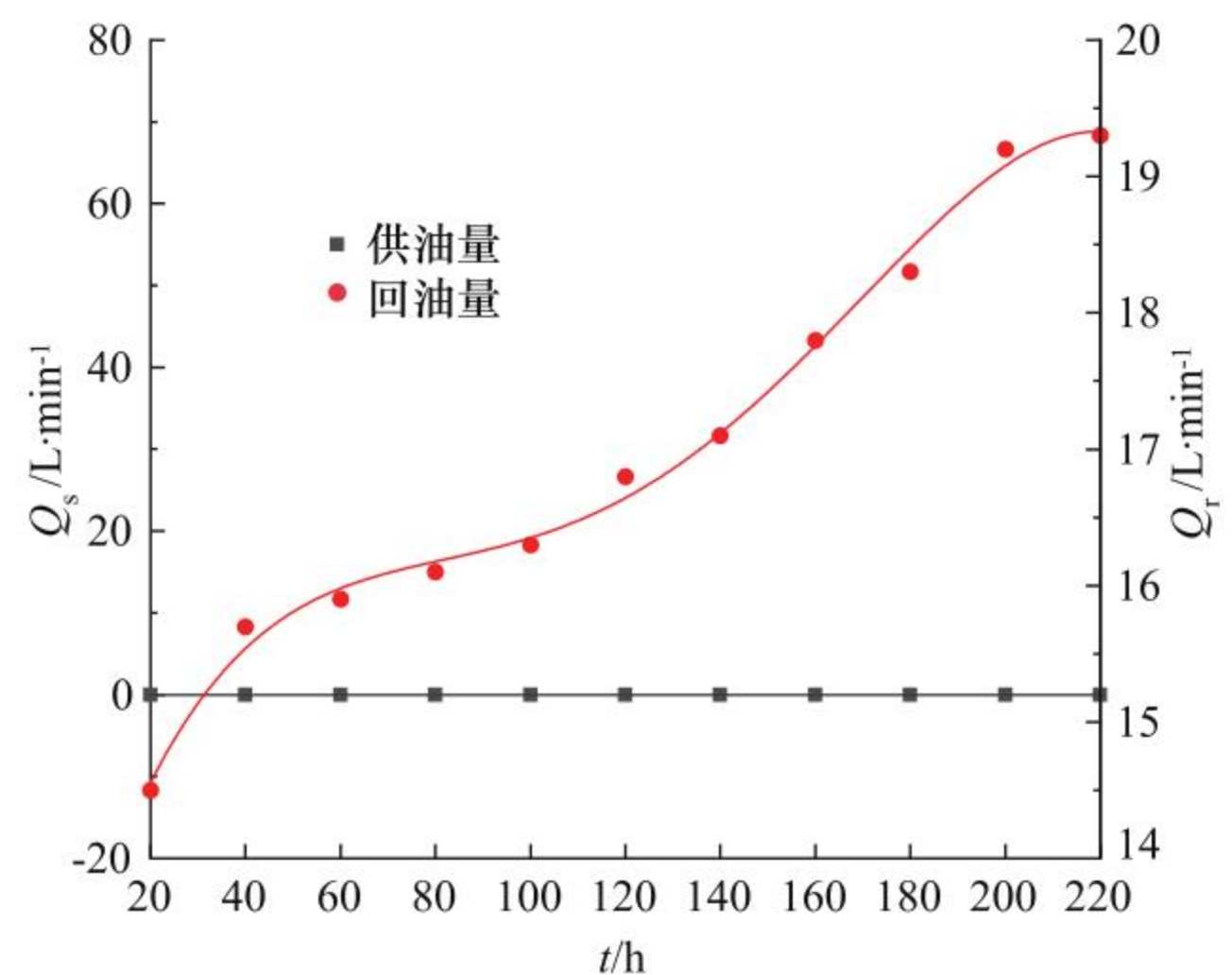


图 18 30.0 MPa 零流量时回油量变化图

Fig. 18 Change of oil return at zero flow in 30.0 MPa

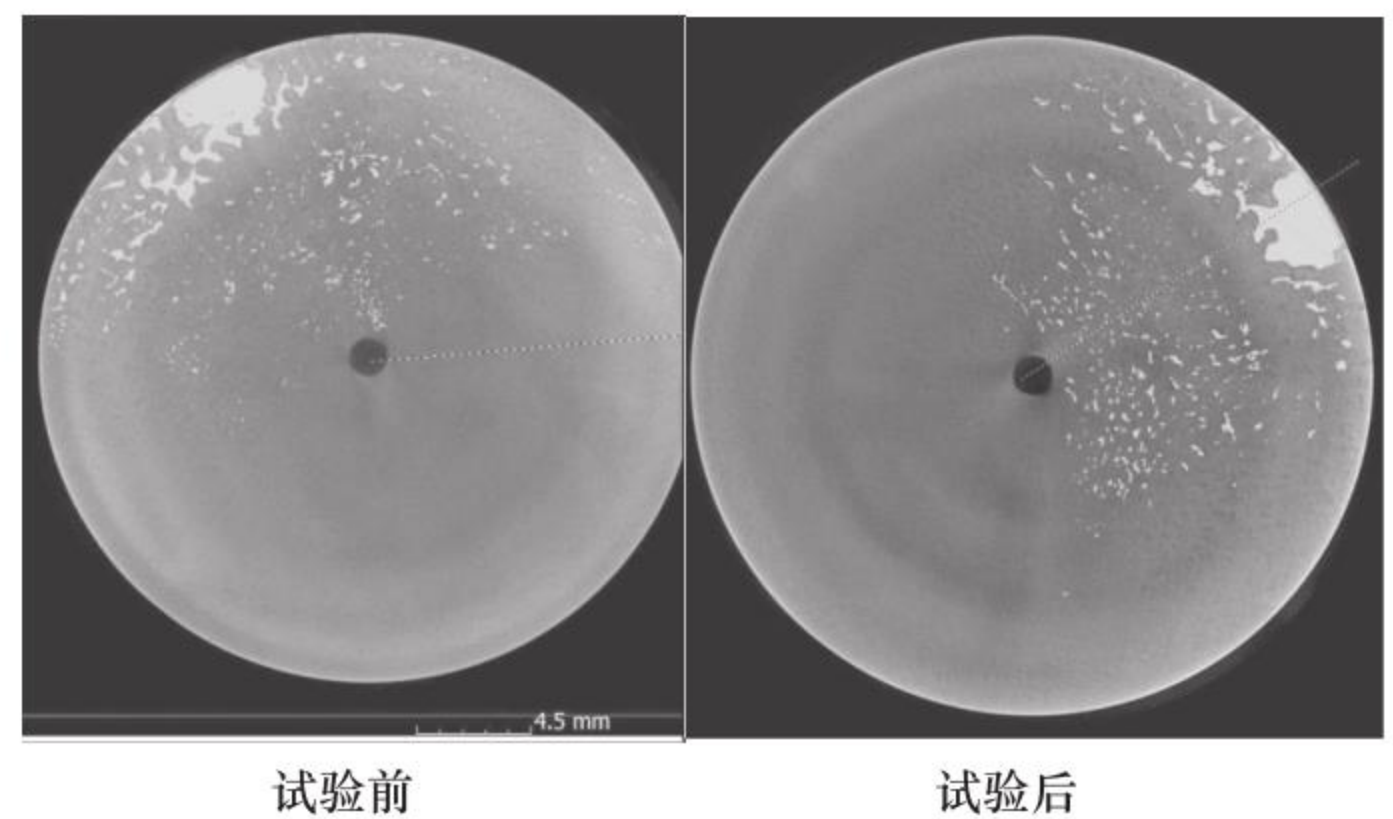


图 19 样本滑靴试验前后检测结果

Fig. 19 Results of sample slipper before and after test

### 5 结论

为研究液压泵滑靴双金属扩散焊性能稳定性,通过滑靴扩散焊层剥落机理分析,滑靴扩散焊层缺陷的检测及样本的选择研究,进行柱塞滑靴扩散焊性能仿真验证分析和试验验证,得出以下结论:

(1) 扩散焊界面的孔隙缺陷是造成柱塞滑靴扩散焊使用过程中掉块、剥落的主要原因;

(2) 确定工业 CT 可有效检测出滑靴扩散焊孔隙的大小、位置分布,制定了滑靴扩散焊的检测要求,通过工业 CT 检测筛选确定了最大缺陷样本;

(3) 仿真分析了样本滑靴扩散焊界面缺陷处的应力分布和损伤判据,确定样本滑靴性能稳定,满足液压泵运转条件强度要求;

(4) 结合仿真确定的可靠性,试验泵经 220 h 耐久试验运行良好,性能稳定,分解后检测样本滑靴扩散焊界面缺陷试验前后稳定无变化;

(5) 经过综合分析判定得到,该批次液压泵稳定可靠,扩散焊孔隙对液压泵使用性能无影响,可以继续使用。

#### 参考文献:

- [1] 刘振岗,郭健,杨建民. 扩散焊技术的应用[J]. 航空科学技术,2004,(2):38-40.  
LIU Zhen'gang, GUO Jian, YANG Jianmin. The Application of Pervasion Weld Technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2004,(2):38-40.
- [2] 邹文江,程耀永,陈波,等. 结构钢与锡青铜异种材料扩散焊[J]. 焊接,2019,(6):6-8,65.  
ZOU Wenjiang, CHENG Yaoyong, CHEN Bo, et al. Study on Diffusion Bonding of Structural Steel/Tin Bronze [J]. Welding & Joining, 2019,(6):6-8,65.
- [3] 张军. 转子真空扩散焊工艺研究[J]. 热加工工艺,2015,(3):205-206,210.  
ZHANG Jun. Research on Vacuum Diffusion Welding Process of Rotor [J]. Hot Working Technology, 2015,(3):205-206,210.
- [4] 李迎兵,徐兵. 轴向柱塞泵滑靴副楔形油膜特性分析[J]. 液压与气动,2010,(9):87-91.  
LI Yingbing, XU Bing. Axial Piston Pump Slipper Pads Dynamic Characteristics of Wedge Oil Film [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2010,(9):87-91.
- [5] 郭夏阳,林建平,孙博. 扩散焊技术的研究进展[J]. 热加工工艺. 2014,43(17):15-20.  
GUO Xiayang, LIN Jianping, SUN Bo. Research Progress of Diffusion Bonding Technology [J]. Hot Working Technology, 2014,43(17):15-20.
- [6] 赵培峰,周延军,宋克兴. 新型耐磨锡青铜合金包套挤压工艺及组织性能[J]. 塑性工程学报,2012,19(3):8-12.  
ZHAO Peifeng, ZHOU Yanjun, SONG Kexing. Micro-structure and Properties of Wear-resisting Cu-Sn-Pb-Ni Alloy Prepared by Canning Extrusion Process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012,19(3):8-12.
- [7] 王志斌,高峰. 液压泵滑靴失效分析与改进优化设计[J]. 材料工程,2005,(11):54-57.  
WANG Zhibin, GAO Feng. Analysis on Failures of Slipping Shoe in Hydraulic Pump and Its Improvement Design [J]. Journal of Materials Engineering, 2005,(11):54-57.
- [8] 陈之奇,申荣华,董伏龙,等. 钢件铸挂青铜结合面的气孔及防治途径[J]. 铸造技术,2008,(2):188-190.  
CHEN Zhiqi, SHEN Ronghua, DONG Fulong, et al. Blowholes of the Binding Surface Between Casting Bronze and Steel Workpiece and Prevention [J]. Foundry Technology, 2008,(2):188-190.
- [9] 张子剑,叶瑞,张豪俊,等. X射线实时成像系统在GIS焊接壳体检测的应用[J]. 高压电器,2019,55(1):215-219,225.  
ZHANG Zijian, YE Rui, ZHANG Haojun, et al. Application of X-ray Real Time Imaging System in GIS Shell Welding Inspection [J]. High Voltage Apparatus, 2019,55(1):215-219,225.
- [10] 敖波,王乃波,何深远. 小管路焊缝内部缺陷的三维X射线成像[J]. 焊接学报,2016,37(5):11-14,129.  
AO Bo, WANG Naibo, HE Shenyuan. Three Dimensional Imaging of Internal Defects in Small Diameter Pipe Welding Seam by X-ray Microtomography [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016,37(5):11-14,129.
- [11] 连红运,吴定允,刘新. 超声特征扫描检测扩散焊连接质量[J]. 周口师范学院学报,2008,(5):46-49.  
LIAN Hongyun, WU Dingyun, LIU Xin. Ultrasonic Feature Scan Testing Joint Quality in Diffusion Welding [J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2008,(5):46-49.
- [12] 魏莉莉,黄一雄. 转子及滑靴组件的扩散焊工艺研究[J]. 航空维修与工程,2016,(2):48-49.  
WEI Lili, HUANG Yixiong. Study on the Diffusion Bonding of the Roter and Slippery Boots Assembles [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016,(2):48-49.
- [13] 王强松,王自东,范明,等. 新型耐高压铸造锡青铜的研制[J]. 特种铸造及有色合金,2009,29(11):1070-1074,980.  
WANG Qiangsong, WANG Zidong, FAN Ming, et al. Development of Novel Pressure-resistance Tin-bronze [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009,29(11):1070-1074,980.
- [14] 王飞,田玉清. 铜合金-钢双金属柱塞液压泵转子材料的研制[J]. 粉末冶金工业,2013,23(3):56-60.  
WANG Fei, TIAN Yuqing. R&D of F10-2-3 Cu Alloy/Steel Bimetal Rotor for Plunger Hydraulic Pump [J]. Powder Metallurgy Industry, 2013,23(3):56-60.

#### 引用本文:

- 张峰,刘姿,管博文. 液压泵滑靴双金属扩散焊性能稳定性验证研究[J]. 液压与气动,2022,46(10):149-156.  
ZHANG Feng, LIU Zi, GUAN Bowen. Performance Stability of Bimetal Diffusion Welding of Hydraulic Pump Slipper [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022,46(10):149-156.