

减压阀球头磨损故障分析及改进

徐登伟, 朱建国, 罗大亮, 曾维亮
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:针对某型减压阀主弹簧座球头磨损的问题, 利用仿真和试验相结合的方法, 分析了减压阀球头磨损的故障机理, 计算了不锈钢 2Cr13 不同硬度组合下球头的应力与应变, 结果表明现有结构存在应力超高的问题。同时对金属材料配对副磨损进行研究, 从减小接触应力和避免黏附磨损的改进思路出发, 提出了改进措施, 通过磨损对比试验验证, 确定了减压阀的最终改进方案。经过减压阀多个批次试验考核, 球头磨损的问题得到彻底解决, 验证了改进措施的有效性。研究结果表明, 在接触应力未超出材料屈服强度的前提下, 磨损与材料的晶体结构密切相关, 常用金属材料钛合金作为摩擦副材料具有一定的优势, 为高应力摩擦副材料的选用提供参考。

关键词:减压阀; 球头磨损; 机理分析; 故障

中图分类号:V434 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)04-0081-07

Failure analysis and improvement of the ball-end wear for pressure reducing valve

XU Dengwei, ZHU Jianguo, LUO Daliang, ZENG Weiliang
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the problem of the wear of the ball-end of the main spring seat of the pressure reducing valve, the failure mechanism of the ball-end of the pressure reducing valve was analyzed by the method of combining simulation and experiment. Stress and strain of the steel 2Cr13 ball-end with different hardness combinations were calculated, and results indicate that the existing structure has the problem of super high stress. The wear of paired metal materials was studied, from the improvement ideas of reducing contact stress and avoiding adhesion wear, the improvement measures were proposed. Through the verification of wear comparison test, the final improvement plan of the pressure reducing valve was determined. After large numbers of the pressure reducing valve test, the problem of ball wear has been completely solved, which verifies the effectiveness of the improvement measures. Under the premise that the contact stress does not exceed the yield strength of the material, wear is closely related to the crystal structure of the material. The titanium alloy has certain advantages as the friction pair material.

Keywords: pressure reducing valve; ball-end wear; mechanism analysis; failure

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(51775412)

作者简介: 徐登伟(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计。

0 引言

恒压挤压式增压系统具有结构简单、工作可靠等优点,广泛应用于液体火箭发动机中,减压阀属于该系统的核心组件,其作用是将气瓶内的高压气体压力调整至(额定)增压压力,且在不同流量下保证系统增压压力稳定^[1-2]。

某恒压挤压式发动机试验过程中,减压阀出口压力出现振荡现象,导致个别工况压力超过系统设计要求。分解发现减压阀内部调节元件有磨损、蹭伤痕迹,其中主弹簧座球头(以下简称球头)磨损极为严重。根据减压阀内部各零件磨损现象分析和故障排查,球头磨损是导致减压阀出口压力振荡的主要原因。随即对以往的典试产品进行分解检查,同样存在球头严重磨损的现象。球头磨损可能导致减压阀阀芯自找正能力降低,弹簧调节系统对中性不良,进而导致内部各调节零件间异常接触、摩擦力增大,引起出口压力的振荡,从而影响减压阀的工作可靠性。因此,亟需采取措施解决减压阀球头磨损的问题。

本文针对减压阀球头磨损的问题,开展故障机理分析,通过仿真软件对球头接触处的应力和应变进行了计算,提出结构改进方案,并验证了改进措施的有效性。

1 减压阀球头磨损故障

1.1 结构介绍

减压阀中压盖球窝(以下简称球窝)与主弹簧座球头的结构如图1所示,其作用是加载弹簧力时,减小摩擦力,防止膜片感压元件受力褶皱,造成膜片的破坏或刚度改变,从而影响减压阀的工作可靠性,广泛应用于液体火箭发动机减压阀结构设计

中。设计时球头的圆弧一般小于或等于球窝的圆弧,通常球窝圆弧稍大一点。对于弹簧力较大的结构应选用圆弧半径较大者,有利于提高球头结构的强度;当球头与球窝圆弧尺寸存在一定差值时,有利于降低摩擦力,有利于减压阀装配和调整。某型减压阀球窝和球头的材料均为不锈钢 2Cr13,其中球窝半径为 2.5 mm,硬度为 32 ~ 38;球头半径为 2 mm,硬度为 45 ~ 51。

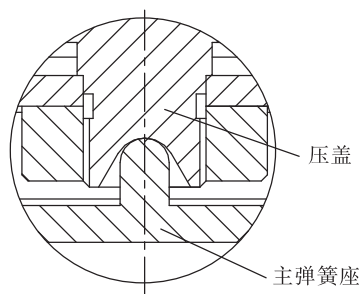


图1 球窝与球头结构图

Fig.1 Structure diagram of ball socket and ball-end

如图2所示,装配减压阀时,先将主弹簧座放在弹簧上一并放入弹簧外套中,弹簧外套通过螺纹与压紧套筒连接,在加载弹簧力的过程中,弹簧外套旋转带动球头旋转,起初球头与球窝不接触,随着螺纹的旋合,球头逐渐接触球窝,由于压盖随膜片一起压紧固定,球窝处于静止状态,球头随弹簧外套和弹簧处于转动状态;随着弹簧力的加载,力值逐渐增大,直至施加的弹簧力满足减压阀出口额定点的要求。当额定点超出要求时,需卸载弹簧力重新调整。因此,在减压阀的装配及调试过程中,球头与球窝逐渐接触,接触应力逐步增大,并伴有球头的旋转。

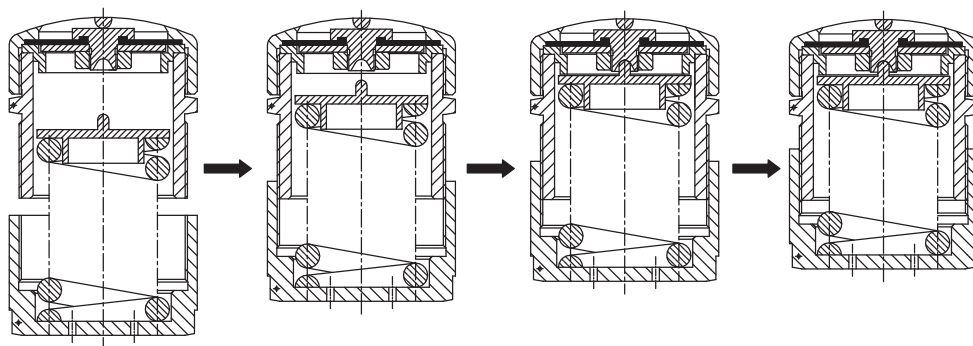


图2 减压阀装配过程示意图

Fig.2 Assembly process diagram of pressure reducing valve

1.2 磨损现象分析

减压阀球头磨损如图 3 所示,磨损部位呈现螺旋一周的深度划痕,球头顶端圆弧几乎磨平。磨损部位除了细小的颗粒外,还有大块的金属颗粒,理化分析与球头材料一样。从磨损的形貌可以看出,当减压阀球头与球窝发生相对旋转运动时才会出现该部位磨损现象,而装配后的球头在弹簧力的作用下与球窝配合压紧,无摩擦运动。因此,球头与球窝的磨损现象只能发生在减压阀的装配及调试过程中。

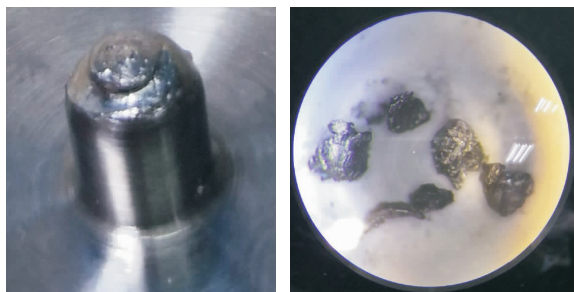


图 3 磨损(左)及脱落金属块(右)的照片

Fig.3 Photos of worn(left) and exfoliated metal bars(right)

1.3 故障分析

将减压阀主弹簧座球头基体脱落作为顶事件,出现基体脱落的可能原因有球头硬度偏低、球头部位应力超大及材料选用不合理,建立故障树如图 4 所示。

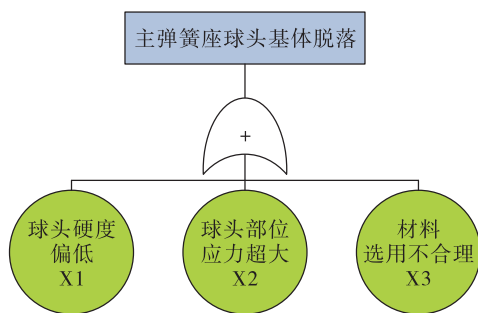


图 4 故障树

Fig.4 Fracture tree of pipeline

对减压阀球头和球窝的硬度值进行复测,实测硬度为 47.6 ~ 48.2,满足技术文件中硬度 43 ~ 51 的要求,故障模式 X1 排除。

采用软件 ABAQUS 对主弹簧座球头结构强度进行仿真计算,计算模型见图 5,设定主弹簧力为

3 500 N,得到主弹簧座球头的 Mises 应力分布及等效塑性应变分布,如图 6 所示,接触部位最大 Mises 应力为 1 339 MPa,最大等效塑性应变 0.031,接触应力已超过材料的屈服极限^[3-7]。因此,故障模式 X2 不能排除。

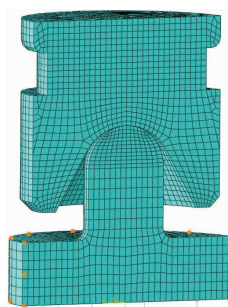


图 5 接触部位计算模型

Fig.5 Computational model of contact site

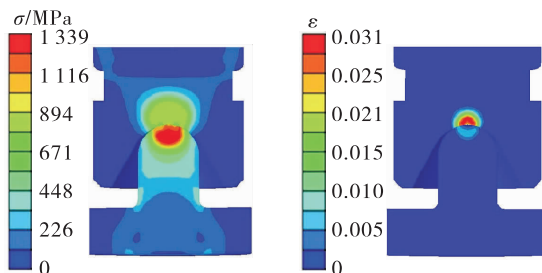


图 6 接触部位应力及应变计算结果

Fig.6 The stress and strain of contact site

通过对球头和球窝磨损部位的显微镜观察,部分金属物黏着在球窝表面,而主弹簧座和压盖材料均为不锈钢 2Cr13,一般来说,相同金属或晶格类型,晶格间距、电子密度、电化学性质相近的金属,在高应力的作用下易发生磨损^[8-10]。因此,故障模式 X3 不能排除。

综上所述,故障模式 X2、X3 均不能排除。因此,本文对减压阀球头部位应力和金属材料配对副磨损开展研究。

2 不同硬度 2Cr13 组合下应力/应变

不同硬度的材料组合能够提高抗黏附磨损能力,脆性材料的抗黏着性能比塑性材料好^[11-12]。因此,开展了不同硬度 2Cr13 球头和球窝配对组

合下,接触点应力和应变的变化研究。首先采用不同的回火温度对不锈钢 2Cr13 钢棒试样进行热处理,对其力学性能进行测试,获得不同硬度下钢棒 2Cr13 试样力学性能,每种状态钢棒试样各 3 件,测试结果取均值后各状态力学性能如表 1 所示。

表 1 钢棒 2Cr13 不同硬度的力学性能(实验实测值)

Tab. 1 Mechanical properties of steel with different hardness(experimental measured values)

状态	抗拉强度/ GPa	屈服强度/ GPa	延伸率/%	断面收缩量 /%	弹性模量 /GPa
610 ℃回火 60 ℃水冷(硬度为 36.5)	1.065	0.918	21.5	65.0	404.536
580 ℃回火(硬度为 39)	1.160	1.025	21.0	64.5	406.496
550 ℃回火(硬度为 46.5~47)	1.505	1.275	18.5	56.0	447.749
230 ℃回火(硬度为 49.5)	1.710	1.365	17.5	58.0	543.584

按现有球头和球窝的结构尺寸,将不同硬度 2Cr13 实测的力学性能修正到仿真模型中,分别计算弹簧力 3 kN、3.5 kN、4.2 kN 3 种工况下,接触点处的应力与应变。计算时,还考虑了球头旋转的摩擦力,球头与球窝的应力计算结果见表 2。由应力计算结果可以看出,随着零件硬度提高,其接触应力增大;同一配对组合状态下,随着弹簧力的增大,球头和球窝的最大应力几乎没有变化,均略高于屈服强度,说明接触部位已发生局部结构变形和磨损。因此,在现有结构的基础上,通过材料热处理获得零件高硬度的方式不能解决磨损的问题,需通过结构改进降低接触应力。

表 2 不同球头球窝组合应力计算结果

Tab. 2 Stress results of different combinations of ball-end and ball socket

主弹簧座球头硬度	压盖球窝硬度	位置	应力/MPa		
			3 kN 弹簧力	3.5 kN 弹簧力	4.2 kN 弹簧力
36.5	36.5	球头	930.1	934.2	937.9
		球窝	922.3	922.9	921.4
39	36.5	球头	1 034.0	1 035.0	1 038.0
		球窝	926.3	926.5	927.8
49.5	36.5	球头	1 370.0	1 371.0	1 373.0
		球窝	931.4	933.4	935.5
36.5	49.5	球头	934.3	938.6	943.8
		球窝	1 297.0	1 324.0	1 315.0
49.5	49.5	球头	1 390.0	1 394.0	1 397.0
		球窝	1 378.0	1 380.0	1 382.0

由表 3 所示应变计算结果可以看出,随着材料硬度提高,各零件的最大应变降低;随着弹簧力的增大,各零件的应变均呈现增大趋势,且球头的应变相对更大,进一步说明球头强度不足是结构的薄弱环节。

为降低球头的接触应力,将球头半径从 2.0 mm 增大至 2.5 mm,仿真计算结果如表 4、图 7 所示,在最大工况下,球头和球窝接触处的最大应力均未超过 320 MPa,且远小于材料的屈服强度,接触部分均未发生塑性变形,说明球头应力超大的问题得到解决。

表 3 不同球头球窝组合应变计算结果

Tab. 3 Strain results of different combinations of ball-end and ball socket

主弹簧座球头硬度	压盖球窝硬度	位置	应变		
			3 kN 弹簧力	3.5 kN 弹簧力	4.2 kN 弹簧力
36.5	36.5	球头	0.020 26	0.025 46	0.030 91
		球窝	0.010 38	0.010 9	0.011 22
39	36.5	球头	0.015 48	0.017 26	0.023 53
		球窝	0.014 02	0.014 98	0.016 24
49.5	36.5	球头	0.004 99	0.005 386	0.006 249
		球窝	0.021 44	0.024 37	0.027 42
36.5	49.5	球头	0.028 35	0.031 83	0.039 4
		球窝	0.001 181	0.001 209	0.001 215
49.5	49.5	球头	0.014 52	0.017 06	0.018 97
		球窝	0.008 673	0.009 568	0.010 67

表 4 改进后不同球头球窝组合应力计算结果

Tab. 4 Stress results of different combinations of ball-end and ball socket after improvement

主弹簧座球头硬度	压盖球窝硬度	位置	应力/MPa		
			3 kN 弹簧力	3.5 kN 弹簧力	4.2 kN 弹簧力
49.5	36.5	球头	216.3	254.2	310.9
		球窝	228.5	262.9	312.6
36.5	49.5	球头	216.3	254.1	310.7
		球窝	223.3	256.9	305.6
49.5	49.5	球头	216.2	254.1	310.8
		球窝	230.2	265.3	316.1

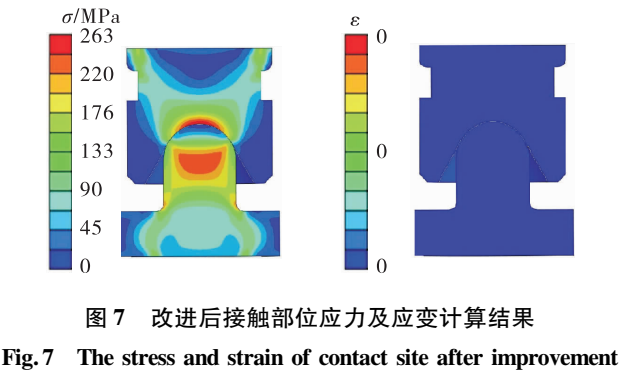


图 7 改进后接触部位应力及应变计算结果

Fig.7 The stress and strain of contact site after improvement

3 金属材料配对副磨损研究

磨损除了与接触应力大小密切相关外,还与材料的性质有关^[1-2]。材料的晶体结构决定材料的性质,常见的晶体结构包括面心立方晶体、密排六方晶体和体心立方晶体。其中面心立方结构是层状的,晶胞每个面上的原子多,晶胞之间相互滑移的位移短,造成了晶胞之间容易滑移错位,宏观上表现为质软,容易变形,即容易被磨损、黏着。而密排

六方金属滑移系少,滑移过程中可能采取的空间位向少,故塑性差。体心立方金属滑移系较多,故比密排六方金属塑性好,但其滑移面原子密排程度不如面心立方,滑移方向的数量少于面心立方,故体心立方金属不如面心立方金属塑性好。因此,金属材料配对副应优先采用密排六方晶体或体心立方晶体材料,避免采用面心立方晶体材料,特别要避免采用奥氏体钢,此外还要避免使用同种金属配对副^[13-14]。常用材料中钛合金是以钛为基础加入其他元素组成的合金,钛有两种同质异晶体,882 ℃ 以下为密排六方结构 α 钛,882 ℃ 以上为体心立方的 β 钛^[15]。所以,采用钛合金作为摩擦配对材料具有一定优势。

4 故障定位及机理分析

减压阀球头与球窝属于点接触,在较大弹簧力和旋转摩擦力的作用下,局部接触点的应力较高,并超过了材料的屈服极限。由于球窝相对较软,接触部位产生塑性变形,在高应力作用下伴随着球头

的旋转,接触区域表面温度急剧升高,导致接触处材料熔化并形成黏结点,进而发生焊合。焊合点的强度高于材料的抗剪强度,其原因是材料晶粒滑移面上的碎晶块和附加晶格的强烈扭曲,增大了滑移阻力,使其继续滑移难于进行,在后续摩擦副的反复旋转摩擦过程中,摩擦系数增大,引起球头与球窝金属基体的撕裂,在两者接触表面出现擦伤和划伤,从而形成黏附磨损^[16-20]。该磨损过程发生得非常突然,往往一连串动作就发生在短短几秒钟内。由于主弹簧座硬度较高,材料相对较脆,焊合点垫在球头与球窝之间,进一步阻碍了主弹簧座球头的旋转运动,球头出现崩碎、颗粒。减压阀球头的磨损现象,前期为黏附磨损,后期主要为磨料磨损。

5 结构改进及试验验证

从减小接触应力和避免黏附磨损的改进思路出发,根据目前型号常用的球头与球窝组合和仿真

计算结果,将球头半径增大至 2.5 mm,并策划了 4 种不同材料的组合方案,每种方案各 3 套配对零件,分别装配到减压阀上进行磨损对比试验,每种状态每套配对零件磨损 10 次,将减压阀弹簧外套由自由状态拧至额定点附近,再退至自由状态为 1 次磨损试验,最终通过磨损的程度确定优选组合。

改进方案磨损试验对比如表 5 所示,结果表明同种类型的材料配对时,磨损比较严重,与材料的力学性能无关。J1、J2 为同种类型材料组合,磨损严重。J3、J4 为异种材料组合,磨损较轻或几乎看不出磨损,说明相同的应力下异种材料具有较好的耐磨性。通过 J2 与 J3 磨损照片对比发现,钛合金 TC4 比不锈钢 1Cr11Ni2W2MoV 的强度低很多,但后者磨损很严重,进一步说明磨损与材料的晶体结构密切相关,与材料硬度无直接关系。通过 J3 与 J4 磨损照片对比发现,J3 状态球头无磨损痕迹。因此,最终减压阀采用 J3 的改进方案。

表 5 减压阀球窝/球头磨损对比

Tab. 5 The wear comparison test of ball-end and ball socket of pressure reducing valve

状态	主弹簧座(球头)	压盖(球窝)	试验结果
J1	 9Cr18(硬度为 50 ~ 55)	 2Cr13(硬度为 32 ~ 38)	有磨损
J2	 1Cr11Ni2W2MoV(硬度为 45 ~ 51)	 2Cr13(硬度为 32 ~ 38)	磨损严重
J3	 TC4M	 2Cr13(硬度为 32 ~ 38)	无磨损
J4	 9Cr18(硬度为 50 ~ 55)	 TC4M	轻微磨损

改进后的减压阀经过了力学环境试验(振动试验、冲击试验、加速度试验)、典型试验及整机试车考核,减压阀各项性能满足系统设计要求,分解检查主弹簧座球头、压盖球窝无磨损现象,磨损问题得到彻底解决。目前改进措施已成功应用到多个型号的减压阀中,并经过飞行考核。

6 结束语

利用仿真和试验相结合的方法,分析了减压阀主弹簧座球头磨损的故障机理,并提出结构改进措施,通过磨损对比试验验证,确定了减压阀的最终改进方案。经过减压阀多个批次试验考核,球头磨损的问题得到彻底解决,验证了改进措施的有效性。研究表明,在接触应力未超出材料屈服强度的前提下,磨损与材料的晶体结构密切相关,常用金属材料钛合金作为摩擦副材料具有一定的优势,为高应力摩擦副材料的选用提供参考。

参考文献:

- [1] 徐登伟,朱建国.减压阀启动振荡分析与抑制研究[J].火箭推进,2021,47(2):76-80.
XU D W,ZHU J G. Analysis and inhibition research on startup pressure oscillation of pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion,2021,47(2):76-80.
- [2] 朱建国,魏学峰,孙亮.某减压阀高压冲击超调问题仿真分析与试验研究[J].火箭推进,2015,41(5):72-76.
ZHU J G,WEI X F,SUN L. Simulation and experiment research on high-pressure shock overshoot phenomenon of pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion,2015,41(5):72-76.
- [3] 王顺,何东升,魏秦文,等.基于ABAQUS的三通有限元分析与强度评定[J].化学工程与装备,2015(12):1-3.
- [4] 岳晓宇.基于ABAQUS的导轨副磨粒磨损微观过程的有限元研究[D].天津:天津理工大学,2014.
- [5] 霍亚军.向心关节轴承摩擦磨损性能仿真及试验分析[D].上海:上海交通大学,2015.
- [6] 张生芳,金路,刘宇,等.风电盘式制动器制动闸片磨粒磨损仿真分析[J].大连交通大学学报,2018,39(1):53-59.
- [7] 李聪聪,曾攀,雷丽萍,等.钴基合金的滑动磨损行为及仿真预测[J].机械工程学,2011,47(21):97-103.
- [8] 孙家枢.金属的磨损[M].北京:冶金工业出版社,1992.
- [9] 李茂林.我国金属耐磨材料的发展和应用[J].铸造,2002,51(9):525-529.
- [10] 戴雄杰.摩擦学基础[M].上海:上海科学技术出版社,1984.
- [11] 温诗铸.材料磨损研究的进展与思考[J].摩擦学学报,2008,28(1):1-5.
- [12] 辛礼兵.磨损机理的研究与探讨[J].安徽职业技术学院学报,2006,5(4):11-14.
- [13] 黄维刚,薛冬峰.材料结构与性能[M].上海:华东理工大学出版社,2010.
- [14] 丁晖.金属材料及热处理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.
- [15] 赵永庆,陈永楠,张学敏.钛合金相变及热处理[M].长沙:中南大学出版社,2012.
- [16] 袁成清.磨损过程中的磨粒表面和磨损表面特征及其相互关系研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.
- [17] 机械设计手册编委会.机械设计手册:滑动轴承[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [18] 李建明.磨损金属学[M].北京:冶金工业出版社,1990.
- [19] 赵伟刚,张鹏鹏,任姗姗,等.液体火箭发动机涡轮泵机械密封磨损机理研究[J].火箭推进,2017,43(3):10-16.
ZHAO W G,ZHANG P P,REN S S,et al. Research on wear mechanism of mechanical seal for turbopump in liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion,2017,43(3):10-16.
- [20] 杨晓辉,曹佩,王毅,等.C/SiC复合材料喷嘴冲蚀磨损性能及其机理研究[J].火箭推进,2019,45(1):53-58.
YANG X H,CAO P,WANG Y,et al. Study on erosion wear properties and its mechanism of C/SiC composite nozzle[J]. Journal of Rocket Propulsion,2019,45(1):53-58.