

变速器壳体低周疲劳优化设计

罗义建, 汤天宝, 彭国民, 吴才勇, 余春祥, 秦玉林, 何维康

(浙江吉利动力总成研究院, 杭州 315336)

摘要: **目的** 分析变速器壳体驻车耐久试验的失效根本原因, 对变速器壳体进行低周疲劳优化设计。**方法** 首先排查壳体的化学成分、铸造质量, 排除材料和工艺引起失效问题的可能性, 然后通过有限元方法分析驻车轴孔的最大拉应变、驻车工况壳体变形、轴孔接触区域。根据局部应变分布特征, 提出驻车轴修形的优化方案, 并且根据壳体材料的低周疲劳参数, 确定 Coffin-Manson 模型, 并根据该模型预测壳体驻车轴孔优化前后的疲劳寿命。**结果** 驻车轴孔的最大拉应变高达 0.95%, 确定应变过大是导致壳体失效的根本原因。驻车轴度修形的优化方案将最大拉应变降低到 0.40%, 塑性应变占比由 42%降低到 5%, 疲劳寿命的预测值由原来的 175 次提高到 7980 次, 满足试验循环次数 1000 次的要求, 最终优化物理样机通过了驻车耐久试验验证。**结论** 使用的 Coffin-Manson 模型参数能准确地预测变速器壳体的低周疲劳寿命, 驻车轴小角度修形优化方案能够有效解决局部应变过大的失效问题, 具有一定的工程参考意义。

关键词: 低周疲劳; 有限元方法; Coffin-Manson 模型; 塑性应变

中图分类号: TJ81+0.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0117-06

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.10.019

Transmission Housing Low-cycle Fatigue Optimization Design

LUO Yi-jian, TANG Tian-bao, PENG Guo-min, WU Cai-yong, YU Chun-xiang, QIN Yu-lin, HE Wei-kang

(Zhejiang Geely Powertrain Research Institute, Hangzhou 315336, China)

ABSTRACT: This paper aims to find out the root cause of the failure of transmission housing park lock test issue and optimize the low cycle fatigue life of transmission housing. Firstly, checked the housing chemical component and cast quality, excluded the material and casting quality issue. And then analyzed the housing strain is up to 0.95%, confirmed the root cause of the housing crack is big strain amplitude. Finally, according to the housing system deformation and contact area results of finite element method model, proposed a proposal of shaft modification, confirmed the Coffin-Manson model according to housing material low-cycle fatigue parameters, predicted the fatigue life of the housing. The shaft sharp modification proposal decreased the strain to 0.40%, plastic strain occupancy rate decreased from 42% to 5%. The predicted fatigue life of the housing increased from 175 cycles to 7980 cycles, which can fulfill the 1000 cycles requirement, and the physical samples had passed the test. The Coffin-Manson model parameters used in this paper can predict the low cycle fatigue life of transmission housing accurately, the shaft modification proposal can solve local big strain failure issue effectively, which is significance to engineering.

KEY WORDS: low-cycle fatigue; finite element method; Coffin-Manson model; plastic strain

收稿日期: 2021-05-29; 修订日期: 2021-07-10

Received: 2021-05-29; Revised: 2021-07-10

作者简介: 罗义建 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为车辆工程。

Biography: LUO Yi-jian (1986—), Male, Master, Engineer, Research focus: vehicle engineering.

引文格式: 罗义建, 汤天宝, 彭国民, 等. 变速器壳体低周疲劳优化设计[J]. 装备环境工程, 2021, 18(10): 117-122.

LUO Yi-jian, TANG Tian-bao, PENG Guo-min, et al. Transmission housing low-cycle fatigue optimization design[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 117-122.

面对市场压力,各主机厂纷纷对变速器进行了轻量化设计,制定了严格的质量控制目标。变速器壳体作为变速器各系统的支撑零部件,是尺寸、质量最大的零部件,是减轻质量的主要对象之一。变速器壳体的主要作用是支撑轴齿系统、换挡系统、驻车系统、变速器附件等。变速器壳体不仅存在高周疲劳部位(如轴承座承受轴齿交变周期载荷,特点是循环次数多,载荷相对较小),还存在低周疲劳部位(如驻车轴孔承受非常大的冲击载荷)。高周疲劳发生在弹性变形区,通常采用 Miner 疲劳累积损伤定理来评价,疲劳参数容易获得,方法成熟。低周疲劳发生在塑性变形区,疲劳参数不容易获得,且计算精度不高,因此建立精确有效的低周疲劳评价模型以及优化方法十分必要。

低周疲劳中,塑性应变能使材料微观组织结构发生不可逆变化^[9-12]。研究结果表明,铸造铝合金 A1Si9Cu3 在应变控制下表现为循环硬化,且应变幅值越大,硬化速率越高。随着应变幅值的增大,疲劳寿命降低明显;合金塑性应变、弹性应变与断裂时的载荷反向次数之间呈直线关系,实验结果符合 Coffin-Manson 公式^[1-8,11]。

在变速器壳体开发初期,由于低周疲劳问题难以预测,驻车耐久试验过程中,壳体发生开裂。文中针对变速器壳体低周疲劳失效问题进行了分析,基于 Coffin-Manson 理论,建立了低周疲劳预测模型,对壳体低周疲劳寿命进行了预测。最终提出了一种适应性变形设计理念,有效降低了极限工况的应变,提高了壳体低周疲劳寿命。

1 失效原因分析

变速器壳体在台架验证过程中,壳体驻车轴孔边缘位置发生裂纹失效,如图 1 所示。为了保障车辆的驻车安全,驻车耐久台架试验包含 2 个工况:坡道耐久工况和极限驻车工况。其中极限驻车工况发生 1000 次,属于低周疲劳失效问题,文中主要对其进行分析。

铸造工艺容易产生气孔、夹杂等缺陷,因此失效原因分析除了设计强度校核外,通常还需要进行材料化学成分、铸造工艺的排查^[13-15]。为了保证项目进度,以上调查同步开展。



图 1 壳体驻车轴孔裂纹

Fig.1 Housing crack of park lock hole

1.1 化学成分及铸造工艺分析

从失效壳体上切取样块进行化学成分分析,结果见表 1。结果表明,变速器壳体的本体材料符合技术要求,材料方面不是壳体失效的根本原因。

针对壳体失效区域进行剖切、CT 扫描,未发现明显气孔,如图 2 所示。结果表明,铸造质量良好,无质量问题,铸造质量方面也不是该壳体失效的根本原因。

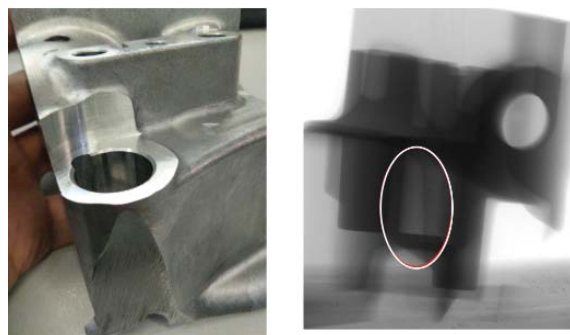


图 2 样件剖切和 X 光扫描结果

Fig.2 Sample cutting and X-scanning result

表 1 壳体铝合金材料化学成分

Tab.1 Aluminium chemical components of housing

Components	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Requirement	9.60%~12.00%	≤1.30%	1.50%~3.50%	≤0.50%	≤0.30%	≤0.05%	≤0.50%	≤1.00%	≤0.30%
Test results	10.62%	0.85%	2.45%	0.16%	0.27%	0.03%	0.06%	0.70%	0.04%

1.2 壳体应变分析

根据台架实际工况,搭建驻车系统 FEA 模型:变速器通过发变接合面安装在台架上,约束离合器壳体发变接合面的自由度;除壳体外,模型需要建立驻车轴、棘轮棘爪、输出轴、轴承等模型,并建立接触,以获得壳体变形实际刚度;通过外在交变载荷施加轴承座载荷、差速器输出端的扭矩。

为了获得准确的结果,对壳体失效区域及驻车轴的网格进行细化,网格尺寸为 1 mm,有限元模型如图 3 所示。同时,考虑到壳体驻车轴孔承受载荷非常大,应力已超过材料的屈服应力,为了计算更真实的应力应变结果,赋予材料非线性属性,材料的应力应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知,当材料超过屈服应力后,应力变得不敏感,因此采用应变更适合评估壳

体的强度风险。

铝合金材料在交变载荷的作用下表现为循环硬化^[1-8]。当循环应变幅值大于 0.6% 时，随着应变幅值增加，铝合金的低周疲劳寿命显著降低^[3]。根据驻车极限工况有限元分析结果（如图 5 所示），最大拉伸应变为 0.95%，因此，推断拉伸应变过大是试验失效的根本原因。

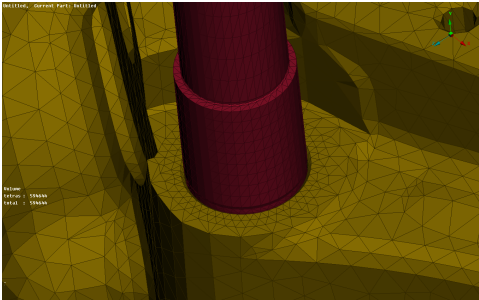


图 3 壳体驻车有限元模型
Fig.3 FEA model of park lock system

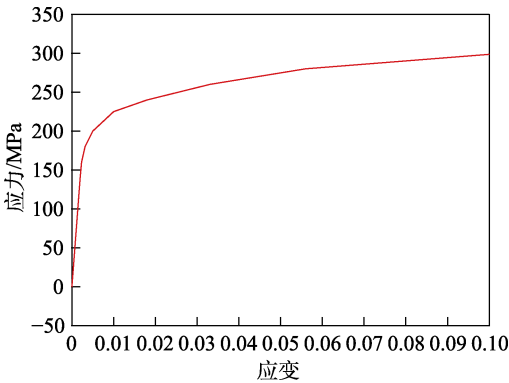


图 4 壳体材料应力应变曲线
Fig.4 Stress-strain curve for housing material

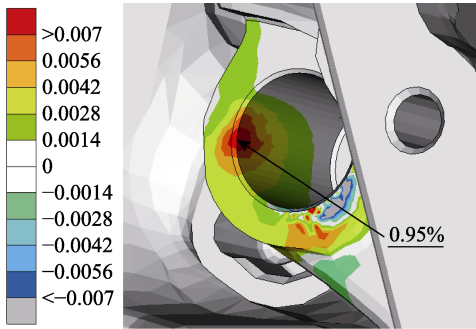


图 5 壳体驻车轴孔应变结果
Fig.5 Strain of housing park lock hole

2 低周疲劳寿命预测及优化

2.1 铝合金 AlSi9Cu3 的 Coffin-Manson 模型

根据 Coffin-Manson 模型，总应变由塑性应变和弹性应变组成^[5]：

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_e}{2}$$

式中： $\frac{\Delta \varepsilon_t}{2}$ 为总应变幅值； $\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$ 为塑性应变幅值； $\frac{\Delta \varepsilon_e}{2}$ 为弹性应变幅值。

根据 Coffin-Manson 关系式和引入弹性模量后的 Basquin 关系式，总应变与低周疲劳寿命间的关系可表示为：

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c + \frac{\sigma_f' (2N_f)^b}{E}$$

式中： ε_f' 为疲劳延性系数； c 为疲劳延性指数； σ_f' 为疲劳强度系数； b 为疲劳强度指数； $2N_f$ 为发生疲劳破坏时的载荷反向次数，即 2 倍疲劳寿命； E 为杨氏模量^[5]。

根据铝合金材料 AlSi9Cu3 的力学参数特性，拟合了壳体低周疲劳参数，见表 2。

表 2 壳体铝合金材料低周疲劳参数					
Tab.2 Housing aluminium low cycle fatigue parameter					
Parameter	ε_f'	c	σ_f' /MPa	b	E /MPa
Value	0.251 3	-0.826 4	332	-0.091	71 000

根据 Coffin-Manson 模型计算了壳体材料低周疲劳的弹性应变和塑性应变的关系，如图 6 所示。由图 6 可知，为了使极限驻车验证次数达到 1000 次以上，总应变范围的优化目标为小于 0.6%。

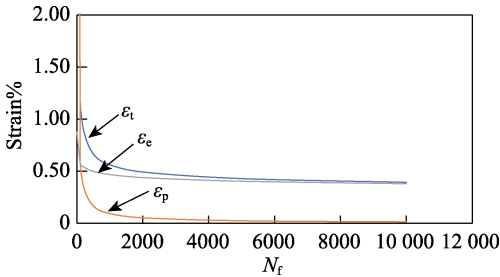


图 6 应变-寿命曲线
Fig.6 Strain-fatigue life curve

2.2 壳体低周疲劳预测及优化

根据 CAE 的仿真结果，极限驻车工况下，驻车轴孔最大拉应变为 0.95%。当驻车棘爪脱出时，驻车轴孔不受载，最小拉伸应变为 0%，总应变为 0.95%。根据 Coffin-Manson 预测模型，壳体的疲劳寿命预测为 175 次，预测结果与试验结果吻合。分析有限元的系统变形结果（如图 7 所示）发现，轴的弯曲变形以及轴孔配合间隙会导致轴孔偏载，接触区域集中在孔口区域，此处产生较大的应变。

为了降低壳体驻车轴孔的应变,提出了以下几个方案:

- 1) 增加壳体壁厚,增加壳体刚度;
- 2) 在回转轴孔内嵌一个钢套,与壳体过盈配合,增大孔的受力面积;
- 3) 增加轴孔的配合长度,增强系统刚度;
- 4) 轴修形,让接触区域下沉,增加孔的受力区域。

有限元分析结果(见表3)表明,方案1和方案3的优化效果非常小,原因是轴相对壳体刚度大得多,在有限的空间对壳体进行优化无法改变壳体偏载的现象。方案2的效果最好,最大拉应变仅有0.3%,但改进成本高,需要额外引入一个钢套,如图8所示。

为了降低应变,改善接触区域,方案4采用在轴上修形让接触区域下沉,优化方案如图9所示。该方案增大了孔壁的受力区域,有效地降低了应变,应变降低到0.40%,满足优化目标。此方案基本不增加成

本,仅需要在加工轴的时候增加一道修形工序。

优化前后的低周疲劳参数对比见表4,优化后的寿命次数由175次提高到7980次,其中优化前塑性应变占总应变的42%,优化后塑性应变仅占5%,大大提高了弹性应变的比例,有效地提高了结构的低周疲劳寿命。优化样机顺利通过试验验证也证明了预测模型的有效性。

表3 优化方案对比

Tab.3 Comparison of optimization scheme

No.	Proposal description	Max strain/%	Cost
1	Increase the wall thickness of housing	0.94	Low
2	Add a sleeve to the hole	0.30	High
3	Increase the length of the hole	0.92	Low
4	Shaft modification	0.40	Low

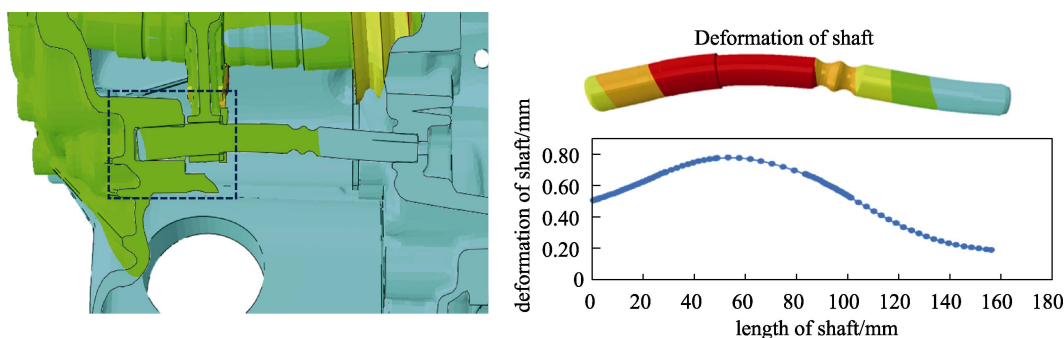


图7 系统变形结果

Fig.7 System deformation results

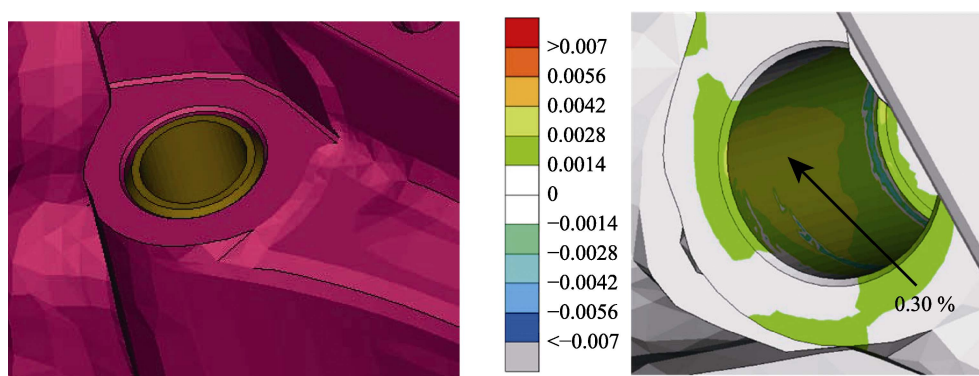


图8 驻车轴修形优化方案2及应变结果

Fig.8 Optimization scheme 2 and strain results of parking axle modification

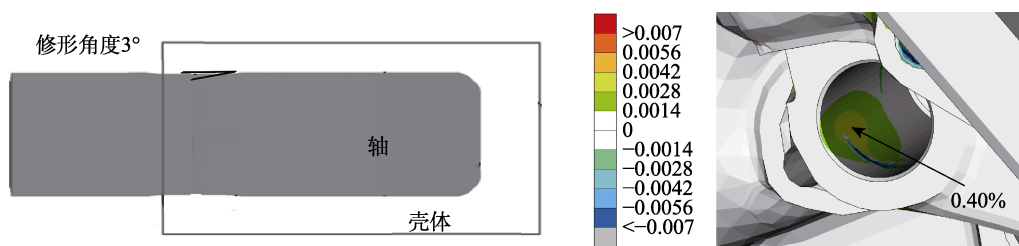


图9 驻车轴修形优化方案4及应变结果

Fig.9 Optimization scheme 3 and strain results of parking axle modification

表 4 优化前后寿命及应变结果对比

Tab.4 Comparison of fatigue life and strain results before and after optimization

Proposal	N_f	$\varepsilon_t/\%$	$\varepsilon_p/\%$	$\varepsilon_e/\%$
Base	175	0.95	0.40	0.55
Optimization proposal	7980	0.40	0.02	0.39

3 结论

1) 变速器壳体驻车试验失效的根本原因是受载壳体应变过大, 通过降低壳体应变能有效提高其低周疲劳寿命。

2) Coffin-Manson 模型能够有效地预测变速器壳体的低周疲劳行为, 为壳体的优化设计提供有效的优化手段, 具有重要的工程参考意义。

3) 轴的修形优化方案能够有效地改善壳体局部接触状态, 降低最大拉应变, 同时又是一种设计改动最小, 成本最经济的优化方案。

参考文献:

- [1] 王栓柱. 金属疲劳[M]. 北京: 科学技术出版社, 1985.
WANG Xue-zhu. Metal fatigue[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1985.
- [2] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
U Hao. Fatigue strength[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [3] 郑飞, 何玉怀, 苏彬. 低周疲劳寿命预测模型分析[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(10): 192-194.
ZHENG Fei, HE Yu-huai, SU Bin. Analysis of low cycle fatigue life prediction models[J]. Research and exploration in laboratory, 2007, 26(10): 192-194.
- [4] 高超干, 胡明敏. 基于应变能的复杂应力场低周疲劳分析[J]. 力学季刊, 2015, 36(1): 81-87.
GAO Chao-gan, HU Ming-min. Complex stress field low cycle fatigue life prediction model based on plastic energy[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2015, 36(1): 81-87.
- [5] 徐鹏. 估计金属材料应变疲劳性能参数的新方法[J]. 江苏航空, 2011(增刊): 19-22.
XU Peng. A new method for estimating strain fatigue property parameters of metallic materials[J]. Jiangsu aviation, 2011(s1): 19-22.
- [6] 罗阳军, 亢战, 邓子辰. 多工况下结构鲁棒性拓扑优化设计[J]. 力学学报, 2011, 43(1): 227-234.
LUO Yang-jun, KANG Zhan, DENG Zi-chen. Robust topology optimization design of structures with multiple load cases[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2011, 43(1): 227-234.

- [7] 刘斌, 何国求, 樊康乐, 等. 铸造铝合金 $AlSi_9Cu_3$ 低周疲劳行为[J]. 功能材料, 2014, 45(4): 4047-4051.
LIU Bin, HE Guo-qiu, FAN Kang-le, et al. Low-cycle fatigue behavior of cast $AlSi_9Cu_3$ aluminum alloy[J]. Journal of functional materials, 2014, 45(4): 4047-4051.
- [8] LADOS D A, APELIAN D. Fatigue crack growth characteristics in cast Al-Si-Mg alloys: Part II. Life predictions using fatigue crack growth data[J]. Materials science and engineering: A, 2004, 385(1-2): 187-199.
- [9] 刘向东, 佟立丰, 丰崇友, 等. 应变状态下 ZL114A 铝合金低周疲劳行为的研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2013, 31(2): 303-305.
LIU Xiang-dong, TONG Li-feng, FENG Chong-you, et al. Research on low cycle fatigue behaviors of aluminum alloy ZL114A[J]. Journal of Jiamusi University (natural science edition), 2013, 31(2): 303-305.
- [10] COFFIN L F. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1954, 76: 931-950.
- [11] 车欣, 徐志军, 陈立佳, 等. Al-Si-Cu-Mg(-Er)铸造铝合金的低周疲劳行为[J]. 铸造, 2011, 60(1): 20-23.
CHE Xin, XU Zhi-jun, CHEN Li-jia, et al. Low-cycle fatigue behavior of cast Al-Si-Cu-Mg(-Er) aluminum alloy[J]. Foundry, 2011, 60(1): 20-23.
- [12] ELLYIN F. Effect of tensile-mean-strain on plastic strain energy and cyclic response[J]. Journal of engineering materials and technology, 1985, 107(2): 119-125.
- [13] 张振, 李静, 张忠平. 航空铝合金疲劳参数的理论估算方法分析[J]. 失效分析与预防, 2011, 6(1): 28-31.
ZHANG Zhen, LI Jing, ZHANG Zhong-ping. Estimation methods for fatigue parameters of aluminum alloys in aviation industry[J]. Failure analysis and prevention, 2011, 6(1): 28-31.
- [14] 陈胤楨, 郝红, 王利发, 等. 7050-T7451 铝合金低周疲劳平均应力松弛规律[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(3): 427-431.
CHEN Yin-zhen, HAO Hong, WANG Li-fa, et al. Mean stress relaxation during low-cycle fatigue of aluminum alloy 7050-T7451[J]. Journal of materials science and engineering, 2013, 31(3): 427-431.
- [15] MONDOLFOL F. 铝合金的组织与性能[M]. 王祝堂译. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
MONDOLFOL F. Microstructure and properties of aluminum alloys[M]. WANG Zhu-tang Translate. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [16] 王建伟, 何佳, 赵涛, 等. 高压开关用铸态拐臂断裂失效分析[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 200-204.
WANG Jian-wei, HE Jia, ZHAO Tao, et al. Cracking failure analysis on the cast crank arm of high voltage apparatus[J]. High voltage apparatus, 2015, 51(4): 200-204.

- [17] 郑鑫, 唐辉, 张文昌, 等. 高压共轨泵出油阀座开裂失效分析[J]. 现代车用动力, 2016(4): 16-19.
ZHENG Xin, TANG Hui, ZHANG Wen-chang, et al. Fracture failure analysis on outlet valve seat in high pressure common rail pump[J]. Modern vehicle power, 2016(4): 16-19.
- [18] 毛力奋. 考虑可靠性和鲁棒性的机械接头有限元设计优化[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(3): 101-105.
MAO Li-fen. Finite element design optimization on mechanical joint considering reliability and robustness[J]. Computer aided engineering, 2010, 19(3): 101-105.
- [19] 王先瑞. 发动机缸盖低周疲劳分析方法研究[J]. 汽车实用技术, 2017(16): 74-76.
WANG Xian-rui. Low cycle fatigue analysis method study of cylinder head[J]. Automobile applied technology, 2017(16): 74-76.
- [20] 路明, 王振. 缸盖低周疲劳分析方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(1): 87-89.
LU Ming, WANG Zhen. Low cycle fatigue analysis method study of cylinder head[J]. Machine building & automation, 2016, 45(1): 87-89.
- [21] 张素, 邓爱林, 廖春平. DY08 型铝合金弹性联轴器的断裂失效分析[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(10): 102-105.
ZHANG Su, DENG Ai-lin, LIAO Chun-ping. Fracture failure analysis on DY08 aluminum alloy elastic coupling[J]. Machine design and manufacturing engineering, 2018, 47(10): 102-105.