

某柴油机高压油管冷镦接头断裂问题分析

王雁冰^{1,2}, 胡广云¹, 宋雅丽¹, 刘利军¹

(1. 沪东重机有限公司, 上海 200129; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 针对某型机高压油管使用中冷镦接头发生断裂的原因进行分析。分析表明: 断裂方式为疲劳断裂, 并在此基础上针对疲劳裂纹萌生及扩展两大影响零件疲劳寿命的主要因素进行了分析。结合疲劳裂纹萌生及扩展的基本理论, 提出了改善高压油管疲劳性能的生产工艺改进措施。

关键词: 柴油机; 高压油管; 冷镦接头; 疲劳断裂

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)06-0040-04

Analysis of the Fracture of a Diesel Engine High Pressure Fuel Pipe's Cold Heading Joint

Wang Yanbing^{1,2}, Hu Guangyun¹, Song Yali¹, Liu Lijun¹

(1. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129;
2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Aiming at the fracture of the high pressure fuel pipe's cold heading joint on a diesel engine, it is firstly identified that the damage of the pipe is due to fatigue fracture. And then the crack initiation and growth which are the two main factors influencing fatigue life are analyzed. Finally, combined with the fatigue theory, the manufacturing technical solutions on how to improve high pressure fuel pipes' anti-fatigue performance are proposed.

Keywords: diesel engine; high pressure fuel pipe; cold heading joint; fatigue fracture

0 引言

柴油机高压油管组件由油管、护套及压紧螺母组成, 一端连接喷油泵, 另一端连接喷油器, 是构成柴油机燃油系统高压容积的一个重要部分, 承担着输送高压燃油的任务。由于高压油管是通过压力波的形式将燃油以一定的压力和速度输送到喷油嘴, 因此油管内部承受着很高的脉冲喷射压力; 此外, 整个高压油管组件还承受着因两端振动情况不协调而形成的扭剪力作用^[1]。因此造成高压油管断裂的原因很复杂, 其本身的结构、材料以及加工质量都对高压油管的可靠性有着不可忽视的影响, 需要具体问题具体分析。

某船用柴油机在使用中经常发现高压油管组件

接口处漏油, 经拆卸检查发现, 均为高压油管接头处发生径向断裂。断裂处照片见图 1, 具体断裂位置见图 2。

本文首先通过对断口进行初步分析, 确定断口的断裂方式, 然后以此为基础分析断裂的原因, 并提出改进方案。

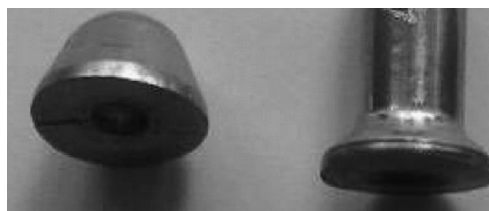


图 1 断裂的高压油管实际照片

收稿日期: 2013-05-27

作者简介: 王雁冰(1983-), 男, 工程师, 主要研究方向为船用柴油机零部件材料, E-mail: cdnfnlgtvq@163.com。

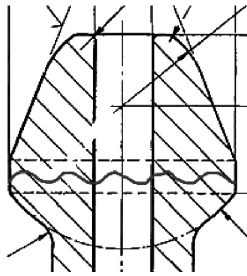


图2 油管断裂位置示意图

1 断口分析

1.1 材质及热处理质量分析

对断裂高压油管截取试样进行化学成分、夹杂

物及金相分析。化学成分检验结果见表1。

化学成分满足《GB/T 3077-1999 合金结构钢》国家标准中20CrMoA钢要求。

按照《GB/T 10561-2005 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》中实际检验A法评定,非金属夹杂物评为A0.5、B0、C0、D0.5,满足高压油管技术条件要求。

金相分析显示其显微组织为均匀的回火索氏体+铁素体组织(图3),是典型的调质处理组织。

表1 化学成分检查结果

| 元素 | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|-----|-------------|-------------|-----------|---------|---------|-----------|-------------|
| 实测值 | 0.18% | 0.28% | 0.47% | 0.011% | 0.003% | 0.94% | 0.18% |
| 国标值 | 0.17%~0.24% | 0.17%~0.37% | 0.4%~0.7% | ≤0.025% | ≤0.025% | 0.8%~1.1% | 0.15%~0.25% |

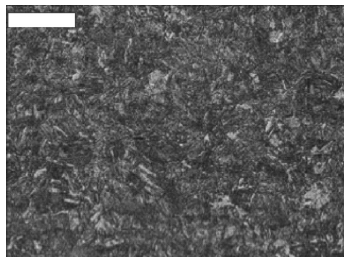


图3 回火索氏体+铁素体组织

以上分析结果表明,高压油管材质及热处理质量均良好。

1.2 断口特征分析

通过对断口进行初步分析,由裂纹低倍形貌可见裂纹源位于管内壁侧,见图4。

将裂纹源放大1000倍后,可看到清晰河流状准解理特征(图5)。

将裂纹扩展区放大5000倍后则呈现出疲劳扩展辉纹形状(图6);并且,在靠近管外壁处呈现典型的最后撕裂区形貌(图7)。

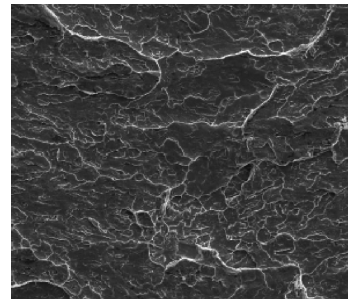


图5

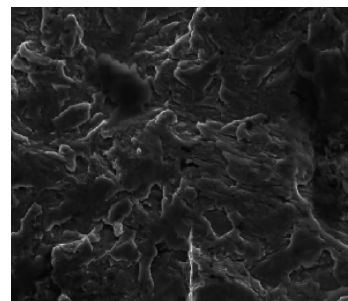


图6

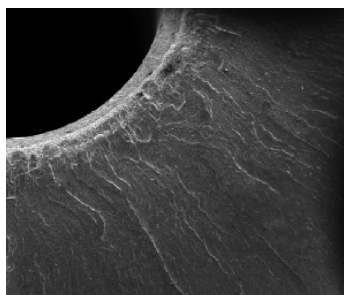


图4

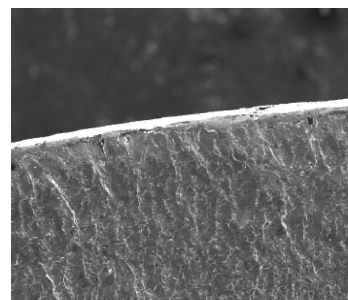


图7

由上述分析可判定, 断口处的断裂方式为疲劳断裂, 裂纹源发源于高压油管内壁, 沿径向扩展至外壁, 最终断裂。

根据疲劳理论, 零部件的疲劳寿命主要由裂纹起始寿命和裂纹扩展寿命两部分组成。裂纹起始寿命可以根据具体零件承受的载荷状态和应变幅度选用应变寿命方法或应力寿命方法计算; 裂纹扩展寿命可用断裂力学方法计算, 两者之和即为总疲劳寿命。因此, 作为解决断裂问题的突破口, 本文将从疲劳裂纹起始和疲劳扩展两方面加以分析。

2 疲劳裂纹起始及扩展分析

2.1 疲劳裂纹起始分析

将断裂高压油管在断面直径位置沿轴向切开, 观察断口附近区域。图 8 为断口附近区域实际照片, 由图可见, 断口附近管内壁粗糙度较差。

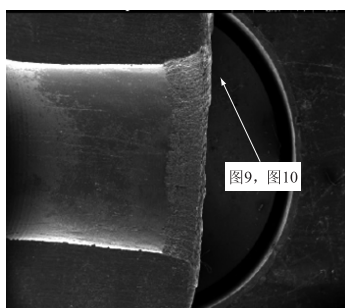


图 8 横切断口附近区域实际照片

将图 8 所示位置进一步放大观察后, 可以看到断口附近存在大量二次裂纹, 且断口裂纹源开口较宽, 见图 9 和图 10。



图 9

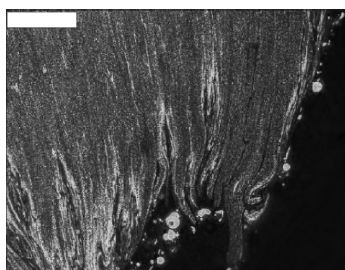


图 10

由此可见, 裂纹萌生于高压油管接头内粗糙度较大区域, 需要对该高粗糙度区域的成因进行具体分析。

2.2 疲劳裂纹扩展分析

通过研究发现, 该型高压油管组件采用低合金钢冷拔管, 接头部分采用经济性好, 生产效率高的冷镦工艺成型。而冷镦变形会在管内壁造成材质的挤压、折叠, 形成褶皱, 虽然在后续加工中有一道铰孔工序, 但受图纸尺寸限制, 部分褶皱未能完全加工掉, 留下了导致表面疲劳裂纹萌生的高粗糙度区域; 并且冷镦造成的挤压堆叠还在近内壁表面区域形成了垂直于轴向的流线特征(图 11), 从而降低了裂纹扩展的阻力。

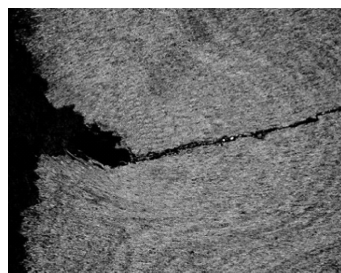


图 11 垂直于轴向的流线

2.3 疲劳裂纹起始及扩展原理分析

根据疲劳裂纹的起始及失稳扩展通用表达式:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \leq K_{IC}$$

式中: K_I 为应力强度因子; σ 为名义应力, 即裂纹位置处按无裂纹时计算得到的应力; Y 为形状系数, 与裂纹位置及大小有关; a 为裂纹尺寸, 表面粗糙度越大, 可认为裂纹尺寸越大; K_{IC} 为裂纹扩展门槛值, 为材料本身的固有属性。

应力强度因子是裂纹尖端应力应变场强度的度量, 当 σ 一定时, K_I 随 a 的增大而增大, 当 K_I 达到临界值 K_{IC} 时, 裂纹尖端的应力也达到了临界值, 从而令裂纹扩展。

由于高压油管的工作状态一定, 即名义应力 σ 一定; 裂纹源均发源于管内壁冷镦工艺造成的堆叠褶皱, 即裂纹形状系数 Y 一定。因此提高疲劳寿命需要从降低 a 值, 即从降低表面粗糙度和提高 K_{IC} , 即材质方面着手。

3 解决方案

3.1 疲劳裂纹萌生控制

由冷镦工艺造成的高压油管内壁堆叠褶皱宏观上表现为高粗糙度区域, 为疲劳裂纹萌生提供了便利条件。为提高高压油管疲劳强度, 首先需消除接

头内壁表面高粗糙度区域。在原有的冷墩接头及铰孔工序基础上,增加了一道内孔精磨工序,以降低内壁,尤其是冷墩造成的堆叠区域的表面粗糙度。

此外,还在高压油管液压试验后增加了一道高压内壁强化工序。其原理是:通过在油管内壁施加超高压,使高压油管内壁屈服,产生塑性变形,然后卸除压力;同时,由于高压油管外层材料的弹性收缩,使已经塑性变形的内层材料受到外层的弹性压缩而产生压应力,这样,高压油管内表面将处于压应力状态,而表面压应力状态对抑制疲劳裂纹萌生具有显著作用。

3.2 疲劳裂纹扩展控制

疲劳裂纹的扩展可以从两方面加以控制,一方面通过提高材质 K_{IC} 值的方式,达到提高寿命的目的;另一方面通过优化冷墩工艺,改善墩头材质的流线特征,避免出现利于疲劳裂纹扩展的,与轴向垂直的过度挤压带。

疲劳裂纹扩展门槛值 K_{IC} 可通过改变热处理工艺,改变材料金相组织的方式加以提高。该高压油管材料为 20CrMoA, 原热处理工艺为淬火+高温回火的调质工艺,其组织为回火索氏体+少量铁素体。研究表明^[2],该组织状态下材料的 K_{IC} 值较低,通过调整工艺,采用球化退火工艺,获得铁素体+球状渗碳体组织,这种组织的 K_{IC} 值相对较高。值得注意的是,虽然改变工艺后,材料抗拉性能有所下降,但经 Abaqus 软件模拟仿真进行复算后,判定强度值仍在设计许可范围内(图 12),并且由于退火组织含大量铁素体,材料塑性大幅提高,有利于减少冷墩过程中造成的缺陷。

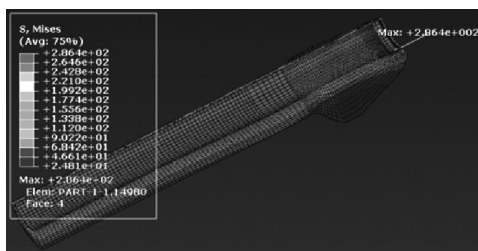


图 12 高压油管有限元模拟分析结果

配合改进热处理工艺后的材料机械性能,对冷墩工艺进行了相应改进。为避免一次变形量过大形成挤压带,增加了墩压次数,通过多次试验确定了工艺参数。改进后的冷墩接头基本消除了流线挤压现象,获得了较为理想的效果(图 13)。

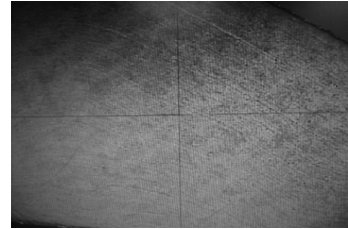


图 13 优化工艺后良好的流线

3.2 实践检验

以上改进通过装机试验验证,效果良好,新制的高压油管装机后未再出现冷墩接头断裂问题,亦未出现因工艺改进引起的新问题。

4 总结

本文首先通过对冷墩接头断裂的高压油管进行断裂原因分析,确定了断裂方式为疲劳断裂,然后针对裂纹源和裂纹扩展两大影响零件疲劳寿命的因素提出了工艺改进措施,包括改进热处理及冷墩工艺,增加精磨及高压内壁强化工序。经实践检验,改进措施收到了良好效果。

柴油机高压油管作为燃油系统重要零件,工作状态下承受复杂载荷;而制造过程又包括冷墩、热处理等多道工序。因此,造成高压油管失效的原因较多,应针对性地找出失效的具体原因,才能切实有效地解决问题。

参考文献

- [1] 白书战,贾迎军,张海龙,等,基于振动测试的发动机高压油管断裂问题分析[J]. I. C. E&Powerplant, 2007(3): 49-52.
- [2] Benson J P, Edmonds D V, Effect of microstructure on fatigue in threshold region in low-alloy steel [J]. Metal Science, 1978, 12(5): 223-232.