

引文: 田野. 油气管道工程用 X80 三通优化设计及增材制造技术[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 787-795.

TIAN Ye. Research on design optimization of oil and gas pipelines leveraging X80 tee and additive manufacturing technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 787-795.

油气管道工程用 X80 三通优化设计及增材制造技术

田野

国家管网集团西部管道有限责任公司

摘要:【目的】传统热挤压三通制造工艺复杂,组织性能与质量水平不稳定,容易出现三通本体强度或韧性不满足标准要求等问题,严重制约油气管道的安全平稳运行,因此亟需对三通的性能提升与质量控制方法开展研究。【方法】通过对油气管道工程用 X80 钢级、直径 1 219 mm 等径三通的结构进行优化设计与安全性评价,改善局部应力集中的问题。采用京雷焊丝与电弧增材技术实现了等径三通的增材制造,对产品开展微观组织、力学性能、缺陷与残余应力测试,并对等径增材三通及其环焊缝进行耐压试验与往复循环压力波动试验。【结果】在控制总质量的前提下,优化改进三通结构后,设计压力下三通所受最大应力降低了 38 MPa,三通主管连接区域应力降低约 50%。增材制造的 X80 三通力学性能稳定,各部位、方向心部与表面的性能及组织均匀,强度、韧性各向异性小,无厚度效应。相控阵超声与常规超声适用于增材制造三通的缺陷检测,整体热处理可显著降低增材制造三通生产过程中的残余应力。【结论】X80 增材制造三通及其连接环焊缝性能远高于同钢级热挤压三通,整体可承受的最大压力超过 57.5 MPa,焊接短节爆破裂纹扩展至增材三通管件肩部后停止,具有良好的韧性与止裂能力。增材制造技术提高了三通的安全性与稳定性,为低温服役环境等特殊场景适用的三通设计与制造提供了新的思路与方法。(图 12,表 8,参 20)

关键词: 油气管道; 高强度; 三通; 增材制造; X80 钢

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)07-0787-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.008

Research on design optimization of oil and gas pipelines leveraging X80 tee and additive manufacturing technology

TIAN Ye

PipeChina West Pipeline Co. Ltd.

Abstract: [Objective] The traditional hot-extruded tees are manufactured through a complex process and exhibit unstable organizational properties and quality levels. These tees are susceptible to having strength or toughness levels below standard requirements, thereby significantly impeding the safe and stable operation of oil and gas pipelines. Hence, it is imperative to explore methods to enhance properties and ensure quality control for tees. [Methods] This study introduced equal tees made of X80 steel with a diameter of 1 219 mm for the structural design optimization and safety evaluation of oil and gas pipelines, aimed at addressing local stress concentration issues. These equal tees were fabricated using Jinglei welding wires and the arc additive manufacturing (AM) technique. Various tests, including assessments of microstructures, mechanical properties, defects, and residual stresses, were conducted on the products. Additionally, pressure tests and reciprocating pressure fluctuation tests were performed on these equal tees and their circumferential welds. [Results] The tee structure was optimized and improved on the prerequisite of fulfilling the weight control requirement. The maximum stress in the tees under design pressures decreased by 38 MPa, while the stress at the tee connections to the main pipelines was reduced by approximately 50%. The mechanical properties of the X80 tees, produced through additive manufacturing, demonstrated stability, and their behaviors and microstructures were observed consistent across all parts and directions, including their cores and surfaces. Their strength and toughness exhibited minimal anisotropy and were unaffected by thickness variations. Both phased array ultrasonic testing and conventional ultrasonic testing proved effective for defect detection in AM tees. Additionally, bulk heat treatment was found to be highly beneficial in significantly

reducing residual stresses during the production of AM tees. [Conclusion] The X80 AM tees and their circumferential welds for connection significantly outperform hot-extruded tees with the same steel grade. The maximum pressure capacity of these tees surpasses 57.5 MPa. Cracking upon blasting of welded nipples propagates within the fitting shoulder range of AM tees, demonstrating good toughness and crack arrest capability. The additive manufacturing technology contributes to the safety and stability improvement of tees and offers new insights and methods for the design and manufacturing of tees suitable for special scenarios, such as low-temperature service environments.

(12 Figures, 8 Tables, 20 References)

Key words: oil and gas pipeline, high strength, tee, additive manufacturing (AM), X80 steel

管道是石油、天然气的主要运输方式之一，具有经济安全、高效环保的优势。三通在管道工程建设中可以改变管道方向与管径大小，具有实现管道分支、局部加强及特殊连接等作用，是油气输送管道工程的重要组成构件，其质量水平是评价管道能否安全平稳运行的关键指标之一。随着中国管道输送技术的快速发展，管件钢级、口径、壁厚不断提高。高钢级、大口径三通制造工艺复杂、开孔率大，存在需要多次加热、人为影响因素大、低温性能稳定性偏低、可靠性难以保障等问题，是质量控制难度最大的管件。近年来，中国先后出现高强度三通本体强度不达标或韧性过低的事件，因此，三通的性能提升与质量控制是亟需突破的技术瓶颈。

增材制造技术基于离散-堆积原理，由三维数据模型驱动，采用材料逐层累加的方法实现实体零件的快速成形制造与再制造，其核心思想是通过快速凝固突破传统冶金对合金化大型构件的性能制约。金属材料增材制造技术目前主要应用于航空、航天、军工领域，按照热源类型可分为激光增材制造、电子束增材制造、电弧增材制造等^[1-7]。其中激光、电子束增材制造设备投资与运行成本高，所制产品材料多为钛合金。电弧增材制造的成形精度不及前两者，但其材料适用范围广、成形效率高、成本低、产品组织致密、可靠性高，应用前景极为广阔。在此，利用电弧增材制造技术制造X80钢级、直径1219 mm等径三通，改变了传统的设计与制造理念，该技术可根据现场环境与性能要求，灵活改变管件结构与材料成分，快速响应制造要求，制造工序少，生产周期短，整体性能均匀，无壁厚与管长限制。

1 三通结构优化设计

由于三通开孔破坏了结构的连续性与整体性，受内压载荷作用会在交贯区产生局部高应力，形成应力

集中区域。为了使设计内压下交贯区附近的应力集中降低至允许范围内，防止交贯区应力过大而产生结构破坏，通常需要进行开孔补强设计^[8]。

采用弹塑性极限载荷法对油气管道工程用X80钢级三通进行结构应力分析，建立了12 MPa、DN 1200等径清管三通及工艺管组合件模型（表1、图1），因其整体结构关于中心面对称，为提高计算效率，建立1/4模型。

表1 12 MPa、DN 1200 等径清管三通及工艺管尺寸表
Table 1 Dimensions of equal pigging tee and process pipe at 12 MPa and DN 1200

主管 内径/mm	支管 外径/mm	主管 长度/mm	支管 长度/mm	主管 下壁厚/mm	支管 壁厚/mm
1166.2	1219	889	838	67	53

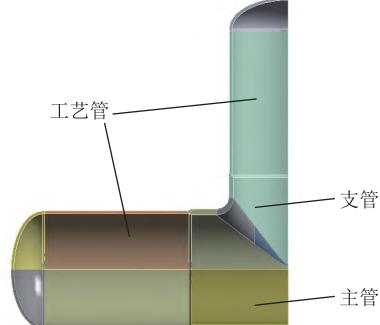


图1 12 MPa、DN 1200 等径清管三通及工艺管组合件模型图
Fig. 1 Model of equal pigging tee and process pipe assembly at 12 MPa and DN 1200

计算设计压力下组合件Von Mises应力分布，三通肩部所受应力最大为603 MPa，存在应力集中现象，内表面腹部应力较小。三通主管、支管与工艺管连接焊缝处均存在应力集中，最大应力出现于三通主管与工艺管连接位置，为609 MPa。

对等径三通结构进行优化设计，以三通交管内表面倒角为优化设计变量，三通肩部最大Von Mises应力为优化设计约束，进行参数优化分析。随着倒角尺寸减小，肩部厚度增大，最大应力逐渐降低；当倒角尺寸为110 mm时，肩部应力最小（图2），故三通交管内表面倒角最优尺寸为110 mm。

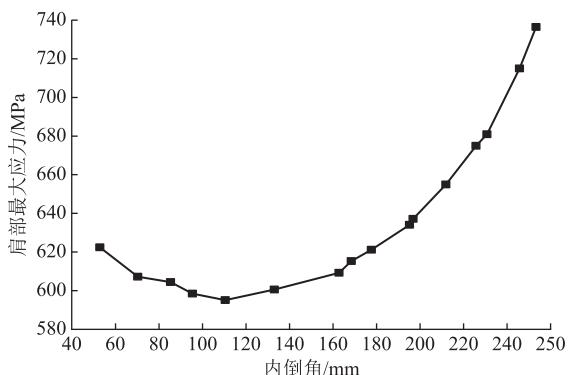


图 2 三通肩部最大应力随内倒角变化曲线

Fig. 2 Curve of maximum stress variation at tee shoulder with the change of internal chamfer

对三通进行拓扑优化分析,研究其最优结构尺寸。结果表明三通肩部可加工为内弧形,外表面肩部加厚,支管加长,在三通近倒角区结构外部呈阶梯状加厚,三通外表面结构呈圆弧状加厚。根据参数优化与拓扑优

化结果,考虑加工可实施性,设计主、支管壁厚相等,增大肩部厚度,最终建立 1/4 优化三通几何模型(图 3)。优化三通与工艺管等内径连接,主、支管加长 100 mm,并使其光滑过渡(表 2)。

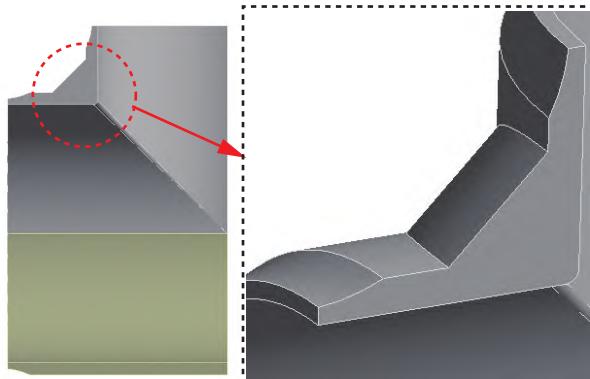


图 3 优化后三通 1/4 三维模型图

Fig. 3 Three-dimensional model of optimized tee at 1/4 scale

表 2 优化后三通尺寸参数表
Table 2 Dimension parameters of optimized tee

主管外径/ 支管外径/	支管中心至端面	主管中心至	主管下厚度/	主管上厚度/	支管厚度/	交管外表面倒角/	交管内表面倒角/
mm	mm	距离/mm	端面距离/mm	mm	mm	mm	mm
1 274.2	1 274.2	989	938	54	54	150	19

优化后三通在设计压力下所受最大应力为 571 MPa,位于三通肩部;主管、支管与工艺管连接处所受最大应力分别为 319 MPa、309 MPa。优化后三通在控制结构质量的前提下,极限承压值有所增加,设计压力下所受最大应力降低 38 MPa,三通主管连接区域的应力约降低 50%,连接处的应力集中得以显著改善。

2 增材制造

2.1 材料与工艺参数设计

通过调研国内外主要埋弧焊材,选择 3 款不同的商用埋弧焊材制造试验块,分析其化学成分、冲击性能、拉伸性能、硬度与金相,选择低温冲击韧性最稳定的京雷焊材用于 X80 钢级、直径 1 219 mm 等径增材三通的制造。

首先在实验室环境下预制增材制造试验环,评价埋弧打印工艺的同时开展三通环焊工艺研究。试验前对基体表面进行精车,去除表面氧化物与污染物。在基体表面直接形成第一层熔覆层使基体温度升高,然后通过内部水冷方式控制层间温度为 150~200 °C,依次在第一层表面连续完成后续制造工序,工艺参数设置为:电压 29.6 V、电流 521~565 A、送丝速度

120 mm/min、扫描线速度 600 mm/min。最终在基体表面形成宽 200 mm、高 50 mm 左右的熔覆层作为试验环毛坯,取样进行化学成分分析与理化性能试验。在打印横截面上截取金相试样,经硝酸酒精溶液浸蚀后采用 OLS 4100 激光共聚焦显微镜、MEF4M 金相显微镜及图像分析系统观察试样截面的微观组织,可见组织以粒状贝氏体为主,晶粒度达到 10.5 级(图 4)。测试试验环的力学性能(表 3),可见试验环的横向、纵向拉伸性能均满足标准要求,试验结果差异小。通过增材制造试验环的系列低温冲击试验测得,横向、纵向 -45 °C 冲击吸收能量高达 150 J, -60 °C 冲击吸收

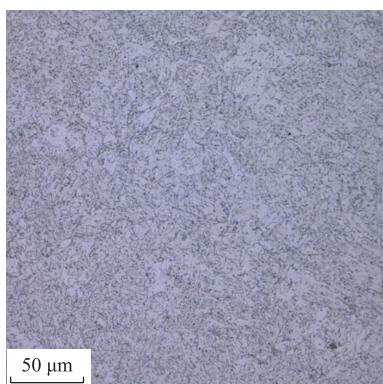


图 4 增材制造试验环管体组织金相图
Fig. 4 Metallographic photo of tube microstructure in AM ring specimen

表3 增材制造X80钢级试验环拉伸试验结果表
Table 3 Tensile test results for X80 AM ring specimen

取样方向	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率	屈强比
横向	659	577	30%	0.88
横向	656	572	31%	0.87
横向	652	576	28%	0.88
纵向	658	578	29%	0.88
纵向	655	582	29%	0.89
纵向	659	584	29%	0.89

能量在100 J以上。从试验环一周等距的9个位置取样进行硬度测试,试验环显微硬度的波动较小,最大值与最小值仅相差19 HV10(图5)。导向弯曲试样未出现裂纹。

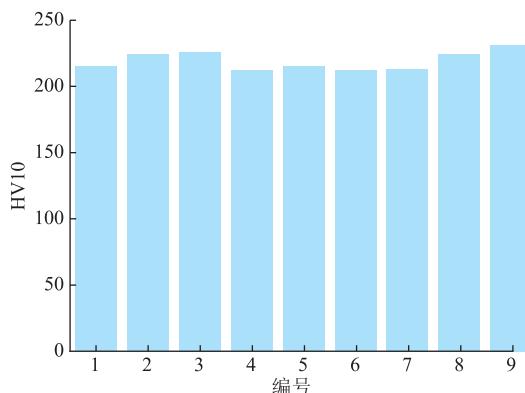


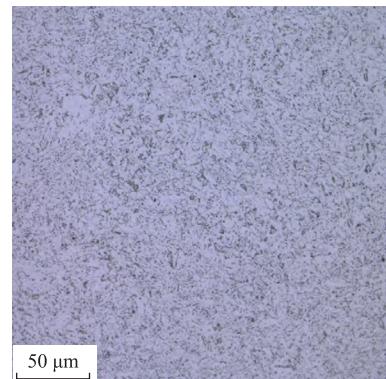
图5 增材制造X80钢级试验环维氏硬度统计图
Fig. 5 Vickers hardness statistics of X80 AM ring specimen

2.2 生产及验证

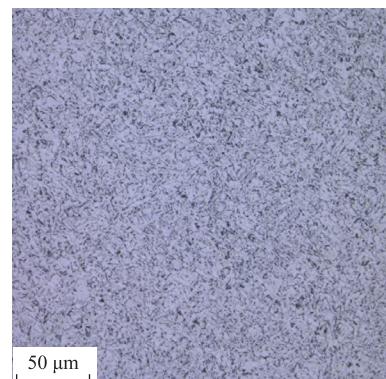
2.2.1 微观组织与力学性能

利用中国石油集团首套增材制造试验研究平台,采用京雷焊丝与经证实可靠的试验环制造工艺生产了两个X80钢级、直径1219 mm的等径增材三通。解剖其中一个增材三通,对其不同部位及方向的性能进行测试,研究增材三通的性能均匀性;于另一个增材三通的主管延长段取样进行性能测试,对测试结果进行评定。可见增材三通主管、支管、肩部垂直及平行打印方向上的金相结果一致,均为晶内针状铁素体+粒状贝氏体+多边形铁素体(图6),无厚度效应,表面无宏观焊接缺陷与明显裂纹。在增材三通延长段垂直打印方向取样可以满足增材三通金相观察的要求。

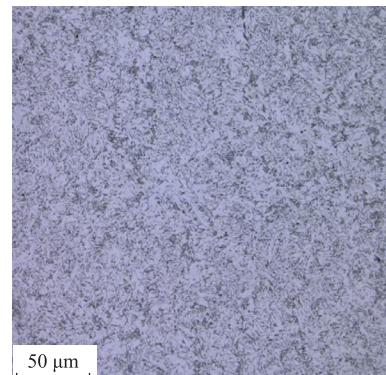
在解剖增材三通的1#~5#位置取全壁厚试样(图7),在另一个增材三通主管位置取全壁厚试样,进行10 kg载荷维氏硬度试验与力学性能测试。由增材制造三通主管、支管、肩部的拉伸性能及硬度测试结果分布(图8、图9)可见,增材制造三通不同位置、方



(a) 上表面



(b) 1/4 壁厚处



(c) 壁厚中心

图6 增材制造三通样品金相图
Fig. 6 Metallographic photos of AM tee specimen

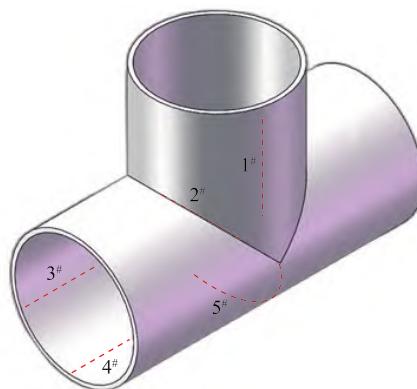


图7 三通硬度试验取样位置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of sampling position for tee hardness test

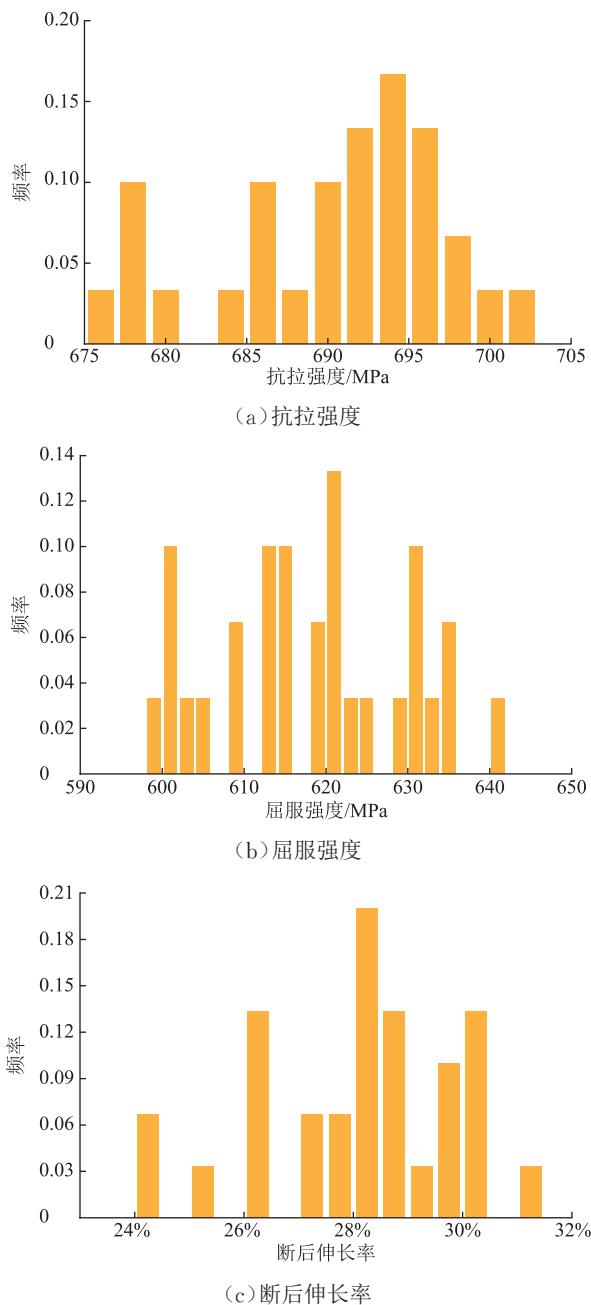


图 8 增材制造三通拉伸性能频率分布图

Fig. 8 Frequency distribution for tensile property of AM tee

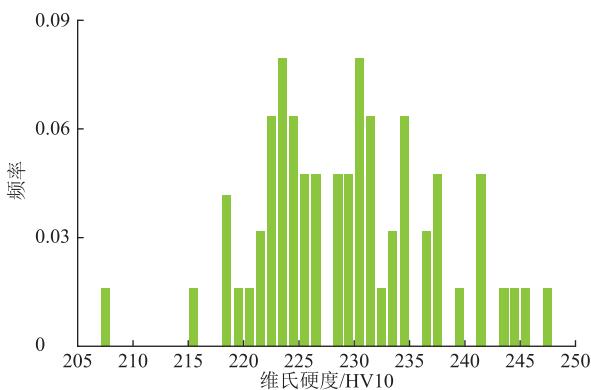


图 9 增材制造三通硬度频率分布图

Fig. 9 Frequency distribution for hardness of AM tee

向抗拉强度波动范围为 3.57%; 屈服强度波动范围为 6.55%, 硬度波动范围为 16.19%, 各参数波动范围较小, 三通力学性能稳定。统计增材三通主管、支管的冲击韧性(表 4), 可见在试验方向一致的条件下, 各部位冲击韧性相差不大, 仅平行打印方向冲击韧性略低, 各部位均满足标准要求。

表 4 增材制造三通冲击韧性试验结果表
Table 4 Impact toughness test results of AM tee

取样部位	取样方向	试验温度/℃	吸收能量/J		剪切断面率	
			单个值	平均值	单个值	平均值
主管	垂直	-45	188、176、181	182	90%、85%、85%	87%
	平行	-45	133、145、166	148	60%、80%、85%	75%
支管	垂直	-45	132、172、171	158	75%、80%、80%	78%
	平行	-45	138、122、120	126	70%、65%、50%	62%

2.2.2 缺陷与残余应力

设计加工规格为 340 mm×150 mm×58 mm 的 X80 增材制造对比试块, 对相控阵超声、常规超声斜探头等检测方法在增材制造三通上的适用性进行对比研究。其中, 相控阵超声使用试块中的 2 mm 孔进行校准, 制作时间增益补偿曲线, 对试块上的缺陷进行检测, 探头置于 A 检测位(图 10)。由检测结果(表 5、表 6)可见, 两种方法均可检出试块中的所有缺陷, 缺陷检出率高; 常规超声的缺陷测量深度误差平均值为 0.66 mm, 长度测量误差平均值为 2 mm, 深度与长度测量较为准确; 相控阵超声的缺陷测量深度与实际深度绝对误差平均值为 2.8 mm, 自身高度测量误差平均值为 0.7 mm, 深度与自身高度测量较为准确。

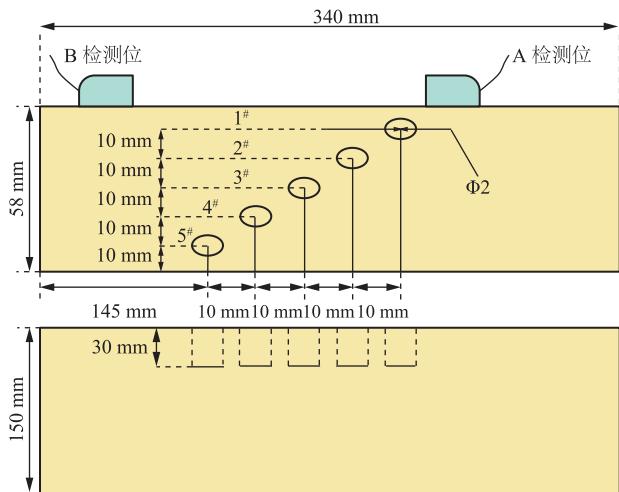


图 10 增材制造对比试块及检测位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of AM reference specimen and detection positions

表 5 增材制造对比试块超声斜探头检测结果表
Table 5 Tensile test results for X80 AM ring specimen

缺陷编号	水平距离/mm	实际深度/mm	测量深度/mm	绝对误差/mm	长度/mm	当量/dB	级别
1 [#]	1.0	8	7.5	-0.5	28	Φ2-0.3	IV
2 [#]	10.1	18	17.1	-0.9	28	Φ2+0.7	IV
3 [#]	20.0	28	27.6	-0.4	27	Φ2+0.2	IV
4 [#]	29.1	38	37.2	-0.8	28	Φ2+0.3	IV
5 [#]	38.6	48	47.3	-0.7	29	Φ2+2.3	III

表 6 增材制造对比试块相控阵超声检测结果表
Table 6 Test result of AM reference specimen using phased array ultrasonic testing

缺陷编号	水平距离/mm	实际深度/mm	测量深度/mm	绝对误差/mm	长度/mm	高度/mm	当量/dB	级别	缺陷类型
1 [#]	2.5	8	6.7	-1.3	22	1.8	Φ2-1.3	IV	线状缺陷
2 [#]	13.3	18	16.8	-1.2	23	2.2	Φ2-0.9	IV	线状缺陷
3 [#]	24.2	28	25.7	-2.3	22	3.6	Φ2-1.1	IV	线状缺陷
4 [#]	41.6	38	33.1	-4.9	23	3.7	Φ2-2.2	IV	线状缺陷
5 [#]	52.9	48	43.5	-4.5	23	2.2	Φ2-2.6	III	线状缺陷

使用盲孔法^[9-15]对X80增材制造三通相贯线位置进行残余应力测试,设备为中航电测的E120-2CA-K型应变花,灵敏度系数为2.18,采用动态数字采集仪采集数据,测量点位在相贯线附近与三通主管上,分别记为X1~X5(图11)。测试时,依照GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》,分别于去应力热处理前后进行检测。由测试结果(表7)可见,去应力热处理前,相贯线处残余应力最大值为546 MPa,环向残余应力最大值为506 MPa,轴向残余应力最大值为329 MPa;去应力热处理后,相贯线处残余应力最大值为168 MPa,环向残余应力最大值为144 MPa,轴向残余应力最大值为134 MPa。经热处理后,相贯线处

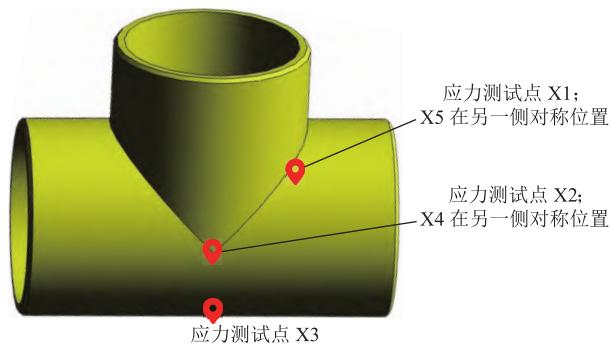


图 11 盲孔法应力测试点位置示意图
Fig. 11 Schematic diagram of stress test points using blind-hole method

残余应力大幅下降,均在170 MPa以内,残余应力得到充分释放。

表 7 去应力热处理前后相贯线位置残余应力统计表
Table 7 Statistics of residual stress at intersecting positions before and after stress relief heat treatment

测量位置	最大残余应力/MPa		最小残余应力/MPa		环向残余应力/MPa		轴向残余应力/MPa	
	热处理前	热处理后	热处理前	热处理后	热处理前	热处理后	热处理前	热处理后
X1	546	141	289	126	506	140	329	126
X2	525	100	121	86	426	95	219	91
X3	417	138	181	53	377	99	220	92
X4	147	168	14	132	124	144	36	133
X5	495	142	219	118	465	126	263	134

2.3 水压试验

对等径增材三通及其连接环焊缝进行离线水压试验^[16-20],通过耐压试验与往复循环压力波动试验(表8),检验三通及环焊缝的服役性能,最终通过水压爆破获得三通的承压能力。结果表明,增材制造三通整体承受的最大压力超过57.5 MPa。试验中,焊接的48 mm厚短节首先发生变形,随后发生爆破失效,爆破裂纹快速扩展至堵头与增材三通管件;在堵头处,由

于材料具有一定脆性,断口为脆-韧混合断口。裂纹扩展至增材三通管件肩部后停止扩展,在压力的作用下沿圆周形成45°韧性断口,局部位置在断裂时经历断口摩擦,呈现黑色,断面有微小的撕裂棱(图12)。传统同钢级、同规格热挤压三通的极限承压能力一般为40~47 MPa,断口集中在主管与支管的过渡区域,呈放射状,具有脆性断裂特征,对比可知,增材技术制造三通的承压能力与韧性均显著优于传统热挤压三通。

表 8 等径增材三通水压试验方案表
Table 8 Hydrostatic test scheme for AM equal tee

试验压力/MPa	压力保持时间	注释
12	16 h	设计规范强度试验
6~18	循环 20 次 (约 0.5 h 一个循环)	压力波动试验
18	10 min	设计压力的 1.5 倍
33	10 min	最小抗拉承压能力
36	10 min	三通实际承压能力要求
60	继续加压, 直到 爆破或 60 MPa	



(a) 整体



(b) 断口处

图 12 水压爆破后的增材制造三通实物图
Fig. 12 Photos of AM tee after hydraulic blasting

3 结论

1) 通过优化 X80 钢级、直径 1 219 mm 等径三通的肩部尺寸并进行增材制造, 可以增加三通极限承压能力, 降低设计载荷下所受最大应力, 显著改善三通主管与支管连接区域的应力集中问题。

2) X80 增材制造三通力学性能稳定, 各部位、各方向、各壁厚心部与表面的性能及组织均匀, 强度、韧性各向异性小, 无厚度效应, 平行打印方向的冲击韧性低于垂直打印方向, 韧性差异原因还需结合工艺与试验数据进行深入分析。

3) 设计制作了 X80 电弧增材制造探伤试块, 对比相控阵超声与常规超声对增材制造试块缺陷的检出能

力, 结果表明两种方法对直径 2 mm 孔的检出率均达到 100%, 常规超声对缺陷深度、长度的测量较为准确; 相控阵超声对缺陷深度、自身高度的测量较为准确。热处理前后应力对比试验表明, 增材制造三通整体热处理可明显降低生产过程中的残余应力。

4) 耐压试验与压力循环试验表明: X80 增材制造三通及其连接环焊缝性能远高于同钢级热挤压三通, 整体可承受最大压力超过 57.5 MPa, 具有良好的韧性与止裂能力。增材制造技术可根据现场环境与性能要求, 灵活改变管件结构与材料成分, 快速响应制造要求, 制造工序少、生产周期短, 整体性能均匀, 无壁厚与管长限制, 提高了三通的适用性、安全性及稳定性, 为低温服役环境等特殊场景适用的三通设计与制造提供了新思路与方法。

5) 由于增材制造三通使用的焊丝等材料成本较高, 其生产成本约为同规格热挤压三通的 4 倍。考虑到实际工程应用中的防腐与检测需要, 增材制造三通还需进行外表面加工处理, 进一步开发性能优异且成本低廉的焊材, 研究表面高效加工处理技术, 降低制造成本与生产周期, 将有助于推动增材制造技术在管材管件生产领域的规模化应用。

参考文献:

- [1] 熊江涛, 耿海滨, 林鑫, 黄丹, 李京龙, 张赋升. 电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景[J]. 航空制造技术, 2015(23/24): 80~85. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.080. XIONG J T, GENG H B, LIN X, HUANG D, LI J L, ZHANG F S. Research status of wire and arc additive manufacture and its application in aeronautical manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(23/24): 80~85.
- [2] 胡美娟, 田野, 慕进良, 胡旭, 宁杰, 张林杰. CMT 增材 X80 钢组织和性能与韧性调控措施[J]. 焊接, 2022(7): 6~13. DOI: 10.12073/j.hj.20220429001. HU M J, TIAN Y, MU J L, HU X, NING J, ZHANG L J. Microstructure and mechanical properties of CMT additive X80 steel and control measures of toughness[J]. Welding & Joining, 2022(7): 6~13.
- [3] 张含嫣, 熊俊, 陈勇, 陈辉. 低热输入高效成形电弧增材制造研究进展及展望[J]. 电焊机, 2023, 53(2): 1~11. DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.02.01. ZHANG H Y, XIONG J, CHEN Y, CHEN H. Research progress

- and prospect of wire and arc additive manufacturing with low heat input and high-efficiency forming[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(2): 1-11.
- [4] 郭立杰,许伟春,齐超琪,任斐,封小松,赵凯,等.金属增材制造监测与控制技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2022, 54(3): 365-377. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2022.03.002.
GUO L J, XU W C, QI C Q, REN F, FENG X S, ZHAO K, et al. Research progress of monitoring and control technology for metal additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 365-377.
- [5] 董翼纶,李宇航,武少杰,程方杰.埋弧增材厚壁构件的组织与力学性能[J].材料热处理学报,2022,43(2):87-93. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2021-0396.
DONG Y G, LI Y H, WU S J, CHENG F J. Microstructure and mechanical properties of thick-walled component prepared by submerged arc additive manufacturing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(2): 87-93.
- [6] 胡瑞章,郭纯,菅梦,吴随松.电弧增材制造耐磨钢的组织结构与摩擦学性能[J].锻压技术,2023,48(2):194-202. DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.025.
HU R Z, GUO C, YING M, WU S S. Microstructure and tribological properties on wear resistant steel prepared by wire+arc additive manufacturing[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(2): 194-202.
- [7] 李丹,王启伟,韩国峰,张保国,朱胜,李卫.横向交变磁场对铝合金电弧增材成形组织与性能的影响[J].材料导报,2023, 37(4): 126-131. DOI: 10.11896/cldb.21050158.
LI D, WANG Q W, HAN G F, ZHANG B G, ZHU S, LI W. Effect of transverse alternating magnetic field on the microstructure and properties of aluminum alloy arc additive forming[J]. Materials Reports, 2023, 37(4): 126-131.
- [8] 尤泽广,王成,傅伟庆,孙学军.中俄东线站场用直径1422 mm×1219 mm三通设计[J].油气储运,2020,39(3):347-353. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.03.015.
YOU Z G, WANG C, FU W Q, SUN X J. Design of D1 422 mm×1 219 mm tee in China-Russia Eastern Gas Pipeline station[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 347-353.
- [9] 路浩,朱政,邢立伟.高钢级管道残余应力超声波法检测及小孔法验证[J].油气储运,2021,40(5):533-538. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.05.008.
LU H, ZHU Z, XING L W. Residual stress measurement of high-grade steel pipeline via ultrasonic method and verification by small hole method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 533-538.
- [10] 田野,罗宁.强弱磁场下管道应力内检测方法[J].油气储运,2023,42(5):542-549. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.05.007.
TIAN Y, LUO N. Internal detection of pipeline stress under strong and weak magnetic field[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(5): 542-549.
- [11] 赵宏涛,王永振,沈楠,王浩瑜,曾维国.管道铝热焊温度场及残余应力场的数值模拟[J].油气储运,2022,41(11): 1305-1311, 1318. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.11.009.
ZHAO H T, WANG Y Z, SHEN N, WANG H Y, ZENG W G. Numerical simulation on temperature field and residual stress field in thermite welding of pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11): 1305-1311, 1318.
- [12] 牛关梅,李伟,黄东男,刘成.盲孔法测试铝合金残余应力的释放系数的标定[J].铝加工,2023(1):44-49. DOI: 10.3969/j.issn.1005-4898.2023.01.09.
NIU G M, LI W, HUANG D N, LIU C. Calibration of release coefficient of aluminum alloy residual stress by blind hole method[J]. Aluminium Fabrication, 2023(1): 44-49.
- [13] 田野,罗宁,刘剑,张贺,赵康,李坤.基于矫顽力的管道剩磁应力检测技术研究[J].辽宁石油化工大学学报,2021,41(4): 85-90. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6952.2021.04.014.
TIAN Y, LUO N, LIU J, ZHANG H, ZHAO K, LI K. Research on detection stress technology of residual magnetic based on coercive force[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2021, 41(4): 85-90.
- [14] 李玉坤,王鄯尧,杨进川,徐春燕,田野,贾海东,等.大口径天然气管道环焊缝残余应力分布[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(6): 161-167. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.06.019.
LI Y K, WANG S Y, YANG J C, XU C Y, TIAN Y, JIA H D, et al. Residual stress distribution in girth weld of oil and gas pipeline[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(6): 161-167.
- [15] 程凡菊,李坤,丁融,彭启凤,李玉坤,韩彬.X80管线钢矫顽力与应力关系[J].油气储运,2022,41(11):1332-1340. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.11.013.
CHENG F J, LI K, DING R, PENG Q F, LI Y K, HAN B. Relationship between coercivity and stress of X80 pipeline steel[J].

- Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11): 1332–1340.
- [16] 程浩力, 郭志民, 张春生, 刘为秀, 郝天宇, 宋菁, 等. 海外油气田集输管道设计水压试验标准探讨[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 474–480. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.018.
- CHENG H L, GUO Z M, ZHANG C S, LIU W X, HAO T Y, SONG J, et al. Discussion on design standards of hydrostatic testing of gathering pipelines in oversea oil and gas fields[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 474–480.
- [17] 王言聿, 成志强, 周毅, 曹国飞, 柳葆生. ASME PCC-2-2011 复合材料修复设计适用性及试验验证[J]. 油气储运, 2018, 37(4): 449–453. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.04.014.
- WANG Y Y, CHENG Z Q, ZHOU Y, CAO G F, LIU B S. Applicability analysis and experimental validation of ASME PCC-2-2011 composite repair system design methodology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(4): 449–453.
- [18] 张冬娜, 戚东涛, 丁楠, 邵晓东, 魏斌, 蔡雪华. 复合材料增强管线钢管的预应力处理及水压试验[J]. 油气储运, 2017, 36(5): 502–507. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2017.05.004.
- ZHANG D N, QI D T, DING N, SHAO X D, WEI B, CAI X H. Autofrettage and hydrostatic burst test of composite reinforced line pipe[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(5): 502–507.
- [19] 安治国. 长输管道冬季水压试验风险分析及控制措施[J]. 油气储运, 2015, 34(11): 1231–1235. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.11.019.
- AN Z G. Risk analysis and control measures of hydrostatic testing in winter for long-distance pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(11): 1231–1235.
- [20] 刘玉卿, 张振永, 赵子峰. 较高设计系数管道高强度试压方案的设计与应用[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 557–561. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.05.022.
- LIU Y Q, ZHANG Z Y, ZHAO Z F. Design and application of the heavy-duty pressure test program for pipelines with high design factor[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 557–561.

(编辑:张腾)



(上接第 768 页)

- LI A L, QUAN L X, CUI G M, XIE S F. Sparrow search algorithm combining sine-cosine and Cauchy mutation[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(3): 91–99.
- [28] MIRJALILI S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 96: 120–133. DOI: 10.1016/j.knosys.2015.12.022.
- [29] 雍欣, 高岳林, 赫亚华, 王惠敏. 多策略融合的改进萤火虫算法[J]. 计算机应用, 2022, 42(12): 3847–3855. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2021101830.
- YONG X, GAO Y L, HE Y H, WANG H M. Improved firefly algorithm based on multi-strategy fusion[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(12): 3847–3855.
- [30] RASMUSSEN C E, WILLIAMS C K I. Gaussian processes for machine learning[M]. Cambridge: MIT Press, 2006: 79–102.

(编辑:张腾)

- Received: 2023-06-30
- Revised: 2023-08-01
- Online: 2024-05-07

**基金项目:** 陕西省公益性地质调查项目“陕西省国有资产资源资产评估管理评价体系研究设计”, 202202。**作者简介:** 肖述辉, 男, 1982 年生, 高级工程师, 2014 年硕士毕业于西安石油大学机械工程专业, 现主要从事油气储运管理方向的研究工作。地址: 陕西省延安市宝塔区枣园街道枣园路延长石油公司, 716000。电话: 15319559459。Email: 9109509@qq.com**通信作者:** 杜传甲, 男, 1993 年生, 在读博士生, 2020 年硕士毕业于西安建筑科技大学工业工程专业, 现主要从事复杂系统决策与分析方向的研究工作。地址: 陕西省西安市碑林区西安建筑科技大学雁塔校区, 710055。电话: 18291862590。Email: cjdu@xauat.edu.cn

- Received: 2023-08-24
- Revised: 2023-10-08
- Online: 2024-05-17