

16MnII基层上堆焊NCu30缺陷分析及对策

张举莉¹ 付林¹ 王利军¹ 张娟² 李雅楠² 赵秀丽²

(1.西安航天华威化工生物工程有限公司,西安710100;

2.镍钴共伴生资源开发与综合利用全国重点实验室,金昌737101)

摘要: NCu30焊接时容易产生气孔和裂纹缺陷直接影响焊接质量。在焊接过程中适当的预热可以有效避免气孔的产生。另外,虽然理论上直接用ENCu-7焊条焊接,焊接试验件合格,但是由于合金中含Cu的原因,导致焊接过程中冷却速度过快,致使熔池的氢不能及时溢出来而导致气孔的产生。主要原因在于Cu的化学活性比较强,且Cu的热导率、线膨胀系数和电阻率都比较大。所以在NCu30与低合金异种钢焊接时,需要用ENi-1的焊条作为过渡层。有色金属材料的焊接,需要小的线能量,并严格控制层间温度不得高于100℃,但Cu冷却速度太快,综合考虑,在NCu30的焊接过程中,需要持续保证焊接层温在60℃-100℃,且要求焊接环境的清洁和焊接过程中的保护。

关键词: NCu30; 裂纹; 气孔; 层间温度; 冷却速度; 焊接环境; 焊接保护

Defect Analysis and Countermeasure of NCu30 Surfacing Welding on 16MnII Base

Zhang Juli¹, Fu Lin¹, Wang Lijun¹, Zhang Juan², Li Yanan², Zhao Xiuli²

(1. Xi An Space Hua Wei Chemical & Biologic Engineering Co., Ltd., Xi An 710100;

2. National Key Laboratory of Development and Comprehensive Utilization of Nickel Cobalt Co-associated Resources, Jinchang 737101)

Abstract: It is easy to produce porosity and crack defects in NCu30 welding, which directly affects the welding quality. In the welding process, proper preheating can effectively avoid the formation of porosity. In addition, although in theory, there is no problem in direct welding with ENC_u-7 electrode, and the welding test parts are qualified, due to the reason that Cu is contained in the alloy, the cooling speed is too fast in the welding process, resulting in the hydrogen of the molten pool cannot overflow in time, resulting in the formation of pores, mainly because of the strong chemical activity of Cu. The thermal conductivity, linear expansion coefficient and resistivity of Cu are relatively large. Therefore, when NCu30 is welded with low alloy dissimilar steel, it is necessary to use the ENi-1 electrode as the transition layer. Although the welding of non-ferrous metal materials requires a small line energy, and strictly control the interlayer temperature should not be higher than 100 ° C, but the Cu cooling speed is too fast, considering the overall consideration, in the welding process of NCu30, it is necessary to continue to ensure that the welding layer temperature is 60 ~ 100 ° C, and requires the cleaning of the welding environment and the protection of the welding process.

Keywords: NCu30; crack; porosity; interlayer temperature; cooling rate; welding environment; welding protection

0 引言

公司承接的某化工企业年产11200吨ODS替代以及5500吨搬迁技改项目的液相洗涤换热器,管程:设计压力1.2MPa,设计温度100℃,工作介质为氟化氢、水、R133a;壳程:设计压

力1.0MPa,设计温度100℃,工作介质为循环水;设计标准GB/T151—2014、JB/T47566—2006、HG/T20594—2020、GB/T150—2011;设备管板采用NCu30 III,管箱封头、法兰、接管均采用NCu30材料,管箱设备法兰采用在16Mn II上堆焊NCu30。设备结构如简图1所示。

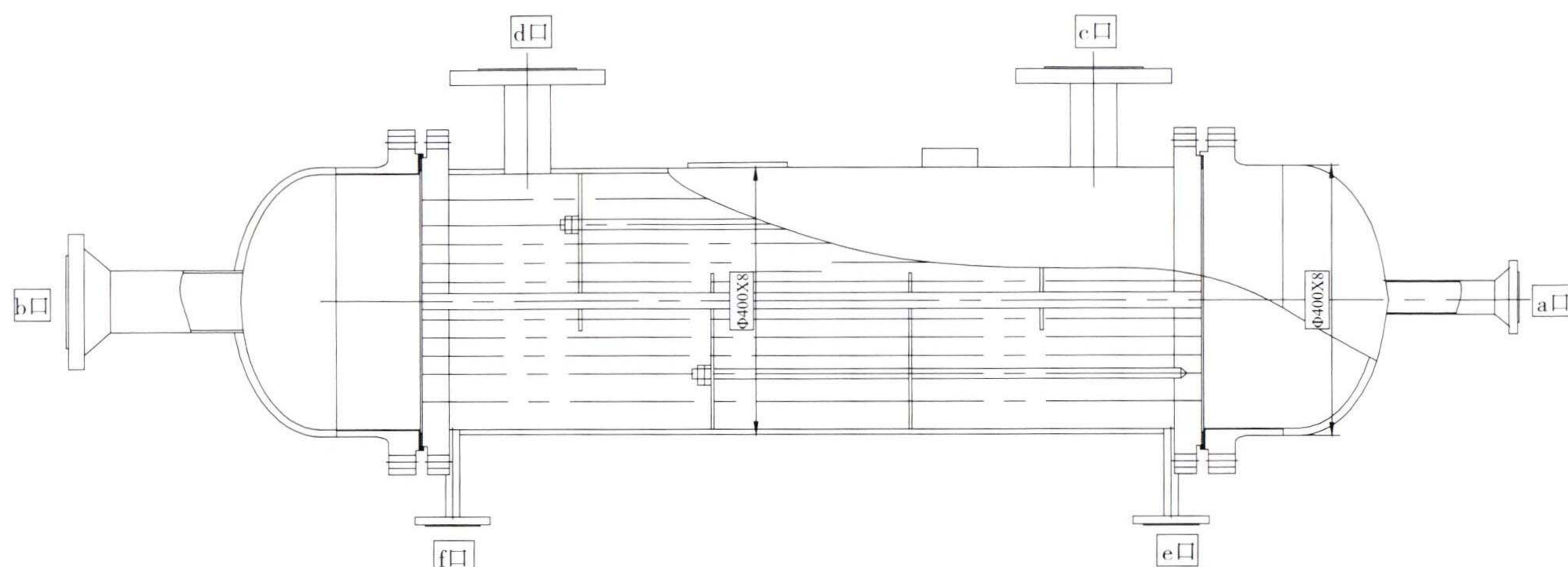


图1 液相洗涤换热器结构简图

1 堆焊工艺评定试验

1.1 焊接材料选用

按照JB/T4756—2006《镍及镍合金制压力容器》标准释义表4-26异种金属焊接时镍及镍合金焊接材料的选用，分别采用GTAW和SMAW两种堆焊方法进行焊接工艺评定试验。堆焊母材选用 $\delta=8\text{mm}$ 的Q345R板材。GTAW堆焊时，过渡层采用ERNi-1,面层采用ERNiCu-7,SMAW堆焊时，过渡层面层均采用ENiCu-7焊条。焊材化学成分如表1。

1.2 焊接工艺参数设定

按照焊接材料及镍及镍合金焊接相关要求，设定如表2的堆焊焊接工艺参数。

1.3 焊接工艺评定试验

评定按照NB/T47014《承压设备焊接工艺评定》及相关技术协议要求。对两种评定试验的过渡层、面层均按NB/T47013.5—2015进行了100%PT—I级和NB/T47013.3—2015进行

100%UT—I级，进行检测，结论合格。并按照要求对焊接接头进行了侧弯试验，结论合格。对熔覆金属化学成分分别进行了测定，其熔覆金属化学成份如表3：

熔覆金属化学成分，满足工艺评定及技术协议、设计图纸相关要求。

2 设备法兰堆焊

2.1 设备法兰堆焊

以工艺评定试验为支撑，考虑到焊接效率，对如图2的设备法兰采用SMAW进行堆焊，按经验，分别进行了过渡层和面层的堆焊，堆焊厚度约6mm。选用ENiCu-7的焊条， $\Phi 4.0\text{mm}$ ，焊接电流：140A-160A，电压22V-26V，并在焊接之前对法兰进行了100℃左右的预热，面层焊接没有预热。焊后分别对过渡层和面层进行了100%的着色检查，表面检测合格。

2.2 设备法兰堆焊及组对设备法兰与封头环缝

按照图纸要求组对定位焊接设备法兰与封

表1 焊材化学成份表

焊材	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	AL	Ti	其他
ERNi-1	0.15	1.0	1.0	0.03	0.015	0.75	0.25	≥ 93.0	1.5	2.0-3.5	0.50
ERNiCu-7	0.15	4.0	2.5	0.02	0.015	1.25	余	62.0-69.0	1.25	1.5-3.0	0.50
ENiCu-7	0.15	4.0	2.5	0.02	0.015	1.5	余	62.0-69.0	0.75	1.0	0.50

表2 堆焊焊接工艺参数

焊接方法	堆焊层数	焊材	规格 (mm)	电特性	电流(A)	电压(V)	消应力热处理
GTAW	过渡层	ERNi-1	$\Phi 2.0$	直流正接	150	12	过渡层620℃
	面层	ERNi-7	$\Phi 2.0$	直流正接	160	14	保温3.75h
SMAW	过渡层	ENiCu-7	$\Phi 4.0$	直流反接	145	24	过渡层620℃
	面层	ENiCu-7	$\Phi 4.0$	直流反接	145	24	保温3.75h

表3 熔覆金属化学成分分析

堆焊方法	取样至熔合线距离	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	AL	Ti	Nb
GTAW	2mm	0.013	3.77	0.29	0.0059	0.00035	0.068	28.43	64.33	0.18	2.05	0.057
	3mm	0.012	3.74	0.28	0.0059	0.00036	0.093	28.57	64.62	0.31	1.88	0.038
	4mm	0.013	3.74	0.30	0.0060	0.00037	0.0793	28.45	64.69	0.31	1.89	0.039
SMAW	2mm	0.0099	3.04	1.63	0.011	0.0089	1.34	27.08	66.04	0.02	0.53	/
	3mm	0.0093	3.05	1.58	0.011	0.0086	1.35	26.99	66.18	0.021	0.52	/
	4mm	0.010	3.05	1.91	0.010	0.0077	1.34	26.92	65.90	0.016	0.55	/

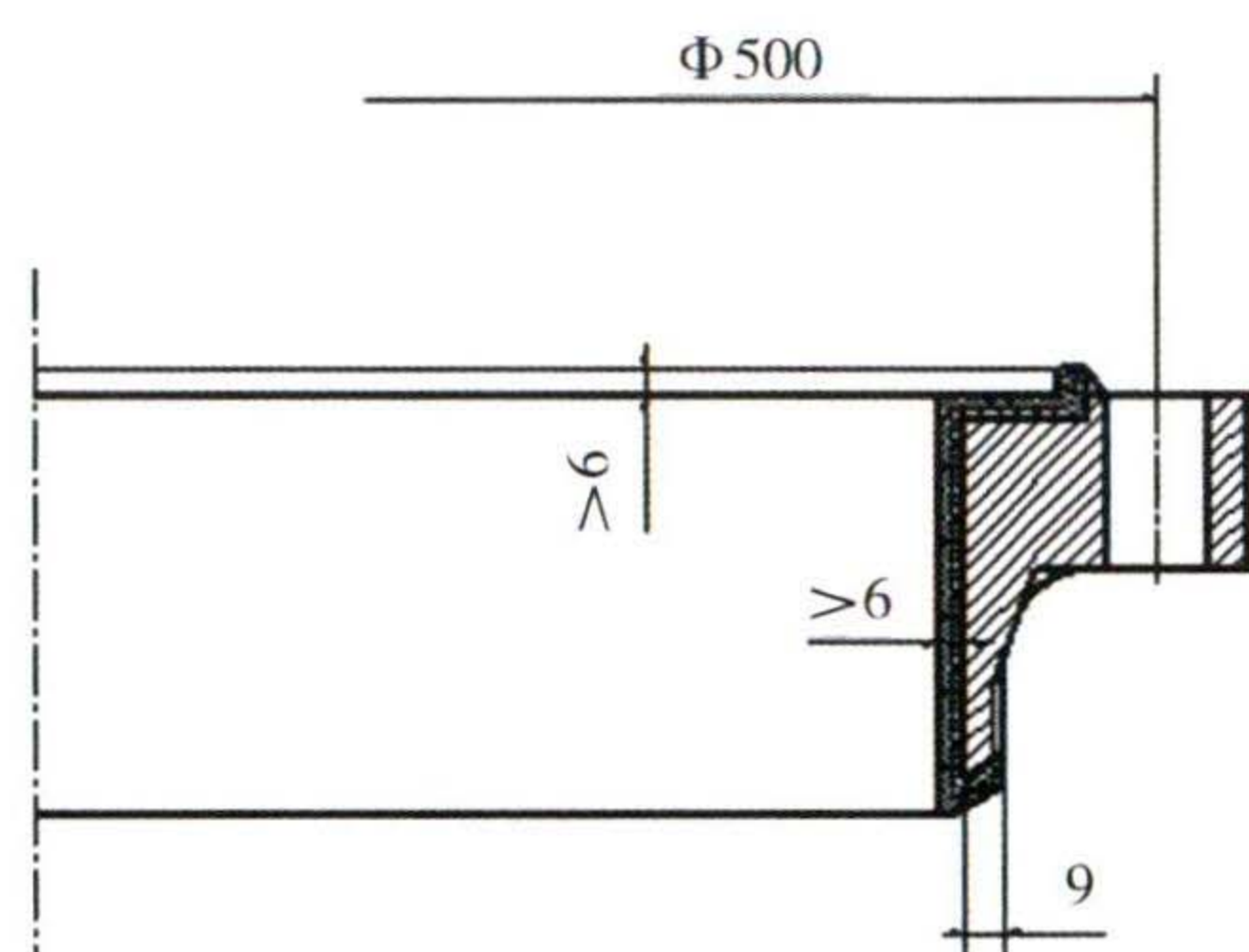


图2 设备法兰结构简图

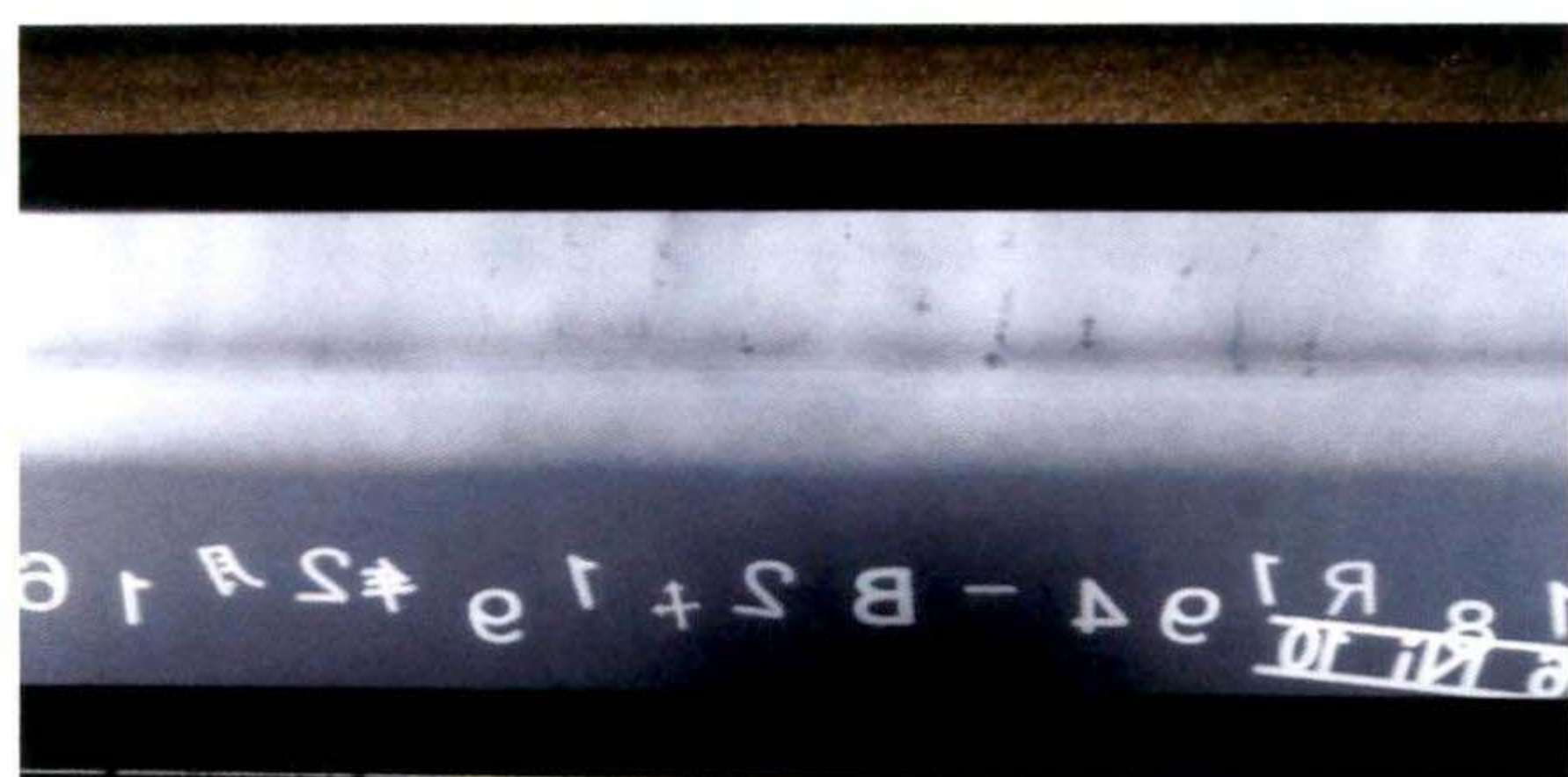


图3 设备法兰与封头环缝射线底片

头环缝，焊缝表面成型良好。于是对焊缝按NB/T47013.2—2015进行射线检测，射线检测发现，在法兰侧有密集裂纹，如图3设备法兰与封头环缝射线底片所示：

针对此种情况，将设备法兰与封头焊缝打开，从法兰内侧逐层车掉堆焊层熔覆金属，经排查发现法兰内侧均是纵向裂纹，车加工后的法兰侧面车加工后着色裂纹如图4所示，法兰颈部对接部位打磨后着色裂纹如图5所示。经研究分析，初步判定此裂纹是因密集氢气孔引起的裂纹，原因有以下几个方面：1) 焊接材料中的含氢量；2) 焊接表面的清洁度不够；3) 焊接环境洁净度不够；4) 堆焊熔覆金属的稀释率等。

根据上述原因，制定堆焊措施，采用两种方法对照试验，第一种仍然用焊条电弧焊堆焊，过渡层采用ENi-1焊条，面层堆焊材料不变。第二种采用手工氩弧焊堆焊，过渡层焊丝：



图4 车去堆焊层的法兰内侧



图5 堆焊法兰颈部对接端

ERNi-1，面层焊丝：ERNiCu-7，所用焊接电流：130A-150A，电压12V-16V，保护气体选用99.999%的液氩。并更换了焊接场地，要求对焊接材料严格烘干，对焊件进行严格清理。法兰在堆焊之前对法兰进行了100℃左右的预热，面层焊接没有预热。焊后分别对过渡层和面层进行了100%的着色检查，表面检测合格。

重新组对设备法兰与封头环缝，对接焊缝采用氩弧焊打底，焊条电弧焊填充的方法，为确保焊缝质量，在设备法兰与封头环缝打底焊后，对焊缝进行100%着色检测，满足要求。但在填充完第一层时，两条环缝的整圈均出现了不同程度的气孔，相比较，氩弧焊堆焊的气孔略少一些。经研究分析，原因有以下几个方面：1) 气孔的原因仍然是氢气孔导致的；2) 焊条电弧焊气孔略多主要还是因为焊条的原因；3) 不管是焊条还是焊丝，都不同程度的出现了气孔。于是考虑给工件加热，但考虑到NCu30属于有

色金属，在修磨完气孔后，对设备法兰颈部进行了轻微的预热，实时监测温度，其中一条环缝用焊条电弧焊填充，一条环缝用手工氩弧焊填充，焊接过程中，层间温度持续在50°C-100°C之间，两条焊缝焊接后，按NB/T47013.2-2015进行100%RT检测，II级合格，并对焊缝表面按NB/T 47013.5—2015进行100%PT检测。

3 结论

NCu30焊接时，由于铜热导率、线膨胀系数较大等原因，铜的冷却速度较快，致使熔池的氢不能及时溢出来从而产生气孔，严重者产生裂纹，故在焊接前适当的预热可有效的预防气孔的产生，经过多次的实践，焊前预热温度约60°C；有色金属的焊接层间温度不能过高，故层间温度保持在60°C-100°C之间，焊接采用小的线能量；对保护气体的要求较高，对焊接环境的洁净度也

有很高的要求。

参考文献

- [1] 王娟等.实用焊接技术丛书.表面堆焊与热喷涂技术.北京:化学工业出版社, 2004.
- [2] 陈茂爱, 陈俊华, 高进强.实用焊接技术丛书.复合材料的焊接.北京:化学工业出版社, 2005.
- [3] 李亚江, 王娟, 刘鹏.实用焊接技术丛书.异种难焊材料的焊接及应用.北京:化学工业出版社, 2004.
- [4] 中华人民共和国行业标准.JB/T4756-2006.镍及镍合金制压力容器.中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2006
- [5] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.JB/T4756-2006.镍及镍合金制压力容器标准释义.新华出版社, 2006.
- [6] 中华人民共和国行业标准 承压设备焊接工艺评定[M], 国家能源局发布, 2011.
- [7] 中华人民共和国行业标准 压力容器焊接规程[M], 国家能源局发布, 2011.

(上接第10页)

少计算工作量提高计算效率。

4.4 五步弹性屈曲分析法与ASME之前版本中的弹性预应力屈曲分析法在理论原理和评定准则的本质上是完全相同的。不同点是：以屈曲当量薄膜应力为评定量，评定准则以0.55Sy为分界线，给予了不同的确定许用屈曲当量薄膜应力的计算方法。

4.5 当临界屈曲当量薄膜应力 $>0.55S_y$ 后，ASME老版本方法的计算和评定结果是不可靠或不安全的，应按新版本中的五步弹性屈曲分析法得到更为安全可靠的防止屈曲垮塌失效的评定。

4.6 五步弹性屈曲分析法需要提取临界屈曲位置中面处的屈曲当量薄膜应力，鉴于目前有限元软件的处理能力，采用实体单元建模和计算无法准确提取中面处的应力，而采用壳单元则可较为准确的得到中面处的应力。实际工程设计中，建议根据具体模型灵活选取实体或壳单元建模方式，可采用保守的方法提取中面处的应力。

参考文献：

- [1] 李金科,张贤福,刘韞砚.外压圆筒的计算及数值计算

稳定性分析[J].压力容器, 2011, 28(7):35-39.

- [2] 段成红,吴港本,罗翔鹏.基于ANSYS Workbench稳定性分析的大型真空容器优化设计[J].机械设计, 2024, 41(5):29-33.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code—Section VIII: Division 2: Alternative Rules: ASME VIII-2—2007-2021[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [4] 左安达,韩志威,石乾宇,李翔.基于弹性和弹塑性预应力的结构屈曲对比分析[J].石油化工设计, 2025, 54(4):7-10.
- [5] 厉晓英,闫龙龙.基于ASME VIII-2篇的外压圆筒屈曲分析[J].医药工程设计, 2020, 041(005):56-59.
- [6] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.GB/T 4732—2024,压力容器分析设计[S].北京:中国质量标准出版传媒有限公司, 2024.
- [7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code—Section VIII: Division 2: Alternative Rules: ASME VIII-2—2023 [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [8] 陆明万,沈釜,刘应华.压力容器分析设计理论和释义[M].北京:清华大学出版社, 2024.
- [9] 左安达,刘杰.天方地圆截面特殊压力容器的结构设计与应力分析[J].中国特种设备安全, 2020, 36(9):15-21, 27.