

高钢级螺旋焊管成型应力有限元数值研究

董志强¹ 毕宗岳² 李超¹ 张建勋¹

1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 宝鸡石油钢管有限责任公司钢管研究院, 陕西 宝鸡 721008

摘要:采用三维有限元对高钢级螺旋焊管成型过程的应力分布进行了计算,在此基础上研究了不同钢级、不同壁厚螺旋焊管成型内辊下压量以及成型后应力。结果表明:钢高级螺旋焊管成型后应力在管体分布不均匀,除了自由边及其附近的环向应力,成型后内表面的轴向和环向应力呈压应力分布,外表面的轴向和环向应力呈拉应力分布;板材在弯曲成型过程中,处于三辊弯板区域的成型内辊下方时,成型等效应力最大,经过成型辊后板材发生回弹变形,内外表面等效应力大幅减小,中间部位等效应力略有减小,在经过外控辊时,等效应力不发生明显变化;随着钢级的提高,相同管径的螺旋焊管合适的成型内辊下压量随之增加,不同钢级螺旋焊管成型后内外表面递送边的环向应力都随钢级升高而增大;随着成型板厚度增加,合适的成型内辊下压量减小,递送边的环向应力随厚度增加而减小,轴向应力随板材厚度变化不大。研究成果可为制造低残余应力、高质量螺旋焊管提供借鉴参考。

关键词:螺旋管;应力;有限元;管道成型;高钢级

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.02.003

Finite Element Study on Forming Stress of High-Grade Spiral Welded Pipeline

Dong Zhiqiang¹, Bi Zongyue², Li Chao¹, Zhang Jianxun¹

1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, 710049, China;

2. Steel Pipe Research Institute of Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721008, China

Abstract: The stress distribution in the forming process of high-grade spiral welded pipe was calculated by using three-dimensional finite element method. On this basis, press amount and post-forming stresses of spiral pipe with different steel grades and wall thicknesses were studied. The results show that the stress distribution after forming of high-grade spiral welded pipeline is not uniform. Except for the hoop stress near the free edge, the axial and hoop stresses on the inner surface are compressive stress distribution, while the axial and hoop stresses on the outer surface are tensile stress distribution. During the bending process, when the plate is under the inner roll in the three-roll bending area, the forming equivalent stress is the largest. After passed the forming roller, the elastic recovery of the plate occurs, the

收稿日期:2019-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875442);宝鸡石油钢管有限责任公司研究项目“螺旋埋弧焊管残余应力及焊接缺陷的研究与控制”(20110675)

作者简介:董志强(1988-),男,江西抚州人,博士研究生,主要研究方向为管道制造工艺及使用寿命评估。E-mail: dongzhiqiang2014@163.com

equivalent stress of the inner and outer surfaces decreases greatly, and the equivalent stress of the middle part of the plate decreases slightly. The equivalent stress does not change significantly when the plate passed the outer control rolls. With the increase of the steel grade, the appropriate press amount of the inner roll of the spiral pipe with the same diameter increases, and the hoop stress of the inner and outer surfaces of the spiral pipe with different steel grades increases with the steel grade. With the increase of the thickness of the forming plate, the appropriate press amount of the inner roll decreases, and the hoop stress of the delivery side decreases with the increase of the thickness, the axial stress does not change with the thickness of the plate. The results can provide reference for fabricating spiral welded pipeline of low residual stress and high quality.

Keywords: Spiral pipe; Stress; Finite element; Pipe forming; High-grade

0 前言

在考虑更低的输送成本和更高的输送效率情况下,大口径、高钢级(X 70 及以上钢级)已成为油气输送管的主要发展方向^[1]。管道的制造过程中经历塑性成型,成型后管道不可避免地存在残余应力,残余应力对焊管的疲劳、腐蚀、稳定性以及承压能力均有显著影响。螺旋焊管的残余应力分布规律远比直缝焊管的残余应力分布规律复杂,并且与管道尺寸和成型工艺密切相关。研究螺旋焊管的残余应力对提高管道的制造质量,保证管道的安全运行十分必要。

管道应力测试的常用方法有盲孔法、X 射线衍射法、切环法等,但管道内部及厚度方向的应力难以测试^[2],近年来,有限元分析技术已大量应用于管道应力的研究中^[3-4],在螺旋焊管残余应力研究方面,由于螺旋焊管的制造过程是一个连续的过程,经过铣边、螺旋成型后进行焊接,铣边的应力会叠加到螺旋焊管成型过程中,焊接是在成型模具的约束下进行的,成型模具松开管道会产生较大的回弹变形,而焊后管道应力会重新分布,因此螺旋焊管成型后的应力难以进行实验测试,对螺旋焊管的应力测试及有限元研究多集中在焊接工艺后^[5-7],但低应力成型是精确控制管形的关键^[8],而且成型的合缝质量以及应力会直接对焊接过程质量产生较大影响,成型合缝控制不好会产生气孔、夹渣、焊偏等焊接缺陷^[9],成型应力达到某一程度时,就会将应力传递到焊缝熔池中,影响焊缝结晶的稳定形成,降低焊缝的力学性能^[10],降低焊接质量,甚至降低焊接速度^[11],制造完成后的螺旋焊管在远离焊缝位置的应力也主要是成型应力。李宏等人^[12]对螺旋焊管的成型过程进行了有限元计算,计算结果表明成型内辊下压量对残余应力的影响远大于板宽对残余应力的影响。Yu Jianrong 等人^[13]用 Abaqus 软件模拟了螺旋焊管的成型以及随后的焊接过程,展示了从成型过程到焊接过程计算的关键步骤。李霄等人^[14]利用 Abaqus 软件对螺旋焊管成型过程进行

了仿真,研究结果表明当成型辊下压量为 7 mm 时,成型后的螺旋焊管管径符合要求。从以上研究可知成型内辊下压量对成型后螺旋焊管的管径大小和成型应力都有很大影响,成型出符合标准规定的螺旋焊管,需要合适的下压量。

本文建立了与实际成型器基本一致的三维有限元模型,通过设置合理的有限元计算参数,对螺旋焊管成型中应力演变过程以及成型后应力分布进行计算,对比成型后焊管管径与理论计算管径,在此基础上研究了不同钢级、不同壁厚螺旋焊管的合适成型内辊下压量以及成型后应力分布。研究成果,可为制造低残余应力、高质量的螺旋焊管提供参考。

1 有限元模型

本文模拟的螺旋焊管采用外控式成型方式,成型的有限元模型见图 1,成型器的主要结构由三组成型辊(成型内辊组以及成型外辊组)以及五组外控辊组成。板料由递送辊的动力递送至三组成型辊中,经过三辊弯板后,再经过五组外控辊的定径作用而成型为所要管径的管子,通过调整成型内辊下压量以及成型辊轮的倾角可以成型不同管径的螺旋焊管。图 1 中成型板板厚为 14.6 mm,板长为 7 000 mm,板宽为 1 449 mm,成型角为 63°,经式(1)计算成型后焊管直径应为 1 016 mm,板料的两条长边分别为自由边和递送边,辊轮直径为 200 mm,每个辊组由 20 个小辊轮组成。建立 1 个垂直的挡板用以限制板料在水平方向的运动,在板料的上下表面分别加两个压平板,用以限制板料在垂直于板面方向的上下运动,压板和挡板保证了成型板在成型过程中沿递送方向前移。

$$\cos \alpha = B / \pi D \quad (1)$$

式中: α 为成型角,°; B 为板宽,mm; D 为焊管直径,mm。

本文研究的成型板材料有 X 70、X 80 以及 X 90 管线钢,密度 7.85 g/cm³,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3,挡板、压板以及辊轮都设置为刚体。由于螺旋焊管的成

型属于弹塑性大变形问题,同时因为金属材料在塑性变形过程中存在加工硬化现象,所以在定义板料塑性时采用弹塑性硬化模型。依据管线钢管规范 API Spec 5 L 对 X 70、X 80 以及 X 90 焊管的性能要求,确定不同钢级管道的应力应变关系见表 1^[15-17],不同钢级管道的组织不同,在弹塑性计算中表现为拉伸性能不同。板料的单元类型为 8 节点减缩积分单元 C3D8R,厚度方向划分了 4 层单元,一共划分了 996 262 个单元,节点数为 1 240 721 个,见图 2。经过对比划分更细密网格的模型计算结果以及提取伪应变能与动能的比值表明这个网格划分方案可以保证结果准确及提高计算效率。

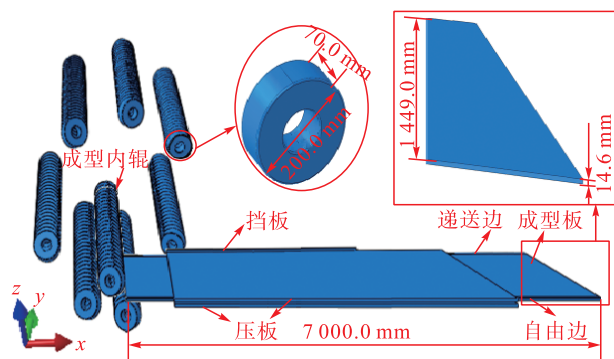


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model

表 1 不同钢级管道成型板应力应变关系表

Tab. 1 Stress-strain relationship of forming plate for different grades of steel pipelines

应变	不同钢级管道成型板应力 /MPa		
	X 70	X 80	X 90
0.000	485	555	625
0.002	497	567	662
0.005	510	580	700
0.060	610	700	805
0.100	637	725	—
0.140	665	—	—

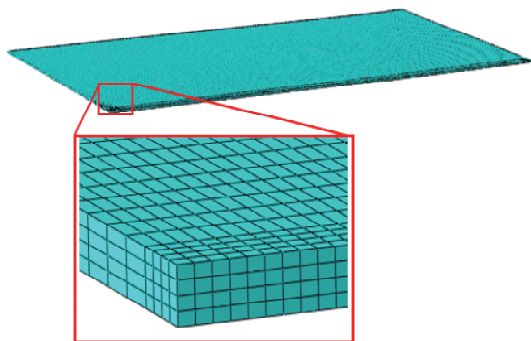


图 2 成型板网格划分图

Fig. 2 Mesh of the forming plate

成型辊和外控辊都是被动辊,依靠与板料表面的摩擦来转动,板料和辊轮之间属于滚动摩擦,摩擦系数为 0.1^[18-19]。螺旋焊管的成型过程可以作为准静态过程处理,所以整个计算采用 ABAQUS 的显式动力学模块 ABAQUS /Explicit 进行。

2 计算结果与讨论

2.1 成型后内外表面应力分布

采用三维有限元数值模型,通过调整成型内辊下压量,成功模拟卷出了螺旋焊管,管见图 3。由于本文研究的不同钢级的管道尺寸及成型模具相同,成型后表面应力有相似分布规律,因此这里选取 X 80 螺旋焊管作为代表进行高钢级管道成型后内外表面应力分布分析。对卷出的螺旋焊管进行分析,焊管外表面与外控辊都相切,整个焊管的圆度较好,成型后焊管管径与理论计算管径一致,成型后内外表面最大 Mises 等效应力在 200 MPa 左右。成型过程最大的应力出现在成型内辊下方位置,最大 Mises 等效应力在 600 MPa 左右,超过了板材的屈服强度,因此板材在成型内辊下方产生了塑性变形。

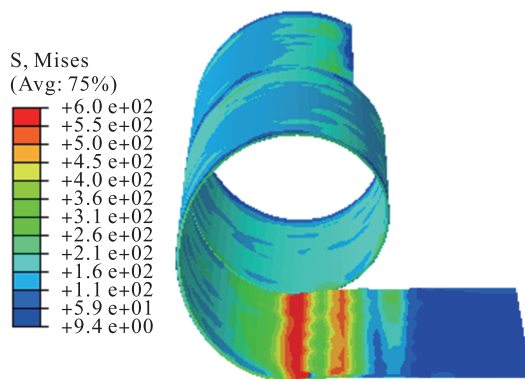


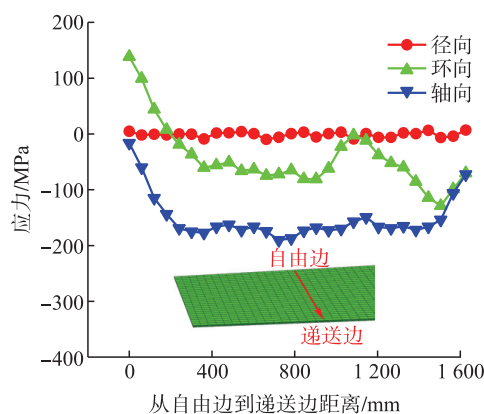
图 3 成型后螺旋焊管 Mises 等效应力云图

Fig. 3 Mises equivalent stress nephogram of the formed spiral pipeline

为了了解应力在管体的分布规律,在钢管的内外表面各定义一条路径,起点是自由边,终点是递送边,定义的路径及沿定义路径的应力分布见图 4,除了自由边附近的环向应力,轴向应力和环向应力在内表面基本呈压应力分布;除了自由边附近的环向应力,轴向应力和环向应力在外表面基本呈拉应力分布,这是由于板材在成型过程中内表面受压,而外表面受拉。从图 4 可看出,应力在成型后管体的分布不均匀,有较大波动,这是由于成型辊组各个辊轮之间有间隙,因此板材有的部位受到辊轮挤压,而有的部位没有。轴向应力在递送边和自由边都很小,内表面自由边有较大的拉环向应力,外表面递送边有较大的拉环向应力。径向应力在内外表面都很小,接近 0 MPa。

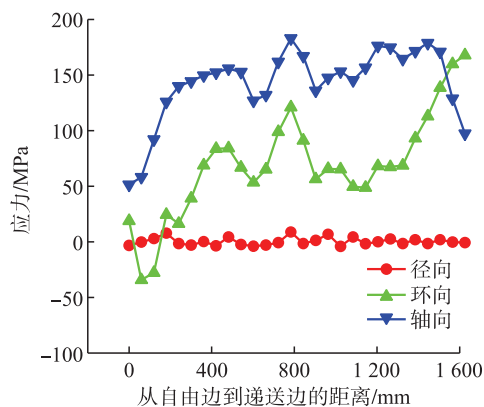
2.2 成型过程应力演变

为了研究螺旋焊管成型过程应力的演变过程,在螺旋焊管内表面、中间以及外表面各选取 1 个单元,单元应力随时间变化曲线见图 5。从图 5 可看到,板料在经过 3 个成型辊的弯曲变形之后,在 3 个成型辊中板料的 Mises 等效应力最大,内表面应力超过板材屈服强度,而外表面



a) 内表面

a) Inner surface



b) 外表面

b) Outer surface

图 4 内外表面从自由边到递送边应力图

Fig. 4 Stresses on inner and outer surfaces from free edge to delivery edge

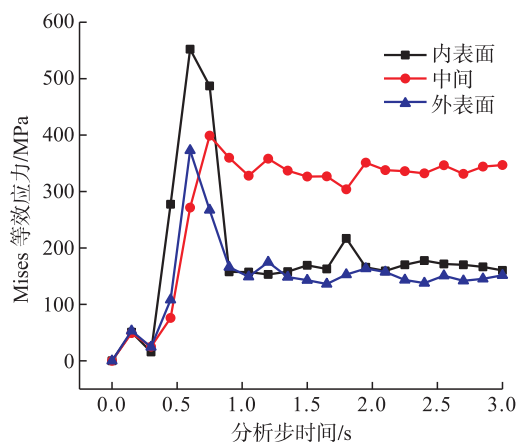


图 5 应力随时间变化曲线图

Fig. 5 The curve of stresses-time

及板厚中间部位最大 Mises 等效应力比板材最大屈服强度低,板料穿过成型辊后,应力值开始迅速减小,内外表面应力减小幅度较大,中间部位略有减小,到外控辊时远远小于板材屈服强度,并且 Mises 等效应力在经过其余外控辊时,板料应力值变化很小,说明螺旋焊管成型时的弹塑性变形主要发生在三辊弯板区域的,板料在成型过程中的最大 Mises 等效应力出现在成型内辊正下方,板料的塑性弯曲变形主要发生在成型辊之间,经过成型辊后板料发生回弹,成型应力减小。

2.3 不同钢级螺旋焊管成型内辊下压量及应力分析

本文对不同钢级同一尺寸螺旋焊管的合适成型内辊下压量进行了研究,在此基础上研究了成型后螺旋焊管的环向应力分布。图 6 为 X 70、X 80 和 X 90 合适的成型内辊下压量,从图 6 可看到,随着钢级的提高,合适的成型内辊下压量随之增加,并且 X 90 与 X 80、X 80 与 X 70 合适的成型内辊下压量都相差 1.3 mm。图 7 为不同钢级螺旋焊管成型后环向应力分布,从前面的研究结果可知,螺旋焊管外表面基本呈拉应力分布,而螺旋焊管外表面不直接面临较强腐蚀性的石油天然气,管道内表面为压应力,因此这里不直接研究焊管内外表面应力,而取焊管递送边厚度方向应力作为研究对象。从图 7-a) 可知,不同钢级螺旋焊管成型后外表面递送边的应力随钢级增加而增加,外表面环向应力呈拉应力分布,内表面环向应力呈压应力分布,不同钢级螺旋焊管厚度方向中间部位的环向应力都接近 0 MPa。从图 7-b) 可知, X 70 和 X 80 管道轴向应力在厚度方向基本一样, X 90 管道轴向应力比 X 70 和 X 80 大,和环向应力一样,外表面轴向应力呈拉应力分布,内表面轴向应力呈压应力分布,不同钢级螺旋焊管厚度方向中间部位的轴向应力都接近 0 MPa。

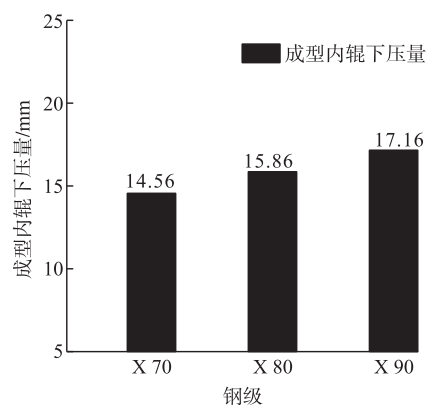


图 6 不同钢级焊管成型内辊下压量柱状图

Fig. 6 The press amount of inner roll for different grade pipelines

2.4 板厚对螺旋焊管成型内辊下压量及应力分析

实际生产中,根据运输压力不同制造不同壁厚螺旋焊管,同一批次的原材料板厚也会有一定差别,因此有必要

研究成型板板厚对成型参数及成型应力的影响。本文研究了 14.6、18.4、21.4 mm 的 X 80 螺旋焊管的成型过程,结果见图 8。从图 8 可看出,随着成型板板厚增加,合适的成型内辊下压量减小,这是由于板厚增加回弹量相应减小。从图 9-a)可看出,递送边的环向应力随板厚增加而减小,不同厚度管道环向应力在中间层最小接近 0;从图 9-b)可看出,递送边的轴向应力在厚度方向分布基本一样。

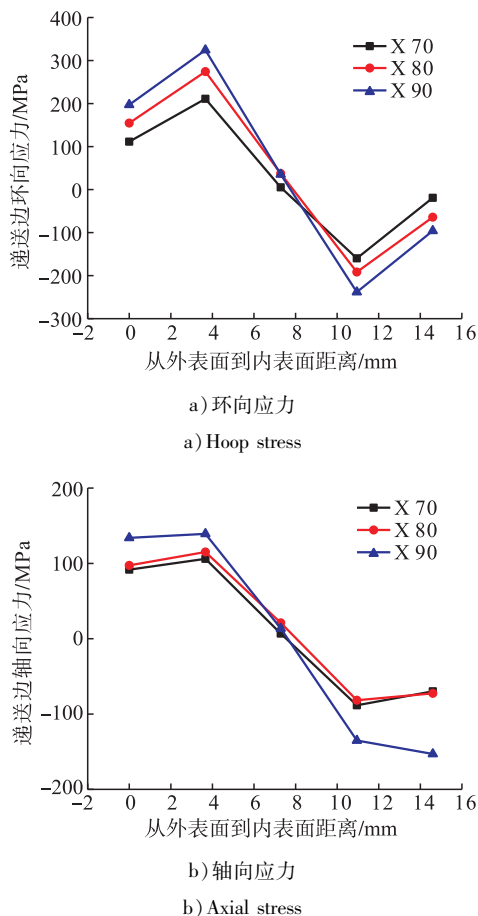


图 7 不同钢级螺旋焊管成型后应力曲线图

Fig. 7 The stresses of different spiral formed grade pipelines

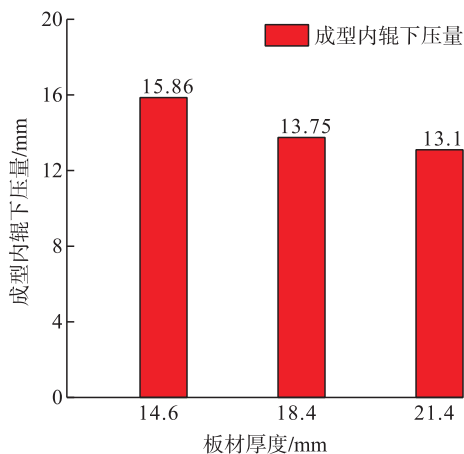


图 8 不同厚度板材的合适成型内辊下压量柱状图

Fig. 8 The appropriate press amount of inner roll for plates of different thickness

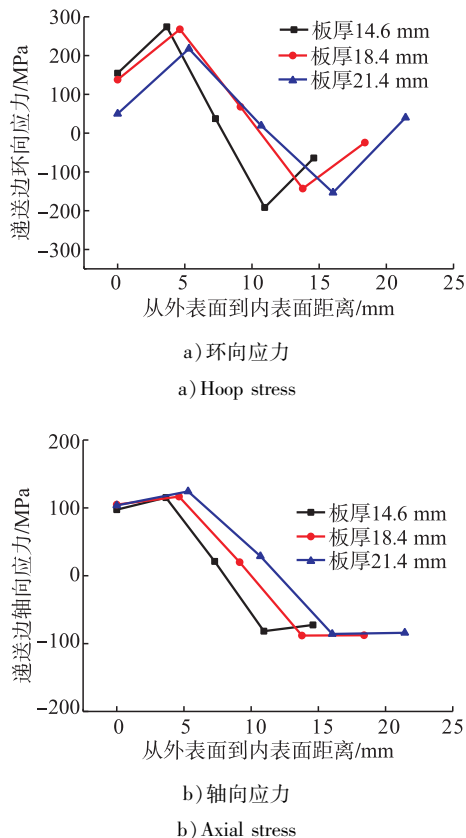


图 9 不同厚度板材成型后应力曲线图

Fig. 9 The stresses after forming for plates of different thickness

3 结论

1) 螺旋焊管成型后应力在管体分布不均匀。除了自由边及附近环向应力,成型后内表面的轴向应力和环向应力呈压应力分布,外表面的轴向应力和环向应力呈拉应力分布。

2) 板料在弯曲成型过程中,处于三辊弯板区域的成型内辊下方时,成型应力最大,经过成型辊后板材发生回弹变形,应力减小,在经过外控辊时,应力不发生明显变化。

3) 相同管径的螺旋焊管,随着钢级提高,合适的成型内辊下压量随之增加。内外表面递送边的环向应力都随着钢级的升高而增大,X 70 和 X 80 螺旋焊管轴向应力基本一样,都明显比 X 90 螺旋焊管轴向应力小。

4) 随着成型板板厚增加,合适的成型内辊下压量减小。递送边的环向应力随厚度增加而减小,轴向应力随成型板板厚变化较小。

参考文献:

[1] 李鹤林,吉玲康,田 伟. 西气东输一、二线管道工程的几项重大技术进步[J]. 天然气工业,2010,30(4):1-9.

Li Helin, Ji Linggang, Tian Wei. Significant Technical

- Progress in the West-East Gas Pipeline Projects-Line One and Line Two [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30 (4): 1-9.
- [2] 严仁军,雷加静,李 鹏,等.特厚板多层多道焊的 Marc 有限元模拟[J].机械工程学报,2011,47(18):37-42.
Yan Renjun, Lei Jiajing, Li Peng, et al. Marc Finite Element Simulation in Special Thick Plate by Multi-Pass and Multi-Layer Welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (18): 37-42.
- [3] 董俊慧,霍立兴,张玉凤.环焊缝管道焊接应力应变三维有限元分析[J].机械工程学报,2001,37(12):86-90.
Dong Junhui, Huo Lixing, Zhang Yufeng. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Welding Stress-Strain in a Girth Welded Pipe [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37 (12): 86-90.
- [4] Dong Zhiqiang, Zhang Jianxun. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Residual Stresses in Circumferential Welds of 2205/X 65 Bimetallic Pipe [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (5-8): 2841-2851.
- [5] Nasim K, Arif A F, Al-Nassar Y, et al. Investigation of Residual Stress Development in Spiral Welded Pipe [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215 (1): 225-238.
- [6] Forouzan M R, Nasiri S M M, Mokhtari A, et al. Residual Stress Prediction in Submerged Arc Welded Spiral Pipes [J]. Materials & Design, 2012, 33 (1): 384-394.
- [7] Arif A F, Al-Omari A S, Al-Nassar Y. Development of Residual Stress During Manufacturing of Spiral Welded Pipes [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27 (7): 738-745.
- [8] 王 洁,韩秀林,李汝江,等.大直径螺旋埋弧焊管成型过程中的管形控制及应力补偿[J].焊管,2017,40(2):46-51.
Wang Jie, Han Xiulin, Li Rujiang, et al. Pipe Shape Control and Stress Compensation of Large Diameter Spiral Submerged Arc Welded Pipe in Forming Process [J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40 (2): 46-51.
- [9] 毛浓召,乔凌云,张继成.成型合缝对螺旋埋弧焊管质量的影响[J].焊管,2013,36(11):39-42.
Mao Nongzhao, Qiao Lingyun, Zhang Jicheng. Influence on SAWH Pipe Quality of Forming Joint Close [J]. Welded Pipe and Tube, 2013, 36 (11): 39-42.
- [10] 刘洪飞,晁小陇.螺旋缝焊管成型应力对焊缝力学性能的影响及控制措施[J].钢管,2015,44(6):52-56.
Liu Hongfei, Chao Xiaolong. Influence by Forming Stress Properties of Spiral Welded Pipe on Weld Seam Mechanical and Relevant Control Measures [J]. Steel Pipe, 2015, 44 (6): 52-56.
- [11] 王 佳,王 斌,马红霞.成型过程对焊管残余应力的影响分析[J].中国设备工程,2017(21):114-115.
Wang Jia, Wang Bin, Ma Hongxia. Effect Analysis of Forming Process on Residual Stress for Welded Pipe [J]. China Plant Engineering, 2017 (21): 114-115.
- [12] 李 宏,张见明.螺旋焊管成形过程的有限元分析[J].石油机械,2001,29(9):30-32.
Li Hong, Zhang Jianming. Finite Element Analysis of Forming Process of Spiral Welded Pipes [J]. China Petroleum Machinery, 2001, 29 (9): 30-32.
- [13] Yu Jianrong, Wu Bo, Zhao Zenghui, et al. Finite Element Synthesized Analysis of the Forming Process of Spiral Welded Pipe [J]. China Welding, 2006, 15 (4): 71-74.
- [14] 李 霄,熊庆人,石 凯,等.基于参数化的螺旋焊管成型模型建立及成型过程仿真[J].热加工工艺,2010,39(9):120-122.
Li Xiao, Xiong Qingren, Shi Kai, et al. Parameterized Forming Procedure Model and Simulation of Helical Submerged Arc Welded Pipe [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (9): 120-122.
- [15] Zhao Wenbo, Liao T W, Kompotiatis L. Stress and Springback Analysis of API X70 Pipeline Steel Under 3-Roller Bending via Finite Element Method [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017, 30 (5): 470-482.
- [16] 彭宁琦,史术华,罗 登,等.应变时效对大口径 X 80 管线钢拉伸性能的影响[J].机械材料,2018,42(6):42-45.
Peng Ningqi, Shi Shuhua, Luo Deng, et al. Effect of Strain Aging on Tensile Properties of X 80 Large-Diameter Pipeline Steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42 (6): 42-45.
- [17] 张继建,付 超,王宪栋,等.X 90 M 钢级螺旋缝焊管残余应力控制的实现——2号辊压下量与残余应力关系模型的建立[J].钢管,2015,44(6):61-66.
Zhang Jijian, Fu Chao, Wang Xiandong, et al. Control of Residual Stress of X 90 M SSAW Pipe—Setting up Model of Relationship Between Screwdown Amount of Roll 2 and Residual Stress [J]. Steel Pipe, 2015, 44 (6): 61-66.
- [18] Jiang Jinmao, Li Dayong, Peng Yinghong, et al. Research on Strip Deformation in the Cage Roll-Forming Process of ERW Round Pipes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (10): 4850-4856.
- [19] Li Mingqi, Sun Zhichao, Li Minghui, et al. FEM Numerical Simulation of Tube Axial Drawing Process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160 (3): 396-400.