

船用柴油机电控喷油器针阀偶件耐久性分析

孔 晨^{1,2}, 金江善^{1,2}, 徐建新^{1,2}, 金 锋¹

(1. 上海船用柴油机研究所, 上海 201108;
2. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心, 上海 201108)

摘 要: 针对电控燃油喷射系统中针阀偶件的耐久性问题, 对某型电控喷油器原理进行阐述, 分析针阀偶件可能的失效机理。通过建模与仿真, 在机理分析的基础上重点对冲击疲劳寿命进行预测分析。通过试验对针阀偶件失效机理及预测寿命的准确性进行验证。试验结果证明耐久性分析模型有效, 可为同类部件的耐久性分析提供参考, 并为电控喷油器寿命设计优化提供支撑。

关键词: 柴油机; 电控喷油器; 针阀偶件; 失效; 耐久性

中图分类号: TK423.8⁺4 文献标志码: A 文章编号: 1001-4357(2023)01-0035-04

Durability Analysis of Needle Valve Assembly of Electronic Fuel Injector for Marine Diesel Engine

KONG Chen^{1,2}, JIN Jiangshan^{1,2}, XU Jianxin^{1,2}, JIN Feng¹

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China;
2. National Engineering Research Center of Special Equipment and Power System for Ship and Marine Engineering, Shanghai 201108, China)

Abstract: In view of the durability of the needle valve assembly in the electronic fuel injection system, the principle of a certain type of electronic fuel injector is described, and the possible failure mechanism of the needle valve assembly is analyzed. Through modeling and simulation, the impact fatigue life was mainly predicted and analyzed on the basis of mechanism analysis. The failure mechanism of needle valve assembly and the accuracy of life prediction were verified through tests. The test results show that the durability analysis model is effective, which can provide reference for the durability analysis of similar components, and provide support for the life design optimization of electronically controlled fuel injectors.

Key words: diesel engine; electronically controlled injector; needle valve assembly; failure; durability

0 引言

柴油机以其热效率高、功率范围广、启动迅速、维修简易、运行安全、使用寿命长等优势得以广泛应用, 在国民经济和国防建设中处于重要地位^[1]。其中, 船用柴油机是船舶运行的主要动力, 其性能与船舶的运行质量、运行效率、经济

性与安全性等息息相关^[2]。能源危机、全球气候变暖等问题的出现推动了柴油机向高可靠性、低排放的方向发展。电控高压共轨燃油系统应运而生, 改善了传统柴油机排放差、噪声大、耗油大等问题^[3]。此外, 有数据表明由燃油喷射系统发生故障而引起柴油机失效的故障数约占柴油机总故障数的 20%~30%^[4], 燃油喷射系统的可靠性会

显著影响柴油机可靠性。电控喷油器作为电控高压共轨燃油系统的核心部件和执行器，其性能直接影响柴油机整体性能，因此对于其可靠性的研究是提高高压共轨系统乃至柴油机整机可靠性的关键。针阀偶件作为喷油器喷油的最终执行偶件，其可靠性对喷油器的喷油特性具有重要影响^[5]，此外针阀偶件还长期处于高压、温度变化幅度大等恶劣工作环境中，所以对于针阀偶件的可靠性研究具有一定工程价值。目前大多数学者^[5-12]主要针对针阀偶件的密封性和喷油特性进行研究。吴帅等^[13]采用化学分析、金相组织分析等手段，对针阀体出现故障后的失效原因进行了分析，但并未对其耐久性进行研究。袁长军等^[14]通过对针阀体金相组织的观察，对比不同加工工艺对针阀体耐磨性的影响，但并未考虑工作载荷对针阀体使用寿命的影响。陈云霞等^[15]在总结以往几种定延寿方法适用原则的基础上，提出一套基于故障行为的寿命分析方法，其成果对本文的研究具有指导意义。

本文采用试验与仿真相结合的方法对冲击疲劳作用下针阀偶件的耐久性进行系统分析。首先针对针阀偶件的耗损型失效机理进行系统地定性分析，在此基础上结合工作剖面，对其进行数字化建模及仿真，重点对其在冲击疲劳下的寿命进行理论分析，最后开展试验对针阀偶件耗损机理及寿命分析结果的准确性进行验证，以证明针阀偶件的可靠性以及耐久性分析模型的有效性。

1 针阀偶件失效机理分析

1.1 电控喷油器工作原理

图1为典型的蓄压式电控喷油器工作原理图。来自共轨管的高压油流入喷油器头部的蓄压腔后，一部分高压燃油经进油量孔流入与进油量孔相连的控制腔，其余高压燃油流入盛油槽。不通电时，电磁阀中的钢球在弹簧力的作用下关闭出油量孔，高压油流入控制腔，控制腔内压力升高，高压油在控制柱塞顶部施压，针阀由于上下承压面积的不同而关闭。通电时，电磁力使电磁阀中的衔铁吸合，在液压力的作用下，钢球抬起，出油量孔打开，出油量孔与进油量孔连通，控制腔压力下降；盛油腔内的燃油始终保持高压状态，当针阀下端所受压力比针阀弹簧力和柱塞压力更大时，针阀抬起，喷油开始。再次断电，电磁阀弹簧力使钢球回

落，出油量孔关闭，高压燃油流入控制腔，控制腔压力上升，作用于针阀上端的压力逐渐增大，当压力增大到设定值时，针阀再次关闭，如此循环实现不断地喷油。

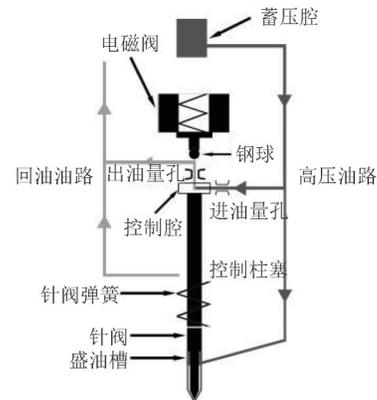


图1 电控喷油器工作原理图

1.2 机理分析

机理分析的目的在于定性得出针阀偶件可能的失效机理，为数字化建模和耐久性仿真提供依据。通过电控喷油器的结构和工作原理可知在工作过程中针阀偶件可能面临的失效机理有4种：(1) 针阀与针阀体之间撞击引起冲击疲劳失效机理。(2) 针阀与针阀体之间相对运动，运动行程即针阀升程，存在磨损失效机理。(3) 针阀体头部伸入燃烧室，燃烧室温度波动从几十K到上千K，会引发热疲劳失效。(4) 内部油压变化引起高压脉动疲劳失效。以第1种失效的机理为例讨论针阀偶件的耐久性。

2 针阀偶件耐久性仿真

2.1 工作剖面

针阀偶件任务剖面取喷油器用于推进工况时对应的工作剖面，如表1所示，寿命指标为6 000 h。

表1 工作剖面

序号	轨压/MPa	频率/(次·min ⁻¹)	时间/h
1	160	533.0	600
2	140	473.3	4 200
3	70	247.4	1 200

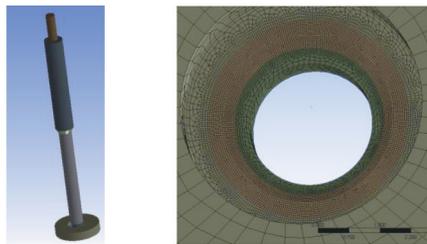
2.2 模型仿真及应力分析

基于已知工作载荷对针阀偶件进行数字化建模仿真。该型电控喷油器的针阀体材料为18CrNi8，针阀材料为W6Mo5Cr4V2。表2列出了其相关的材料属性。

表2 材料参数

材料名称	屈服极限/MPa	泊松比	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)
W6Mo5Cr4V2	930	0.3	218	7 850
18CrNi8	735	0.3	201	7 800

由于针阀主要撞击在针阀体的底座上，所以对撞击模型进行简化，去掉针阀顶端部分以及针阀体底座下部，采用六面体网格以提高计算精度。在主要的撞击区域采用细网格，直接接触的撞击面网格尺寸为0.05 mm。建立的撞击计算网格模型如图2所示，动力学计算边界参数设置如表3所示。



(a) 针阀偶件简化模型 (b) 底座局部网格

图2 针阀与底座计算网格

表3 动力学计算参数

序号	油压/MPa	撞击初速度/(m·s ⁻¹)	受力/N
1	160	0.75	313
2	140	0.68	293
3	70	0.46	207

图3显示了不同时刻针阀偶件撞击的应力云图，可以看到撞击首先发生在一个小区域，随后逐渐扩展为一个环形撞击面。

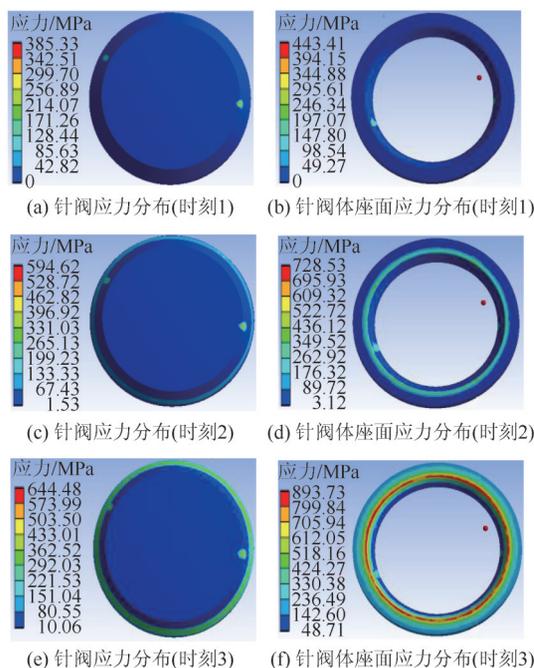
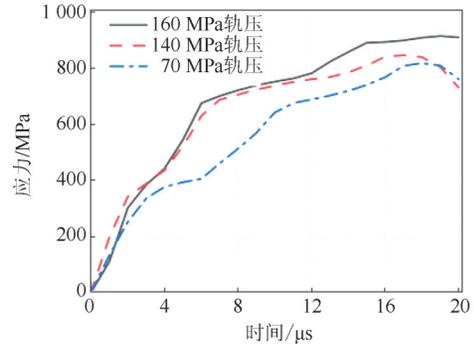
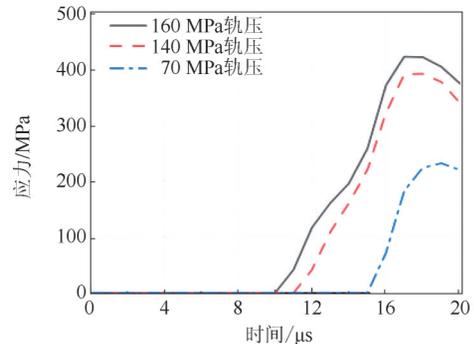


图3 撞击面应力分布

根据仿真结果得到针阀与针阀体座面的应力随时间变化的数据，后续将利用这些数据对针阀偶件的寿命进行分析，针阀偶件应力随时间变化曲线如图4所示。从图4可知，在一次撞击过程中应力先增大后减小，在撞击过程中针阀以及针阀体所受应力存在峰值。



(a) 针阀体座面应力随时间变化曲线



(b) 针阀体应力随时间变化曲线

图4 应力随时间变化曲线

2.3 耐久性分析

通常认为当循环数大于10⁷时，即为无限寿命，此时对应的疲劳强度即为疲劳极限，但随着对疲劳问题的研究不断深入，发现不同材料的疲劳极限在循环数大于10⁷范围内有可能会继续下降。目前对于这种问题的解决方式主要是将S-N曲线进行延伸拟合^[16]。

针阀与针阀体座面撞击过程应力比R=0，采用Goodman平均应力修正方法进行修正得到R=-1时的等效平均应力，再通过S-N曲线得到对应的理论计算寿命。Goodman修正公式如下：

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right) \quad (1)$$

式中： σ_a 和 σ_m 分别为应力幅值和平均应力； σ_s 为抗拉强度； σ_{-1} 为R=-1对应的疲劳强度。

取在各个工况下的最大应力作为耐久性计算指标的输入，结合名义应力法进行保守估计，得到寿命预测的理论结果，如表4和表5所示。

表4 针阀理论寿命

项目	参数		
	160	140	70
轨压/MPa	160	140	70
最小应力/MPa	0	0	0
最大应力/MPa	423.91	392.96	232.37
拉伸强度极限 σ_b /MPa	2 080	2 080	2 080
材料疲劳性能相关常数 b	3.16	3.16	3.16
实际周数/周	1.92E7	1.19E8	1.78E7
等效平均应力 σ_e /MPa	236	217	123
许用疲劳次数	2.23E8	2.90E8	1.74E9
损伤 D_i	8.63E-2	0.410 85	0.010 22
损伤 D	0.507 3		
理论寿命	3.08E8		

表5 针阀体座面理论寿命

项目	参数		
	160	140	70
轨压/MPa	160	140	70
最小应力/MPa	0	0	0
最大应力/MPa	914.9	846.6	818.78
拉伸强度极限 σ_b /MPa	1 180	1 180	1 180
材料疲劳性能相关常数 b	4.89	4.89	4.89
实际周数/周	1.92E7	1.19E8	1.78E7
等效平均应力 σ_e /MPa	747	660	626
许用疲劳次数	1.61E9	2.96E9	3.81E9
损伤 D_i	0.012	0.040	0.005
损伤 D	0.056 9		
理论寿命	2.75E9		

Miner理论是应用比较广泛的一种损伤累积模型,该理论给出的损伤模型如下:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{f,i}} \quad (2)$$

式中: $N_{f,i}$ 为第*i*级载荷单独作用时对应的疲劳寿命; n_i 为第*i*级载荷作用的循环数。采用Miner理论来计算疲劳损伤,得到每运行6 000 h后针阀偶件的损伤 D ,根据损伤累积原则,当 $D=1$ 时认为发生失效,从而得到针阀偶件的寿命,取针阀偶件的最短寿命作为冲击疲劳寿命,即 3.08×10^8 次循环,约等于11 846 h,预测寿命大于要求的 1.56×10^8 次循环。结果表明,针阀偶件的耐久性满足6 000 h的工作要求。

3 耐久性试验

在喷油器整机装配后按照加速剖面进行耐久性试验,重点关注针阀偶件,目的在于对针阀偶件的失效机理以及耐久性仿真结果进行验证。

对喷油器进行8 000 h加速寿命试验,对应的循环数为 2.37×10^8 ,加速因子取1.5,等效于在

工作剖面下 3.55×10^8 次循环。在试验过程中持续监测喷油器的喷油量,当喷油器运行7 627 h时,喷油量误差过大,根据经验认为该喷油器已经不能满足工作要求。随后进行密封性测试,发现针阀偶件的密封性退化,拆检喷油器并对针阀头部进行检查,针阀试验前后的影像如图5所示。针阀头部存在明显撞击痕迹,原密封线由线状变为带状,因此认为该针阀偶件已不满足工作要求。试验得到的等效循环数即针阀偶件的疲劳寿命为 3.39×10^8 ,与理论计算结果 3.08×10^8 接近,证明理论计算结果具有一定的准确性。

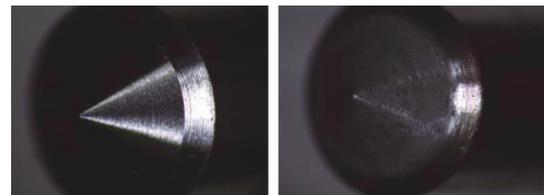


图5 针阀试验前后影像

4 总结

(1) 对针阀偶件某种失效机理在给定工况下的针阀偶件进行数字建模和应力分析,得到针阀偶件在工作过程中应力随时间的变化情况以及在各工况下的应力最大值。

(2) 根据应力最大值进行理论寿命计算,经分析得出针阀偶件理论使用寿命约为11 846 h,满足不低于6 000 h的要求。

(3) 进行8 000 h加速寿命试验,试验结果表明针阀偶件受到明显的冲击作用,针阀偶件密封性变差,冲击疲劳失效机理得到验证。试验得到的寿命结果与理论预测寿命结果接近,寿命预测结果的准确性得到验证。

参考文献

- [1] 伍赛特. 船用柴油机应用前景展望[J]. 柴油机设计与制造, 2018, 24 (3): 1-4.
- [2] 陆江丰. 船用柴油机故障分析及解决办法[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29 (4): 49-50.
- [3] 福长聪, 长田英朗, 冈本毅, 等. 日欧新时代的清洁柴油机[J]. 国外内燃机, 2016, 48 (6): 26-32.
- [4] 付阳. 柴油机燃油供给系统复合故障机理及行为建模分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- [5] 游鹏. 电控喷油器针阀偶件密封特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

(下转第43页)