

S-07 钢在高压充气阀芯中的替代应用研究

黑爱卿, 邓全得, 高斌, 席常亮
(西安航天发动机有限公司, 西安 710100)

摘要: **目的** 解决高压充气阀 S-03 钢渗氮阀芯生产过程中周期长、合格率低、渗氮层开裂和贮存过程中锈蚀及方向漏率超标等问题。**方法** 结合 S-03 钢渗氮阀芯工艺流程, 分析其生产及贮存过程中存在的问题, 并提出由 S-07 钢替代 S-03 钢渗氮工艺, 从防锈、硬度和强度 3 个方面进行两种材料特性理论分析, 同时进行耐腐蚀性试验、功能性试验、力学环境试验和寿命试验考核。**结果** S-03 钢渗氮阀芯经历湿热试验 20 d 后, 出现轻微锈蚀, 盐雾试验 96 h 后, 锈蚀严重, 而同条件下的 S-07 钢阀芯无锈蚀。S-07 钢阀芯经过了功能性试验, x , y , z 这 3 个方向的力学环境试验, 动作 200 次的寿命考核试验后, 动作灵活, 功能测试合格。**结论** 充气阀阀芯完成了 S-07 钢替代工艺研究, 成功解决了影响充气阀功能的阀芯锈蚀问题和渗氮层开裂问题, 同时使生产效率提高了约 70%, 生产成本降低了约 50%。

关键词: 阀芯; S-03 钢; 渗氮; S-07 钢

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.03.022

中图分类号: TG14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)03-0172-06

The Application of S-07 Steel in High Pressure Gas-filled Valve Core

HEI Ai-qing, DENG Quan-de, GAO Bin, XI Chang-liang

(Xi'an Aerospace Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the problems of long cycle, low qualification rate, cracking of nitriding layer, corrosion and reverse leakage rate in production of S-03 steel nitriding valve core of high pressure gas-filled valve. Combined with the technological process of S-03 steel nitriding valve, the problems existing in its production and storage process were analyzed. It was proposed to replace the nitriding process of S-03 steel with that of S-07 steel. The properties of two materials were theoretically analyzed from rust resistance, hardness and strength; at the same time, rust resistance test, functional test, mechanical environment test and life test were evaluated. After 20 days of damp-heat test, the S-03 steel nitriding valve core was slightly corroded; while after 96 h of salt spray test, the corrosion was severe; while the S-07 steel valve core was free from corrosion under the same condition. The S-07 steel valve core passed the functional test, the mechanical environment test in x , y and z directions, and the 200 times of life assessment test. The valve core was flexible and qualified in the functional test. The study on replacement technology of S-07 steel for the valve core is completed; the corrosion and nitrification layer cracking that affect the function of the valve is successfully solved; and the production efficiency is improved by about 70%, and the production cost is reduced by about 50%.

KEY WORDS: valve core; S-03 steel; nitriding; S-07 steel

某发动机交付后需带气贮存多年, 充气阀是满足此要求的重要组件。充气阀主要由堵头、外套螺母、

密封圈、阀体、阀芯、接管嘴和弹簧等零件组成, 其工作原理为通过顶杆顶开阀芯给气瓶充气, 充气压力

收稿日期: 2019-12-04

作者简介: 黑爱卿 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机发动机制造。

通常约为 30 MPa 左右，充气后旋松顶杆，阀芯自动复位，阀芯与阀体通过金属-金属形式进行可靠密封，贮存状态下，阀门处于常闭状态^[1]。

为提高阀芯的表面硬度和耐磨性，阀芯的材料为 S-03 钢，如图 1 所示，B 和 C 表面需进行渗氮处理，渗氮层厚度不小于 0.1 mm，渗氮层硬度要求为

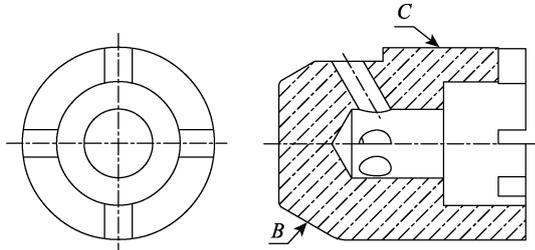


图 1 S-03 钢阀芯结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of S-03 steel valve core

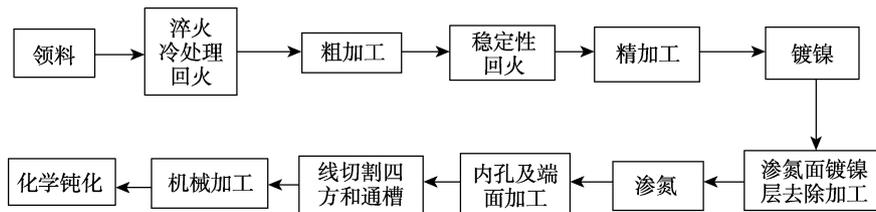


图 2 S-03 钢渗氮阀芯工艺流程
Fig.2 Process flow of S-03 steel nitriding valve core

渗氮采用气体渗氮工艺，即采用氨气作为渗氮介质源，非渗氮部位采用镀镍进行保护，由于 S-03 钢表面存在自钝化层，采用 NH_4Cl 作为催化剂对钝化层进行破坏，以提高渗氮效率。气体渗氮是将氨气 (NH_3) 通入耐热罐体后在一定温度和压力下分解成活性氮原子和氢气，活性氮原子通过化学和物理吸附作用与材料表面层的活性金属原子发生化学反应形成金属氮化物，当表面层的氮原子浓度达到一定程度后会在浓度差的驱动下向材料内部扩散，通过保温一定的时间，最终在材料内部形成一定浓度的金属氮化物层^[2-4]。

S-03 钢渗氮后，渗氮层硬度达到 HRC60~70，传统的车削和铣削工艺由于刀具材料硬度不足，无法实现产品上多余材料的去除。由于电火花线切割工艺具

HRC60~70，其余表面允许有渗氮层。

阀芯贮存过程中多批次出现渗氮面锈蚀问题，同时型号发动机交付贮存过程中，用户多次反馈产品年检过程中存在充气阀反向漏率超标问题，明显听到了漏气声音，严重影响了发动机贮存安全性和工作可靠性。为彻底解决上述问题的发生，急需开展 S-07 钢替代 S-03 钢渗氮工艺研究。

1 S-03 钢渗氮工艺

1.1 工艺流程

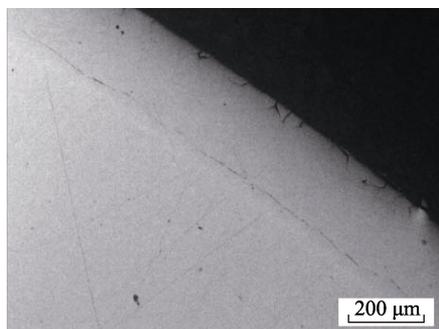
阀芯 S-03 钢渗氮工艺的工艺流程如图 2 所示，其中阀芯 S-03 钢渗氮工艺机械加工、热处理、表面处理、线切割和化学钝化等专业，周转环节多达 12 次。

有以下优点：① 不主要依靠机械能，而是主要依靠电能和热能去除金属材料；② 工具硬度可以低于被加工材料的硬度；③ 加工过程中工具和工件之间不存在明显的机械切削力^[5]，故对图 1 中阀芯的四方和十字槽采用电火花线切割工艺。

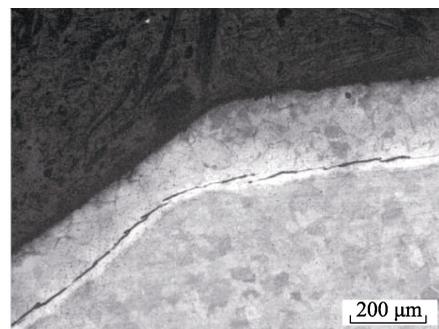
1.2 S-03 钢渗氮工艺存在的问题

1) 加工周期长。阀芯 S-03 钢渗氮工艺涉及专业多，周转环节多，加工周期较长，经统计，从领料加工到成品入库至少 3 个月。

2) 渗氮层裂纹和合格率低。渗氮后的表层具有极高的表面硬度，可达到 HRC60~70，脆性为 I 级。由于氮原子渗入原晶界，破坏原晶界组织，脆性增加，会导致渗氮层与基体结合面存在裂纹，如图 3 所示，



a 横剖结合面



b 纵剖结合面

图 3 阀芯渗氮层裂纹形貌
Fig.3 Crack in nitriding layer of valve core

同时孔与孔相交处、孔与平面相交棱边尖角处为应力集中区域，易使渗氮层剥落^[6-7]。在型号批产过程中多次发生上述问题，导致产品报废。

3) 阀芯锈蚀。渗氮处理过程中 S-03 钢中的铬与 NH₄Cl 中的氮生成 CrN，降低不锈钢中自由 Cr 含量，限制了致密钝化膜的形成。渗氮后虽采取钝化处理可

促进钝化膜的形成，但因自由 Cr 含量不足，极大降低了其耐蚀性能^[8]，同时阀芯四方、十字槽采用线切割工艺，线切割过程中因间隙放电的瞬时高温而发生材料熔化、氧化变化^[9-10]，表面粗糙，易于生锈。充气阀配套装配过程中，多批库存产品发生锈蚀，如图 4 所示。



a 四方和锥面

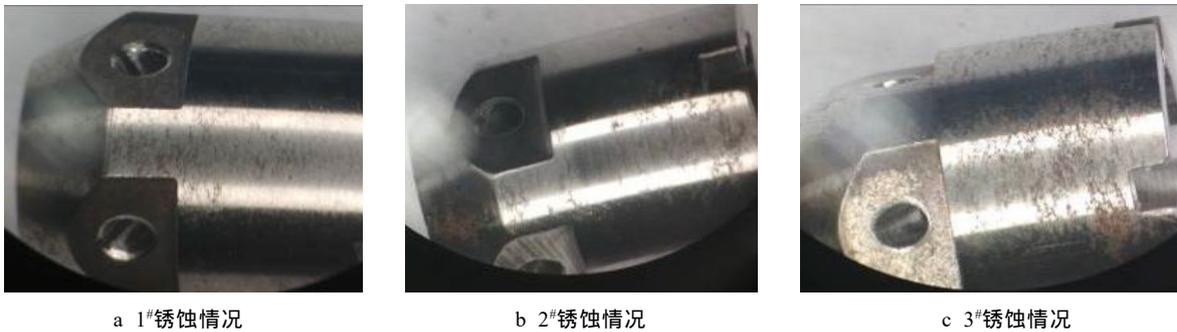
b 圆柱面

图 4 阀芯锈蚀情况

Fig.4 Corrosion condition of valve core

4) 严重锈蚀会导致阀门漏率超标。选择库存锈蚀严重的 3 件阀芯，如图 5 所示，装配成充气阀后进行阀芯阀座密封性检查，结果如表 1。由表 1

所知，库存锈蚀严重阀芯漏率最大为 51 mL/min，不满足设计文件漏率 ≤ 10 mL/min，影响充气阀气密性功能。



a 1#锈蚀情况

b 2#锈蚀情况

c 3#锈蚀情况

图 5 阀芯锈蚀严重情况

Fig.5 Serious condition of corrosion on valve core

表 1 阀芯锈蚀对充气阀漏率影响试验结果

Tab.1 Influences of valve core corrosion on the leakage rate of charging valve

mL/min

序号	40 MPa 下气密性 (最高工作压力的 1.5 倍)				5 MPa 下气密性 (最低工作压力)			
	装配后气密试验	一次动作试验后	二次动作试验后	三次动作试验后	装配后气密试验	一次动作试验后	二次动作试验后	三次动作试验后
1#	36	51	45	39	3.5	5	5	4.2
2#	30	4	2.5	2	3.5	2.7	2	1.5
3#	36	21	18	15	3	2	2	2

2 S-07 钢替代应用研究

2.1 材料特性

S-07 钢是一种高强度、高韧性和高抗耐蚀性能的马氏体-奥氏体双相不锈钢，其与 S-03 钢材料特性对比见表 2。由表 2 可知，防锈性方面，S-07 钢 Cr 的

质量分数相对于 S-03 钢要高，达 15.5%~17.5%，耐蚀性较好，同时 S-07 钢阀芯不需要渗氮提高表面硬度，从机理上避免了因组织结构破坏而易生锈的风险；硬度方面，S-07 钢为 HRC40~47，虽比渗氮后的 S-03 钢表面硬度 (HRC60~70) 较小，但相比 TC4 (M 态) 阀体 HRC26~39 略高，满足 Q/QJA 35—2006 中要求金

属-金属的硬密封“一般选取阀芯材料硬度比阀座略高”的原则；强度方面，S-07 钢的屈服强度为 980 MPa，

而气瓶在充气压力为 40 MPa 时的密封比压为 260 MPa，故 S-07 钢屈服强度满足密封副强度要求。

表 2 S-07 钢与 S-03 钢性能对比
Tab.2 Comparison of properties between S-07 steel and S-03 Steel

材料	牌号	硬度	Cr 的质量分数/%	屈服强度/MPa
S-03 钢	022Cr12Ni10MoTi	HRC26~35，渗氮后表面硬度为 HRC60~70	11.5~12.5	735
S-07 钢	07Cr16Ni6	HRC40~47	15.5~17.5	980

2.2 试验替代研究

2.2.1 工艺流程

阀芯 S-07 钢工艺流程如图 6 所示。由图 6 所示，阀芯 S-07 钢工艺仅涉及机械加工和热处理，周转环

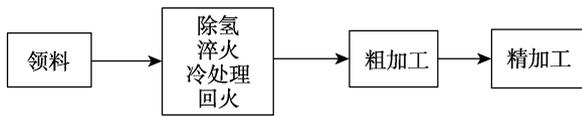


图 6 S-07 钢阀芯工艺流程
Fig.6 Process flow of S-07 steel valve core



a S-03 钢渗氮阀芯



b S-07 钢阀芯

图 7 湿热试验后阀芯状态
Fig.7 Condition of valve core after damp-heat test

2) 盐雾试验。各种盐分的富集使盐雾中含有大量氯离子，氯离子可以很容易穿透金属保护膜，破坏金属的钝性从而加速金属的腐蚀，盐雾试验是考核产品耐腐蚀性能的重要手段^[12-13]。试验条件为：试验时间 96 h (24 h 喷雾+24 h 静置，共进行 2 个周期)，喷雾阶段试验温度为 (35±2) °C；静置阶段试验温度为 15~35 °C，相对湿度不高于 50%，阀芯试验前状态如图 8 所示，盐雾试验后结果如图 9 所示。由图 8 可知，盐雾试验后，S-03 钢渗氮阀芯表面锈蚀严重，

S-07 钢阀芯未见锈蚀。



图 8 阀芯试验前状态
Fig.8 Pre-test condition of valve core



a S-03 钢渗氮阀芯



b S-07 钢阀芯

图 9 盐雾试验后阀芯状态
Fig.9 Condition of valve core after salt spray test

2.2.3 功能性试验

用 S-07 钢阀芯装配了 5 台阀门，按照设计技术

条件要求进行了相关性能测试，试验结果均满足设计文件要求，其中部分产品在气密性试验过程中存在轻

微泄漏,最大泄漏量为 0.2 mL/min,远小于设计文件要求的不大于 10 mL/min。

2.2.4 力学环境试验

正弦扫描、模拟运输、随机振动、正弦振动、加速度、低频冲击和高频冲击试验为力学环境试验中的重要组成试验项目,用于评估产品功能、疲劳寿命和磨损寿命情况^[14-15]。按照力学环境试验技术条件要求对上述试验后的 5 台阀门进行了力学环境试验考核,试验条件包括正弦扫描(x, y, z 这 3 个方向,量级为 1.6g,扫描率 2 oct/min,频率范围 8~100 Hz)、模拟运输(x, y, z 这 3 个方向,功率谱密度为 -3 dB/oct,频率范围为 40~500 Hz,总均方根加速度为 1.449g,每方向 300 min)、随机振动(x, y, z 这 3 个方向,频率为 80~1500 Hz,功率谱密度为 -6 dB/oct,总均方根为 20g,每个方向 3 min)、正弦振动(频率为 47~100 Hz, x 向 4.5g,半循环对数扫描时间为 5 min)、加速度($\pm x, \pm y, \pm z$ 方向为 19.6g 保持 3 min 以上)、低频冲击(峰值加速度为 120g,持续时间为 4 ms,三向每方向 2 次)和高频冲击试验(频率为 50~1500 Hz,量级为 40g~12 000g,三向每方向 3 次),试验后按照上表 3 项目进行检查试验,阀芯运动灵活,阀芯阀体密封性良好。

2.2.5 寿命考核试验

寿命考核试验是指按照额定工况试验到工作寿命考核值时无故障发生,也可根据工作寿命指标的要求安排考核的子样数和试验时间^[16]。对于充气阀,寿命试验为考核其动作次数及动作后功能性指标。力学环境试验后阀门已完成充放气动作 120 次的考核,为进一步验证材料配合可靠性,从中选取 3 台阀门各增加 80 次充放气试验,此次考核已达到要求使用寿命的 4 倍,试验过程中阀芯运动灵活,试验后按照表 3 的项目要求对阀门进行了检查,结果均满足要求。

2.2.6 各项试验后阀门剖切检查结果

上述全部试验完成后,对充气阀进行剖切检查,阀芯导向面、密封面质量良好,均无影响使用的瑕疵,如图 10 所示。



图 10 各项试验后阀芯状态

Fig.10 Condition of valve core after each test

3 阀芯两种工艺方案对比

阀芯采用 S-07 钢后,其工艺方案相对 S-03 钢渗氮工艺在生产效率、生产成本、产品质量等方面具有明显的优越性,其结果如下。

1) 生产效率和生产成本。S-03 钢渗氮工艺周转环节多达 12 次,生产一批产品约 4 个月,而采用 S-07 钢工艺,周转环节仅为 2 次,生产一批产品约 1 个月,生产效率提高了约 70%,成本降低了约 50%。

2) 质量可靠性。S-03 钢渗氮工艺阀芯在库存存放过程中均有轻微锈蚀,经过 20 d 的湿热试验后,锈蚀程度加重,而经过 48 h 的盐雾试验后,锈蚀极为严重,由表 1 可知,锈蚀较为严重的阀芯会导致充气阀的气密性超标,而 S-07 钢阀芯在上述过程中均无锈蚀发生。

4 结论

针对高压充气阀生产周期长、合格率低及贮存过程中阀芯锈蚀问题,开展了 S-07 钢替代工艺研究,生产阀芯经过了耐蚀性能试验、功能性试验、力学环境试验和寿命试验的考核,成功解决了阀芯的锈蚀问题,同时有效提高了产品的合格率和降低了产品的生产成本。

参考文献:

- [1] 孙法国,余锋,崔景芝,等. 箭体充气阀密封性能量化分析[J]. 阀门, 2015(1): 13—15.
SUN Fa-guo, YU Feng, CUI Jing-zhi, et al. Quantification Analysis Method of Rocket Valve Seal Performance[J]. Valve, 2015(1): 13—15.
- [2] 陈兴岩. 不锈钢气体渗氮改性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
CHEN Xing-yan. The Modification Research of Gas Nitriding on Stainless Steel[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [3] 王博. 纯铁及结构钢快速气体渗氮工艺及机理研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
WANG Bo. Rapid Gas Nitriding Process and Nitriding Mechanism for Pure Iron and Structural Steels[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [4] NG C H, CHAN O K, MAN H C. Formation of TiN Grid on NiTi by Laser Gas Nitriding for Improving Wear Resistance in Hanks Solution[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32: 459—464.
- [5] 相奎. 金属电化学线切割工艺研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2011.
XIANG Kui. The Processing Research of Metal Electrochemical Wire-cutting[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2011.

- [6] WAN Peng, REN Yi-bin, ZHANG Bing-chun, et al. Analysis of Magnetism in High Nitrogen Austenitic Stainless Steel and Its Elimination by High Temperature Gas Nitriding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(12): 1139—1142.
- [7] 章敬保, 丁宗凯, 张程崧. 合金钢与碳钢渗氮层的耐腐蚀性对比[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 199—204.
ZHANG Jing-bao, DING Zong-kai, ZHANG Cheng-song. Comparative Study on Corrosion Resistance of Nitride Layer between Alloy Steel and Carbon Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(11): 199—204.
- [8] KADIRVEL A, HAREHARAN P, MUDHUKRISHNAN M. A Study on the Die-Sinking Micro-Electrical Discharge Machining of EN-24 Die Steel Using Various Electrode Materials[J]. Advanced Materials Research, 2014: 73—82.
- [9] 魏妍丽. 线切割加工质量的分析及改善措施[J]. 模具技术, 2015(2): 57—59.
WEI Yan-li. Analysis and Improvement for Wire-cutting Electrical Discharge Machining[J]. Die and Mould Technology, 2015(2): 57—59.
- [10] QUINTERO D, GALVIS O, CALDERON J, et al. Effect of Electrochemical Parameters on the Formation of Anodic Films on Commercially Pure by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 248: 1223—1228.
- [11] 施建荣. 论舰船设备的湿热试验[J]. 理论与试验研究, 2005, 2(3): 7—9.
SHI Jian-rong. Damp and Heat Test of Ship Equipment[J]. Theories and Experimental Research, 2005, 2(3): 7—9.
- [12] 赵青, 吴瑞轩. 空空导弹系统金属零部件盐雾试验与改进措施[J]. 河南科技, 2015, 564(5): 128—129.
ZHAO Qing, WU Rui-xuan. Salt Spray Test and Improved Measures for Air-to-air Missile System Metal-parts[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015, 564(5): 128—129.
- [13] 朱顺. 盐雾试验中各试验参数对结果的影响[J]. 上海计量测试, 2016(1): 28—29.
ZHU Shun. The Influence of Various Parameters on the Results of Salt Spray Test[J]. Shanghai Measurement Testing, 2016(1): 28—29.
- [14] 荣克林, 洪洁. 高性能系统-航天飞行器的力学环境试验与评估[J]. 强度与环境, 2017, 44(6): 1—7.
RONG Ke-lin, HONG Jie. Experiment and Evaluation about Mechanical Environment for High Performance System[J]. Structure & Environment Engineering, 2017, 44(6): 1—7.
- [15] 沈凤霞. 力学环境试验测量不确定度分析[J]. 强度与环境, 2010, 37(1): 58—60.
SHEN Feng-xia. Measurement Uncertainty Analysis of Dynamic Environment Test[J]. Structure & Environment Engineering, 2010, 37(1): 58—60.
- [16] 张仕念, 颜诗源, 徐军, 等. 导弹弹上仪器工作寿命考核方法探讨[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(2): 1—4.
ZHANG Shi-nian, YAN Shi-yuan, XU Jun, et al. Discussion on the Working Life Assessment Method of Missile-borne Instrument[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2017, 35(2): 1—4.