文章编号：1003-1480（2026）01-0054-07

长期高温工况下燃气发生器密封性能优化设计

韦 瑞，陈 静，杨甲甲，高春亮，冯少培

（陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061）

摘 要：针对低燃温燃气发生器在长时间工作周期中出现的密封失效问题，本文通过热-结构耦合仿真，揭示了原铜质垫圈在≥300 ℃高温下因蠕变、应力松弛及差异热膨胀导致的接触应力动态衰减与泄漏机制。据此，提出了 3 种密封改进方案：退火态 1050-O 铝垫圈、柔性石墨垫圈以及一种以“激光深熔焊接为主、铝垫圈预紧为辅”的复合密封结构。静压与点火联合试验表明：铝垫圈方案在 5.5 MPa 时出现微泄漏；石墨垫圈密封耐压可达 8 MPa；而复合结构在-10 ~ +65 ℃、10 MPa、1 400 s 条件下零泄漏，且焊缝熔深达 1.15 mm、拉断力≥130 kN。研究表明，复合密封以冶金-机械双重屏障突破了传统垫圈的高温性能局限，为提升燃气发生器的长寿命与高可靠性提供了可工程化的解决方案。

关键词：燃气发生器；高温蠕变；密封失效；激光焊接；铝垫圈；石墨垫圈

中图分类号：TQ560.5 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.009

Optimization Design of Sealing Performance for Gas Generators under Long-Term High Temperature Conditions

WEI Rui，CHEN Jing，YANG Jia-jia，GAO Chun-liang，FENG Shao-pei

（Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute,Xi’an, 710061）

Abstract：To address the sealing failure of low-temperature gas generators during long-duration pressurization missions, this paper combines fault-tree analysis with coupled thermo-mechanical simulation to demonstrate how copper gaskets lose elastic recovery above 300 ℃ owing to creep and stress relaxation, while differential thermal expansion further reduces contact stress and propagates dynamic gaps. Three remedies are proposed：annealed 1050-O aluminum gasket；flexible graphite gasket, and a hybrid scheme in which deep-penetration laser welding provides the primary seal and an aluminum gasket supplies secondary preload. Static-pressure and live-firing tests reveal that the aluminum gasket leaks slightly at 5.5 MPa, the graphite gasket remains leak-tight up to 8 MPa, and the hybrid seal achieves zero leakage at 10 MPa for 1 400 s over -10 ~ +65 ℃, with weld depths of 1.15 mm and tensile strengths exceeding 130 kN. The hybrid approach breaks the high-temperature performance ceiling of conventional gaskets through a metallurgical-mechanical dual barrier, offering an engineering-ready solution for long-life, highly reliable low-temperature gas generators.

Key words：Gas generator；High-temperature；Sealing failure；Laser welding；Aluminum gasket；Graphite gasket

低燃温燃气发生器是液体姿控动力系统中的核心组件，主要应用于推进剂贮箱的恒压维持、涡轮泵组的启动助推以及气囊式推进系统的快速充气等典型工况[1-3]。该装置利用固体推进剂的可控燃烧过程产生高温高压燃气，并通过多级过滤与梯度温控结构，实现燃气温度的有效调控，最终输出洁净、稳定且满足系统要求的高纯度增压工质。在动力系统工作中，燃气发生器与推进剂贮箱压力连通，兼具“能源产生”

收稿日期：2025-12-08

作者简介：韦瑞（1999-），男，在读硕士研究生，从事燃气做功类火工品技术研究。

通讯作者：陈静（1990-），女，副研究员，主要从事燃气做功类火工品技术研究。

基金项目：国家十四五预研项目（90903050301）。

引用本文：韦瑞，陈静，杨甲甲，等.长期高温工况下燃气发生器密封性能优化设计[J]. 火工品, 2026(1): 54-60.

与“结构承压”功能[4]，其可靠性影响动力系统安全与任务成功率。

目前，国内外学者针对燃气发生器的密封问题已开展了诸多工作，主要集中在新型密封材料适应性、结构参数的优化设计以及常温或短时高温工况下的密封性能验证等方面。例如，何君等[5]探讨了柔性石墨在固体发动机高温密封中的应用，王乐勤等[6]综述了柔性石墨垫片的发展趋势。然而，现有研究多聚焦于静态、常温或瞬态高温工况，对于在持续高温（>300 ℃）环境下，因材料蠕变与应力松弛导致的密封接触应力时变性衰减规律、界面动态间隙扩展机理等关键科学问题，尚缺乏系统性的机理分析与实验验证，导致长时间高温工作循环密封结构设计缺乏理论依据。

针对某型燃气发生器在工程样机地面试验过程中燃烧后期出现的泄漏问题，本研究旨在系统剖析其在高温工况下的密封失效机理，并提出切实有效的优化设计方案。为此，本研究首先借助热力学耦合仿真与故障树分析方法，系统阐释了原铜质垫圈在高温蠕变与差异热膨胀耦合效应作用下的应力松弛路径以及泄漏演化机制。在此基础上，创新性地提出并深入对比了铝垫圈密封、石墨垫圈密封以及激光焊接结合铝垫圈的复合密封这 3 种改进策略，明确了各方案的密封原理、工艺特性以及适用范围。最后，通过系统的实验验证了各方案的有效性，并着重对激光焊接的关键工艺参数进行了优化，确定了保障焊缝质量的最优工艺窗口，进而为高可靠密封结构的工程应用提供了数据依据与实践参考。

1　密封失效机理

燃气发生器通过电信号激活点火装置，进而点燃点火药环。点火药环燃烧产生的高温固体颗粒触发主装药的燃烧反应。燃烧过程中生成的高压燃气在腔体内逐步积聚压力。当达到预设膜片破裂压强时，密封结构破裂，燃气经多级过滤后通过渐缩喉道加速排出，并通过管道系统对贮箱进行梯度增压，直至达到预定工作参数。

1.1　密封泄漏分析

在产品输出性能试验中，尽管输出性能正常且结构完整，但在燃烧室与端盖间的螺纹位置出现了局部胶液渗漏现象，如图 1 所示。使用气泡法进行后续气密性测试时，观察到从燃烧室与端盖间螺纹处有气泡产生。工程失效分析确认，本次泄漏发生在图 2 所示的密封圈组件区域。

图 1　燃气发生器燃烧室与端盖连接处泄漏现象

Fig.1　Leakage phenomenon at the joint between combustion chamber and end cap of the gas generator

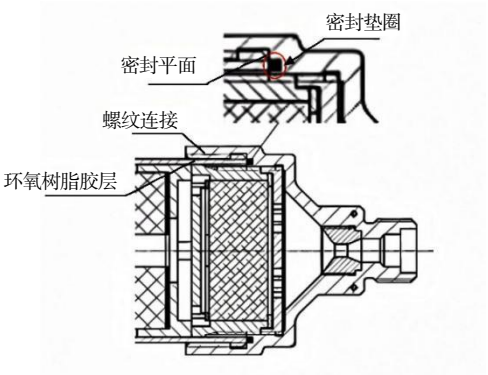

图 2　燃气发生器密封失效位置示意图

Fig.2　Schematic of sealing failure location in the gas generator

该密封机制依赖于上下两个精密加工的密封平面对铜质垫圈施加轴向压缩力以实现静态密封，并在内外螺纹配合界面施加环氧树脂基防松胶层，以提供二次锁定。故障再现试验显示，在额定工况下，密封界面出现非正常的胶液渗出现象；进一步的气密性检测同样在相同位置发现持续性气泡逸出。

1.2　失效机理

失效模式分析表明，泄漏路径源自燃烧室与端盖

金属接触密封界面，确定故障根源为 2 者之间的密封失效。基于故障分析模型的系统研究，针对可能导致密封失效的因素进行了多层次的失效分析，结果指出长期高温工况下的密封结构设计缺陷是导致泄漏的主要原因。

燃气发生器燃烧室与端盖之间的密封采用紫铜垫圈方案。根据垫圈的压紧机理，在预紧拧紧力矩作用下，垫圈发生适度变形，确保密封效果。然而，热力学耦合仿真结果如图 3~4 所示。

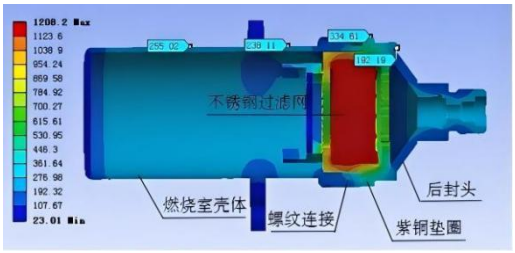

图 3 燃气发生器工作状态温度场仿真云图

Fig.3 Simulated temperature field of the gas generator under operating conditions

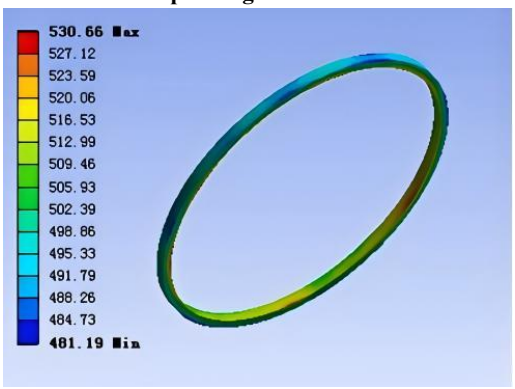

图 4 密封垫圈区域温度场仿真云图

Fig.4 Simulated temperature field in the gasket region

由图 4 可知，燃气发生器运行时，紫铜垫圈最高温度可超过 500 ℃，此时其弹性模量衰减约 30%[7]。高温蠕变效应及应力松弛现象显著削弱了紫铜垫圈的弹性恢复能力，低于常温条件下的水平。具体而言，当燃烧室与端盖组件经历瞬态热冲击时，差异热膨胀导致密封接触应力下降至低于标准规定的最小有效密封压力阈值。此过程引起密封界面动态间隙扩展，超出了垫圈的最大弹性补偿能力，最终导致密封界面完整性丧失和介质外泄。

在实际工作中，由于燃烧室内装药产生的高温高压燃气，连接螺纹受到热膨胀影响，使得密封面与垫圈之间出现相对分离趋势，降低了垫圈上的压紧力并造成接触不足的状态。此外，密封垫圈位于端盖过滤层附近，此处热交换尤为剧烈，致使紫铜垫圈承受严重的热负荷。结合材料性质分析，垫圈主要依靠塑性变形实现密封，在高温和应力作用下，原有的弹性变形部分逐渐消失，最终导致紫紫铜垫圈密封失效和泄漏的发生。

2 密封结构优化设计

针对燃气发生器在工程样机试验中暴露出的工质泄漏问题，本文在保持燃烧室主体结构不变的前提下，聚焦于燃烧室与端盖连接界面的密封失效机制，提出并系统论证了 3 种优化设计方案。研究遵循“材料–结构–工艺”协同优化原则，在提升装置在高温、高压及长时间服役条件下的密封可靠性。

2.1 优化方案设计

依据上述提到的优化设计原则，即传统铜质垫圈在高温下因蠕变与应力松弛导致密封应力衰减，本文提出以下 3 种改进方案。

2.1.1 方案 1：退火态铝垫圈密封

采用退火态纯铝 1050-O 替代原紫铜垫圈，并将密封位置沿轴向适度前移，以规避燃烧室最高峰值温度区，其结构示意图如图 5 所示。

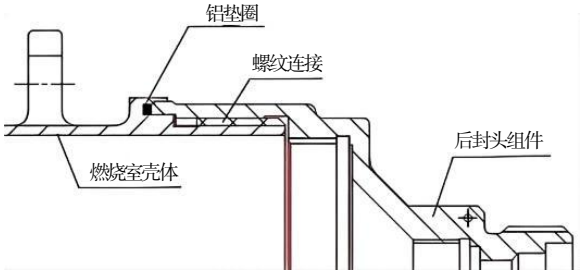

图 5 退火态铝垫圈密封结构示意图

Fig.5 Schematic of annealed aluminum gasket sealing

垫圈的初始设计厚度设定为 1.4~1.5 mm，目标压缩量不低于 0.2 mm。该设计方案的依据如下：

热膨胀匹配性：在高温下，热膨胀系数更高的铝垫圈比铜垫圈会产生更大的径向热膨胀。若垫圈材料坚硬，这种不协调的膨胀将产生巨大的热应力，强行分离界面。然而，退火态纯铝（1050-O）的屈服强度小于紫铜，其材质更软、塑性更好。因此，当不协调的热变形发生时，铝垫圈不是刚性抵抗，而是通过其

优异的塑性变形能力来吸收和适应这部分额外的膨胀量，将其转化为自身的微量塑性流动，从而避免了对密封接触界面造成破坏性的剥离应力。

塑性填充能力：铝的屈服强度（约 35 MPa）明显低于紫铜（约 70 MPa），在相同预紧力作用下，更易于发生充分的塑性变形，进而有效填充密封槽表面的微观不平度，形成连续且均匀的密封接触面。

2.1.2 方案 2：柔性石墨垫圈密封

采用高密度柔性石墨作为密封材料替代紫铜垫圈，并对燃烧室与端盖的螺纹配合进行公差优化，以确保装配精度。设计垫圈压缩率不低于 20%（对应压缩量约 0.3 mm），其结构示意图如图 6 所示。

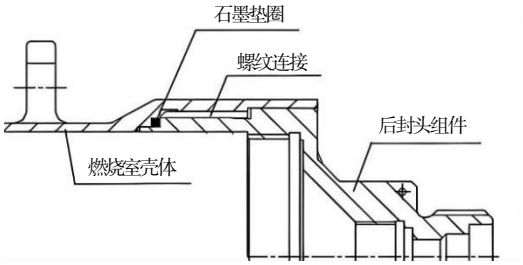

图 6　柔性石墨垫圈密封结构示意图

Fig. 6　Schematic of flexible graphite gasket sealing

该方案的核心优势体现于以下两个方面：

（1） 高温稳定性。石墨材料具备卓越的热稳定性（可承受高于 3 000 ℃的高温）以及极低的热膨胀系数，能够有效抑制高温环境下的蠕变现象与应力松弛，保障密封应力的长期稳定。

（2）自适应密封特性。石墨材料的层状结构使其拥有较高的可压缩性与自润滑性，能够在较低预紧力的条件下实现有效密封，并且可以适应装配误差与热变形，降低微间隙泄漏的风险。此外，石墨的化学惰性使其能够耐受燃气介质的腐蚀[5-6]。

2.1.3 方案 3：激光焊接与铝垫圈复合密封

在保留铝垫圈以实现初始机械预紧的前提下，于燃烧室与端盖螺纹连接部位开展激光连续焊接作业，构建“机械预紧 + 冶金结合”的双重密封体系。所设计的焊缝熔深不低于 0.9 mm，其结构示意图如图 7 所示。该方案的设计依据如下：

根本性消除蠕变失效路径：激光焊接通过局部熔融实现金属间的完全冶金结合，从根本上避免了传统弹性/塑性密封元件在高温环境下因材料性能退化而引发的失效问题。

载荷协同分配机制：螺纹结构承担主要的剪切与拉伸载荷，而焊缝则着重实现高温零泄漏密封。铝垫圈在焊接前确保组件紧密贴合，减小热变形与装配误差对焊缝质量的影响，二者协同工作，大幅提高系统在极端工况下的整体可靠性。

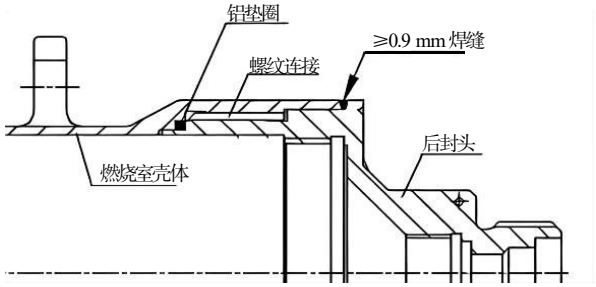

图 7　激光焊接与铝垫圈复合密封结构示意图

Fig.7　Schematic of composite sealing with laser welding and aluminum gasket

2.2 工艺参数优化与验证

2.2.1 预紧力矩确定

预紧力矩的精确控制是确保垫圈类密封方案可靠性的关键。理论上，最小预紧力 Q_p 可按公式（1）计算[8]。

$$Q_p = \sigma_s S + PA \qquad (1)$$

式（1）中：Q_p 为预紧力；σ_s 为材料屈服强度，取 34 MPa；S 为密封垫圈压紧面积（286 mm²）；PA 为反向作用力，P 为最大工作压力（15 MPa），数据取自燃气发生器工作的内部压强最大值；A 为螺纹间隙面积（131.2 mm²）。计算得到 $Q_p \geqslant 11.69$ kN。

对应最小拧紧力矩 T 可由公式（2）计算：

$$T = f Q_p d \qquad (2)$$

式（2）中：T 为拧紧力矩；f 为摩擦系数，取 f=0.2；Q_p 为预紧力，N；d 为螺纹受力直径，m。理论计算得 $T \geqslant 117$ N·m。

燃烧室与端盖采用 M50×1.5 螺纹连接，螺纹材料为 13Cr11Ni2W2MoV，其螺纹连接强度依据公式（3）进行计算：

$$F_{螺} = 0.58\pi d_1 n p \tau_b \qquad (3)$$

式（3）中：d_1 为螺纹小径，取值 48.376 mm；n 为螺纹圈数，取值 5；p 为螺距，取值 1.5 mm；τ_b 为

材料剪切强度。燃气发生器工作时，螺纹处最高温度可达 250℃以上，13Cr11Ni2W2MoV 材料在 550 ℃会出现回火脆性，而在 550℃以下材料性能变化相对较小。通过查阅相关文献资料[9]，可得该材料的剪切强度为 648 MPa（即 1080 MPa×0.6）。

经计算可知，当 $F_{螺}\geqslant$ 428.4 kN 时螺纹连接将发生强度失效。

燃烧室内外径为 ϕ43×ϕ45.8，其壳体强度按照公式（4）计算：

$$F_{壳}=\tau_b S \qquad (4)$$

式（4）中：S 为壳体截面面积，取值 195.3 mm²。

经计算，壳体所能承受的最大预紧力 $F_{壳}$ = 147.6 kN。再根据上述公式（2）进行反算，可得最大破坏力矩为 1417.3 N・m。

然而，由于垫圈压缩过程涉及非线性塑性变形，理论计算难以精确反映实际压缩量。因此，通过实验标定不同力矩下的垫圈压缩行为，垫圈压缩量与拧紧力矩关系如表 1 所示。

表 1 铝垫圈在不同拧紧力矩下的压缩量

Tab.1 Compression of aluminum gaskets under various torque levels

方案	设计厚度/mm	压缩量/mm			
		200 N・m	300 N・m	350 N・m	400 N・m
1		-	-	0.21	0.21
2	1.4~1.5	-	-	0.28	0.28
3		0.19	0.23	0.25	0.25

结果表明：当力矩达到 300 N・m 时，铝垫圈压缩量稳定超过 0.2 mm，且继续增大力矩压缩量不再增加，表明密封槽间隙已完全填满。综合考虑安全裕度与工艺可行性，确定最优预紧力矩为 300 N・m。对于石墨垫圈，实验验证 300 N・m 力矩可确保压缩率≥20%，满足密封要求。

2.2.2 激光焊接工艺研究

为实现燃烧室与端盖的永久性密封，采用激光带药焊接工艺。本工艺直接在装有主装药的部件上进行，因此热安全性是首要考量。所用推进剂为改奥醋铅-1 推进剂，其主要成分为硝化棉、硝化甘油与奥克托今（HMX）的复合体系，具有能量密度高、燃烧稳定性好等特点，其实测燃点大于>150℃。为确保焊接过程不引发意外点火，需严格控制焊接热输入。

（1）热安全性评估

采用激光带药焊接工艺，为确保推进剂安全，在端盖外壁布置热电偶监测焊接过程中的壁面温度，测点布置如图 8 所示。实验测得最高壁温约为 50 ℃，远低于改奥醋铅-1 推进剂的燃点，证明该工艺在热力学上具备良好的安全性。

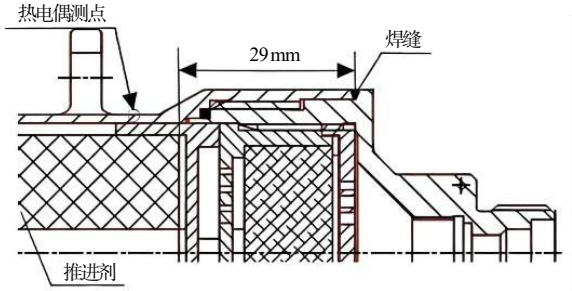

图 8 激光带药焊接测温点布置示意图

Fig. 8 Layout of temperature measurement points in laser flux-cored welding

（2）焊缝强度与工艺窗口确定

针对燃烧室与端盖螺纹连接界面开展激光焊接作业时，必须保证焊缝在高温工况下同时具备力学强度与密封完整性。虽然螺纹结构承担了主要的机械载荷，但焊缝仍需承受极端工况（例如预紧失效或螺纹蠕变）下由内压所产生的环向应力。依据薄壁圆筒强度准则，临界壁厚可按照公式（5）进行计算。

$$\delta_c \geqslant \frac{P_{\max} D}{2[\sigma]+P_{\max}} \qquad (5)$$

式（5）中：δc 为临界壁厚；$P_{\max}$ 为筒体内腔最大压强，取 15 MPa；Dc 为壳体圆筒内径，取 50.6 mm；按结构钢材料的抗拉强度 σ_b=1 080 MPa，焊接后取 85%为 918 MPa，安全系数取 2，[σ]=459 MPa。计算得临界壁厚 0.81 mm。考虑制造公差与安全裕度，设定最小熔深要求为 0.9 mm，以确保极端载荷下结构完整性。

为量化工艺参数与焊接质量间的映射关系，受试验条件所限，每个方案仅验证 2 次。但通过双重复实验设计降低随机误差影响，后续阶段将扩大样本容量。通过系统性焊接实验，试验结果见表 2。

基于独立样本 t 检验（α=0.05）的分析结果显示，焊接功率对拉断力和熔深存在显著的正向效应（p< 0.001）。当功率从 130 W 增至 170 W，拉断力提高了 29.8%，熔深增加了 41.7%。

焊接转速主要对熔深起到调控作用，降低转速可

显著增加熔深（p<0.001），然而对拉断力影响并不显著（p=0.272）。

综合考量密封完整性、接头强度以及工艺稳定性，最终确定的最优工艺参数区间为：激光功率 150~170 W，转速 20~30 °/s。

表 2　激光焊接工艺参数与接头性能测试结果

Tab.2　Laser welding parameters and joint performance test results

编号	功率 /W	转速 /（°·s^{-1}）	拉断力 /KN	左侧熔深 /mm	右侧熔深 /mm
1	130	30	97.25	0.870	0.950
2	130	30	97.33	0.928	0.897
3	150	30	110.89	1.028	1.106
4	150	30	113.94	1.152	1.151
5	170	30	123.26	1.252	1.295
6	170	30	129.23	1.321	1.301
7	190	34	143.79	1.441	1.417
8	190	34	132.89	1.343	1.311
9	130	20	92.00	1.005	0.958
10	130	20	111.54	1.055	1.020
11	150	20	101.28	1.289	1.308
12	150	20	109.20	1.238	1.272
13	130	14	100.36	1.134	1.114
14	130	14	114.58	1.106	1.100

3　实验验证

为系统评估燃气发生器 3 种密封改进方案的性能，开展了多维度实验验证，涵盖静态冷气气压试验、带药点火试验及后续气密性检测。通过对比分析各项指标与失效模式，揭示了各方案的技术优势与适用边界。

3.1 铝垫圈密封（方案 1）

按照方案进行了两发静态冷气气压试验，产品在 10 MPa 压力下持续 1 400 s 未出现泄漏现象。随后装配带药产品进行点火试验，试验结束后再次进行 3.1 MPa、1 400 s 的气密检测。工作过程中未发生泄漏，试验后水泡法检测亦无气泡产生。然而，在气压升至 5.5 MPa 时，观察到一处微小气泡。试验结果表明，该改进措施有效提升了抗高温蠕变性能。然而，5.5 MPa 工况下出现的微泄漏说明，尽管铝垫圈通过塑性变形填补了初始装配间隙，但其应力松弛率仍导致高温下界面补偿能力不足，需结合预紧力优化进一步提升可靠性。

3.2 石墨垫圈密封（方案 2）

采用石墨垫圈替代传统紫铜垫圈，并对其密封性能进行了系统验证。首先，通过 2 发静态冷气气压试验，产品在 10 MPa 压力下连续 1 400 s 内均保持无泄漏状态，证明了该方案在高压工况下的初步可靠性。在此基础上，对组装了药剂的产品进行了点火试验，试验结束后，产品再次接受 3.1 MPa 压力下持续 1 400 s 的气密性检测，结果显示整个工作过程中未出现泄漏现象。

此外，在产品经历 5 MPa（约 17.5%压缩）的工作条件后，利用水泡检测法未观察到气泡产生；然而，当气压升至 8 MPa（约 25%压缩）时，检测中开始出现极微小的气泡现象。

为了进一步探讨石墨材料的非金属密封特性，本研究设计并实施了高压梯度试验和热冲击试验。实验结果表明，得益于石墨垫圈独特的层状结构，其具备自适应填充效应，能够有效缓解因高压作用所产生的应力集中问题，从而在高达 8 MPa 的工作压力下仅在极限条件下出现微量泄漏，充分验证了石墨垫圈在严苛工况下的密封优势。综上，石墨垫圈在高压、高温短周期工况下展现优异密封效能，但其非金属界面公差敏感性不足，制约了其在更高密封压力下的应用。

3.3 激光焊接与铝垫圈复合密封（方案 3）

按照方案 3 进行了 2 发点火试验，试验产品状态及结果见表 3。点火试验后再次进行 3.1 MPa、1 400 s 的气密检测。工作过程中产品未发生泄漏现象，试验后水泡法检测产品焊接处均未出现气泡，说明改进措施有效。

表 3　方案 3 的产品状态及其气密性试验结果

Tab.3　Product status and air-tightness test results of scheme 3

产品序号	垫圈状态	焊接方式	焊缝熔深/mm	试验温度/℃	气密试验结果
1	压缩量 0.15（拧紧力矩 300 N·m）	连续焊	1.15	-10	10 MPa 不泄漏
2	压缩量 0.19（拧紧力矩 300 N·m）	连续焊	1.15	+65	10 MPa 不泄漏

在改进方案中，铝垫圈仅发挥辅助作用，最终密封效果主要依靠焊接来保障。决定最终密封效果的关键因素是焊接质量，因此，必须确保焊接过程的可靠性，在工艺措施中需针对焊接质量开展检测工作。

通过双重复焊接试验，验证了复合密封机制的协同强化效应。对比发现，方案 3 在极端工况下的密封可靠性相较于方案 1 和方案 2 有显著提升，且其工艺

稳定性明显优于单一材料方案，为高可靠燃气发生器提供了融合冶金密封与机械补偿的优化途径。

方案 3 的核心优势在于采用以激光连续焊接为主、螺纹配合为辅的复合承力机制。在此方案中，铝垫圈并非直接参与密封过程，而是通过适度压缩，辅助固定端盖与燃烧室的相对位置，降低因装配偏差或热膨胀在焊接界面产生的局部应力集中现象，同时确保螺纹配合面在焊接前实现紧密贴合，为焊缝提供均匀的预紧力支撑。若不使用垫圈，焊缝需独自承受全部热载荷和机械载荷，容易因应力集中而产生开裂风险；而保留垫圈则形成“螺纹机械锁紧 + 焊缝密封”的双重保障机制，既利用螺纹的抗剪切能力分担动态载荷，又借助激光焊接实现高温环境下的零泄漏密封。

相比之下，方案 1 依靠铝垫圈的塑性变形实现密封，在高温条件下易因应力松弛而失效；方案 2 采用低压缩性的石墨垫圈，螺纹调整过程复杂，且界面贴合性较差，对压强密封工况的适应能力有限，仅适用于 8 MPa 以下的密封场景。方案 3 通过结构协同设计，在极端工况下同时具备可靠性与工艺可控性。

在工艺成本方面，方案 1 与方案 2 仅在垫圈成本上存在差异，整体工艺成本差异较小；与之相比，方案 3 由于引入了激光焊接及检测工艺环节，其工艺成本提高了 12.5%。

表 4　3 种密封改进方案效果对比表

Tab.4　Comparison of three sealing improvement schemes

方案	密封方案	工艺特点	最高适用压力/MPa	良品率/%
1	铝垫圈密封（塑性变形密封，热膨胀匹配性改善）	力矩加载面积大，工艺难度较小，力矩加载对壳体外形损伤小。	3.1	100
2	石墨垫圈密封（高温稳定，高压缩率）	优化石墨与金属界面的贴合性及防碎屑工艺增加复杂度。	8.0	99.5
3	铝垫圈+对接焊（焊接为主，垫圈为辅）	增加垫圈选配过程，加载力矩对壳体外形损伤较大。	13.0	99（工艺改进前 90%）

4 结论

本文针对某型燃气发生器工程试验中燃烧室与端盖连接界面密封失效问题，开展失效机理分析、结构优化设计及实验验证研究，主要结论如下：

（1）传统紫铜垫圈密封结构在高温下因材料蠕变、应力松弛使接触应力衰减，加上差异热膨胀效应，导致密封界面间隙扩展，超出垫圈弹性补偿能力，引发介质泄漏。热-力耦合仿真显示，工作时垫圈区域温度超 500 ℃，弹性模量下降约 30%，是密封性能退化关键因素。

（2）提出 3 种改进方案并优化工艺参数：方案 1 用退火态铝垫圈，提升密封稳定性，在 3.1 MPa 以下可可靠密封，5.5 MPa 时微泄漏，高温应力保持能力有限；方案 2 采用柔性石墨垫圈，高温稳定性和自适应填充特性好，8 MPa 下密封良好，适用于高压短时工况，但对装配公差敏感，应用受限；方案 3 构建“铝垫圈预紧+激光连续焊接”复合密封体系，消除高温蠕变失效路径，在 13 MPa 极端压力及-10 ~ 65 ℃ 宽温域零泄漏，提升密封可靠性与环境适应性。

（3）综合对比，方案 3 工艺成本增加 12.5%，但密封性能、长期稳定性和极端工况适应能力优于前两者，良品率达 99%，具工程推广价值。

参考文献：

[1] 陈静,张博,张明,等.过滤结构对贮箱增压用燃气发生器输出性能的影响[J].火工品, 2024(2): 26-29.

[2] 赵芳,任泽斌.燃气发生器应用综述[J].火箭推进, 2019 (3):1-8.

[3] 刘睿, 张善科, 赫英辉. 船用燃气轮机燃气发生器特性仿真与试验研究[J]. 舰船科学技术, 2021(11): 116-121.

[4] 张明,杨绪印,吴秋.高低燃温组合推进剂下喷管壁面温度边界层影响规律[J].弹箭与制导学报, 2016(2): 91-93.

[5] 何君,李颖,余瑞,等.柔性石墨在固体发动机高温密封上的应用研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40 (6): 1-4,10.

[6] 王乐勤,杨晖,励行根,等.柔性石墨密封垫片的研究现状及发展趋势[J].流体机械,2013,41(6) : 37-41.

[7] 罗汉武,来文青,姜国义,等.不同温度下变压器绕组材料弹性模量及短路轴向力学性能研究 [J].绝缘材料, 2017, 50 (9): 46-51.

[8] 成大先.机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.

[9] 孙玉福.实用工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.