

Analysis of the Failure Mechanism of Titanium Alloy High Pressure Vessels

Hongwei Jiang, Fan Wang, Zhongxin Li, Nan Yang, Mingjian Jiang

Chongqing Pump Industry Co., Ltd4, Chongqing, 400033, China

Email: 381739233@qq.com

Abstract

In order to ensure the accuracy of failure mechanism analysis for titanium alloy pressure vessels, this study proposes to use thermal coupling simulation for failure mechanism detection, and use micro analysis method and finite element software model analysis method to conduct pressure testing on TC18 titanium alloy pressure vessels. The entire experimental process was carried out using a JR-3DSS optical scanner to determine the surface condition of titanium alloy high-pressure containers, and the container performance was calculated using relevant public displays. Research has shown that the main reasons for the fracture of titanium alloy high-pressure vessels are corrosion and the formation of grooves in the weak positions of the vessels due to high-pressure gas impact. The interaction between impact load and corrosion highlights the fracture characteristics.

Keywords: Titanium Alloy; High Pressure Vessels; Failure Mechanism

对钛合金高压容器的失效机制的分析

姜宏伟, 王帆, 李忠新, 杨楠, 姜明鉴

重庆水泵厂有限责任公司, 重庆 400033

摘要: 为确保钛合金压力容器失效机制分析的精准性, 本次研究提出采用热力耦合模拟的方式进行失效机制检测, 利用微观分析法和有限元软件模型分析法来对 TC18 钛合金压力容器进行承压检验。整个实验过程利用 JR-3DSS 光学扫描仪来确定钛合金高压容器表面情况, 并利用相关公式计算容器性能。研究表明, 造成钛合金高压容器断裂的主要原因为腐蚀和高压气体冲击容器的薄弱位置形成沟槽, 在冲击荷载和腐蚀的相互作用凸显为断裂特征。

关键词: 钛合金; 高压容器; 失效机制

引言

钛合金材料广泛应用于航天、海洋工程、化工、电力、冶金等多个领域, 具有抗拉强度高、耐腐蚀、比重小等特点, 且能够满足冷加工、热加工需求。从钛合金高压容器用途的角度来看, 在制造过程中需要进行材料焊接, 一些焊缝区域存在晶粒粗大情况, 因此会存在裂纹、气孔等缺陷, 需要采用热处理办法提升其质量, 细化晶粒。但存在处理质量不佳的问题, 加之钛合金高压容器使用过程中, 由于压力波动会导致内部温度计波动及内部液体振荡情况, 若介质腐蚀性高, 则会进一步加剧钛合金断裂问题, 构件连接处疲劳失效。而由于高压容器内温度计形态的变化, 对失效机制的分析存在不精准问题, 应采用有限元仿真方式对钛合金高压容器内部的温度计应力情况进行分析, 同时根据数据信息了解容器使用年限, 以此为基准降低影响。

1 钛合金材料及状态

本次所研究的钛合金材料为 TC18, 其成分表详见表 1。根据对钛合金高压容器的双态组织能够发现, 其强度和韧性均比较好, 使用环境为 25MPa 压力, 介质为高纯氮气, 在压力作用下导致容器断裂失效。为

详细了解失效原因，对裂纹性质进行断口电镜取样及扫描观察，为典型端口和剪切带孔洞，断口宏观外貌为：色泽灰暗、且粗糙，呈现纤维状，有剪切唇，约 45°，存在明显塑性变形情况。整体未发现韧窝材料形变后出现连接、聚集现象等特征，不属于韧性断裂。断口组织部分还存在“河流状花样”“小平面”等特征，部分位置发现少量的韧窝情况，且尺寸、深浅多样，如图 1 所示。针对焊缝进行显微观察，发现存在等轴晶体粗大情况，枝晶含量多，焊接热影响区存在析出相，主要由于热处理不彻底。

表 1 高压容器钛合金成分表

成分	Al	Mo	V	Cr	Fe	Ti
质量分数	4.4-5.7	4.0-5.5	4.0-5.5	0.5-1.5	0.5-1.5	余量

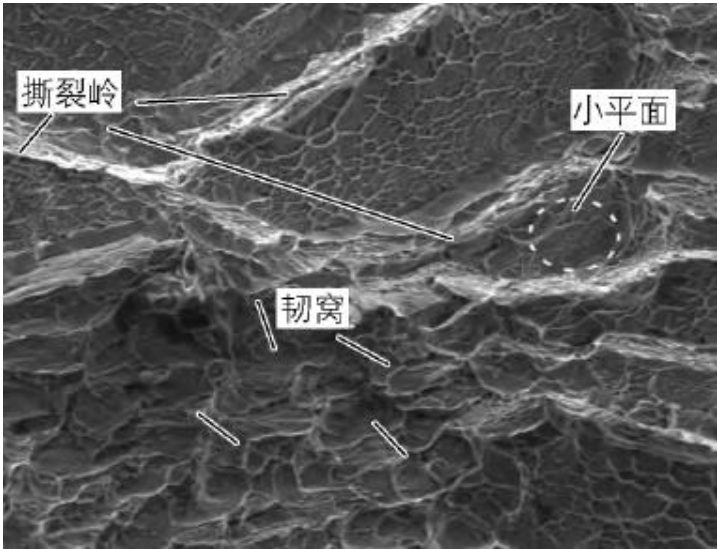


图 1 钛合金高压容器表面状态

2 钛合金高压容器失效分析

2.1 有限元模型

2.1.1 创建模型

以 TC18 材料制作的钛合金高压容器，由于热膨胀不均匀或其他约束原因而导致的热应力问题，会形成交变温度场，在这一环境下运作热应力循环会使得容器表面出现材料剥落情况，表现为表面出现凹陷、麻点等。当钛合金高压容器磨损情况逐渐突破某一限值后，材料的强度和刚度降低，经过长期性的表面微观变化以及容器使用过程中的重复性应力作用，会导致其发生变形或出现裂纹。当钛合金高压容器在交变荷载状态中，原有的细小裂纹会逐渐扩大，形成沟槽后会受到腐蚀环境的影响，造成腐蚀失效。

一般情况下，钛合金高压容器应用环境为变温环境，开始运作后温度升高，停止后会降低，存在瞬时变化波动，若温差较大时会影响热应力情况，加重容器表面及内部的塑性变形程度，造成开裂^[1]。本次研究针对热应力差异进行分析，并引入 Abaqus 有限元软件构建模型，分析 TC18 材料的钛合金高压容器失效机制，截取容器结构中部分危险板材，如图 2 为钛合金容器截取板材的热应力输出云图，最大应力 22.52MPa，可应用于疲劳寿命计算。结合高压容器形态创建模型，包括主螺栓、筒体、顶盖及垫圈等，保证模型的完整性，对容器结构参数进行详细记录，为后续的对比如分析提供数据参考。本次研究为提升效率，制作模型时简化部分结构，便于模型创建。详细注意事项如下：

(1) 先进性前处理，构建几何模型，主螺栓部分用圆柱体弹性元件代替，并保证圆柱体的底部与筒体相连接；

- (2) 针对主螺栓与顶盖之间的空气孔隙导温可以忽略;
- (3) 压力容器下半部分的筒体与顶盖部分的接管处可以省略;
- (4) 针对钛合金压力容器中的环向对称部分, 在创建模型时可根据实际需求选择某一部分。

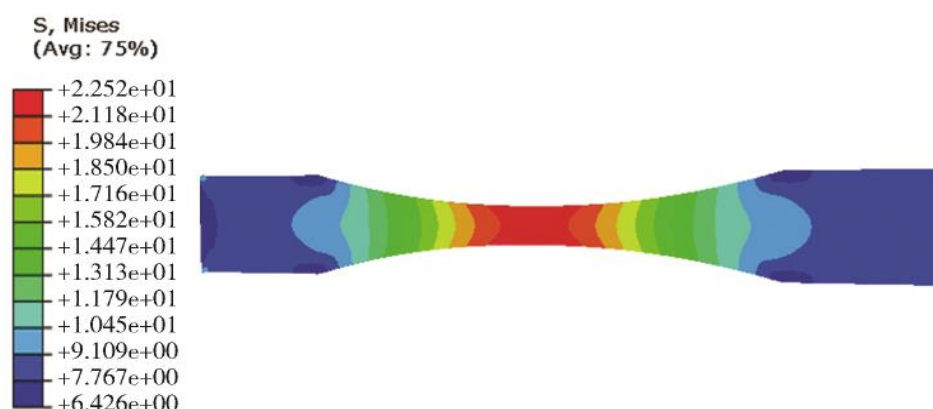


图 2 热应力云图

2.1.2 网格规划

模型建立完成后, 需要结合钛合金压力容器热处理情况对不同的位置进行网格划分, 保证最终的压力容器结构有限元模型的不同形态均在不同网格结构中, 针对模型中的转角部分、连接缝隙部分需要适当增加网格数量。本次研究在有限元模型中选择 30335 个单元和 25791 个单元节点, 如图 3 为容器部分有限元模型。对有限元模型定义约束条件, 针对筒体底端以及筒体与主螺栓之间的位置增加特定约束, 并在筒体和主螺栓之间增加捆绑约束。在筒体与堆焊层、垫圈之间增加接触约束, 同样解除约束还要增加在顶盖与堆焊层、垫圈与顶盖和主螺栓之间, 控制接触面摩擦力, 数值为 0.28。

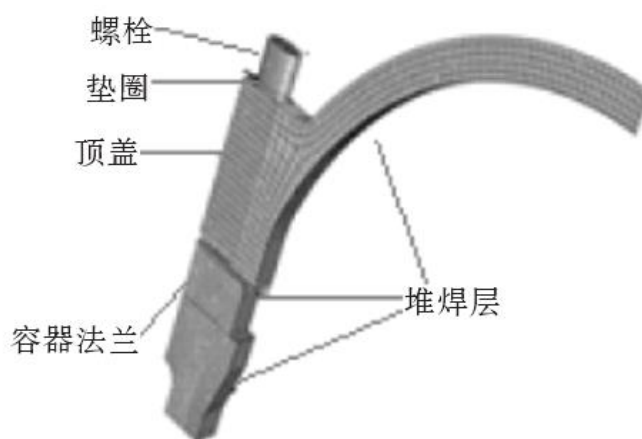


图 3 有限元模型

2.2 周高、低疲劳断裂失效

造成容器疲劳断裂的主要原因在于长期且反复受到交变载荷的影响, 导致容器损伤情况累积, 造成零部件失效。可将失效分为高周疲劳失效和低周疲劳失效。其中, 高周疲劳失效原因常见于压气机震颤、振动, 导致叶片疲劳。本次研究利用有限元软件构建模型, 结合钛合金材料特点, 明确高周疲劳对组织形态表面状态相对敏感, 且缺陷敏感性较大, 因此, 试验数据分散性较大。钛合金周高疲劳断裂缺陷敏感性可以根据试样表面情况、残余应力等来判断。钛合金发生高周疲劳破坏的主要原因在于高频振荡, 其中, 部分构件已经存在微小问题时, 其振动所造成的影响力会更大^[2]。针对低周疲劳断裂, 主要由于交变载荷作用

下塑性应变循环导致低周疲劳，寿命较短，一般在 105 周次以内，在退火状态下，钛合金的地周疲劳表现为循环软化，在这一情况下，钛合金高压容器构件会由于应力控制而出现构件失效。

2.3 瞬态温度计热应力

为详细分析钛合金压力容器的失效原因，通过顺序耦合法展开对高压容器的热应力运算，设置温度升高过程的参数，根据瞬时温度进场进行运算，计算载荷，再试压计算热应力。以钛合金高压容器实际应用情况为依据，将原始边界温度施加到容器内壁部分，为满足瞬态温度变换这一条件，在试验中采用升温、保温、升温、保温的方式控制温度，钛合金高压容器外表与外界隔离，并对温度进行运算，获得温度场分布后再根据节点温度计算热应力。根据结构划分网格来对耦合热应力展开分析。针对热应力的运算过程，主要步骤如下：

- (1) 向钛合金高压容器的内壁进行施压；
- (2) 对主螺栓部分施加预紧力，并将节点温度施加到压力容器中；
- (3) 根据有限元仿真运算实现对各个升温节点热应力的记录；
- (4) 分析在不同温度节点下，钛合金高压容器的疲劳失效情况。

2.4 焊接接头疲劳失效

焊接工艺是钛合金高压容器生产中的关键工艺，在焊接过程中借助热循环作用提升组织性能，由于钛合金材料的熔点较高，且导热性差，若过热区高温停留时间过长或过短，均会出现明显颗粒，显微组织差异，造成失效隐患。本次研究在针对钛合金高压容器接头疲劳问题展开分析，发现在热成型过程中，压力容器的上半段部分与同锻坯间的接触时间相较于其他部分时间更长，加之施工工况相对恶劣，对容器承载部分的影响较大，状况多变。因此，出现的接头磨损问题更为严重，研究利用 JR-3DSS 光学扫描仪（精确度 0.04mm）对其表层进行监测，单次完成 1500000 个观测点的扫描，并对比焊接接头磨损程度，确定最易失效位置^[3]。针对疲劳失效部分的寿命计算，主要应用 Paris 公式来计算磨损扩散速率，公式为：

$$\frac{P}{N_f} = A(n\Delta\delta\sqrt{\alpha P})^n$$

剩余寿命表示为：

$$N_f = \int_{c_p}^{c_a} \frac{bP}{A(n\delta\sqrt{\alpha P})^m}$$

其中 A 为材料常数；n 和 b 分别为幅值变化格式和失效程度；m 和 α 为磨损几何形态因子； c_a 和 c_p 分别为原始磨损尺寸和最大边界磨损尺寸； $\Delta\delta$ 为热应力变化幅值。

2.5 腐蚀损伤

钛合金相较于其他材料来说，具有较强的耐腐蚀性能，但在还原性酸面前，钛元素相对活泼，容易发生反应，在高压容器中，由于静力应力及相关腐蚀环境的影响，会形成应力腐蚀开裂，其中，较为敏感的介质元素包括 H₂、甲醇、汞、CCl₄ 等，若此类介质受到拉应力，也会导致裂纹扩展速度加快。

3 试验结果分析

本次研究以某工程所用的 TC18 材料钛合金高压容器为例，螺栓与静力和结构内壁承压分别为 5.02×10^6 和 21.5MPa，采用以上方式计算高压容器失效情况，首先进行热应力分析。设置钛合金压力容器内壁的原始温度为 23℃，分阶段进行升温 and 保温，第一阶段为 5h，将内壁温度升高至 180℃，并保温 1.3h 后继续升温，第二次升温持续时间为 10h，将内壁温度控制在 285℃，并保温 5h，整个过程需要与外界隔热，根据压力容器热应力分布获取弹性模量、泊松比、热导率、比热容、热膨胀系数等顺序，其中热膨胀系数和弹性

模量随着温度的升高而降低，而热导率和比热容随着温度的升高而升高，泊松比保持不变为 0.34^[4]。最后可得出，钛合金高压容器的最高热应力与温度成正比，最高阶段为两次升温结束阶段，之后呈下降趋势。对该现象的原因展开分析，可归纳为钛合金高压容器在稳定温度内热应力较为均匀。另外，根据压力容器反应来看，受时间的影响并不大，受温度的影响较大，需要进一步研究。

本次研究参考 TC18 钛合金热处理制度，在原有参数的基础上进行热处理工序，明确热处理过程中可能造成的问题，分析对钛合金高压容器的影响。结合 GB/T2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》中的内容准备拉伸试片，选择 18 个试片并分为 6 组，每组 3 个试验试片，从 1-6 分别放在 530℃、560℃、590、600℃、620℃、630℃，每个试片需保温 1.5h，再根据相关标准落实拉伸实验。实验显示，针对焊接接缝的处理，温度在 590℃，保温 1.5h 阶段接头工艺性能最佳，亚稳相分解稳定。

针对磨损情况展开分析，钛合金压力容器表面的磨损程度与使用次数的增加而越来越严重，并利用电子扫描显微镜观察焊接层，选择其中最薄弱的两个部分进行失效分析，第一个部分，能够发现高压容器表面存在两个主裂纹和多个次裂纹，由于表层热应力系数较高，经过长期性的循环使用，表层温度的反复变化使得其产生网络热疲劳裂纹，磨损程度逐渐加剧，且发展为沟槽。沟槽环境下，极易出现腐蚀失效，但在使用寿命之^[5]。再继续循环后，发现裂纹小时，而表面出现钛合金脱落现象，由于硬度降低，出现塑性形变。另一部分则存在明显的韧性断裂失效，韧性失效的原因主要包括扭转载荷、拉伸载荷以及冲击载荷。根据微观观察来看，在钛合金高压容器的破裂部分存在撕裂拉长韧窝，由于塑性变形导致显微孔洞，经过长期的聚集使其相互连接，在断口处形成痕迹，且明显为冲击载荷。再对钛合金高压容器的碎片断裂进行检测，造成表面断裂的主要原因在于剪切带及孔洞连接，则说明导致该部分开裂的问题在于瞬间破坏。

根据试验显示，TC18 钛合金焊缝区域在实施热处理前是饱和亚稳状态，经过高温和保温处理后，亚稳分解，出现晶粒变化，冷却过程中存在平行细片状态，影响焊接效果，导致其强度和塑性指标均有所下降。针对钛合金高压容器的寿命展开对比分析，本次研究采用多种方式对容器的堆焊层磨损展开寿命计算。能够发现，运算结果与实际寿命相比，其中蒙特卡洛模拟方式下的容器使用寿命计算与实际寿命之间差距较大，尤其在 9 次循环数以内；含缺陷双判断方式的差距从 1 次—15 次循环数的差距逐渐缩小，但整体来看仍旧很大。根据结果显示，本次所采用的热力耦合方式下的使用寿命及计算使用寿命差距最小，拟合度高达 97.6%，能够有效计算钛合金高压容器的失效位置和剩余寿命。

结论

本次针对钛合金高压容器失效机制的试验分析，利用有限元软件创建模型，并根据实际工作情况对不同压力下的容器热应力分布展开分析，借助仿真运算，最终证明热应力与温度呈正比关系，且所计算的剩余寿命具有一定参考价值，能够计算钛合金高压容器剩余寿命，维护仪器生产运作稳定。针对压力容器的表层情况分析，由于循环热负荷的影响，导致其表面出现网格式裂纹，容器性能下降，磨损部位会形成沟槽，容易与介质发生反应并腐蚀，加重磨损的破坏情况。其中引起韧性断裂失效的问题主要由于：容器实际载荷与设计要求不符；容器焊接及热处理缺陷；容器缺陷导致应力集中，长时间反复运作使得韧性断裂失效。针对以上问题需要结合钛合金材料的特殊性，严格控制焊接和热处理过程，避免出现加工缺陷，注意工艺应用流程，实施有效的监督管理工作。

参考文献

- [1] 许亚利,吴小文,赖敏杰,等.钛合金变形织构及其影响研究进展[J].铸造技术,2022,43(12):1021-1031.
- [2] 张大磊,李媛媛.高压热处理对 TC9 钛合金显微组织和力学性能的影响[J].机械工程材料,2021,45(08):72-76.
- [3] 贾晓鹏,林乐刚,刘会杰.TC18 钛合金高压气瓶电子束焊接研究[J].机械工程师,2021(07):129-131.
- [4] 鲜宁,荣明,李天雷,等.钛合金在高温高压酸性油气井的应用研究进展[J].天然气与石油,2020,38(05):96-102+107.
- [5] 史媛媛.高压条件下钛合金材料组织演变及力学性能研究[J].世界有色金属,2020(19):221-222.