

# 含硫化氢管道A105与20异种钢TIG焊接工艺及性能研究

许辉<sup>1</sup> 赵军<sup>1</sup> 王修张<sup>1</sup> 鲁友财<sup>1</sup> 袁永惠<sup>1</sup> 赵太源<sup>2</sup> 马俊文<sup>2</sup> 王体刚<sup>2</sup> 李亚军<sup>2</sup>

(1.中国石油工程建设有限公司土库曼斯坦分公司 土库曼斯坦 巴格德雷合同区)

(2.中国石油集团济柴动力有限公司成都压缩机分公司 四川 成都 610100)

**[摘要]** 含硫化氢管道的安全运行问题，一直是人们关注的焦点。本文以Φ60×6mm的A105和20异种钢为例，采用TIG进行焊接工艺试验、探伤试验、拉伸试验、冲击试验、弯曲试验、硬度试验、抗氢致开裂试验、抗硫化物应力开裂试验，研究了A105和20异种钢焊接接头的工艺、力学性能和抗腐蚀性能。试验结果表明：A105和20异种钢焊接接头具有良好的工艺性能，X射线探伤不低于II级，在635℃保温2h后，抗拉强度分别为461MPa和470MPa，-20℃冲击功不低于16.5J，面弯和背弯试样弯曲拉伸面焊缝、熔合区和热影响区没有裂纹，硬度小于250HV10，抗氢致开裂和硫化物应力开裂试验合格，符合NB/T 47014—2023及技术协议要求。

**[关键词]** 硫化氢；异种钢；TIG；焊接工艺

随着全球经济和社会的快速发展，人们对天然气的消耗量不断增加，已开始开采含硫化氢的气田。天然气的输送通常采用压力管道完成的，在完成施工后可以长期稳定的使用。但是硫化氢遇水或水蒸气易形成硫酸，对管道有很强的腐蚀作用<sup>[1]</sup>。同时硫化氢是一种无色，有毒性的气体，一旦泄露，将会对人们的身体造成伤害，环境造成污染，带来巨大损失<sup>[2,3]</sup>。因此含硫化氢管道的安全运行问题，一直是人们关注的焦点。

笔者所在公司承制了某国外压缩机机组管道的制造，工况介质天然气且含有少量硫化氢，采用的管道材料是ASTM A105法兰锻件和20钢管。本文以Φ60×6mm规格为例，采用TIG进行焊接工艺试验、探伤试验、拉伸试验、冲击试验、弯曲试验、硬度试验、抗氢致开裂试验、抗硫化物应力开裂试验，研究了ASTM A105和20异种钢焊接接头的工艺、力学性能和腐蚀性能，为含硫化氢管道异种钢焊接提供一定的参考依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验母材是在ASTM A105的锻件上加工规格Φ60×6mm，长度150mm的接管5件；20钢管规格也为Φ60×6mm，长度150mm的短管5件。试验焊材为规格2.5mm的ER50-G型氩弧焊丝。试验为A105的接管与20钢短管对接，对接坡口为V形，角度为60°，组对间隙为3.4mm，钝边为0.9mm，坡口形状截面如图1所示。母材和焊材化学成分和力学性能如表1所示。

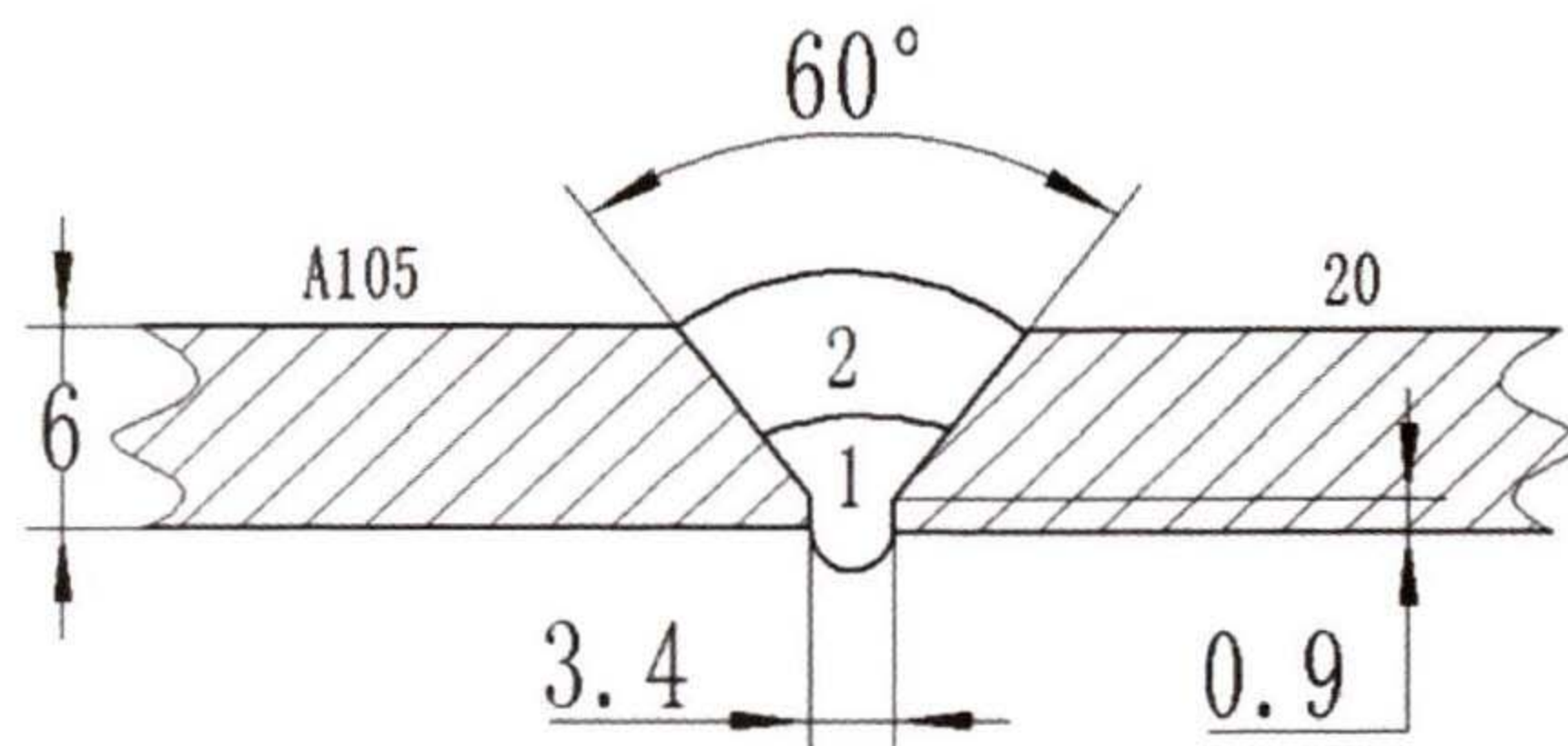


图1 对接坡口截面形状

表1 母材和焊材化学成分(质量分数，%)和力学性能

| 材料   | C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo    | V     | Cu   | Rm/MPa | Rel/MPa | A/%  | KV2/J |
|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|--------|---------|------|-------|
| A105 | 0.18 | 0.84 | 0.25 | 0.008 | 0.005 | 0.05 | 0.01 | 0.001 | 0.002 | 0.01 | 530    | 360     | 36.0 | /     |

**作者简介：**许辉，男，主要从事油气田地面工程设计、施工及运营。基金项目：中油济柴成都压缩机分公司生产项目(2401)；中油济柴成都压缩机分公司科研项目(FG61023K4)。

|        |       |      |      |       |       |      |      |       |       |      |     |     |      |           |
|--------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-----|-----|------|-----------|
| 20     | 0.21  | 0.57 | 0.25 | 0.015 | 0.008 | 0.10 | 0.04 | 0.030 | 0.030 | 0.04 | 452 | 309 | 30.0 | ≥18(-20℃) |
| ER50-G | 0.080 | 1.30 | 0.51 | 0.006 | 0.003 | 0.07 | 0.07 | 0.003 | 0.002 | 0.03 | 519 | 413 | 31.5 | ≥54(-30℃) |

1.2 试验方法

焊接设备为WS-500HD型直流脉冲氩弧焊机，TIG焊保护气体为氩气，纯度为99.99%。试件焊接位置为5G，焊接工艺参数如表2所示。

表2 TIG焊接工艺参数

| 焊接层次 | 焊接方式 | 焊丝规格 Φ / mm | 电流极性 | 焊接电流 I / A | 焊接电压 U / V | 焊接速度 V / (cm · min <sup>-1</sup> ) | 道间温度 T / °C |
|------|------|-------------|------|------------|------------|------------------------------------|-------------|
| 1    | TIG  | 2.5         | DCEN | 145        | 11~16      | 6~9                                | —           |
| 2    | TIG  | 2.5         | DCEN | 165        | 11~16      | 6~9                                | ≤180        |

2 焊后外观检查 and 无损检测

2.1 焊缝外观检查

A105和20异种钢焊接完后按照NB/T 47014—2023《承压设备焊接工艺评定》进行外观检查，焊缝成形美观，没有出现裂纹、未焊透、未熔合、气孔、咬边等缺陷。焊缝余高最高处为1.1mm，符合GB/T 20801.5—2020《压力管道规范工业管道第5部分：检验和试验》中规定不大于1.5mm的要求。

2.2 无损检测

A105和20异种钢焊接后按照NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》进行100%RT探伤检测，技术等级为AB级。每个焊接试件拍照3张，总共15张，结果为14张 I 级1张II级，符合GB/T 20801.5—2020规定不低于II级的要求。

3 焊后热处理

由于管道含硫化氢因此焊后需要进行热处

理。依据GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》和SY/T 0599—2018《天然气地面设施抗硫化物应力开裂和应力腐蚀开裂金属材料技术规范》，再结合实际情况，制定了焊后热处理工艺参数。热处理工艺参数：试件进炉300℃以下，当温度升温到300℃时，以不大于150℃/h升温，升到635±10℃后保温2 h，然后以不大于150℃/h冷却到300℃后取出，空冷至室温。

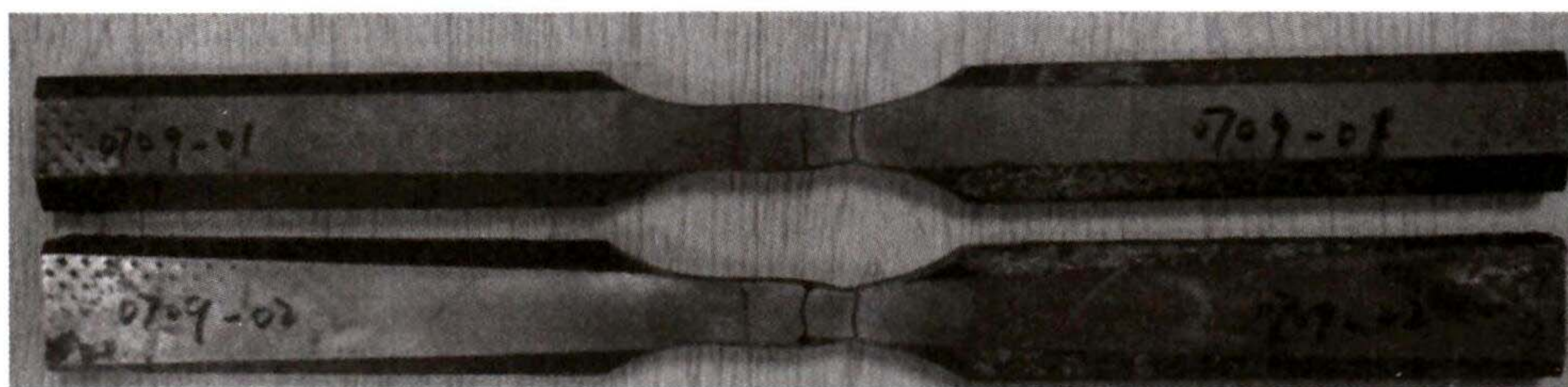
4 试验结果与分析

4.1 拉伸试验

依据NB/T 47014—2023对A105和20异种钢焊接接头截取2个横向拉伸试样，按照GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分 室温试验方法》，试验结果如表3所示。拉伸试样断裂宏观形貌如图2所示，从图2中可以看出，断裂位置位于20钢母材处，说明焊缝的抗拉强度高于20钢母材。从表3中可以看出，焊接接头的抗拉强度符合NB/T 47014—2023规定要求。

表3 拉伸试验结果

| 试样编号    | 试样宽度D/mm | 试样厚度 δ /mm | 断裂载荷F/kN | 抗拉强度Rm/MPa | 屈服强度ReL/MPa | 断裂位置  |
|---------|----------|------------|----------|------------|-------------|-------|
| 0709-01 | 11.87    | 4.81       | 26.30    | 461        | 300         | 20钢母材 |
| 0709-02 | 11.94    | 4.81       | 26.99    | 470        | 308         | 20钢母材 |



(a) A105

(b) 20钢

图2 拉伸试样断裂宏观形貌

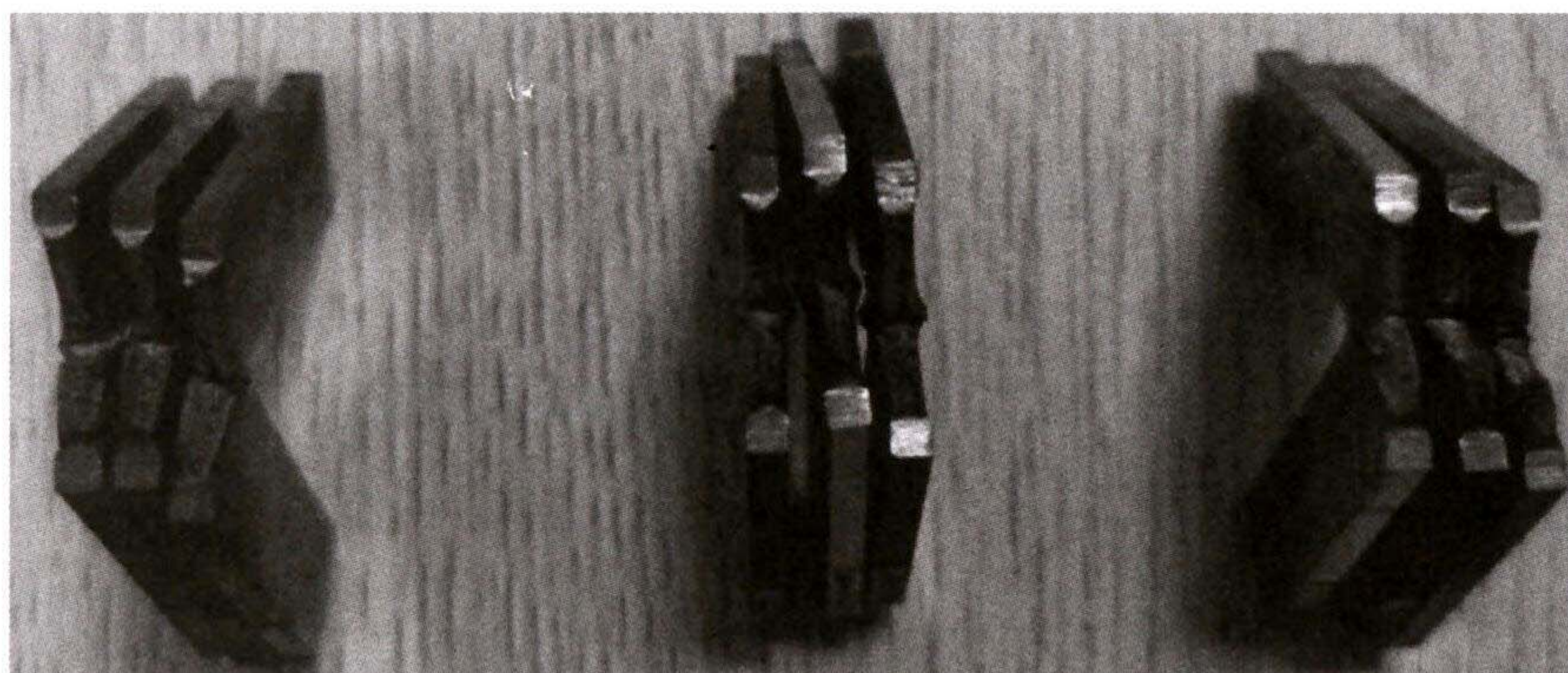
### 4.2 冲击试验

在A105和20异种钢焊接接头截取9个冲击试样，冲击试样尺寸为 $2.5\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ ，开V型缺口，坡口角度为 $45^\circ$ ，深度为 $2.00 \pm 0.05\text{mm}$ ，其中3个位于A105钢热影响区，3个缺口位于焊缝，3个位于20钢热影响区。按照GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》，检测结果如表4所示。A105和20异种钢焊接冲击吸收能量一般要求焊缝金属的冲击韧性应不低于塑性较差一侧母材的性能，本次试验冲击吸

收能量要求 $\geq 5\text{J}$ 。从表4中可以看出， $-20^\circ\text{C}$ 焊缝和热影响区冲击吸收能量富余量较大，满足规定要求。图3为冲击试样断裂宏观形貌，可以看出为韧性断裂。

表4 冲击试验结果

| 试验温度 $T/^\circ\text{C}$ | 试样缺口位置   | 冲击吸收能量KV2/J |
|-------------------------|----------|-------------|
| -20                     | A105热影响区 | 24.5/25/26  |
| -20                     | 焊缝       | 25/26/29    |
| -20                     | 20热影响区   | 23/26/16.5  |



(a) A105热影响区 (b) 焊缝 (c) 20热影响区

图3 冲击试样断裂宏观形貌

### 4.3 弯曲试验

依据NB/T 47014—2023对A105和20异种钢焊接接头截取2个面弯试样和2个背弯试样，按照GB/

T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》，检测结果如表5所示，从表5中看出，在弯曲拉伸面上的焊缝、熔合区和热影响区没有出现裂纹，符合NB/T 47014—2023规定要求。

表5 面弯和背弯试验结果

| 试样编号 | 试样类型 | 试样厚度/mm | 压头直径 $d/\text{mm}$ | 弯曲角度 $\alpha/^\circ$ | 试验结果 |
|------|------|---------|--------------------|----------------------|------|
| MW-1 | 面弯   | 6       | 24                 | 180                  | 无裂纹  |
| MW-2 | 面弯   | 6       | 24                 | 180                  | 无裂纹  |
| BW-1 | 背弯   | 6       | 24                 | 180                  | 无裂纹  |
| BW-2 | 背弯   | 6       | 24                 | 180                  | 无裂纹  |

### 4.4 硬度试验

按照GB/T4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第1部分:试验方法》，A105和20异种钢焊接接头硬度试验在NEMESIS9104万能硬度试验机上进行，焊接接头试样的焊缝、热影响区、母材测量位置点如图4所示，测量结果如表6所示。从表6中可以看出，硬度最高值188HV10出现在A105热影响区，且焊缝、热影响区、母材均小于250HV10，符合SY/T 0599—2018规定要求。

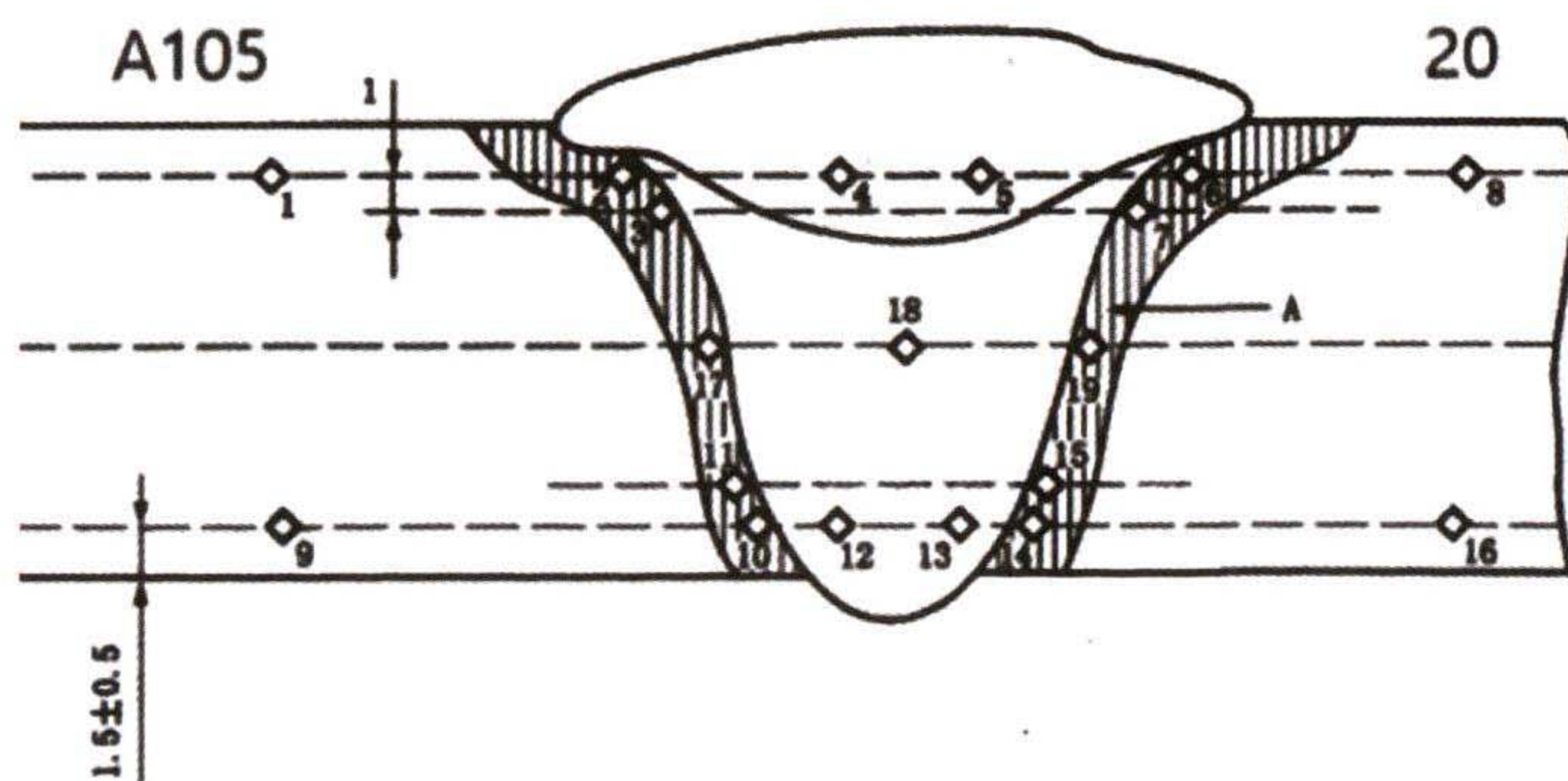


图4 硬度测量点位置

表6 硬度HV10试验结果

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  |
| 154 | 163 | 184 | 184 | 185 | 173 | 164 | 130 | 148 | 166 | 188 | 172 | 174 | 150 | 152 | 131 | 180 | 182 | 159 |

4.5 抗腐蚀性能

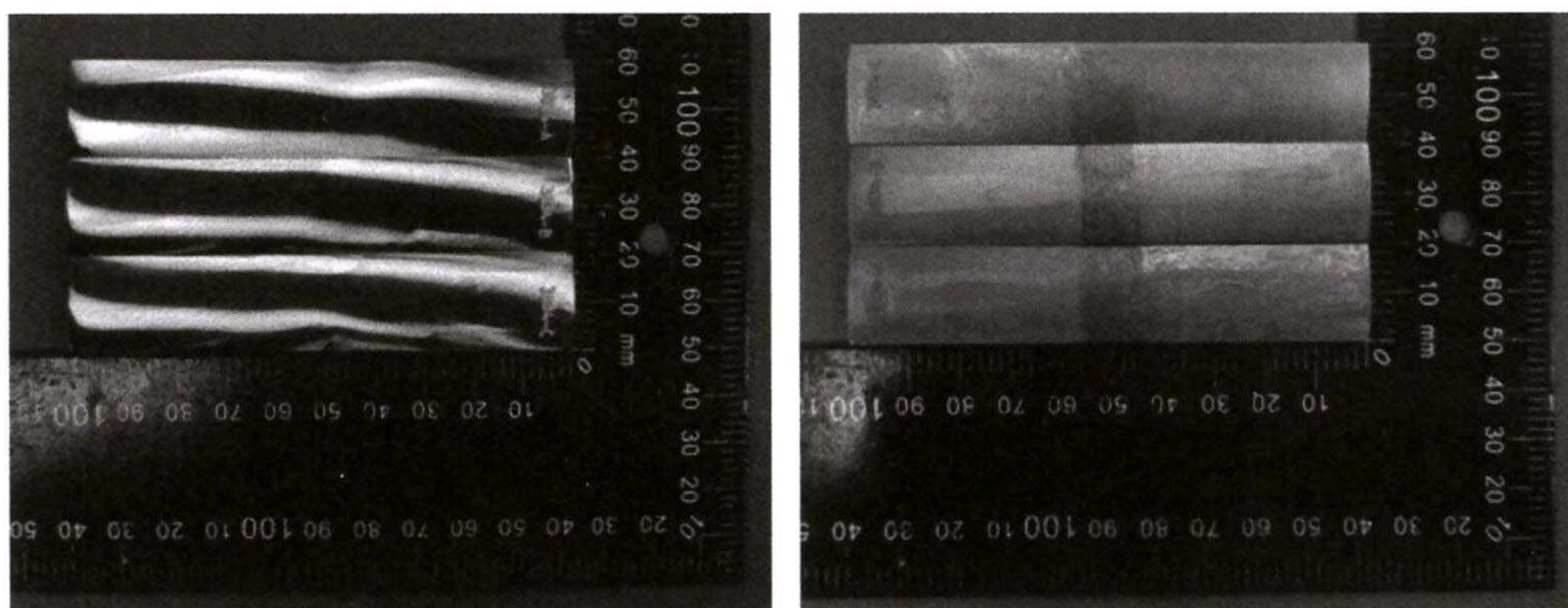
(1)抗氢致开裂试验

A105和20异种钢焊接接头抗氢致开裂试验按照NACE TM 0284—2016《Evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking》进行，制取试样3件，试样形貌图如图5所示。在标准溶液[5%(wt)NaCl+0.5%(wt)CH<sub>3</sub>COOH]中浸泡96h，试验结果如表7所示。从表7中可以看出，裂纹长度率(CLR)、裂纹厚度率(CTR)、裂纹敏感率(CSR)均为0，符合ISO 15156.2—2020《Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Materials for use in H<sub>2</sub>S

-containing environments in oil and gas production Part 2 Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons》中规定每个试样三个截面平均值CLR(%)≤15，CTR(%)≤5，CSR(%)≤2的规定要求。

表7 抗氢致开裂试验结果

| 试样编号  | CLR (%) | CTR (%) | CSR (%) |
|-------|---------|---------|---------|
| HIC-1 | 0       | 0       | 0       |
| HIC-2 | 0       | 0       | 0       |
| HIC-3 | 0       | 0       | 0       |



(a) 试验前 (b) 试验后

图5 抗氢致开裂试样宏观形貌

(2)抗硫化物应力开裂试验

A105和20异种钢焊接接头抗硫化物应力开裂试验按照NACE TM 0177—2016《Laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H<sub>2</sub>S environments》进行，采用四点弯曲法，加载应力为246.4MPa，经720h受拉伸面未发生应力腐蚀开裂，腐蚀后的试样形貌如下图6所示。结果表明，A105和20异种钢焊接接头抗硫化氢应力腐蚀性能良好。

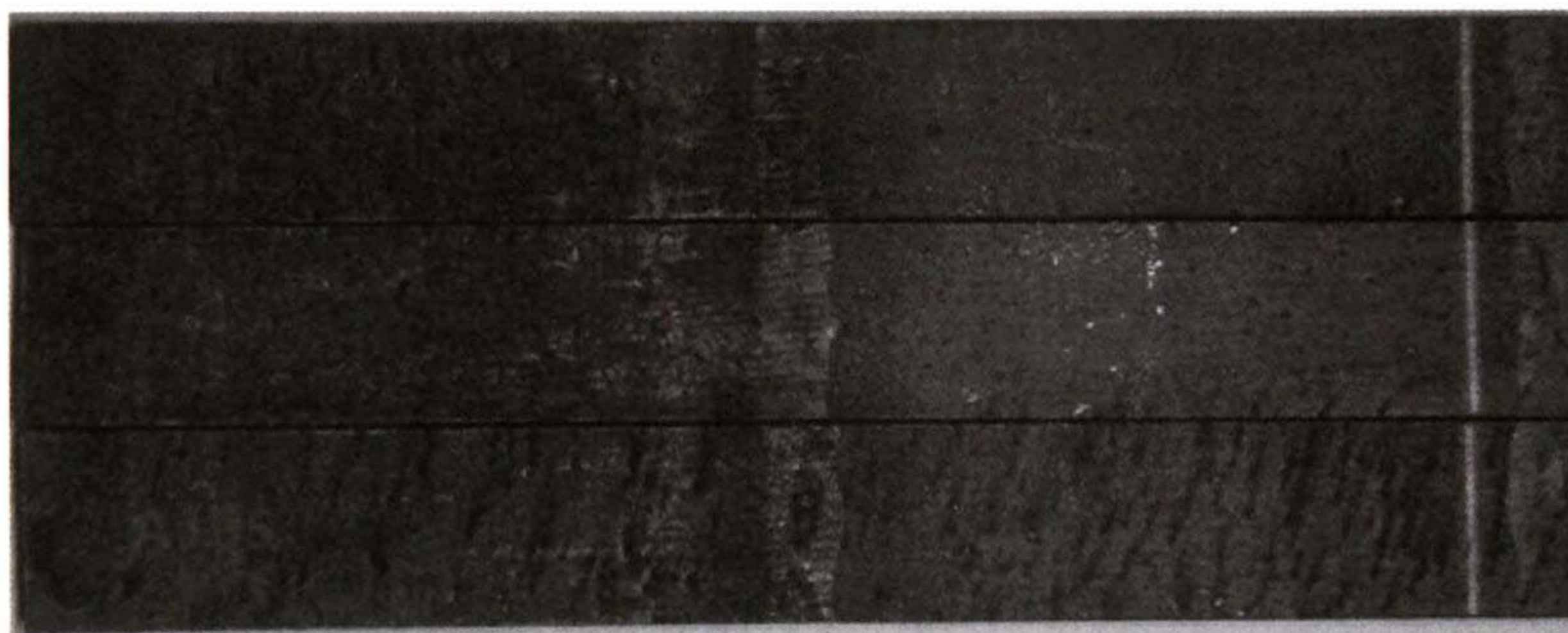


图6 抗硫化物应力开裂腐蚀试验后试样形貌

合、气孔、咬边等缺陷，焊缝余高1.1mm；射线检测结果14张I级，1张II级，符合GB/T 20801.5—2020规定要求。

5 结论

(1)规格Φ60×6mm的A105和20异种钢焊接接头焊缝成形美观，没有出现裂纹、未焊透、未熔

(下转29页)

相关系数热力分布图可以通过颜色与数值对多个变量相关性进行展示,图中颜色为蓝色表示其正相关,颜色越深且数字越接近1表示相关系数越高;颜色为红色表示其负相关,颜色越深且数字越接近-1表示相关系数越高<sup>[8]</sup>。图中左下角框图横坐标为四影响因素,纵坐标为各项指标。由图可知,与伴生气合格指标渗透侧、截留侧CO<sub>2</sub>浓度相关性最大的影响因素分别为:原料气CO<sub>2</sub>浓度和膜面积。即在进行伴生气膜分离过程中可重点关注上述二因素。

## 5 结论

(1) 基于ASPEN HYSYS自带的ACM(Aspen Custom Modeler)建立了膜分离的数学模型;

(2) 根据不同实际需求,膜分离工艺分为一级膜、基于不同膜组合和回流的二级膜和基于不同膜组合及回流的三级膜;

(3) 对影响膜分离效果的各项因素进行分析,得到了随着原料气CO<sub>2</sub>浓度及流量、操作压力、膜面积、三因素变化,评价膜分离效果各项指标的变化趋势。同时对其相关性进行分析,得到了能够显著影响伴生气合格指标的两个关键影响因素。

## ◆参考文献

- [1] 曹映玉,杨恩翠,王文举.二氧化碳膜分离技术[J].精细石油化工,2015,32(1):8.DOI:10.3969/j.issn.1003-9384.2015.01.013.
- [2] 银登国,周志斌,魏静,等.基于膜分离的沼气及烟气CO<sub>2</sub>捕集技术应用进展[J/OL].能源环境保护:1-9[2024-04-18].https://doi.org/10.20078/j.eep.20240124.
- [3] Shariff,A,M,et al.Modeling, simulation and economic analysis of CO<sub>2</sub> capture from natural gas using cocurrent, countercurrent and radial crossflow hollow fiber membrane[J].International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015.DOI:10.1016/j.ijggc.2015.02.014.
- [4] Rezakazemi M , Heydari I , Zhang Z .Hybrid systems: Combining membrane and absorption technologies leads to more efficient acid gases (CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S) removal from natural gas[J].Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2017, 18(Complete):362-369. DOI:10.1016/j.jcou.2017.02.006.
- [5] 王鹏宇.气体膜分离过程HYSYS模拟系统的研究[D].大连理工大学,2006.DOI:10.7666/d.y825210.
- [6] Hoorfar M , Alcheikhhamdon Y , Chen B .A novel tool for the modeling, simulation and costing of membrane based gas separation processes using Aspen HYSYS: Optimization of the CO<sub>2</sub> /CH<sub>4</sub> separation process[J].Computers & Chemical Engineering, 2018, 117(SEP.2):11-24.DOI:10.1016/j.compchemeng.2018.05.013.
- [7] 许家友.CO<sub>2</sub>膜分离过程的模拟及优化[D].天津大学,2019. DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.000212.
- [8] 叶霖.基于神经网络的输油管道工艺计算及运行方案优化[D].东北石油大学,2022.DOI:10.26995/d.cnki.gdqsc.2022.000033.

收稿日期: 2024-08-22 修回日期: 2024-11-25

(上接33页)

(2)焊接接头焊后热处理后,抗拉强度分别为461MPa和470MPa,断裂位置位于20钢母材处,-20℃焊缝和热影响区冲击吸收能量达到16.5J以上,面弯和背弯试样弯曲拉伸面上没有裂纹,焊缝、热影响区、母材硬度小于250HV10,符合NB/T 47014—2023及技术协议要求。

(3)A105和20异种钢焊接接头裂纹长度率、裂纹厚度率、裂纹敏感率均为0,说明焊接接头抗氢致开裂性能好;焊接接头在加载力246.4MPa下经720h受拉伸面未发生应力腐蚀开裂,说明焊接接头抗硫化氢应力开裂腐蚀性能良好。

## ◆参考文献

- [1]汪洋,曾云帆,刘永良,等.硫化氢环境下老旧管道失效概率评价方法研究[J].钻采工艺,2024,47(1): 115-120.
- [2]雷仁超.海上油田硫化氢的危害与防护浅析[J].石油和化工设备,2024,27(3): 161-163.
- [3]解宇航,张继红,杨二龙,等.某油区高浓度硫化氢达标治理研究和应用[J].内蒙古石油化工,2024(2): 15-18.

收稿日期: 2024-08-26 修回日期: 2024-11-25