压裂泵泵头体疲劳寿命影响因素分析

李文婕
（中石化四机石油机械有限公司　湖北　荆州　434024）

摘要：本文根据国产某种 140MPa 压裂泵产品裂痕的断口检验内容，探究了延长泵头体疲劳周期的办法，经分析产品裂痕的断口检验结果发现，泵头体裂痕断口具有解理开裂形貌特点，疲劳辉纹于解理面上通过脆性形式分散，泵头体运行时很大的周向应力是导致疲劳断裂的重要原因。基于此，采取有限元系统通过自增强方法、表面生产精度、表层强化处理方法与材料挑选，对泵头体疲劳周期的干扰规律进行分析。结果显示，上述方法都能延长泵头体疲劳周期，但自增强方法是延长泵头体疲劳周期最高效且经济的方法。

关键词：压裂泵；泵头体；疲劳周期；自增强；影响因素

0　引言

压裂泵是油气田增储、增产的核心压裂装置，需要具备性能稳定、运行可靠等特征。伴随着油田超深井越来越多，及其大型压裂装置的产生，泵头体将面临越来越严峻的服役环境，其压力与排量持续增加，使得泵头体失效问题频发，运行周期普遍不长，平均应用周期仅有 200 ～ 300h，有些甚至应用几十个小时后便失效了，极大地影响了压裂运行效率。

1　检验

某研究人员对国产 140MPa 压裂泵产品裂痕的断口进行检验，发现通过失效压裂泵设备找到的裂纹处在内腔与柱塞腔相贯线周围。人为扩展断口，断口外表无明显的塑性变形，断口比较光滑、整齐，是脆性开裂形式。对开裂的断面通过质量指数为 3% 的硝酸与酒精进行刻蚀，放入超声波溶液内清理烘干后的宏观外形如图 1 所示。图上箭头是裂痕源区，这一裂痕源区很小，其他部分是裂痕分散区，占断面范围 90% 之上。由图 1（a）得知，断口外表有放射形花样纹，表征裂痕在该地方的分散并不稳定、不迅速，顺着放射角度的逆向能明确裂痕所处地方（图 1（a）的箭头位置）。由图 1（b）能够看到贝壳状标注线（即疲劳弧线），这一标注线表明泵头体裂痕是由于疲劳而引起的，按照贝壳状标注线也能明确裂痕源区与裂痕分散方向（图 1（b）的箭头位置）。

检验者对断口采样，使用酒精消毒后放在扫描电子显微镜下仔细检查，裂纹分散位置的高倍放大照片见图 2。通过图 2 能够清楚地看见台阶连接的平行解理面，这一疲劳条纹断断续续，于解理面上通过脆性形式分散。所以，通过对泵头体裂痕断口模式分析，可得出泵头体运行时很大的周向应力是造成疲劳开裂的重要因素。

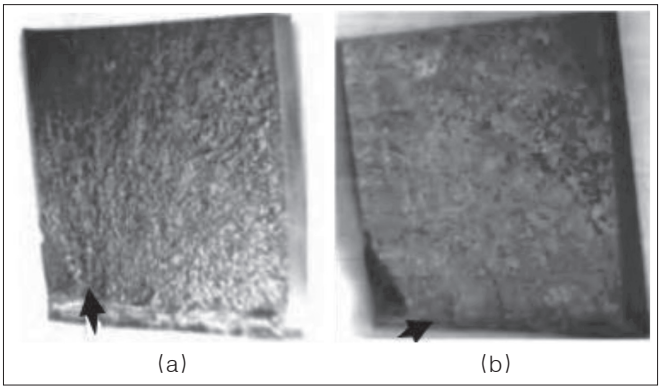

图 1　裂痕断口横截面宏观外形

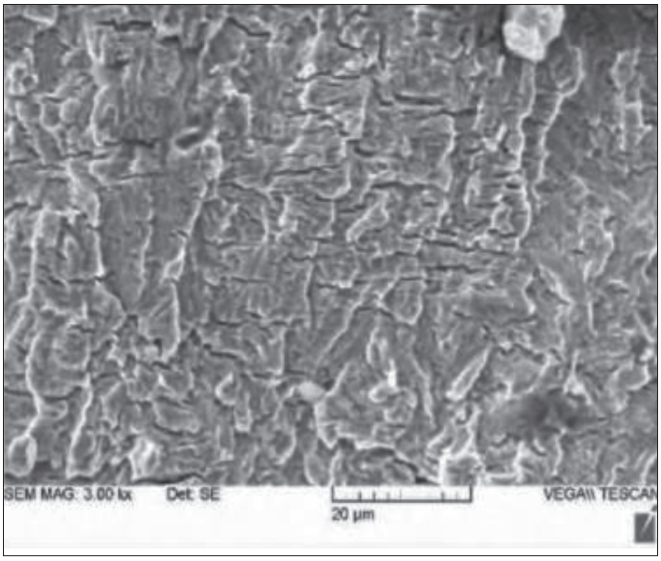

图 2　裂痕分散位置放大图

2　延长泵头体疲劳周期的办法

2.1　自增强

选择 200 ～ 483MPa 自增强荷载对泵头体内侧产生

作用，研究自增强状态、卸载状况与最高运行荷载情况，找到最好的自增强荷载。自增强形成的残余应力使得泵头体内侧应力再次分布。经比较得知，当锥面与相贯线地方同步达到最好的自增强作用时，残余应力令内侧表面的最高应力朝着壁间移动，离开了疲劳危险范围，自增强之后最高应力值减小了 33.28%，由此可见自增强方法对提升泵头体承载力有着显著作用。通过弹塑性研究结果，采取 MSC. Fstigue 系统预计疲劳周期，采取 S-N 寿命方式对泵头体自增强前后展开疲劳探究，泵头体运行过程包含排出与吸入两种运行状态，泵头体内部表面的运行应力伴随吸入与排出状态的改变而改变，即加载、卸载与重新加载的反复过程，所以运行压力选择单峰值反复载荷，最低值是 0，当压裂泵运行在 100r/min 状态下时，界定载荷频率是 0.000167h。通过研究发现，疲劳危险范围出现移动，自增强后疲劳周期明显延长了 7 倍左右。

2.2 表面生产精度

诸多测试结果显示，表面生产精度极大地影响到疲劳强度。零配件表面处理后所造成的表面问题是应力聚集的干扰因素，尤其是针对高强度物料，如果表面存在细小缺陷，将会变成十分危险的锋利切口，造成应力聚集，通常引起疲劳源区，受到交变应力影响产生疲劳裂痕且持续扩大，大幅度减小了疲劳强度。MSC. Fatigue 系统根据等级总共提出了 10 种表面生产粗糙度。在运行应力为 137.9MPa 状态下的疲劳周期研究结果的前提下，使用 MSC. Fatigue 系统的 Design Optimization 完善工具，采取 Change Parameters，假设表面生产状态是 polished，采取 Sensitivity analysis，采取 Surface Finishes（all），采用 Recalculste，系统把依靠 polished 生产状态计算全部表面生产工况下的疲劳周期，其结果如表 1 所示。

表 1 提出了泵头体内侧表面没有任何强化处理与多种表面生产粗糙度基础上的疲劳周期。伴随表面生产精度的下降，泵头体疲劳周期持续多段，通过抛光后的 736.1h 减少到海水侵蚀后的 4.8h，疲劳周期最长相差约 150 倍。所以，泵头体的表面生产精度对其疲劳周期影响很大。

表 1 不同表面生产状况下疲劳周期

表层状况	比例因子	疲劳周期 /h
抛光	1.0000	736.1
研磨	0.9609	398.0
精生产	0.7829	184.0
普通生产	0.7062	116.0
粗生产	0.6385	79.0
热轧	0.4439	26.0
锻造	0.3078	12.0
铸造	0.2783	10.0
水侵蚀	0.2628	9.4
海水侵蚀	0.1615	4.8

2.3 表层强化处理

疲劳裂痕通常出现在零配件表层，主要是由于表层的应力水平一般最高，缺陷通常也最多。此外，表层物料的约束低，滑移带容易开动，所以零配件表层的强化处理对其疲劳强度具有较大的影响。MSC.Fatigue 系统总共提出了 3 种表层强化处理方法，即渗氮、冷轧与喷丸。采取 MSC. Fatigue 系统的完善工具，能够方便获得阀相通过多种表层强化处理方法后的疲劳周期。结合实际状况，本研究设定泵头体的内侧表面生产状态是精生产与不处理，这代表选择的材料性质未修正。实施 MSC.Fatigue 系统的 Desigu Optimization 完善工具，采取 Original parameters，采取 Change Parameters，设置表面生产状态为 Good Machined，采取 Sensitivity analysis，采取 Surface Treatment（all），通过重新计算，系统把依靠 Good Machined 生产状态计算全部表层强化处理状态，其结果见表 2。

表 2 不同表面强化方法的疲劳周期

表层处理	比例因子	疲劳周期 /h
不处理	0.7829	183
渗氮	1.5660	无限
冷轧	1.3310	无限
喷丸	1.0180	832

通过表 2 发现，在 Good Machined 表面生产状态下，表面没有任何强化处理的疲劳周期最短，为 183h，通过渗氮与冷轧能明显增加疲劳周期，除去了疲劳薄弱地方，从理论上来讲泵头体疲劳周期将无限长。总体上来说，表面强化方法都可以增加疲劳周期，但是要注意，该工艺未考虑泵头体运行时的具体环境因素，比如冲蚀、磨损与腐蚀等影响因素，其结果仅能用作理论依据。

2.4 材料挑选

在较长一段时间内，挑选泵头体材料通常侧重于分析材料强度，材料强度愈高愈安全。伴随研究者对材料开裂韧度的分析得知，开裂韧度对零配件疲劳周期有着重要影响。由此，国内外厂家慢慢了解到早期选择的 30CrMnSiA 和 35GrMo 等材料并不适宜。尽管这些零配件的强度极限较高，强度极限愈大，开裂韧度则开始下降，干扰了它的疲劳周期。

该研究在 MSC. Fatigue 的原料信息库采用了几种西方材料预估泵头体的疲劳周期。由表 3 得知，若增加零配件的屈服强度与防拉强度，就能明显地增加泵头体的疲劳周期。当泵头体运行一段周期后因压力、腐蚀、磨损与冲蚀等因素导致泵头体材料质量下降时，会严重干扰泵头体的疲劳周期。当设备屈服强度小于运行应力

表 3　不同原料下的疲劳周期

原料	屈服强度 /MPa	防拉强度 /MPa	屈强比	疲劳预估寿命 /h
25Cr2Ni4MoVE(本国)	880	1020	0.86	196.0
3055	975	1056	0.92	184.0
SAE4340-350A-QT	1102	1171	0.94	303.0
SAE1522-304-HR	1005	1088	0.92	377.0
722M24	781	976	0.84	1210.0
SAE9262-260-NORM	455	923	0.49	38.5

时其会快速疲劳失效，这点能从零配件 SAE9262_260_NORM 的疲劳周期中获得验证。值得注意的是，简单选用高强度材料并无法有效地增加泵头体的疲劳周期，也要考量材料的开裂韧度，像原料 722M24 的屈服强度与防拉强度均相对于 SAE4340_350A_QT 要小，而 722M24 零配件的疲劳周期反而相对于 SAE4340_350A_QT 原料的更长，主要是由于零配件 722M24 的刚度与塑性搭配很好，可以充分体现材料的优势。材料刚度与塑性的最好配合能基于材料的调质实现，所以泵头体材料均要通过调质处理，且添加适量微元素，由此全面提升材料整体性能，使之得以系统体现。

3　结语

通过对裂痕断口的研究结果显示，泵头体疲劳开裂，同时疲劳辉纹于解理表面通过脆性形式分散，泵头体很高的周向应力是引起泵头体疲劳断裂的重要因素。

对 140MPa 类压裂泵泵头体展开弹塑性有限元非线性研究，明确最好的自增强压力，内部表层的最大应力朝壁间转变，脱离了疲劳危险的地方，自增强方法令泵头体结构最短疲劳周期增加了 7 倍左右。

有限元系统模拟了表面生产精度与表层强化处理方法对泵头体疲劳周期的干扰。模拟结果显示，泵头体内部表层不同的生产精度，其疲劳周期有明显差别；强化处理方法对延长泵头体疲劳周期效果显著，但是针对泵头体内部表层，具体操作工艺复杂。

不同原料的泵头体疲劳周期模拟结果显示，唯有选取强度与韧度融合很高的原料，方可大幅度地延长泵头体的应用周期。

综合对比有限元模拟结果，兼顾到表层强化处理方法的具体应用较难，开始对泵头体内部表层喷丸处理，能明显地延长泵头体的应用周期到 4 倍左右；尽可能地提升泵头体内部表层的光洁度，但是能够看出即便处于最好的抛光状态下，也只能提升 4 倍；采用优质材料，成本会增加很多，同时对生产的要求也较高。总之，自增强方法是延长泵头体疲劳周期的最高效与最经济的手段，能使疲劳周期增加 7 倍左右，在工艺应用方面能采取静液压法与炮轰法。炮轰法的应用最简单，无需其他辅助工具，且应用周期短，因此建议选择炮轰法展开自增强处理。

参考文献：

[1] 卢一欣，陈涛，王贺，等．高温铁素体对 17-4PH 钢压裂泵阀箱寿命的影响分析 [J]. 石油矿场机械，2021,50(02):60-63.
[2] 段萍．适用于非常规油气田作业压裂泵阀箱（2300、2500、2800 型）[J]. 石油科技论坛，2017,36(S1):145-147+200-201.
[3] 王国荣，陈林燕，肖晓华，等．压裂泵阀箱用钢的示波冲击性能及动态断裂韧性 [J]. 热加工工艺，2014,43(16):165-168.

作者简介：李文婕（1989.09-），女，汉族，湖北京山人，硕士研究生，中级工程师，研究方向：固井泵、压裂泵设计。