文章编号:1673-5005(2016)06-0126-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.06.016

# 超深水水下分离器承压性能数值分析与试验研究

李秀美,陈国明,李 伟,张慎颜,葛玖浩,刘秀全

(中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心,山东青岛266580)

**摘要**:以中国自主设计制造的2000 m 超深水水下分离器为研究对象,基于图算法和一致缺陷模态法分析分离器样 机极限承载能力;建立包含嵌入式接管子模型的水下分离器精细数值模型,研究马鞍形焊缝应力分布规律;设计高 压舱试验验证水下分离器样机的物理承压能力,并对比分析高压舱试验数据和数值计算结果。研究表明:水下分离 器样机失稳模式为塑性失稳,下放工况应该主要评估其结构强度;接管马鞍形焊缝的鞍点和冠点以及 N<sub>1</sub> 接管焊缝 的角度 φ 为45°和135°位置为应力特征点;试验样机在高压舱试验过程中整体应力水平处于线弹性变形阶段,能够 满足 2000 m 水深的承压强度要求,模拟结果和试验结果吻合较好。

关键词:超深水水下分离器;嵌入式接管;子模型;马鞍形焊缝;高压舱试验

中图分类号:TE 58 文献标志码:A

**引用格式**:李秀美,陈国明,李伟,等. 超深水水下分离器承压性能数值分析与试验研究[J]. 中国石油大学学报(自 然科学版), 2016,40(6):126-134.

LI Xiumei, CHEN Guoming, LI Wei, et al. Numerical analysis and experimental study on pressure bearing performance of ultra-deepwater subsea separator[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6): 126-134.

# Numerical analysis and experimental study on pressure bearing performance of ultra-deepwater subsea separator

LI Xiumei, CHEN Guoming, LI Wei, ZHANG Shenyan, GE Jiuhao, LIU Xiuquan

(Centre for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: With an independently designed 2000 m subsea separator as the research object, the ultimate bearing capacity of the separator prototype was analyzed based on the nomography method and the conformable imperfection mode method. A fine subsea separator numerical model containing embedded nozzle submodel was established to explore the stress distribution of saddle-shape weld. A hyperbaric chamber experiment was designed to validate the pressure-bearing performance of the subsea separator, and the experiment data were compared with the simulation data. Research results indicate that the instability mode of the separator is plastic instability and the structural strength should be assessed in the installation condition. The stress-characteristic locations are at the coronal and saddle points for saddle-shape weld in all nozzles and in the position of  $\varphi = 45^{\circ}$  and  $\varphi = 135^{\circ}$  for saddle-shape weld in nozzle N<sub>1</sub>. In the experiment, the overall stress level of the subsea separator is in an elastic deformation stage and the prototype can satisfy the pressure-bearing strength requirements at 2 000 m water depth. The numerical analysis results are highly consistent with the experimental results.

Keywords:ultra-deepwater subsea separator; embedded nozzle; submodel; saddle-shape weld; hyperbaric chamber experiment

深水水下分离器可在海底完成气液分离和油水

分离,有效解决深海油气生产带来的流动安全保障与

收稿日期:2016-04-22

通讯作者:陈国明(1962-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为海洋油气工程及装备、油气安全工程。E-mail: offshore@126.com。

**基金项目**:国家高技术研究发展计划项目(2013AA09A213);中央高校基本科研业务费专项(14CX06123A);山东省自然科学基金联合专项(ZR2014EL018)

作者简介:李秀美(1989-),男,博士研究生,研究方向为海洋承压结构完整性管理与评价。E-mail:lixiumei2006 @ 126.com。

经济效益的平衡问题。深水水下分离器在下放到目 标水深海域时,承受超高外压载荷,须评估承压结构 强度和稳定性。由于深水水下分离器这种厚壁短圆 筒结构发生塑性失稳所需的外压极大,承重结构强度 是否满足要求成为评估重点。目前,深水水下承压壳 体结构强度的研究大都不考虑壳体接管的影响,将模 型简化成简体结构进行分析,最常见的简化形式为海 底承压管道。Urthaler 等<sup>[1]</sup>分析了深水水下承压结构 的薄膜应力、轴向应力和径向应力分布特点。An 等<sup>[2]</sup>建立了包含一种新型夹层材料的深水海底夹层 管道的有限元模型,分析该承压结构在外压和纵向弯 曲载荷下的极限强度。Li<sup>[3]</sup>、Netto<sup>[4]</sup>、Lee<sup>[5]</sup>等采用数 值计算和试验方法分析了含腐蚀缺陷的海底管道承 压结构的剩余强度。Zheng 等<sup>[6]</sup>研究了带有凹陷的 单壁管和管中管结构在外压载荷下强度问题;深水水 下分离器在海底完成油气水三相分离,接管是不可忽 略的功能性结构,为典型的嵌入式接管。将水下分离 器承压壳体简化成简体难以获得典型多接管承压结 构的应力特征。嵌入式接管环焊缝为复杂的、大直径 开孔的马鞍形焊缝,这种焊缝造成管内外变形增大从 而加剧了焊缝处的应力集中,是整个超深水水下分离 器壳体结构的薄弱环节。Choo 等<sup>[7]</sup>采用极限分析方 法研究了外压载荷下复合夹层结构接管和容器相交 区域的强度。葛玖浩等[8]建立多接管水下分离器数 值模型,分析了接管参数对整体承压结构应力分布的 影响。李志刚等<sup>[9]</sup>采用有限元分析方法校核了1500 m水下分离器的总体塑性变形,但未对测点的选取进 行科学论证。上述文献从不同角度开展多接管承压 结构整体强度分析研究,但考虑包含马鞍形焊缝的嵌 入式接管结构,并从"数模"和"物模"角度系统研究 2000 m 超深水水下分离器结构应力响应方面的文献 未见报道。鉴于此,笔者以中国自主设计的2000 m 超深水水下分离器为研究对象,在分析其极限承载能 力的基础上,确定下放工况应该主要考虑承压结构的 强度问题,设计高压舱试验验证分离器样机的承压性 能。

# 1 水下分离器极限承载能力分析

#### 1.1 图算法

GB 150《压力容器》规定:外压厚壁容器必须首 先评估其稳定性,然后再进行承压结构强度的校核。 作为 GB 150 外压容器设计的推荐做法,图算法可以 避开 Mises 公式求解临界压力的繁琐计算,不受弹 性失稳和弹塑性失稳条件的限制,通过查图即可获 得外压容器的失稳临界压力。图算法首先通过承压 结构的几何参数在外压应变系数 A 曲线中确定系数 A,然后通过系数 A 在外压应力系数 B 曲线中确 定系数 B;由于目标水下分离器样机属于典型的厚 壁容器,最后按照下式计算临界失稳压力 P<sub>cr</sub><sup>[10]</sup>:

$$p_{er} = m \min\left\{ \left( \frac{2.25}{D_o/\delta_e} - 0.0625 \right) \right\} B, \frac{2\sigma_0}{D_o/\delta_e} \left( 1 - \frac{1}{D_o/\delta_e} \right) \right\},$$
  
其中

 $\sigma_0 = \min(2[\sigma]^t, 0.9R_{eL}^t).$  (1) 式中, $D_o$ 为承压简体外直径; $\delta_e$ 为简体有效厚度; [ $\sigma$ ]<sup>t</sup>为简体材料设计温度下的许用应力; $R_{eL}^t$ 为简 体材料设计温度下的屈服强度;m为稳定安全系数, GB 150 规定  $m=3_o$ 

目标水下分离器筒体长度为 6 000 mm, 内径为 1 200 mm, 有效厚度为 85 mm, 两端采用半球形封头 封闭。根据 GB 150 图 4–1 得到计算长度 L 为筒体的 总长度加上每个凸形封头曲面深度的 1/3, 其值为 6 457 mm, 由 GB 150 图 4–2 查得系数  $A = 4.5 \times 10^{-2}$ , 由 GB 150 图 4–6 查得系数 B = 216 MPa,最终根据式 (1)得到目标水下分离器的临界失稳压力  $p_{\rm er} = 49.9$  MPa。

#### 1.2 一致缺陷模态法

图算法是以不含接管的外压筒体为分析对象, 计算得到的临界失稳压力未考虑目标水下分离器接 管的影响。一致缺陷模态分析方法以数值分析软件 建立的实体有限元模型为基础,在外压容器稳定性 评估领域得到广泛运用。该方法认为一阶屈曲模态 代表结构最不利的几何形状偏差,体现了结构失稳 时的形态,分析时将特征值屈曲分析得到一阶模态 乘以一个系数模拟承压结构的初始几何缺陷<sup>[11]</sup>,并 进行非线性屈曲分析求得临界失稳压力。

参照文献[8]建立水下分离器样机整体有限元 模型,进行特征值屈曲分析得到的一阶屈曲模态如 图1所示,一阶特征屈曲压力 *p*<sub>1</sub>=160.98 MPa。基 于材料理想弹塑性理论和几何大变形理论,进行非 线性屈曲分析得到筒体典型位置处的载荷-位移曲 线如图2所示。由图1可知,分离器样机失稳时,整 体承压结构呈现接管两侧筒体向内凹陷、失稳波数 *n*=2的变形。图2中的载荷度α表示外压载荷和 一阶特征屈曲压力 *p*<sub>1</sub>的比值,由图2可知,当载荷 度为0.343时,壳体结构位移出现"无穷大"变化趋 势,承压结构失稳,失稳极限载荷 *p*<sub>cr</sub>=55.2 MPa,大 于图算法分析得到的临界载荷,GB 150 图算法分析 结果相对保守。

由经典厚壁圆筒应力分析理论可知,目标水下 分离器在临界失稳压力作用下发生塑性失稳,在外 压达到该临界压力之前,水下分离器首先出现塑性 变形。目标水下分离器下放工况所承受的最大外压 为20 MPa,远小于图算法和一致缺陷模态法分析得 到的临界失稳压力,那么在该压力下分离器壳体结 构的强度是否满足要求是亟需解决的问题。水下分 离器样机筒体和嵌入式接管之间的马鞍形焊缝是整 个承压结构的薄弱环节,须建立包含嵌入式接管的 精细数值模型进行分析。









# 2 嵌入式接管子模型分析

子模型技术又称"切割边界位移"技术,基于圣 维南原理,在获得局部精确解的前提下,同时不增加 整体模型复杂性和计算量,是有效的工程分析方 法<sup>[12-13]</sup>。采用子模型技术分析水下分离器结构强 度的基本做法是:建立并分析整体模型(较为粗糙 的模型,忽略倒角、焊缝等一些细节特征),采用切 割边界的方法,把模型局部区域从整体模型中分割 出来,整体模型在切割边界上的计算位移作为子模 型的位移边界条件,然后对该局部区域细化网格计 算,最后验证切割边界的合理性。

#### 2.1 水下分离器整体模型分析

由于内部整流板和堰板对分离器筒体结构有支 撑作用.分析时在1.2节中建立的数值模型基础上 增加内部构件。为模拟高压舱压力试验工况,使用 左封头裙座固定约束代替鞍座固定约束,整体结构 施加筒体轴向方向的加速度用来模拟重力浮力差。 整体模型应力分析结果如图 3 所示,支座和接管外 壁应力很小,接管和简体相交处存在应力集中现象, 简体外表面整流板和堰板位置由于内部构件支撑作 用应力出现局部极小值。由于裙座支撑左封头中心 变形较大,右封头和简体应力分布较为均匀,简体、 封头应力场有明显的界限,交界处存在较大边缘应 力。承压结构最大 Mises 等效应力为 381.785 MPa, 出现在 K1 接管内壁,筒体外表面最大 Mises 等效应 力出现在垫板附近。简体、封头、接管、支座和内部 构件的最大 Mises 等效应力均小于材料的屈服强 度,承压结构应力水平处于弹性范围内。





#### 2.2 嵌入式接管子模型分析

以 N<sub>1</sub> 接管为例,嵌入式接管的子模型如图 4 所示。马鞍形焊缝在 PRO/E 中通过等厚扫描切割后

经过变截面扫描生成<sup>[14]</sup>,将生成的接管模型导入 ANSYS中进行网格划分。整个子模型单元均为六 面体 SOLID95 单元,焊缝处网格进行了细化,筒体 厚度方向有 8 层单元。子模型单元数量接近 50000,节点数量超过 210000,具有较高精度。将整 体模型插值提供的边界条件施加到子模型中,并施 加和整体模型一样的载荷约束条件。焊缝经过消氢 处理和消除热应力热处理,不考虑热影响区材料性 能的改变。N<sub>1</sub> 接管子模型 Mises 应力如图 5 所示, 接管应力最大值仍然处在内壁与筒体相交的位置, 倒角的存在明显减弱了接管和筒体处的应力集中。 焊缝应力沿焊缝方向分布不均匀,在鞍点处出现应 力极小值。



1.69 61.61 121.53 181.44 241.36



#### Fig. 5 Mises stress nephogram of nozzle N<sub>1</sub> submodel

采用路径映射技术<sup>[15]</sup>得到马鞍形焊缝焊趾处 应力随角度φ变化曲线如图6所示,角度φ转向定 义为冠点逆时针至鞍点方向。由图6可知,应力沿 焊缝方向分布不均匀,存在明显的波峰和波谷。在 冠点和鞍点出现应力极小值,在φ为45°和135°对 称位置附近出现应力极大值,这些位置是N<sub>1</sub>接管马 鞍形焊缝的应力特征点。左波峰应力极值大于右波 峰,这是由于施加了轴向的加速度导致的。

为验证切割边界的准确性,定义如图 4 所示的 三条切割路径。在整体模型中定义相同的切割路 径,进行路径插值比对,结果如图 7 所示。整体模型 和子模型切割边界上应力分布基本一致,可以认为 切割边界的选取基本合适。



Fig. 7 Stress distribution comparison of cutting paths of nozzle  $N_1$ 

水下分离器样机中存在 N<sub>1</sub> 接管和 K<sub>1</sub><sup>B</sup> 接管两 种不同开孔半径的嵌入式接管,为了全面捕捉分离 器样机嵌入式接管马鞍形焊缝的应力特征点,参照 N<sub>1</sub> 接管的分析过程分析得到其他接管马鞍形焊缝 焊趾应力分布如图 8 所示。



由图 8 可知,其他接管的应力分布规律大致相同,接管位置对马鞍形焊缝应力分布基本没有影响,两个应力波峰向鞍点漂移,最终在鞍点处合并成一个应力波峰,应力波谷消失,应力特征点只有两个冠

点和一个鞍点。

## 3 水下分离器高压舱试验研究

2000 m 超深水水下分离器样机接管采用法兰 密封,全部焊缝经过 X 射线探伤检测后未发现缺 陷。为验证水下分离器样机下放工况下物理承压结 构强度和本文建立的精细数值模型的精度,在中船 重工第七 O 二研究所水下工程结构试验室进行高 压舱试验。

#### 3.1 试验设计

(1) 试验装置。

水下分离器高压舱试验主要结构如图9所示。



of subsea separator prototype

由于试验样机总长度超出压力筒内径,不能将试件 水平放入压力筒内,为此定做吊耳和裙座以便于模 型的吊装及保护。水泵打压形成试验压力,应变及 压力数据由 UCAM-70A 数字测量系统采集,现场试验情况如图 10 所示。

(2)测点布置方案。

水下分离器承压结构的基本构件为筒体和封头, 测点须涵盖封头、筒体的典型位置。封头和筒体连接 处存在较大边缘应力,需要设置测点捕捉该位置的应 力特征。由整体有限元模型分析结果可知,接管外壁 和支座应力水平较低,分离器外壁最大应力出现在垫 板位置,垫板位置为应力特征点,须布置测点。接管 子模型分析结果显示,N<sub>1</sub>接管马鞍形焊缝的应力特 征点为冠点、鞍点以及 *φ*=45°和135°的位置,其他接 管马鞍形焊缝应力特征点为冠点和鞍点。为验证子 模型切割边界适用性,应该在切割边界设置测点。

试验前对贴片位置进行打磨.打磨之后使用瞬 干496 胶水固定应变片,最后使用南大703 胶完成 测点的密封。测量所用双向直角应变片编号以简体 轴向为单号,周向为双号,型号为 BA120-2BB:所用 三向直角应变花编号以逆时针方向为起始,型号为 BA120-2CA。水下分离器试验样机测点布置方案 如图 11 所示,所有应变片贴在外表面,总共设置 115 片,测点分布覆盖数值分析得到的应力特征点: 应变片 E1、E2 为温度补偿片;E3-E9 为封头典型位 置测点:E11-E14 用于测量筒体封头过渡区的边缘 应力:E80-E87 为远离结构不连续处的简体典型位 置:E21/E22、E29/E30 等测点位于子模型切割边 界:E108-E115 分布在分离器垫板中心处:其余测 点基本分布在嵌入式接管马鞍形焊缝应力特征位 置:考虑到 N<sub>1</sub> 接管焊缝  $\varphi = 45^{\circ}$ 和 135°位置的对称 性,只布置一侧的测点。



(a)样机吊装

(b)样机入筒加压

图 10 分离器样机现场试验 Fig. 10 Field test of subsea separator prototype



(3)加卸载程序。

高压舱试验载荷设计基于水下分离器下放到目标水深这种最危险工况:仅受 20 MPa 外压,内压为零。模型试验分 3 次加载,加载速率不大于 0.5 MPa/min。前两次为预加载试验,最高压力为 20 MPa,加载程序同为:0→4→8→12→16→20→16→ 12→8→4→0 (MPa);每个阶段稳压 2 min 并进行 3 次应变测量,当压力升至 20 MPa 时,保压 20 min 并每 5 min 进行一次应变测量。第 3 次为正式加载试验,加压过程不设置稳压台阶,缓慢加压到设计压力 20 MPa,每 0.5 MPa 记录数据 1 次;当压力升至 20 MPa 时,保压 20 min 并每 5 min 进行一次应变测量;最后缓慢卸载外压到 0 MPa,每 0.5 MPa 记录数据 1 次。

#### 3.2 试验结果

试验过程中压力稳定良好,未出现异常响声,试 验结束后试件结构未见明显变形和局部屈曲失稳, 法兰管口未见泄漏。按要求在加卸载过程中对结构 进行应变测量并记录相应的压力值,部分测点在加 卸载过程中的应变-压力曲线如图 12 所示(应变单 位为με,1 με = 10<sup>-6</sup>)。试验中水下分离器除测点 E48 以外的所有测点应变-压力关系曲线基本呈线 性且卸载时回复良好,证明试验压力内各测点处的 结构变形处于材料弹性范围内。

测点在 20 MPa 下应变测量值分布如图 13 所 示。所有测点均为压应变,封头典型位置两向应变 基本一致,筒体典型位置测点的环向应变明显大于 轴向应变,基本上成倍数关系,这些现象与理论相 符。应变最大值出现在分离器垫板位置(对应测点 为 E112-E113 处,沿圆周方向),这与数值分析得出 的结论一致。测点轴向应变值在 E69 和 E105 处发 生突变,应变值急剧减小,这是因为该处筒体内部存 在整流板,对筒体结构有一定支撑能力,轴向应变较 小。



图 12 部分测点应变-压力曲线







# 4 试验结果与模拟结果对比分析

根据原型样机贴片方案,考虑贴片位置误差 (环向±1°,轴向±5 mm),在数值模型中提取与试验样 机相对应的56个测点应变数据(焊缝处应变结果从 接管子模型中获得)与试验数据进行对比分析。

#### 4.1 应力特征点结果对比

简体典型位置、N<sub>1</sub>接管以及其他接管马鞍形焊 缝应力特征点结果对比如图 14 所示。由图 14 可 知,由 Lamé 公式计算得到的简体典型位置应力理 论解和模拟结果、试验结果基本一致,这说明接管对 远离结构不连续处的简体应力场影响很小,只会造 成周围应力场的重新分布。接管马鞍形焊缝模拟结 果和试验结果有较高一致性,高压舱试验能够捕捉 马鞍形焊缝的应力特征,测点布置方案合理。





#### Fig. 14 Comparison of test results with numerical results of some stress-characteristic points

#### 4.2 总体误差分析

数值模型总体误差分析结果如图 15 所示。由图 15 可知,封头、筒体典型位置以及大多数焊缝处模拟结果和试验结果吻合较好,一小部分焊缝测点误差在 20% 以上,测点 E48 和 E9 误差在 40% 以上。

模拟结果误差在 10% 以内的数据占 75.22%,在 20%以内的数据占 93.8%,焊缝区域平均误差为 7.27%,总体平均误差为 7.93%。这说明本文中建 立的数值模型具有较高的计算精度,属于精确建模, 其分析结果能够准确模拟典型焊接承压结构在外压



#### 图 15 数值模型总体误差分析



#### 4.3 误差原因分析

数值模型采用的是对称结构,对称位置的应变 结果相同,E108-E115 测点处对称位置试验结果不 一致,这正说明试验样机在加工制造过程中引入误 差是不可避免的。从图 12 中可知测点 E48 应变-压力曲线不成线性,且卸载回复效果较差,说明该测 点处应变片测得数据可信度不高,造成模拟结果相 对误差较大。测点 E9 靠近封头直线边,封头在冲 压成型过程中会造成局部减薄和厚度增加,在靠近 直线边封头厚度增加量最大<sup>[16]</sup>,在现场测量中该处 的厚度达到 87 mm 以上,造成该测点处应变减小。

### 5 结 论

(1) 首次提出的2000 m 超深水水下分离器下 放工况承压性能评估方法在分析结构极限承载能力 的基础上,确定了下放工况应首先考虑结构强度问 题。建立的精细数值模型及设计的高压舱试验检验 了数模-物模一致性,数模结果指导物模试验设计, 物模试验验证了数模精度。

(2) N<sub>1</sub> 接管马鞍形焊缝在 φ=45°和 φ=135°位 置存在两个应力波峰,鞍点和冠点为应力极小值位 置;样机接管位置不影响焊缝应力分布,其他接管焊 缝应力分布相同,只在鞍点位置存在一个应力波峰, 冠点为应力极小值位置。

(3)自主设计的超深水水下分离器整体应力水 平处于线弹性变形阶段,能够满足下放危险工况下 的强度要求。模拟结果总体平均相对误差为 7.93%,数值模型具有较高精度。

#### 参考文献:

[1] URTHALER Y, MCFARLANE R, BROOKES D. Effect of seawater pressure on the static and fatigue strength of subsea production equipment used in deepwater oil and gas fields: proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2009, Czech republic [C]. Prague: American Society of Mechanical Engineers, 2010.

- [2] AN C, CASTELLO X, OLIVEIRA A M, et al. Limit strength of new Sandwich Pipes with strain hardening cementitious composites (SHCC) core: finite element modelling: ASME 2012: 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rio de Janeiro [C]. Brazil: American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [3] LI H, PAN X, REN H, et al. Study on the residual strength assessment method on corroded subsea pipeline based on reference stress method: proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering 2009, Honolulu[C]. Hawaii: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [4] NETTO T A, FERRAZ U S, BOTTO A. Residual strength of corroded pipelines under external pressure: a simple assessment: 6th International Pipeline Conference, Calgary [C]. Alberta: American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [5] LEE G H, POURARIA H, SEO J K, et al. Burst strength behaviour of an aging subsea gas pipeline elbow in different external and internal corrosion-damaged positions[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015,7(3);435-451.
- [6] ZHENG J, PALMER A, BRUNNING P, et al. Indentation and external pressure on subsea single wall pipe and pipe-in-pipe [J]. Ocean Engineering, 2014, 83: 125-132.
- [7] CHOO Y S, HORNE M R, MONTAGUE P. Strength of intersections in composite sandwich vessels under external pressure: proceedings of the 1st International Offshore and Polar Engineering Conference [C]. International So-

ciety of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 1991.

- [8] 葛玖浩,李伟,陈国明,等.2000 m 超深水水下分离器 承压结构强度分析[J].石油机械,2015,43(2):60-64.
  GE Jiuhao, LI Wei, CHEN Guoming, et al. Strength analysis on bearing structure of subsea separator for 2000 m ultra deepwater [J]. China Petroleum Machinery, 2015,43(2):60-64.
- [9] 李志刚,刘培林,高杰,等. 基于分析设计直接法的水 下分离器结构总体塑性变形校核[J]. 中国石油大学 学报(自然科学版),2013,37(3):137-140.

LI Zhigang, LIU Peilin, GAO Jie, et al. Gross plastic deformation design check for subsea separator based on direct route method for design by analysis[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(3):137-140.

[10] 压力容器: GB 150-2011[S].北京:中国标准出版社, 2011.

 [11] 邓志军,陈冰冰,郑浣琪,等.外压模拟计算中圆筒初始几何偏差描述方法的研究[J].机械工程学报, 2015,51(6):66-72.

> DENG Zhijun, CHEN Bingbing, ZHENG Huanqi, et al. Research on initial geometric deviation description for numerical simulation of cylindrical shells under external pressure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015,51(6):66-72.

[12] ARAI K, YODO K, OKADA H, et al. Ultra-large scale

fracture mechanics analysis using a parallel finite element method with submodel technique [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015,105:44-55.

- [13] WANG H, LI A, HU R, et al. Accurate stress analysis on steel box girder of long span suspension bridges based on multi-scale submodeling method [J]. Advances in Structural Engineering, 2010,13(4):727-740.
- [14] 陈永秋,白雪.带钝边马鞍形焊接坡口数控切割数学 模型[J].焊接学报,2010,31(7):91-94.
  CHEN Yongqiu, BAI Xue. Mathematical model for NC cutting saddle type of welding groove with edge[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010,31 (7):91-94.
- [15] 陈团海,陈国明.T型焊接管节点应力集中系数数值 分析[J].焊接学报,2010,31(11):45-48.
  CHEN Tuanhai, CHEN Guoming. Numerical analysis on stress concentration factor of joints in welded T-tube
  [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010,31(11):45-48.
- [16] 夏春申,徐贵珍.厚壁半球封头及大型中厚椭圆封头 冲压工艺探讨[J].压力容器,1997(4):72-75.
   XIA Chunshen, XU Guizhen. A study on press of process for thick-walled hemispherical head and largescale medium thick-walled elliptical head[J]. Pressure Vessel Technology, 1997(4):72-75.

(编辑 沈玉英)