

环境及其效应

18CrNi4WA 钢渗碳针阀体开裂失效分析

吴帅¹, 王长鹏¹, 苏艳¹, 陈喜栋¹, 张凯¹, 赵丽阳²

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039, 2. 中国船舶工业综合技术经济研究院, 北京 100081)

摘要: **目的** 研究 18CrNi4WA 钢渗碳针阀体开裂失效原因。**方法** 通过化学成分分析、断口扫描分析、金相组织分析、能谱分析等测试手段, 对 18CrNi4WA 钢渗碳针阀体的断裂模式及失效原因进行分析。**结果** 针阀体失效件原始材料符合针阀体制造要求, 但渗碳淬火温度过高, 未得到最优的渗碳层组织, 燃油中存在的硫元素导致喷油孔位置产生严重腐蚀, 燃油局部压力的变化导致针阀体表面产生空蚀损伤, 裂纹起始于喷油孔圆周边, 自裂纹源向外发散呈月牙状, 为典型疲劳断裂特征。**结论** 腐蚀与空蚀损伤的协同作用加快裂纹的萌生, 使针阀体在热疲劳及机械振动等交变载荷的作用下产生疲劳开裂, 使用寿命大为降低。

关键词: 针阀体; 18CrNi4WA 钢; 失效分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.07.016

中图分类号: TK413

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)07-0075-05

Cracking Failure of Carburized Injector Valve of 18CrNi4WA Steel

WU Shuai¹, WANG Chang-peng¹, SU Yan¹, CHEN Xi-dong¹, ZHANG Kai¹, ZHAO Li-yang²

(1. Southwest Research Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2. China institute of marine technology and economy, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: Objective To investigate cracking failure reasons of the carburized injector valve made of 18CrNi4WA steel. **Methods** The fracture modes and failure reasons of the injector valve were analyzed by means of chemical composition analysis, SEM analysis, metallographic examination and energy spectrum analysis. **Results** The original material of the needle valve was in conformity with the manufacturing requirement. But due to the high carburizing quenching temperature, the best carburized layer structure was not obtained. The sulfur element in fuel caused serious corrosion of injection holes. Changes of the local pressure in the fuel oil caused cavitation damage on the surface of the needle valve body. The crack began at the circumferential surface of the injection hole and radiated from the crack source to the crescent shape. It was called as typical fatigue fracture. **Conclusion** Synergistic effects of the corrosion and cavitation damage promote crack initiation and produces fatigue cracking under the action of the thermal-mechanics alternate fatigue load. The service life of the injector valve was greatly reduced.

KEY WORDS: injector valve; 18CrNi4WA steel; failure analysis

柴油机喷油器有柴油机心脏之称, 是柴油机燃油系统中的关键部件, 它将喷油泵供给的高压适量燃油按一定的方向、贯穿度以均匀的雾状喷入柴油机燃烧室, 并与气缸内的空气充分混合形成可燃气体, 可燃混合气体形成的质量及时间特性直接影响柴油机的工作过程^[1-2]。针阀体作为喷油器的精密偶件, 其好

坏对柴油机整机性能至关重要^[2-5]。喷油器长期在高温、高压、燃油往复磨损和冲击、腐蚀等极其恶劣的条件下工作。因此, 要求喷油嘴偶件(针阀体)具有高的耐磨性和接触疲劳强度、良好的抗回火稳定性和耐腐蚀性能^[6-8]。

现代轿车和卡车均使用高喷射压力, 柴油机喷油

器通常在 25 MPa 或以上的压力下工作。高的工作压力容易产生气蚀现象,导致针阀体的性能劣化和结构损坏^[9-10]。通常针阀体的表面均进行渗碳处理,以使其具有高的耐磨性、接触疲劳强度和腐蚀性能等。在实际使用过程中,喷油嘴针阀体开裂失效的故障时有发生。

文中针对在服役期开裂的某型喷油嘴针阀体进行了失效分析,样件材质为 18CrNi4WA 钢,表面经渗碳淬火处理。样件宏观形貌如图 1 所示,样件服役过程中在轴径方向产生贯穿裂纹,喷油孔下方圆角处出现较多粗糙麻点,将样件沿裂纹方向掰开,可见油孔附近存在大量裂纹。

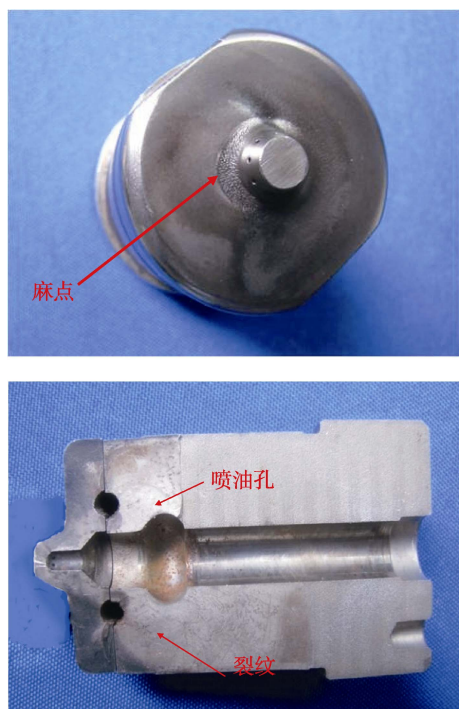


图 1 断裂样件宏观形貌

1 试验方法

在样件断口处截取试样,利用 ICP 分析仪进行化学成分分析,并将样件沿油孔进行切割取样,采用 FEI Quanta 200 型环境扫描电子显微镜对断口形貌、油孔周围裂纹源形貌、油孔内腐蚀产物进行观察,并

结合能谱对腐蚀产物进行分析。完成后将样品经 240# 至 2000# 砂纸依次打磨、3.5 μm 的金刚石研磨膏抛光后,选用 10% 的 FeCl₃ 溶液侵蚀,采用 Observe.A1m 型倒置式金相显微镜对样品表层及芯部进行金相组织分析。

2 试验结果与分析

2.1 材料成分和金相组织分析

在失效针阀体样件上靠近断口处截取试样进行化学成分分析,分析结果见表 1。结果表明,针阀体材料各元素含量均在 18CrNi4WA 钢标准成分要求范围内。

在样件断面纵向方向取样进行金相组织分析,并按照标准《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》将金相样品精抛后对材料中非金属夹杂物进行评定,评定结果见表 2。硫化物类、硅酸盐类等夹杂物均为 0.5 级。失效件样品表层金相组织为针状马氏体和残余奥氏体及粒状碳化物,芯部组织为板条马氏体和少量铁素体,如图 2 和图 3 所示。

由材料化学成分分析和夹杂物评定结果可见,样品原始材料符合针阀体制造要求。研究表明^[6],渗碳层的马氏体形态对针阀体的耐磨性、耐用度起至关重要的作用,粗大的针状马氏体硬而脆,韧性较差,容易产生开裂等现象,理想的渗碳层组织状态应为隐晶马氏体+弥散分布的碳化物。分析发现,该样品表面渗碳层金相组织为针状马氏体和残余奥氏体及粒状碳化物,可见原淬火温度使样件渗碳层部位完全奥氏体化,碳化物完全融入奥氏体中,因而未得到最优的渗碳层组织。为了增加针阀体的使用寿命,可适当降低渗碳淬火温度,以得到隐晶马氏体基体上弥散分布碳化物的组织形态,增加材料的耐磨性和塑性。

2.2 表面形貌

对样品喷油孔下方圆角处表面的麻点进行观察分析,发现其呈鱼鳞状,放大后可见表面非常粗糙。损伤区域包含大量的凹坑和局部塑性变形,在腐蚀凹陷底部存在较致密腐蚀产物层,如图 4 所示。

表 1 化学成分分析结果

化学元素	Cr	Ni	W	C	Si	Mn	S	P
实测成分	1.46	4.16	1.04	0.17	0.30	0.44	0.002	0.011
18CrNi4WA 钢 标准成分	1.35~1.65	4.0~4.5	0.8~1.2	0.13~0.19	0.17~0.37	0.3~0.6	≤0.03	≤0.03

表 2 材料非金属夹杂物评级

非金属夹杂物类型	硫化物类	氧化铝类	硅酸盐类	球状氧化物类	单颗粒球状类
级别	0.5 级 (细系)	0.5 级 (细系)	0.5 级 (细系)	0.5 级 (细系)	0.5 级

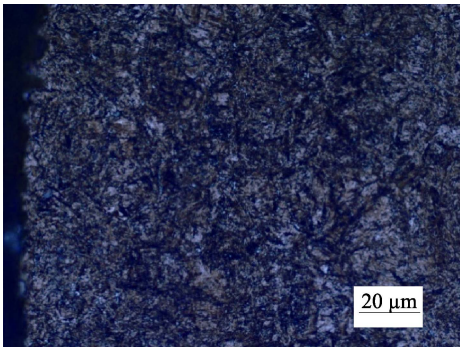


图 2 样品表层金相组织

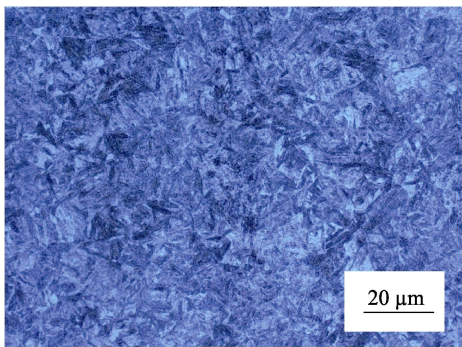
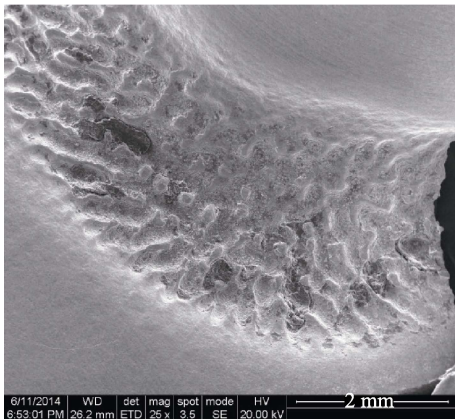


图 3 样品芯部金相组织



a



b

图 4 失效件表面形貌

当燃油的局部压力降至一定水平以下时，在快速流动或振动的液体中容易产生空泡，当这些气泡遇到一个高压区域，它们会崩裂并引起表面的爆炸冲击。这些冲击引起针阀体表面局部变形和凹坑，这些凹坑最终连成一片导致表面变得粗糙，并造成材料损失。这种材料去除的过程被称为空化侵蚀，由此产生的损伤称为空蚀损伤^[11-12]。针阀体长期侵蚀在燃油中，通常在 25 MPa 或以上的压力、200 ℃左右的条件下工作，工作环境非常严酷，流体压力的变化引起流体微射流撞击针阀体表面，这种反复的冲击压力造成失效件表面产生波浪状的局部塑性变形和凹坑，为典型的

空蚀损伤^[10]。这些凹坑和局部塑性变形区域容易积聚燃油，加速材料的腐蚀，导致应力集中现象产生。

2.3 断口分析

由图 5—7 可见，失效件裂纹起始于油孔边缘，在裂纹源处表面存在较多凹坑，看不到明显断口特征。断口裂纹扩展区存在明显的疲劳贝纹线，自裂纹源向外扩展，低倍下形成局部月牙状灰暗区。裂纹扩展区断口为准解理断裂特征，在垂直于裂纹扩展方向存在较多二次裂纹，断口形貌为典型疲劳断裂特征。

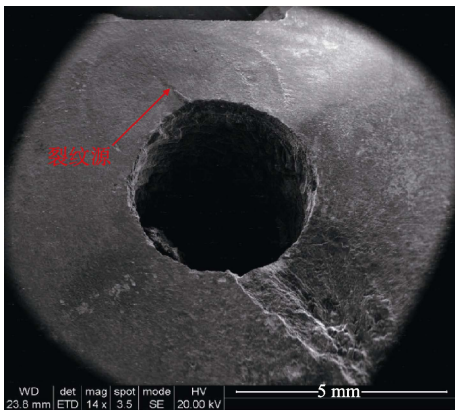


图 5 失效件断口形貌

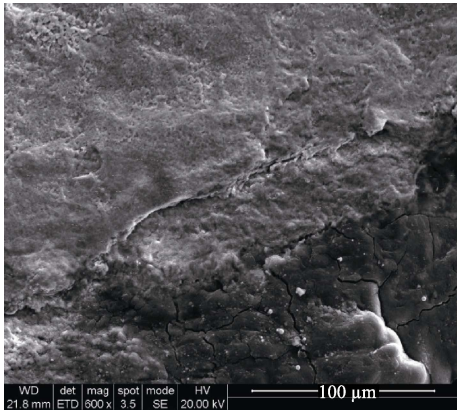


图 6 失效件断口裂纹源形貌

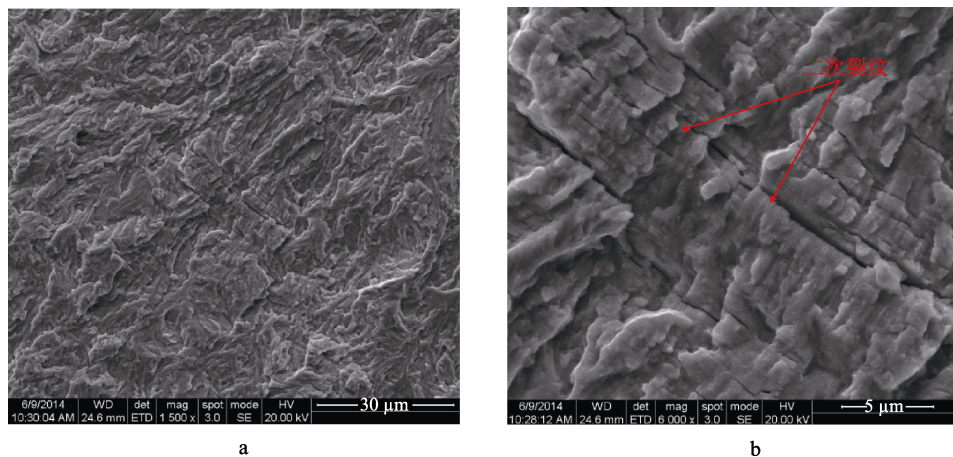


图7 失效件断口裂纹扩展区形貌

疲劳开裂常发生在承受波动应变和交变载荷的构件中,影响构件疲劳寿命的因素很多,包括应力集中、表面状态、环境介质等。由于针阀体油孔边缘存在较多空蚀坑,表面非常粗糙,容易产生应力集中现象。另外,喷油器将喷油泵供给的高压燃油喷入燃烧室时,针阀体会产生一定的机械振动,且工作温度反复变化,对针阀体的自由收缩和膨胀造成影响,在其内部产生温度梯度循环应力,引起材料内部产生热应力。当温度不断变化时,热应力也随之变化,在热应力及机械振动等交变载荷作用下,裂纹在应力集中处萌生,并在热循环载荷的作用下发生疲劳开裂。

2.4 腐蚀产物分析

采用金相显微镜观察失效件油孔周边形貌,如图8所示,可见油孔位置圆周表面存在大量腐蚀坑,点状剥落导致表面组织疏松,局部区域点蚀坑边缘碎裂形成片状剥落。将该试样在扫描电镜下观察,发现油孔内测裂纹源附近表面存在大量腐蚀产物,部分基体组织由于腐蚀严重出现分层现象,如图9和图10所示。采用能谱仪对腐蚀产物进行分析可知(选取三个点),腐蚀产物中含有腐蚀性硫元素,典型谱图如图11所示,元素分析结果见表3。

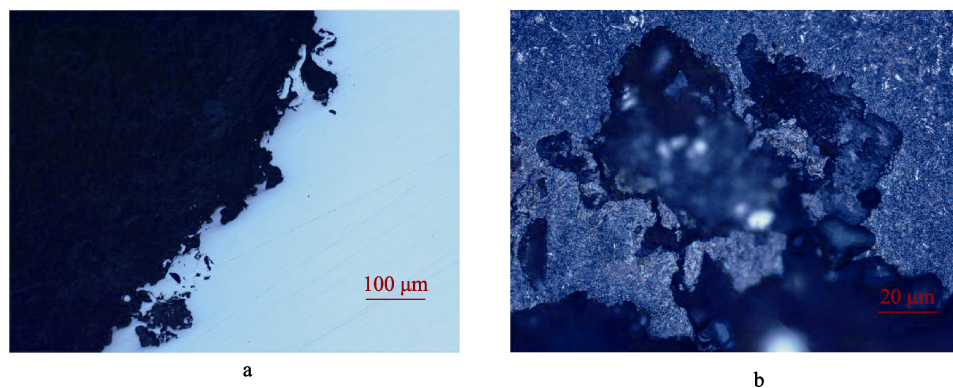


图8 失效件油孔圆周边缘腐蚀坑

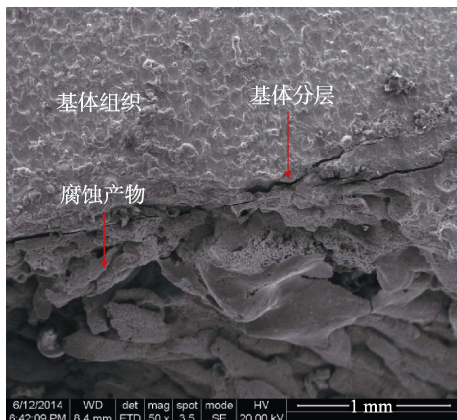


图9 失效件油孔内壁腐蚀形貌

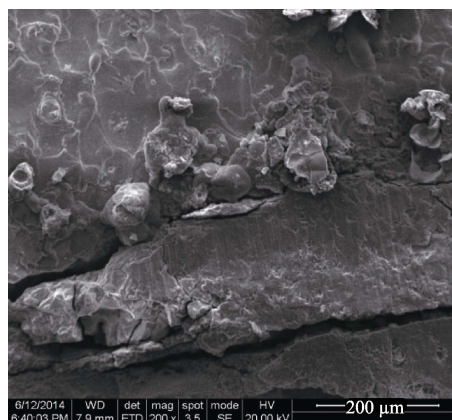


图10 失效件油孔内壁基体腐蚀脱离

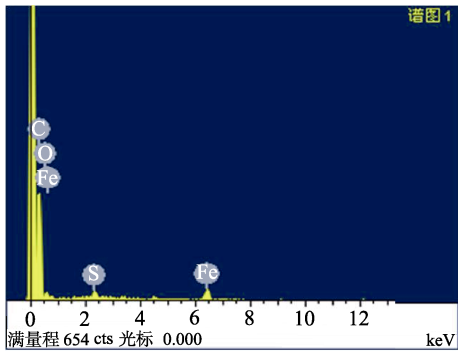


图 11 腐蚀产物能谱图

表 3 腐蚀产物元素含量				%
谱图	C	O	S	Fe
谱图 1	79.99	11.98	1.19	6.84
谱图 2	77.03	12.50	1.58	8.89
谱图 3	79.02	14.94	1.32	4.72

由能谱分析结果可知，腐蚀产物主要为氧化物和硫化物。燃油中的硫来源于硫醇(RSH)、硫醚(RSR)、二硫化物(RSSR)的分解^[13]，以硫化氢、有机硫化物等形式存在。燃烧之后的产物易与水和氧反应，结合形成连多硫酸和亚硫酸^[14]，对针阀体材料产生加速腐蚀作用。由于喷油嘴长期处在 200 ℃左右的高温条件下工作，针阀体承受反复高速冲击和摩擦作用，以及由于燃油局部压力变化导致的空蚀损伤，均会加速针阀体材料的腐蚀。同时，高温氧化和燃油对针阀体的腐蚀作用会加剧其工作时的磨损和腐蚀缺陷位置的应力集中。这种协同作用加剧了裂纹的萌生，使针阀体在热疲劳及机械振动等交变载荷的作用下开裂，使用寿命大为降低。

3 结论

文中研究的针阀体失效件原始材料符合针阀体制造要求，但渗碳淬火温度过高，未得到最优的渗碳层组织。燃油中存在的硫元素导致针阀体腐蚀，燃油

局部压力的变化导致针阀体表面产生空蚀损伤。腐蚀与空蚀损伤的协同作用加快裂纹的萌生，使针阀体在热疲劳及机械振动等交变载荷的作用下产生疲劳开裂，使用寿命大为降低。

参考文献：

[1] 党四清. 国产柴油机孔式喷油嘴可靠性分析[J]. 石油机械, 2001, 29(4): 55-56.

[2] 邵立东, 陈宗明, 楼易. 喷油嘴针阀体头部断裂失效分析[J]. 机电工程, 2007, 24(4): 54-55.

[3] 周艳芬, 张显利, 姜胜科, 等.某高速柴油机喷油器针阀体断裂原因分析[J]. 内燃机与配件, 2017(17): 78-79.

[4] 黄景飞. 喷油嘴针阀体的制造工艺[J]. 机械工程师, 2001(12): 40-41.

[5] 陈茂涛. 船用燃烧重油柴油机 18CrNi8 针阀体热处理工艺研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2015.

[6] XU X L, Yu Z W. Cracking Failure of Locomotive Diesel Engine Injector Nozzles[J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2015, 15(4): 513-520.

[7] 袁长军, 刘宗昌. 针阀体组织及使用寿命的研究[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(2): 26-30.

[8] 宋伟, 常天义, 马茂元. 18Cr2Ni4WA 钢渗碳针阀体失效原因分析[J]. 机械工程师, 1988(4): 8-9.

[9] GAVAISES M. Flow in Valve Covered Orifice Nozzles with Cylindrical and Tapered Holes and Link to Cavitation Erosion and Engine Exhaust Emissions[J]. International Journal of Engine Research, 2008, 9(6): 435-447.

[10] OSMAN A. Failure of a Diesel Engine Injector Nozzle by Cavitation Damage[J].Engineering Failure Analysis, 2006, 13: 1126-1133.

[11] 偶国富, 周永芳, 郑智剑, 等. 空蚀机理的研究综述[J]. 液压与气动, 2012(4): 3-8.

[12] 王国刚, 孙冬柏, 张秀丽, 等. 空泡溃灭过程中的力学损伤行为[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(5): 483-485.

[13] 来维亚, 尹成先, 徐秀清, 等. 中石油东部炼油企业设备腐蚀与控制现状[J]. 装备环境工程, 2017, 14(12): 14-18.

[14] 张凯, 王长朋, 余祖新, 等. 51CrV4 弹簧钢环箍断裂失效分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 86-91.