

《超高压管式反应器》

编制说明

征求意见稿

编制组

二〇二四年八月

1 工作简况

1.1 任务来源

本标准根据中国石油和化学工业联合会《关于印发2022 年第二批中国石油和化学工业联合会团体标准项目计划的通知》（中石化联质标函[2022]62 号）的要求，目前已完成《超高压管式反应器》团体标准的制定工作。

本标准由中国石油和化学工业联合会提出，归口于中国石油和化学工业联合会。由华东理工大学、中石化南京化工机械有限公司、内蒙古北方重工业集团有限公司、中国石化工程建设有限公司、中国石化上海石油化工股份有限公司、中国石化扬子石化公司、江苏龙山管件有限公司、无锡市亚迪流体控制技术有限公司起草完成。

1.2 标准主要起草单位、协作单位、主要起草人

本标准由华东理工大学、中石化南京化工机械有限公司、内蒙古北方重工业集团有限公司、中国石化工程建设有限公司、中国石化上海石油化工股份有限公司、中国石化扬子石化公司、江苏龙山管件有限公司、无锡市亚迪流体控制技术有限公司参与协作完成。

本标准主要起草人：王学生、朱小明、许锐冰、魏志强、陈琴珠、韩冰、元少昀、罗永欣、张朝、侯莲香、谭金龙、马荣青、徐辉、蒋良雄、刘叶佳、朱荣挺、胡雄新。

1.3 超高压管式反应器制定标准目的和意义

1.3.1 超高压管式反应器国内外技术现状

超高压管式反应器是管式法LDPE/EVA装置中重要的反应设备，其核心技术是超高压反应管的设计制造技术和夹套设计技术。目前德国、美国、奥地利、日本等国拥有该设备的设计制造技术。目前国内装置的超高压管式反应器直接采购国外产品价格昂贵，交货周期长，维护服务困难，但因国内缺乏成系统的超高压管式反应器设计生产能力，国内新建和改造的重要石油化工等装置仍需大量进口该产品，因此超高压管式反应器关键技术研发与该类设备的国产化设计与制造意义重大。

1.3.2 超高压管式反应器关键技术及研究水平

超高压管式反应器关键技术主要是：（1）超高压冷却反应器的设计技术；（2）超高压冷却反应器的制造技术；（3）反应管自增强优化设计技术；（4）超高压冷却反应器理论研究与数据分析。

（1）超高压冷却反应器的设计技术：由于超高压管式反应器设计压力为 360MPa，设计温度为 400℃，承受工作压力为 300MPa，工作温度为 300℃，在高温和超高压的情况下，国

内还没有设计标准，以及材料的选择，需要进行大量的材料试验，在确定材料的前提下进行有限元分析强度和疲劳寿命设计、密封性能分析等来确定反应器直管、反应器弯管、外管夹套、超高压密封结构等。

(2)超高压冷却反应器的制造技术：超高压管式反应器主要关键是十几米的深孔加工，反应器管道内外表面的超精度要求，密封面加工，弯管螺纹加工及自增强等，需要一定的制造技术和设备。

(3)反应管自增强优化设计技术：超高压管式反应器自增强处理相关设计计算，包括确定自增强压力和自增强处理要求。需要确定超高压反应管直管部分自增强后残余应力分布的方法。

(4)超高压反应器理论与数据分析：在整个研制过程中需要进行理论分析，根据数据确定每一个环节是否正确和合理，包括检测数据和实验数据等。

近些年来，国内使用的几大超高压聚乙烯装置，由于容器的结构、材质、制造和使用管理等诸多因素影响，已发生多起事故，甚至出现过反应器“破前漏”的事故。北京燕山石化年产18万吨高压聚乙烯装置是于1974年国外引进，1976投产，其中超高压反应器在1990年后多次发生裂纹穿透管壁，管内超高压介质泄漏的事故。

超高压圆筒的内压疲劳试验研究，五十年代到六十年代末对厚壁筒体疲劳强度的研究，70年代随着自增强技术应用于聚乙烯高压反应管及大型合成氨反应器的设计与制造，在自增强理论方面取得了很大进展。目前有关反应管的研究多集中在对反应管材料方面的常规力学性能，残余应力的测量方法，用经典强度理论和断裂力学的方法对反应管进行安全分析等。随着我国多套超高压聚乙烯装置的引进，促进了管式反应器的开发研究，2002年上海石化总厂着手进行高压聚乙烯反应器的国产化研究和工业实施，并实现反应管的局部国产化，由于种种原因没有实施。2003年燕山石化与德国伍德公司合作制造了燕山20吨/年高压聚乙烯装置反应器。从项目实施情况看国内在超高压聚乙烯反应器的设计和制造水平方面与国外先进技术仍存在较大差距。目前国内超高压反应器都处于进口状态，更没有标准。

1.3.3 制定标准目的和意义

由于1PE/2PE装置超高压反应器工作状态处于3000kg/cm²及管内反应温度300℃的高温 and 超高压，工作条件苛刻，装置面临老化及超年限运行。通过调研及国内研究现状来看，1PE/2PE超高压反应器研制技术难度较大，而且如何准确地评价现有反应管的安全性运行难度较高。因此，通过1PE/2PE装置超高压反应器安全性评价及国产化研制形成高压聚乙烯超高压反应器的一整套技术，打破国际技术垄断，填补国内空白。

目前超高压反应器已服役30年，也已经开始出现开裂、泄漏等失效现象，这些装置都会面临老化问题。长期以来，这些超高压反应器一直依赖于进口，价格昂贵，备件重置时间长，维修成本很高。因此，从生产装置的需求及国家当前形势下高压聚乙烯装置超高压反应器安全性评价及研制具有重大意义及迫切需求。

1.4 工作过程的简要说明

本标准于2022 年10月通过石化联合会标准化工作委员会立项,2022 年10月收到中石化联质标函(2022) 62号文件《2022 年中国石油和化学工业联合会第一批团体标准计划项目的通知》。2022年10月至12月期间,开始成立标准编制工作组,编制工作组开展查阅有关文献、资料和调研,编写具体工作方案。2023 年 1月至2024 年8月,根据工作方案,完成了本标准相关各项实验工作和精密度验证工作。2024 年4月,根据实验结果,编制组编制完成了标准征求意见稿、标准编制说明等材料。于2024 年6月至8月,向有关科研院所、生产单位和使用单位征求意见,编制工作组对所收到的相关意见进行归纳和总结,在此基础上,补充完善标准制定的征求意见稿,并进一步形成送审稿。

2 标准编制原则和确定标准的依据

2.1 相关参考标准

GB/T 150 压力容器
GB/T 222 钢的成品化学成分允许偏差
GB/T 223 钢铁及合金化学分析方法
GB/T 226 钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法
GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法
GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分: 高温试验方法
GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法
GB/T 231.1 金属材料 布氏硬度试验第1部分: 试验方法
GB/T 713 承压设备用钢板及钢带
GB/T 1804 一般公差未注公差的线性和角度尺寸的公差
GB/T 1979 结构钢低倍组织缺陷评级图
GB/T 2102 钢管的验收、包装、标志和质量证明书
GB/T 4336 碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定火花放电原子发射光谱法
GB/T 4338 金属材料高温拉伸试验方法
GB/T 4732 压力容器分析设计
GB/T 5371 极限与配合过盈配合的计算和选用
GB/T 6060.2 表面粗糙度比较样块磨、车、镗、铁插及刨加工表面
GB/T 6394 金属平均晶粒度测定方法
GB/T 6479 高压化肥设备无缝钢管
GB/T 8923.1 涂覆涂料前钢材表面处理表面清洁度的目视评定 第1部分: 未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级
GB/T 9948 石油裂化用无缝钢管
GB/T 10561 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法
GB/T 12459 钢制对焊无缝管件
GB/T 12777 金属波纹管膨胀节通用技术条件
GB/T 13298 金属显微组织检验方法
GB/T 13401 钢制对焊管件

GB/T 20066 钢和铁化学成分测定用试样的取样和制样方法
GB/T 20123 钢铁
GB/T 21143 金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法
GB/T 26929 压力容器术语
GB/T 34019 超高压容器
NB/T 10558 压力容器的涂敷与运输包装
NB/T 47008 承压设备用碳素钢和低合金钢锻件
NB/T 47009 低温承压设备用合金钢锻件
NB/T 47013 承压设备无损检测
NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
NB/T 47015 压力容器焊接规程
HG/T 20592-20615 钢制管法兰、垫片、紧固件
HG/T 20580 钢制化工容器设计基础规定
HG/T 20581 钢制化工容器材料选用规定
HG/T 20582 钢制化工容器强度计算规定
HG/T 20583 钢制化工容器结构设计规定
HG/T 20584 钢制化工容器制造技术要求
TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程

2.2 标准编制原则

标准制定本着“先进性、科学性和适用性”原则，制定过程做到统一、协调、优化，同时确保方法的准确性、实用性、可行性，既符合国内外发展的需要，也满足国内目前的实际需求情况。

按照特种设备法规和标准体系架构，TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》提出基本安全要求，技术标准提出保证基本安全要求的技术方法和技术指标，技术标准的内容应与安全技术规范相协调。

本标准主要参考了TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》第2、3、4章的基本安全要求，并提出了与GB/T 151相协调的材料、设计、制造、检验与验收等内容。

2.3 标准制定的依据

查询国内外相关标准资料，参考现有标准，按照GB/T 1.1—2020的规定和要求起草标准草案。

3 标准制定的主要内容

3.1 调研及综合分析

经过国内外文献检索，尚未检索到目前关于超高压管式反应器的标准和规范，结合生产和实际的迫切需要，开展本标准的研究工作具有一定先进性、科学性。在超高压管式反应器

的设计和制造过程中,尤其需要建立标准对超高压反应管和夹套的设计方法与制造工艺进行说明,而且石油化工行业的发展也迫切需要建立超高压管式反应器设计、制造等技术的规范和统一规定。

3.2 标准范围的确定

本标准规定了超高压管式反应器的材料要求、主要结构型式、设计计算方法、制造要求、检验要求、验收要求以及出厂要求等。

本标准适用于化工行业高压聚乙烯装置或其它超高压管式反应器,其反应器内管设计压力 $\geq 100\text{MPa}$,内管设计温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的场合。

3.3 标准结构型式与技术要求的确定

3.3.1 主要结构型式的确定

超高压管式反应器由下列主要部件组成:反应器直管、反应器弯管、外管夹套、超高压密封结构等。

高压直管和高压弯管主要由下列元件组成:内管、夹套、热套环、螺纹法兰及紧固件等。反应器直管和弯管两端选用法兰加透镜垫连接,透镜垫用于直管和弯管连接密封。

外管夹套主要由夹套直管、热套环及必要的支撑柱和垫板组成。反应器内管与外管夹套端部宜采用热套环连接,其中间选用若干个支撑柱插入外管夹套来支撑内管。外管夹套外侧两端选用高颈法兰,并焊接在外管夹套上。直管外管夹套应膨胀节。

3.3.2 通用要求的确定

本文件适用范围内反应器的材料、结构、设计、制造、检验和验收除应符合本文件规定外,还必须遵守国家颁布的相关法律、法规和安全技术规范。制造单位应持有相应的特种设备制造许可证。

3.3.3 材料要求的确定

管式反应器内管选材时应考虑设备的使用条件(如设计压力、设计温度、介质特性和操作特点等)、材料性能(物理性能,工艺性能及与介质的相容性)以及经济合理性。

使用本文件或 GB/T 34019 以外钢材制造管式反应器内管,应按照 TSG 21 的规定通过技术评审。

内管用材料的技术要求、试验方法和检验规则应符合相应的国家标准、NB/T 47008 及设计文件的规定,同时应满足本标准的要求。

内管用材料应附有材料质量证明文件原件,材料质量证明书应由材料生产单位提供,并在指定部位或其他明显部位做出清晰、牢固的标志,反应器制造单位应按内管质量证明书和技术要求对材料进行验收。

3.3.4 结构要求的确定

超高压管式反应器由下列主要部件组成：反应器直管、反应器弯管、外管夹套、超高压密封结构等。反应器内管与外管夹套端部宜采用热套环连接，其中间选用若干个支撑柱插入外管夹套来支撑内管。外管夹套外侧两端选用高颈法兰，并焊接在外管夹套上。反应器直管和反应器弯管两端选用法兰加透镜垫连接，透镜垫用于直管和弯管连接密封。反应器外管夹套直管段应设置膨胀节。

反应器直管主要由下列元件组成：内管、夹套、热套环、螺纹法兰及紧固件等。反应器弯管主要由下列元件组成：内管、夹套、热套环、螺纹法兰及紧固件等。

反应器直管的夹套主要由夹套管、热套环、膨胀节、支撑柱及螺纹法兰等组成。反应器弯管的夹套主要由夹套管、热套环、支撑柱及螺纹法兰等组成。

在反应器内管与夹套之间需设置支撑柱以保证反应器内管与夹套在全长范围内的对中程度。

反应器弯管夹套的弯管部分需至少分成 7 段，按弯管中心部位进行装配焊接，装配中需用定位环固定定位以减少误差。

夹套直管部分的端部设有热套密封结构，反应器内管与夹套端部通过热套环连接。为抵消热膨胀量，在夹套直管上需设置热膨胀环节。

内管端部高压密封结构宜采用金属透镜垫密封。该密封结构主要由内管端部密封面、内管端部螺纹、螺纹法兰、金属透镜垫、螺栓组件构成。

内管之间的密封应采用金属透镜垫形式。在透镜垫侧面设置加强环，中心位置应设置安装螺纹孔。安装螺纹孔的深度不允许超过加强环的厚度的一半。

3.3.5 设计要求的确定

本章规定了超高压管式反应器承受超高压载荷部分的设计要求，涵盖了塑性垮塌、局部过度应变、棘轮、疲劳和脆性断裂失效的评定方法；按本章设计的超高压管式反应器同时还应符合 GB/T 34019-2017 中 4.3 部分的相关要求。

3.3.6 制造要求的确定

管式反应器制造、检验和验收应符合本标准和设计文件的规定，同时满足 TSG 21 的规定。在管式反应器制造、检验过程中，制造单位应根据设计技术文件制定合理的工艺方案和规程。制造单位对原设计的修改以及对受压元件的材料代用，应取得原设计单位的书面批准，并在竣工图上做详细记录。对于采用未列入本标准的制造检验的新技术、新工艺和新方法时，应进行技术评审。

直管应采用锻件经机械加工方法制造。直管的粗糙度应逐支采用粗糙度仪或按 GB/T 6060.2 规定的样块进行对比检验，内表面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$ ，外表面粗糙度值 Ra 应不大于 $1.6\mu\text{m}$ 。直管与热套环的过盈接触面粗糙度 Ra 应加工至不大于 $0.4\mu\text{m}$ 。

直管外圆直线度每 1000mm 不大于 1mm，全长直线度不大于 15mm。

自增强处理实际压力不得超过规定值。自增强时间至少要能保证应变达到要求值所需时间。自增强处理过程中，应当采用合适的方法控制筒体内壁的残余环向应变。

弯管加工：弯管制造可以采用冷弯或热弯加工工艺。弯管制造工艺须进行工艺验证，试制合格后方可进行正式生产。试制弯管的母管应是正式生产弯管同类型、同钢级、相同技

术条件的钢管。

冷弯管弯制：内弯管应采用冷弯成型，应一次弯成型，如弯曲角度不够可以修正但不得回弯。弯制前应进行试弯，弯管完成后应用全尺寸样板检查管子弯曲部分。弯管的形状公差应满足设计要求，且应满足椭圆度 $\leq 2\%$ ，壁厚减薄率 $\leq 5\%$ ，内径流量 $\geq 95\%$ ，弯曲半径公差 $\pm 5\text{mm}$ 。弯管两直边不平行度 $\leq 1.5\%$ ，弯管成型后两端与施工图尺寸偏差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 。内管弯制后应进行恢复性能热处理，热处理时应做好内表面的保护，不得破坏内表面的粗糙度。必要时内管弯管应在炉内得到充分的支撑，以防止在热处理过程中发生翘曲。

内弯管热处理后内表面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$ ，外表面粗糙度值 Ra 应不大于 $3.2\mu\text{m}$ 。内弯管的粗糙度应逐支采用粗糙度仪或按 GB/T 6060.2 规定的样块进行对比检验。

弯管的形状公差应满足设计要求，且应满足椭圆度 $\leq 2\%$ ，壁厚减薄率 $\leq 5\%$ ，内径流量 $\geq 95\%$ ，弯曲半径公差 $\pm 5\text{mm}$ 。弯管两直边不平行度 $\leq 1.5\%$ ，弯管成型后两端与施工图尺寸偏差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ 。

内弯管热处理后内表面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$ ，外表面粗糙度值 Ra 应不大于 $3.2\mu\text{m}$ 。内弯管的粗糙度应逐支采用粗糙度仪或按 GB/T 6060.2 规定的样块进行对比检验。自增强后的成品弯头形状公差应满足设计要求，椭圆度 $\leq 2\%$ ，壁厚减薄率 $\leq 5\%$ ，弯曲半径公差 $\pm 5\text{mm}$ 。如果在自增强后需要对弯曲尺寸进行小的调整，则应按

夹套弯管应整管弯制，管件可采用热加工成形，也可采用冷加工成形。制造工艺应保证管件在成形时其圆弧过渡部分外形圆滑。外套管弯制成型后应用全尺寸样板检查管子弯曲部分，弯管的形状公差应满足设计文件要求。

夹套管弯制成型后按均匀切断成不少于 7 部分，管端坡口应采用机械方法加工，焊前应清理干净。内管端部加工前应采用相同的材料进行试加工，试加工的螺纹经检测合格后才能正式生产，螺纹加工完成后应按设计文件逐个进行检验。内管端部螺纹尺寸需与内管端部法兰螺纹对应配做。

内管端部螺纹表面粗糙度值 Ra 应不大于 $1.6\mu\text{m}$ 。精加工后的螺纹需按 NB/T 47013.4 的规定进行磁粉检测，不低于 I 级为合格。内管端部密封面粗糙度值 Ra 应不大于 $0.4\mu\text{m}$ ，同轴度不高于 0.05mm 。

3.3.7 检验和验收要求的确定

直管的内表面应采用内窥镜逐根进行检查，不应有裂纹、结疤、折叠、划伤、压痕、锈蚀等缺陷存在。外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内。

内弯管检验：内弯管在消除热应力之前和之后将进行硬度检测，硬度变化 $\leq 10\text{HBW}$ 。内弯管热处理后内表面应采用内窥镜逐根进行检查，不应有裂纹、结疤、折叠、划伤、压痕、锈蚀等缺陷存在。外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内，且深度不得大于 0.15mm 。内管弯管热处理后逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测，合格级别为 I 级，并逐件按 NB/T 47013.3 的规定进行 100%的超声检测，不低于 I 级为合格。

热弯管检验：热弯管热处理应附带试样，试样理化性能应符合超高压反应器内管材料要求。热弯管热处理后内表面应采用内窥镜逐根进行检查，不应有裂纹、结疤、折叠、划伤、压痕、锈蚀等缺陷存在。外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内，同时深度不得大于 0.15mm 。热弯管热处理后逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测，合格级别为 I 级，并逐件按 NB/T 47013.3 的规定进行 100%的超声检测，不低于 I 级为合格。

夹套管弯管检验：夹套弯管成型后外表面应按 NB/T 47013.7 逐支进行目视检查，缺陷允许清除，但清除部位应圆滑过渡，且外径和壁厚应在公差范围内，且缺陷深度不得大于大于公称壁厚的 10%且不得大于 0.8mm。夹套弯管成型后逐件按 NB/T 47013.4 的规定对外表面进行 100%磁粉检测，合格级别为 I 级。

管式反应器的无损检测方法包括射线检测、超声检测及磁粉、渗透和涡流等表面无损检测。无损检测人员、检测时机和技术要求应满足 GB/T 34019 的规定。

耐压试验：超高压管式反应器内管的耐压试验按 TSG 21 和 GB/T 34019 的有关规定进行；夹套的耐压试验按 TSG 21 和 GB/T 150 的有关规定进行。

3.3.8 出厂要求的确定

详细设计文件应符合标准规范和采购技术文件的要求。出厂资料应符合标准规范的要求。产品质量证明文件应符合采购技术文件的要求，还应符合 TSG 21《固定式压力容器安全技术》及 GB/T 34019《超高压容器》的规定。交付资料除包括纸质版文件外，还应包括电子文件。具体份数和格式、所用软件要求需符合采购技术文件的规定。若所在项目有数字化交付要求，资料交付还需满足相应的信息数字化交付管理规定。

管式反应器的涂覆、运输包装应符合 NB/T 10558《压力容器涂敷运输包装工艺规程》的规定，并附加相关要求。耐压试验后，应对管式反应器内部进行干燥处理。反应器外表面涂覆前，对设备外表面进行清理，清除所有的铁锈、灰尘、污垢、油脂以及其它附着物，表面清理合格后，管式反应器外表面涂覆清漆两道，漆膜总厚度不小于 50 μm 。所有螺纹表面应采取适当措施进行防护，确保运输过程中螺纹不被损伤；设备经检验合格后，在出厂前将管式反应器充干燥氮气，充氮压力应不小于 0.05MPa，并用端塞将其封闭。

4 标准的技术水平评价

目前，我国现行的国标及行业标准中，还没有相应的超高压管式反应器结构型式及设计制造技术方面的标准。由于我国已颁布了 GB/T 34019《超高压容器》，且超高压管式反应器已实现国产化试生产，在超高压管式反应器国产化试生产的过程中总结出的设计计算方法与加工制造要求对超高压管式反应器的完全国产化设计制造有着重大意义，有望填补国内空白。

本标准制定及实施后，对规范超高压管式反应器的设计计算和生产制造技术，确保该设备的安全运行意义重大，同时也进一步提升国产化技术在全球的影响力。

5 标准的经济效果评价

长期以来，这些超高压反应管一直依赖于进口，每一组反应管约在 50 万~80 万之间，如果按每组 65 万元计算，562 组反应管一旦全部更换需要 36530 万元，价格非常昂贵，备件重置时间长，维修成本很高。如果反应管国产化，成本可降低一半，可节省 1.8 亿。因此，从生产装置的需求及国家当前形势下开展高压聚乙烯装置超高压冷却反应器安全性评价及研制不仅具有重要的学术研究价值，更重要的是具有重大实际工程意义，必将为企业产生巨大的

经济效益与社会效益。

6 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

至标准编制之日，尚未发现与计划编制标准相冲突的现行法律、法规和强制性国家标准。

7 重大分歧意见的处理经过和依据

待征求。

8 标准作为强制性标准或推荐性标准的建议

根据中国石油和化学工业联合会《关于印发2022 年第一批中国石油和化学工业联合会团体标准项目计划的通知》（中石化联质标函[2022]62 号）的要求，本标准作为推荐性行业标准。

9 贯彻团体标准的要求和措施建议

无。

10 其他应予说明的事项

无。

征求意见稿