

甲烷转化气 / 气换热器封头下 法兰垫片改造技术探究

代 明

(呼伦贝尔金新化工有限公司设备管理中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021506)

摘 要 某公司甲烷转化装置 E04302 (气 / 气换热器) 封头下法兰原采用唇式密封与 B22-400-4.0 型内环缠绕垫, 因多次焊接密封导致唇式密封损伤, 且法兰密封面设计较窄, 原垫片无法实现有效密封, 存在高温工况下可燃气体泄漏风险。为解决该问题, 经调研、选型与核算, 最终采用 BMC 恒应力垫片进行改造。该垫片基于“金属碰金属”理念, 由石墨密封环与金属内外环组成, 具有应力恒定、回弹优异、抗热冲击和压力波动、不易疲劳失效等特点, 其石墨材料与机械性能均满足设备工况要求。安装时对法兰密封面光刀处理, 按规范控制表面粗糙度与平行度, 依据《压力容器 第 3 部分: 设计》(GB/T 150.3-2011) 标准核算螺栓预紧力并按特定顺序紧固。改造后设备运行无泄漏, 密封效果可靠。本文详细阐述了 BMC 恒应力垫片的结构、性能特点及安装要点, 以期为行业内同类型法兰密封垫片的选用与改造提供借鉴。

关键词 唇式密封; BMC 恒应力垫片; 螺栓预紧力

中图分类号: TH49

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.003

0 引言

某公司甲烷转化装置 E04302 (气 / 气换热器) 的封头下法兰密封处在以往运行过程中出现过泄漏, 处理措施为紧固法兰螺栓并对法兰唇式密封进行密封焊接, 由于唇式密封的特殊结构导致多次焊接后, 唇式密封已损伤, 无法继续进行焊接密封。由于封头下法兰密封面设计得非常窄, 如不进行焊接密封, 则现有内环缠绕垫无法进行良好密封, 因而需对密封垫片进行改造。通过调研、选型、设计、计算, 最终选用 BMC 恒应力垫片作为 E04302 封头下法兰的新型式垫片, 本文对 BMC 恒应力垫片的结构、性能、安装等要点进行技术探究。

1 E04302 工艺参数和封头下法兰结构

E04302 为固定管板 U 型管式换热器, 由于管程介质温度高达 604 °C, 在封头及封头的接管内衬上了 LC-III 耐火浇注料, 而且封头下法兰密封处设计为唇式密封, 防止高温工况下可燃气体泄漏。封头下法兰密封垫片原设计为内环缠绕垫, 规格为 B22-400-4.0^[1]。

2 BMC 垫片结构

BMC 垫片遵循“金属碰金属”密封理念, 由石墨密封环和金属内、外环组成。金属内外环起到包容、支撑和限制石墨环变形的作用。石墨密封环主要制造材

料是性能优异的柔性石墨材料, 制造时, 将柔性石墨材料放置于凹凸型模具中。在加工成型后, 将石墨环嵌入不锈钢环内, 即可制造出密封垫片。包覆层金属材料采用整张金属薄板, 如果垫片直径过大, 垫片制造需采用拼接工艺, 其拼接头数不宜超过 3 个, 其拼接处板边应切割成 45°, 采用氩弧焊对拼接焊缝进行焊接相连, 焊后必须打磨焊缝与母材平齐。此垫片在温度压力波动下仍可保持密封面和法兰接触面之间的密封应力恒定, 从而有效保证密封的安全、可靠^[2], 垫片详细结构见图 1 所示。

3 BMC 垫片性能特点

BMC 垫片在螺栓预紧载荷的作用下, 上下法兰与垫片金属环能够实现紧密贴合接触。该金属环采用高强度合金材质, 可有效吸收法兰变形及热震载荷引发的机械应力, 通过分散应力集中、缓冲工况波动冲击的方式, 显著提升垫片整体密封稳定性。正因这一独特结构设计, BMC 垫片尤其适配 E04302 这类工业管道、设备法兰连接中温度与压力频繁波动的严苛工况, 其应力缓冲与密封补偿能力可有效规避因工况交变导致的密封失效风险, 进一步筑牢法兰连接的密封可靠性。

在“金属碰金属”的工作状态下, 充足的螺栓预

作者简介: 代明 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化工机械。

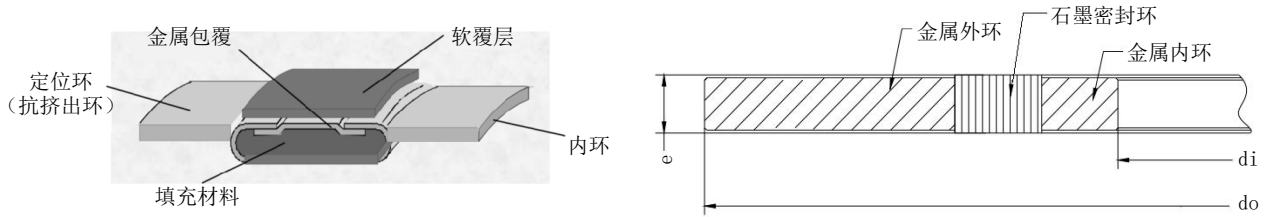


图1 BMC垫片结构

紧力会稳定储存在垫片内、外环的弹性结构中。石墨密封环本身兼具优异的回弹性能与耐高温、化学稳定性，搭配内、外环的弹性释放协同作用，形成“预紧力储存—动态回弹补偿”的闭环机制，能够持续抵消工况波动带来的密封面间隙变化，确保垫片在长期服役过程中始终保持稳定的压紧力，彻底避免弹力衰减或缺失问题，为设备长期安全运行提供持久密封保障^[3]。

高纯石墨保证了密封环本身的松弛率在极低的范围内（< 5%），石墨本身不存在疲劳失效，金属环的设计保证了其应力水平远小于材料的屈服极限，发生疲劳屈服的可能性极小。石墨具有优异的延展性和啮合性，可充分地补偿法兰表面的缺陷。

垫片的内环和外环，可以在金属的抗压强度范围内不压溃。金属碰金属，足够螺栓力储存。当热冲击、压力波动等因素造成螺栓松弛时，释放的是作用在内、外环的载荷，密封应力恒定，密封不会失效^[4]。

覆层材料、填充材料均为柔性石墨，石墨的指标性能需满足以下要求，方可保证垫片耐压、耐高温、耐腐蚀性能。垫片的指标性能见表1，机械性能见表2。

表1 垫片的指标性能

| 化学成分 | |
|------------|-----------|
| 碳含量 | > 99.5% |
| 灰份 | ≤ 0.5% |
| 硫离子含量 | < 200 ppm |
| 总卤素含量 | < 200 ppm |
| 氯离子（游离态）含量 | < 50 ppm |
| 氟离子（游离态）含量 | ≤ 50 ppm |
| 热损失 | < 0.5%/h |

表2 垫片机械性能

| 机械性能 | |
|------|-------------|
| 抗拉强度 | ≥ 4.5 MPa |
| 压缩率 | ≥ 35% ~ 55% |
| 回弹率 | ≥ 9% |

垫片的密封泄漏率的实验条件和指标见表3。

表3 垫片的密封泄漏率的实验条件和指标

| 实验条件 | 泄漏率 (ml/s) |
|-----------------|----------------------|
| 试验应力: 63.3 MPa | ≤ 1×10 ⁻³ |
| 温度: (常温 ℃) | |
| 介质: 氮气 | |
| 试验压力 1.1 倍的公称压力 | |

原设计使用的内环金属缠绕垫与新型式的 BMC 垫片在现有使用工况下的优缺点见表4。

4 螺栓预紧力核算

根据《压力容器 第3部分：设计》（GB/T 150.3-2011）压力容器标准对螺栓预紧力计算，公式：

$$F = \frac{T}{Kd} \quad (1)$$

式(1)中， F 为预紧力（单位：N）， T 为施加的扭矩（单位：N·m）， d 为螺栓公称直径（M24为24 mm）， K 为扭矩系数（通过实验或手册查取，选取0.1~0.3）。

材料参数转化：

35CrMo 材质的屈服强度取 540 MPa（参考碳钢标准值），预紧力需控制在材料屈服强度的 80% 以内^[5]，即：

$$F \leq 0.8 \times 540 \times 3.14 \times (24/2)^2 = 81\,900 \text{ N}$$

螺栓扭矩计算：

K 取 0.3（中等摩擦条件），则：

$$T = F(K \cdot d) = 81\,900 \times 0.3 \times 0.024 = 589.68 \text{ N} \cdot \text{m}$$



因而紧固螺栓时，扭矩扳手的最高扭矩设定值取整数为 589 N·m^[6]。

5 BMC 垫片安装

由于法兰密封面及唇式密封经过多次切割和手动打磨后，存在凹凸不平，无法达到密封标准，需对密封面进行光刀处理。按照《钢制管法兰、垫片、紧固件》（HG/T 20592-2009）标准，光刀后的法兰密封面表面粗糙度全部达到 Ra3.2~6.3 μm 范围内，符合标准规范要求，密封面能够与垫片的石墨密封环紧密贴合^[7]，法兰密封面光刀方式。

垫片外环设置有 4 个间隔 90° 的定位杆，定位杆可弯折，并紧贴法兰外缘，起到定位对中，防止密封面偏移，定位杆。

表 4 BMC 垫片与金属缠绕垫对比表

| 项目 | BMC 垫片 | 金属缠绕垫 |
|---------------|---|--|
| 结构简图 |  |  |
| 密封原理 | 由于采用金属碰金属的设计理念, 在密封服役期内, 垫片应力保持恒定, 从而保证密封的持续有效 | 由垫片本身弹塑性能 (主要依靠金属带的回弹性能) 来保证密封服役期间的有效密封应力 |
| 密封性能 | 金属碰金属的设计, 使其在服役周期内保持垫片密封应力的恒定, 降低泄漏风险 | 主要通过垫片本体的回弹性, 保证其密封性能。在使用初期可满足相应工况, 但随着运行时间的变化, 垫片回弹性逐渐降低, 无法保证其密封比压, 泄漏率逐渐上升 |
| 回弹性 | 事实上, 只要在密封服役期内保证金属碰金属, 并不主要依靠回弹性移位来补偿密封应力的缺失 | 必须保持持续的回弹性, 否则, 密封应力就会缺失 |
| 对热冲击和压力波动的敏感性 | 由于在初始设计的时候就保证垫片应力的恒定, 任何因素造成的应力缺失都在设计和安装时做了充分的考虑补偿 | 非常敏感, 极易发生补偿不足的情况, 最终导致密封失效 |
| 抗疲劳失效 | 由于纯石墨环装配于两个石墨环之间, 限制环受到的是正应力作用, 而且应力值远小于材料的弹性极限, 因此不会发生疲劳失效 | 在交变载荷的作用下, 缠绕部分的金属带容易出现疲劳屈服, 从而使垫片失去回弹性 |
| 整体刚度 | 由于采用金属碰金属的设计, 法兰和垫片的整体刚度得到大幅增强 | 在垫片密封受力面处形成的反力和螺栓的作用力形成弯矩, 对法兰的整体刚度影响较大 |
| 安装要求 | 由于采用金属碰金属的设计, 允许过载 | 不允许过载, 否则, 垫片有被压碎的可能 |

法兰密封面平行度要求小于 0.3 mm, 法兰密封面张口过大, 将无法给垫片提供足够的预紧力。法兰螺栓共计 32 颗, 规格为 M24, 材质 35CrMoA, 螺栓扭矩设置为 589 N·m, 采用扭矩扳手将螺栓紧固 2 遍, 第一遍扭矩值 294 N·m, 第二遍扭矩值 589 N·m^[8]。

6 结束语

E04302 封头下法兰垫片通过改造后, 使用效果好, 在未进行法兰唇式密封焊的情况下未出现过泄漏。虽然垫片选型是保证密封效果的核心要素, 但是也需要相应的垫片高标准安装要求才能发挥垫片的良好性能。通过介绍 BMC 恒应力垫片结构、性能特点、安装等要点, 旨在对行业中同类型法兰密封垫片的选用起到借鉴和指导作用。

参考文献:

[1] 陈立军, 李伟, 赵红波. 高温工况下法兰密封面光刀处理工艺研究 [J]. 石油化工设备, 2020, 49(02): 45-49.

[2] 机械科学研究总院. 法兰用密封垫片实用手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[3] 王建国, 张燕, 李刚. 化工装置高温可燃气体泄漏风险评估与密封技术优化 [J]. 工业安全与环保, 2019, 45(07): 56-60.

[4] 周贤, 翟浩东, 温伟鹏, 等. 新型金属碰金属接触垫片的压缩回弹与密封性能研究 [J]. 压力容器, 2018, 35(10): 1-7.

[5] 李超. 高压换热器设计易忽略问题解析 [J]. 化工设备与管道, 2021, 58(06): 30-33.

[6] 张磊, 王健, 刘军. BMC 恒应力垫片在化工甲烷转化气换热器法兰密封改造中的应用 [J]. 石油化工设备, 2021, 50(04): 45-49.

[7] 李红梅, 陈志强, 吴涛. 换热器法兰唇式密封失效原因及密封面优化技术研究 [J]. 化工设备与管道, 2020, 57(03): 32-36.

[8] 赵伟, 孙丽萍, 马强. 高温可燃气体换热器密封垫片选型及泄漏防控技术 [J]. 化工机械, 2022, 49(05): 689-693.