

研究论文

柔性石墨金属波纹复合增强垫片密封性能试验

励行根^{1,2}, 沈明学¹, 王成林³, 魏世军^{1,2}, 励洁², 彭旭东¹

(¹ 浙江工业大学过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310032;

² 宁波天生密封件有限公司, 浙江 宁波 315302; ³ 中核核电运行管理有限公司一厂, 浙江 海盐 314300)

摘要: 在全自动垫片综合性能试验台上分别进行了 316L 和 A3 钢作为骨架材料的金属波纹复合垫片的泄漏率、压缩回弹性能和应力松弛试验, 考察了柔性石墨覆盖层厚度、骨架材质和垫片应力对垫片密封性能和力学性能的影响, 分析了不同覆盖层厚度和垫片应力下的金属波纹残余高度。结果表明: 覆盖层厚度对垫片的密封性能有重要影响, 厚度为 0.6 mm 时该类垫片的综合性能最佳; 金属波纹复合垫片具有良好的承载能力和密封性能, 尤其适宜压力波动、温度剧变等场合的密封, 预压缩处理更能真实反映出复合垫片优异的回弹性能; 此外, 与 A3 钢作为骨架材料的复合垫片相比, 316L 复合垫片的密封性能和压缩回弹性能随垫片应力的增加逐渐显现, 且其抗松弛能力和抗蠕变性能也得到了显著提高。

关键词: 复合增强垫片; 柔性石墨; 金属波纹; 密封性能; 整体器件; 优化设计; 实验验证

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141172

中图分类号: TB 42

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 04—1417—08

Sealing performance of flexible graphite corrugated metal composite gaskets

LI Xinggen^{1,2}, SHEN Mingxue¹, WANG Chenglin³, WEI Shijun^{1,2}, LI Jie², PENG Xudong¹

(¹ Engineering Research Center of Process Equipment and Its Remanufacture, Ministry of Education,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, Zhejiang, China;

² Ningbo Tiansheng Sealing Packing Co. Ltd., Ningbo 315302, Zhejiang, China;

³ Qinshan NPP Phase I, CNNC Nuclear Power Operations and Management Co. Ltd., Haiyan 314300, Zhejiang, China)

Abstract: The leakage ratio, compression recovery and stress-relaxation of flexible graphite corrugated metal composite gaskets with 316L and A3 steel as framework were tested on an automatic multi-function gasket testing rig. The effects of flexible graphite cover layer thickness, frame material and gasket stress on sealing performance and mechanical properties were investigated. The residual thickness of corrugated metal was determined at different thicknesses of cover layer and gasket stresses. The sealing performance of the composite gasket was mainly dependent upon the thickness of cover layer with flexible graphite, and optimal sealing performance was observed for the corrugated metal when the thickness of cover layer was 0.6 mm. The composite gaskets had good carrying capacity and sealing performance, which was especially suitable for complex applications, such as pressure and temperature fluctuations. Also outstanding recovery of the composite gaskets could be obtained by pre-compression. In addition, as gasket stress increased, sealing and compression recovery performance of 316L composite gaskets became obviously better than the composite gaskets with A3 steel as framework, and the former

2014-08-04 收到初稿, 2014-12-15 收到修改稿。

联系人: 沈明学。第一作者: 励行根 (1962—), 男, 高级工程师。

基金项目: 大型先进压水堆核电重大专项 (ZB02K06)。

Received date: 2014-08-04.

Corresponding author: SHEN Mingxue, shenmx@zjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Major Project of Large-scale Advanced Pressurized Water Reactor Nuclear Power Projects (ZB02K06).

had distinct improvement than the latter in resisting stress relaxation and creep behavior.

Key words: composite gasket; flexible graphite; corrugated metal; sealing performance; monolith; optimal design; experimental validation

引 言

柔性石墨金属波纹复合增强垫片(简称“金属波纹复合垫片”)是在波纹金属垫片的基础上改进和发展起来的新型复合密封垫片,它是以金属波纹板作为骨架材料、以柔性石墨板为上下覆盖层的一种复合式垫片^[1]。该类复合垫片既有金属波纹垫片优异的回弹特性,又兼有柔性石墨熔点高、自润性好、膨胀系数大且耐高/低温、耐化学腐蚀及耐辐射性能等优点^[2-4]。此外,它能克服缠绕垫片易散架和压溃、包覆垫片沿径向发生剪切破坏、平垫片覆盖材料易被向外挤出及发生蠕变、齿形垫片易损伤法兰面等弊端^[1]。因此,该垫片可广泛应用于石油、化工、核电、航空航天和军工等众多领域,尤其适用于苛刻工况和密封环境下的高参数场合,例如高温加氢裂化装置、高压换热器、大膨胀量蒸汽管道系统等。然而,目前该垫片在生产和选用等方面尚缺乏科学的理论分析和系统研究,也无明确骨架和覆盖层具体尺寸参数的相应规范或标准^[5]。

目前,国内外研究复合垫片的形式主要集中于金属石墨缠绕式垫片^[6-9]、金属波齿复合垫片^[10-12]和金属接触型石墨垫片^[13-14]等。许多学者针对柔性石墨金属复合垫片的不同金属骨架形状与结构进行了较系统的研究^[7,11,15-16]。其中,文献^[15]详细比较了4种不同金属骨架(V形、圆弧形、梯形和波纹形)的柔性石墨复合垫片在不同尺寸参数下的力学性能,结果表明以波纹形为骨架的复合垫片压缩和回弹性能均明显优于其余几种骨架的复合垫片。然而,迄今针对金属波纹复合垫片的相关文献报道甚少^[2,17]。此外,柔性石墨是一种带空隙的各向异性流变材料,有限元模拟局限于采用纯弹性或弹塑性模型甚至抛开石墨层进行分析^[15-16],因此有限元模拟很难真实地评价复合垫片的变形行为和应力场分布。本研究旨在优化金属波纹复合垫片结构参数,

进而提高该类垫片的密封性能,通过泄漏率、压缩/回弹性能、骨架材料变形行为及应力松弛等垫片重要性能的分析系统研究金属波纹复合垫片力学行为和密封性能。主要创新之处在于对垫片力学行为分析的过程中首次引入骨架残余高度的概念,针对骨架材料的变形行为结合垫片常温/高温密封性能试验数据的综合分析探讨金属波纹复合垫片的密封机理,以期金属波纹复合垫片的生产、工程选用等提供科学的理论依据。

1 试验材料和方法

1.1 垫片的材料、结构及规格

试验用金属波纹复合垫片由宁波天生密封件有限公司提供,所有垫片均参照 GB/T 19066.3—2003《柔性石墨金属波齿复合垫片技术条件》的要求生产^[5],垫片的基本结构及其主要结构参数分别见图1和表1,柔性石墨主要技术参数见表2。试验开始前垫片经橡胶弹性垫预压(2 MPa)和干燥处理。

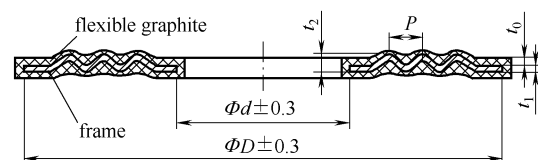


图1 金属波纹复合垫片结构

Fig.1 Diagram of corrugated metal composite gaskets

1.2 试验装置

试验在全自动垫片综合性能试验台上进行,如图2所示。试验台由机架、试验法兰、垫片加载系统、泄漏率检测系统、温度控制系统、数据采集与控制系统等组成,可进行高温/常温下垫片的压缩回弹性能试验、密封性能试验、应力松弛试验。其中,泄漏率检测系统主要包括氦质谱检漏仪(SFJ-211,安徽皖仪科技股份有限公司,分辨率为 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、氦气源(氦气纯度:99.9%)和连接

表1 金属波纹复合垫片骨架材料结构参数

Table 1 Structure parameters for frame material of corrugated metal composite gaskets

Outside diameter D/mm	Inner diameter d/mm	Thickness of frame t_1/mm	Wave number n	Pitch of waves P/mm	Wave height t_2/mm	Thickness of graphite t_0/mm
113.6	86.8	0.5	3	3	1.5	0.38/0.6/0.8/1.0

表2 金属波纹复合垫片用柔性石墨主要技术参数

Table 2 Main technical parameters for flexible graphite of corrugated metal composite gaskets

Test item	Density /g · cm ⁻³	Tensile strength/MPa	Compressibility /%	Recovery /%	Ash content /%	Carbon content/%	Chlorinity content/μg · g ⁻¹	Sulphur content/μg · g ⁻¹	Thickness deviation/mm
specified value	0.9±0.1	≥4.5	≥41	≥9	<0.5	>99.5	<30	<200	±0.03
test value	0.99	5.0	53.8	12.4	0.26	99.63	24	70	±0.02

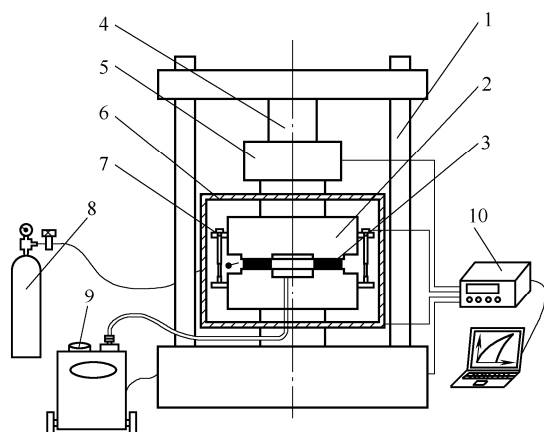


图2 垫片试验机结构

Fig.2 Diagram of specialized test apparatus for gasket

1—base; 2—flange; 3—tested gasket; 4—loading system; 5—pressure sensor; 6—temperature control system; 7—displacement sensor; 8—helium source; 9—helium mass spectrometer; 10—data acquisition and control system

管路等，上下法兰面的表面粗糙度为 $Ra = 0.2$ 。试验机最大试验力为 500 kN，分辨力为最大试验力的 $1/200000$ ；位移控制精度为 0.001 mm。此外，本研究涉及的试验温度、加卸载速度及初始载荷等均按国家标准进行^[5,18-19]。

1.3 试验方法

为了更好地了解覆盖层厚度、骨架材料材质对金属波纹复合垫片力学性能和密封性能的影响，本研究选用 4 种不同石墨层厚度、2 种不同骨架材料及结构的复合垫片进行了详细的对比试验研究。试验主要包括常温（室温：20℃±2℃）下不同参数复合垫片的压缩/回弹性能试验、密封性能（泄漏率测试）试验以及常温和高温（300℃±5℃）工况下的应力松弛试验。对于上述试验，同一条件下均各取 3 个试样进行重复试验，以排除试验数据的偶然性。每次试验前用二甲苯将法兰清洗干净，以避免法兰面残留石墨影响测试结果。

2 实验结果与讨论

2.1 密封性能分析

图 3 示出了不同石墨覆盖层厚度（0.38 mm/0.6

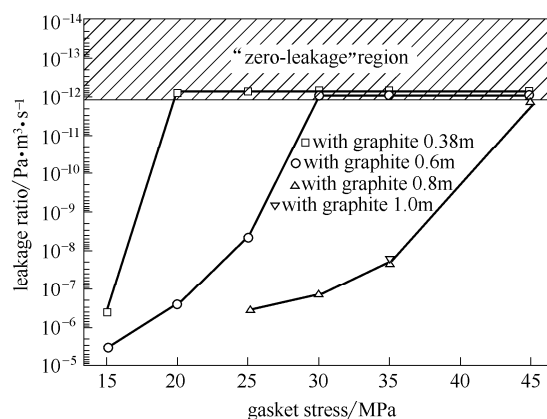


图3 不同石墨厚度下复合垫片泄漏率随垫片应力的变化

Fig.3 Variation of leakage rate of composite gaskets with loading stress under different thickness of graphite

mm/0.8 mm/1.0 mm) 下 316L 金属波纹复合垫片的泄漏率随垫片应力的变化。由图可知，在“零泄漏”（泄漏率 $\leq 1.1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ）前泄漏率和预紧应力基本呈负指数关系，即预紧应力越大泄漏率越小。其中，覆盖层厚度为 0.38 mm 的复合垫片密封性能最好，0.8 mm 和 1.0 mm 柔性石墨覆盖的复合垫片密封性能较差，而覆盖层厚度为 0.6 mm 的垫片在 $\sigma = 30 \text{ MPa}$ 的垫片应力下泄漏率达到 $1.1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此，石墨覆盖层厚度对复合垫片的密封性能有重要影响。

图 4 (a) 示出了 316L 波纹和平板两种不同骨架结构的复合垫片泄漏率对比。由图可知金属波纹作为骨架材料的复合垫片泄漏率均明显低于平板复合垫片，表明金属波纹骨架材料对复合垫片的密封性能具有显著的增强作用。此外，从测得的泄漏率数据看[图 4 (b)]，在较低垫片应力（如 $\sigma = 25 \text{ MPa}$ 和 35 MPa ）下 A3 和 316L 两种不同骨架材料的复合垫片泄漏率在同一量级，表明此时骨架材质对泄漏率影响并不明显。而随垫片应力的增加（如 $\sigma = 45 \text{ MPa}$ ）316L 复合垫片的密封性能明显高于 A3 复合垫片，其原因可能在于 316L 的力学性能优于 A3，其抵抗变形的能力较好。因此，较高的垫片应力下金属骨架波峰与法兰面间仅保留较薄的石墨层后金属波纹的增强作用开始显现，从而形成迷宫密封效

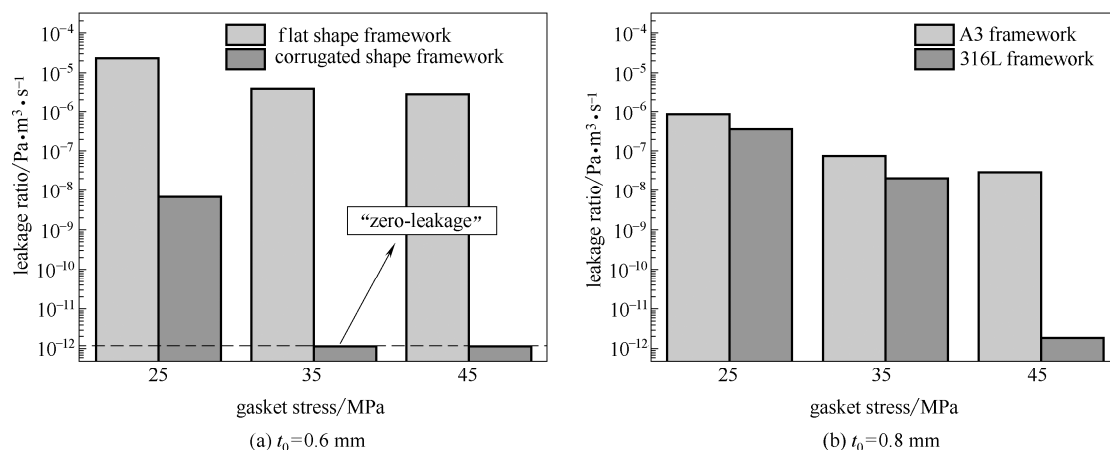


图 4 骨架有无波纹(a)和骨架材质(b)对复合垫片泄漏率影响

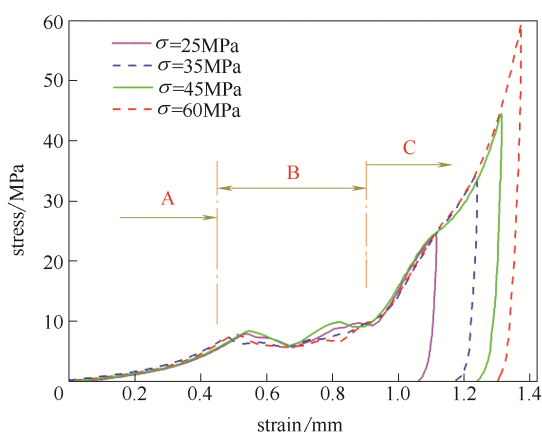
Fig.4 Effect of framework on leakage rate of composite gaskets

应。而在较低的垫片应力下密封面上石墨起主要的承载功能,故泄漏率相差不大。下文将针对骨架材料的变性行为做进一步的探讨。

2.2 压缩/回弹特性及垫片形貌

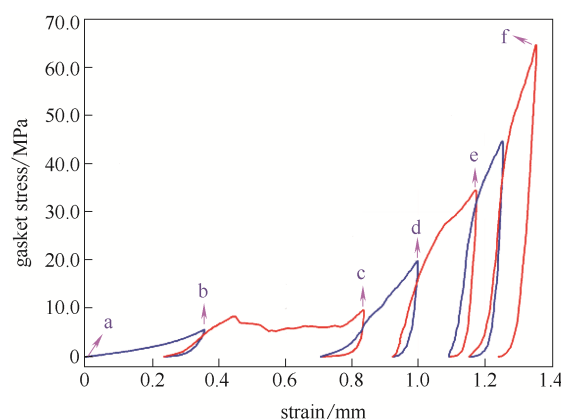
图 5 所示为 316L 金属波纹复合垫片在不同垫片应力作用下的应力-应变曲线。由图可知:在压缩过程中不同垫片应力下的应力-应变曲线大致均可分为如下 3 个阶段:缓慢爬升(阶段 A)、波动(阶段 B)、迅速爬升(阶段 C)。其中,阶段 A 和阶段 C 的曲线重合性较好,阶段 B 的曲线呈不规则波动;在回弹过程中,随垫片应力的增加回弹性能略有提高。此外,垫片在 A 和 B 两个阶段的压缩过程中曲线过于平缓,这将直接影响垫片的压缩率和回弹率性能指标,而且压缩率和回弹率不能真实地反映此类垫片的力学性能。

为了考察复合垫片在压缩过程中出现上述 3 个

图 5 不同垫片应力下的应力-应变曲线
(石墨层厚度 $t_0 = 0.6$ mm)Fig.5 Stress-strain curves under different gasket stress
(thickness of graphite $t_0 = 0.6$ mm)

阶段的原因及预压缩对垫片力学性能的影响,本研究对同一垫片进行了 6 MPa/10 MPa/20 MPa 等不同应力等级下的逐级多次循环加、卸载压缩回弹试验,分析了不同垫片应力下的压缩回弹性能和表面形貌。复合垫片在循环加、卸载条件下的压缩回弹性能曲线如图 6 所示。由图可知,垫片的压缩变形主要出现在较低垫片应力区域(即阶段 A 和阶段 B),如垫片应力 10 MPa 下的压缩量就已超过 0.8 mm (占垫片初始厚度的 30.53%),也就是说垫片的压缩性能只有承受一定的垫片应力后才能进入应力快速爬升的阶段 C,因此其力学性能明显不同于缠绕垫片^[6],而且与波齿复合垫片相比又增加了明显波动的阶段 B^[11]。

图 7 示出了对应图 6 中所示不同阶段的垫片表面形貌。如前所述,该类复合垫片由金属波纹板[图 7(a)]上、下覆盖柔性石墨层复合而成,其表面局部

图 6 复合垫片循环加、卸载的压缩回弹性能曲线
(石墨层厚度 $t_0 = 0.6$ mm)Fig.6 Stress-strain curves of composite gasket under cyclic loading
(thickness of graphite $t_0 = 0.6$ mm)

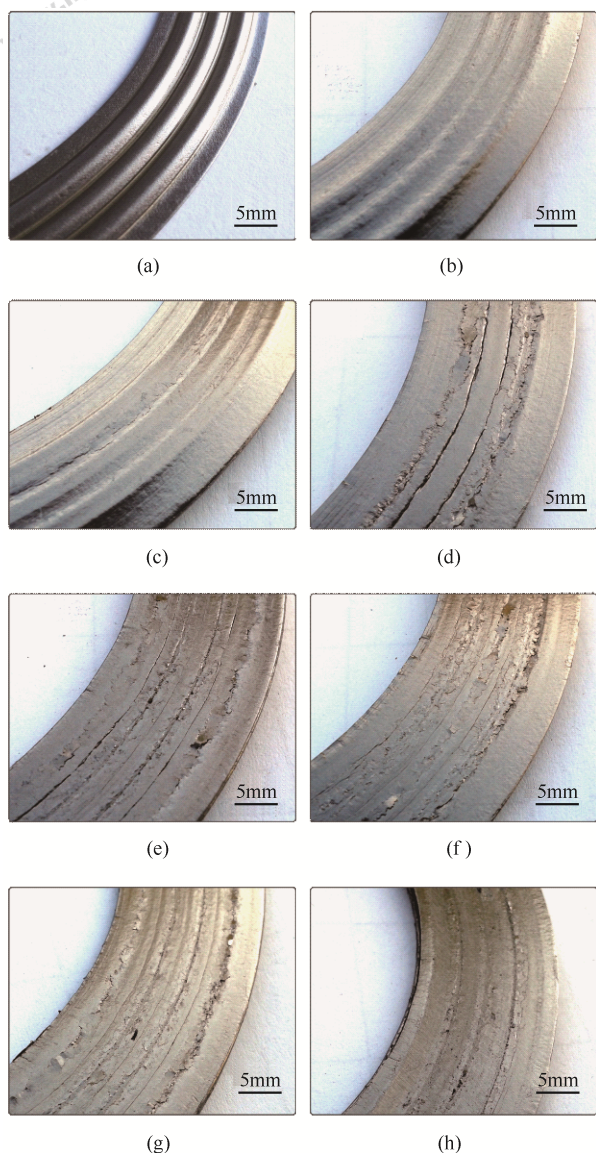


图7 金属波纹骨架及不同垫片应力下的垫片局部表面形貌
Fig.7 Local surface morphologies of corrugated metal frame and gaskets under different loading stress

形貌如图7(b)所示。柔性石墨是具有蠕变、松弛特性和一定孔隙结构的流变非线性材料。在初始压缩阶段(对应图5中阶段A),垫片起承载作用的主要为柔性石墨覆盖层,但该石墨层质地松软、易于压缩,于是波峰及其附近波谷的覆层柔性石墨材料先逐渐密实,但金属波纹凹槽上方的覆盖层尚未与法兰完全接触[图7(c)],该阶段垫片较差的承载能力就表现出应力-应变曲线上相对平缓;随着垫片应力的提高,波峰及其附近波谷处的石墨向两侧波谷推挤,使石墨层呈不规则的流动,并逐渐填实金属波纹的凹槽。结合图7(d)和图6分析可见,当这些石墨与被相向推挤过来的石墨相遇时(此时垫片形貌上呈现环形缝隙)垫片才进入阶段C的压缩过

程。因此,阶段B应力-应变曲线出现无规律的波动且不同垫片的压缩曲线重合性差(见图5中阶段B);当进入阶段C后,金属波纹的凹槽已完全被柔性石墨填实[图7(e)],此后随垫片应力的继续增加垫片密封面基本被压平[图7(f)~(h)]且其变形量已很小,因此应力-应变曲线呈迅速爬升趋势。另一方面,当金属骨架波峰与法兰面间仅保留较薄的石墨层时金属波纹的增强作用开始突显,金属波纹的弹性变形使得骨架波峰处形成同心圆的多道高比压线密封屏障,并与波谷内石墨受压形成的低比压面密封一起构成迷宫密封效应,从而有效保证了垫片良好的密封可靠性。当然,如果石墨覆盖层过厚(如 $t_0 = 0.8 \text{ mm}$),金属波纹的增强作用不能发挥功效,本质上如同金属平板复合垫片上石墨与法兰面应力均布的面密封,这就是石墨覆盖层过厚导致垫片密封性能下降的根本原因(图3)。此外,如果覆盖层厚度继续增加,而环形波纹能防止垫片上的石墨层被挤出,那么波纹区域的接触应力高于两侧,即垫片应力呈抛物线分布,这可能是图3中覆盖1.0 mm石墨的复合垫片密封性能优于0.8 mm垫片的主要原因。因此,合适的石墨覆盖层厚度才能有效发挥出金属波纹骨架材料的弹性储备性能,进而提高垫片的密封性能。

综合分析,对垫片进行预压处理可以消除垫片因柔性石墨覆盖层前期压缩和流动对压缩率和回弹率等垫片性能指标的影响。但对比图5和图6可以发现:预压不会影响垫片最终的密封和回弹能力,却利于客观反映其真实的力学性能。为此,对不同石墨覆盖层厚度的复合垫片在10 MPa预压缩后进行了45 MPa垫片应力下的压缩回弹性能试验,结果表明经过预压处理后的复合垫片承载能力和回弹性能明显提升,如图8所示。表3分别示出了不同石墨覆盖层厚度下复合垫片的压缩率、回弹率和回弹模量。由表可知,不同石墨覆盖层下的复合垫片压缩率均保持在40%左右,回弹率均高于波齿复合垫片^[10-11]。其中回弹性能最好的是石墨覆盖层厚度为0.6 mm的复合垫片,回弹率超过30%。此外,从回弹模量看,1.0 mm石墨层的复合垫片弹性模量为960.2 MPa,而前3种垫片的回弹模量均保持在600 MPa左右,表明石墨层厚度小于0.8 mm的复合垫片适宜压力波动时的密封场合,其性能优于波齿复合垫片^[10]。这是因为垫片回弹模量的大小可以反映卸载过程中垫片压紧应力的改变程度^[20],即垫片弹性模量越小相同回弹量下垫片应力削弱亦小,进而

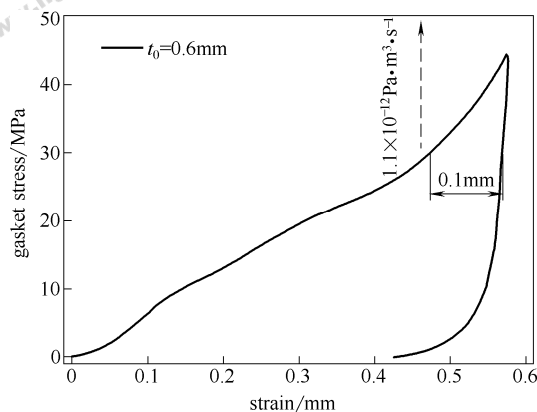


图 8 预压后复合垫片的压缩回弹曲线

Fig.8 Compressive-resilient curve of corrugated metal composite gaskets after prepress

表 3 不同覆盖层厚度的复合垫片压缩率和回弹率

Table 3 Compressibility and recovery of corrugated metal composite gaskets

Thickness of graphite/mm	Compressibility /%	Recovery /%	Rebound modulus/MPa
0.38	42.29	22.67	590.6
0.6	40.30	30.85	602.8
0.8	40.58	19.85	605.4
1.0	35.62	20.53	960.2

弥补管道中因压力波动、温度剧变等引起的瞬时垫片应力的不足。

2.3 骨架材料残余厚度分析

如前所述,随垫片应力的增加复合垫片的密封面被逐渐压平(图 7),金属波纹复合垫片主要依靠骨架上波纹的弹性回弹使密封面形成多道高比压线密封屏障而形成迷宫密封,垫片压缩后骨架材料的残余厚度大小反映了垫片受载后骨架的塑变和垫片的整体破坏程度,因此它也是表征垫片承载能力和是否具备回弹性能的重要参数。图 9 示出了不同石墨层厚度下复合垫片在 45 MPa 受压后垫片及骨架材料的初始高度和残余厚度。可以看出,随着石墨层厚度的增加,垫片残余总高度呈逐渐上升的趋势,而骨架材料呈先上升后逐渐趋于稳定的趋势,较厚的石墨覆盖层下骨架材料的变形很小,过厚的石墨覆盖层不能发挥出骨架材料应有的弹性增强作用,这是造成泄漏率过高的主要原因。另外,覆盖层为 1.0 mm 时波纹板增强层上的残留石墨最厚,这也进一步佐证了 2.2 节相关密封性能的论述。此外,有石墨覆盖层的垫片骨架材料残余高度均明显高于纯骨架材料,说明压实的石墨覆盖层能有效抵抗骨架材料的塑性变形。

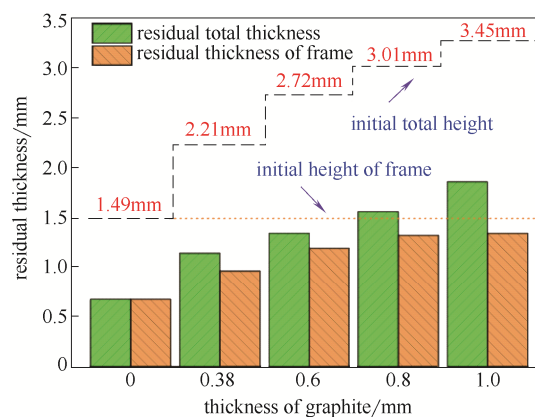


图 9 不同石墨厚度下垫片及骨架材料的初始高度和残余厚度分析

Fig.9 Initial height and residual thickness of corrugated metal frame and gaskets under different thickness of graphite

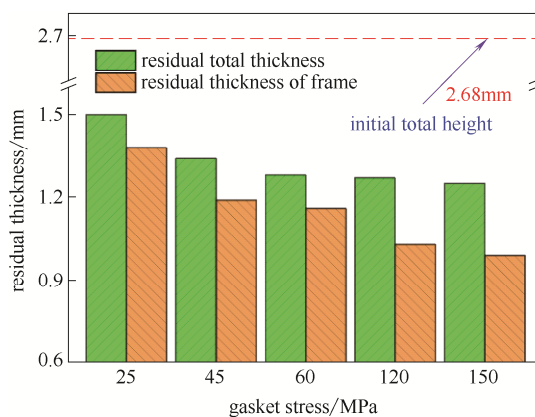


图 10 不同垫片应力下垫片及骨架材料的残余厚度对比

Fig.10 Comparison of residual thickness of corrugated metal frame and gaskets under different loading stress

图 10 示出了覆盖层厚度为 0.6 mm 的复合垫片在不同垫片应力下垫片及骨架材料的初始高度和残余厚度。由图可知:随着垫片应力的增加,复合垫片残余总高度逐渐下降但很快趋于稳定,金属波纹板的残余高度演变也表现出相近趋势。而恰当厚度(如 0.6 mm)的石墨层被密实后与骨架材料的有机结合有效抵抗了金属波纹骨架的变形,150 MPa 的垫片应力下金属波纹板的残余高度仍有 1 mm 左右(图 10),说明此类复合垫片具有极高的承载能力和抗变形能力,使得垫片在高应力作用下仍可以保持良好的密封性能。因此,工程上在安装金属波纹复合垫片时不必担心垫片因过载失效。

2.4 应力松弛性能分析

考虑到高温连接系统的密封失效往往是由垫片的蠕变和应力松弛引起的^[21],而蠕变性能也是表征密封材料最重要的性能之一,它反映了密封材料抵抗应力松弛和变形的能力,通常蠕变越慢则垫片

表4 不同石墨覆盖层厚度下的金属波纹复合垫片
常温/高温应力松弛试验

Table 4 Stress relaxation test with room temperature and high temperature under different thickness of graphite

Test temperature/℃	Gasket stress /MPa	Thickness of graphite/mm	Relaxation rate/%
room temperature (20±2)	35	0.38	5.305
		0.6	3.941
		0.8	6.536
		1.0	6.892
high temperature (300±5)	45	0.38	5.652
		0.6	3.676
		0.8	7.405
		1.0	9.576

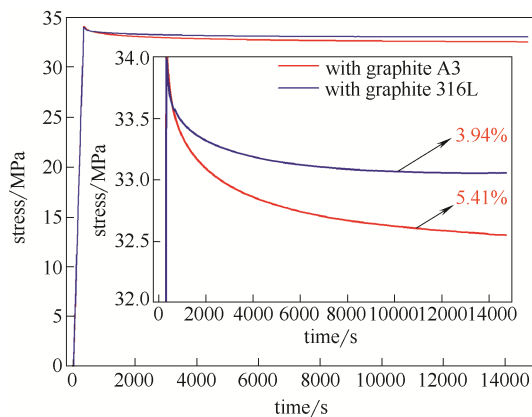


图11 两种不同骨架材料复合垫片的应力松弛性能对比
Fig.11 Comparison of stress relaxation performance of corrugated metal frame composite gaskets with two different frame material

上的残余应力越大、密封性能越好。据此，对不同石墨覆盖层厚度下的复合垫片（骨架材料为316L）分别进行了常温和高温应力松弛试验，结果见表4。从表中数据可以看出过厚的石墨覆盖层加剧了复合垫片的松弛。这是由于石墨层过厚不仅会导致金属波纹不能发挥增强作用，反而致使垫片载荷完全依靠覆盖层承载；无论是常温还是高温工况，覆盖层为0.6 mm的复合垫片由于石墨层和金属波纹的复合增强作用得到充分发挥，不仅松弛率最低，而且垫片应力很快进入稳定阶段，其特殊的结构特点确保了垫片具有较好的承载能力和优异的抗蠕变性能。

骨架材料为A3钢的复合垫片也可以得出上述相似的结论，但不同之处主要在于：石墨覆盖层为0.38 mm和0.6 mm时，由于骨架材料性能的差异，A3钢的复合垫片松弛率明显高于316L的复合垫片。如图11所示，A3钢作为骨架材料的复合垫片

松弛率为5.41%、而316L作为骨架材料的复合垫片松弛率仅为3.94%，而且3 h左右垫片应力已基本保持稳定。当然，鉴于两种不同骨架材料的复合垫片泄漏率和压缩回弹性能相差不多且从综合成本考虑，在一些密封要求不高、操作工况相对稳定、无腐蚀等环境下可以考虑采用A3钢作为骨架材料的复合垫片。工程上可在垫片安装时通过适当增加螺栓预紧力等方法来弥补应力松弛引起的垫片残余压紧应力下降，从而提高该类复合垫片的密封能力。

3 结 论

- (1) 金属波纹复合垫片的泄漏率与预紧应力基本呈负指数关系，预紧应力越大泄漏率越小；石墨覆盖层厚度对复合垫片的密封性能有重要影响，从泄漏率看该金属波纹结构的复合垫片在0.38 mm和0.6 mm两种石墨覆盖层厚度下的密封性能较好；金属波纹有效增强了复合垫片的密封性能，与A3钢作为骨架材料的复合垫片相比316L复合垫片的泄漏率和压缩回弹性能随垫片应力的增加逐渐显现。
- (2) 随着垫片应力的增加，复合垫片的应力-应变曲线均可分为缓慢爬升、显著波动和迅速爬升3个阶段，分别对应波峰附近石墨层密实、石墨向两侧波谷内推挤并逐渐填实金属波纹的凹槽、垫片密封面被基本压平且垫片的承载能力得到有效增强；对复合垫片进行10 MPa左右的预压处理能客观反映其真实的压缩/回弹性能，0.6 mm石墨层厚度的复合垫片回弹率超过了30%，其回弹性能优于波齿复合垫片和缠绕垫片，尤其适宜压力波动等场合的密封。
- (3) 具有合适厚度的石墨层被密实后骨架上波纹附近易形成多道高压线密封屏障，形成迷宫密封效应。石墨层与骨架材料的有机结合能有效抵抗金属波纹骨架的塑变，使垫片具有极高的承载能力和抗变形能力。因此，工程上在安装金属波纹复合垫片时不必担心垫片因过载失效，可以适当增加垫片的螺栓预紧力，以提高管道的密封可靠性。
- (4) 过厚的石墨覆盖层会加剧复合垫片的应力松弛；无论是常温还是高温工况，两种不同骨架材质的复合垫片均是石墨覆盖层为0.6 mm时应力松弛最低、抗蠕变性能最好；但不同于泄漏率和压缩回弹性能，A3钢作为骨架材料的复合垫片松弛率明显大于316L的复合垫片。

References

- [1] Cai Renliang (蔡仁良). Fluid Sealing Technology—Principles and Engineering Applications (流体密封技术——原理与工程应用) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013
- [2] Kris Kolba, Michael P Cooper. CMGC gasket applied to a large reactor vessel [J]. *Sealing Technology*, 2004, **2004** (2): 6-8
- [3] Liu Zongliang (刘宗良), Liu Dong (刘东). Metal corrugated gasket and its development [J]. *Petro-Chemical Equipment Technology* (石油化工设备技术), 2009, **34** (8): 100-104
- [4] Luo Xiangcheng, Chung D D L. Flexible graphite under repeated compression studied by electrical resistance measurements [J]. *Carbon*, 2001, **39**: 985-990
- [5] GB/T 19066. 3—2003
- [6] Gu Boqin (顾伯勤), Chen Ye (陈晔), Lu Xiaofeng (陆晓峰). Theory and technology of classification design and manufacture of spiral wound gaskets [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2006, **42** (4): 168-172
- [7] Krishna Murali M, Shunmugam M S, Prasad Siva N. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007, **84**: 349-357
- [8] Sun Yan (孙岩), Liu Meihong (刘美红), Li Yuxian (李遇贤), Ge Xiawen (葛夏文). The fitting and prediction of compressive and recovery curve of non-asbestos metal spiral gasket [J]. *Materials for Mechanical Engineering* (机械工程材料), 2013, **37** (4): 75-77
- [9] Mathan G, Prasad N Siva. Evaluation of effective material properties of spiral wound gasket through homogenization [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, **87** (12): 704-713
- [10] Li Duomin (李多民), Duan Zihua (段兹华), Qiu Xingqi (仇性启). Research on the compressibility and resilience of the gaskets reinforced by corrugated metal sheet at room temperature [J]. *Lubrication Engineering* (润滑与密封), 2009, **34** (3): 91-93
- [11] Xie Sujiang (谢苏江), Cai Renliang (蔡仁良), Huang Jianzhong (黄健中). Study on the relation between structural parameters and mechanical properties of gasket reinforced by corrugate metal sheet [J]. *Chemical Machinery* (化工机械), 2000, **27** (4): 200-203
- [12] Bazergui A, Winter J R. Room temperature and elevated temperature tests of a metal corrugated gasket with flexible graphite fill//American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels & Piping Division [C]. New York: ASME, 1989, **158**: 33-40
- [13] Li Xinggen (励行根), Li Yong (励勇), Li Jie (励洁), Song Wei (宋炜), Cai Renliang (蔡仁良). Experiment research of graphite sealing gaskets for nuclear power plant [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals* (液压气动与密封), 2010 (11): 29-31
- [14] Fan Shuling (范淑玲), Zhang Lanzhu (章兰珠), Lin Jianhong (林剑红), Xu Dandan (徐丹丹), Cai Renliang (蔡仁良), Liu Yan (刘雁). Experimental study on mechanical properties of graphite sealing gasket with metal to metal contact type at high temperatures [J]. *Pressure Vessel* (压力容器), 2013, **30** (4): 1-7
- [15] Yang Dongjun (杨栋君), Gu Boqin (顾伯勤). Effects of deformation characteristics of metal frameworks on mechanical performance of corrugated gaskets composited with flexible graphite [J]. *Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition* (南京工业大学学报: 自然科学版), 2013, **35** (4): 105-109
- [16] Liu Hongchao (刘宏超), Ren Jianmin (任建民). Study on metal skeleton structural parameters of flexible graphite corrugated metal gaskets [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2012, **41** (6): 617-619
- [17] Wang Leqin (王乐勤), Yang Hui (杨晖), Li Xinggen (励行根), Jiao Lei (焦磊). Present research and development trend of flexible graphite sealing gasket [J]. *Fluid Machinery* (流体机械), 2013, **41** (6): 37-41
- [18] GB/T 12622—2008
- [19] GB/T 12385—2008
- [20] Bazergui A. Compressibility and compliance of spiral wound gasket//Third International Conference on Pressure Vessel Technology [C]. 1977
- [21] Bouzid A, Chaaban A, Bazergui A. The effect of gasket creep relaxation on the leakage tightness of bolted flanged joint [J]. *Pressure Vessel Technology*, 1995, **117**: 71-78