



SA-106B 无缝钢管热弯开裂原因分析与工艺改进

李 勇^{1,2}, 倪燕红^{1,2}, 刘光辉^{1,2}, 朱志宝^{1,2}, 张银桥^{1,2}, 安 涛¹

(1 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001)

摘 要: SA-106B 无缝钢管经过感应加热后, 热弯制时出现裂纹, 对 SA-106B 无缝钢管的理化性能和全截面的硬度均匀性进行分析, 并采用光学显微镜对开裂样品进行检验, 配合能谱分析, 确认热弯开裂原因为钢管在生产过程中, 钢管表面与 Cu 质配件接触, 造成 Cu 黏附在钢管表面, 感应加热时, 形成了熔融的富 Cu 相, 富 Cu 相侵蚀钢管表面的晶界, 并沿晶界向内扩散, 在受到拉应力作用时, 造成了“铜脆”开裂。经全面排查, 提出了将矫直机出口导筒材质由“黄铜”更换为尼龙板的改进措施, 可以有效避免“铜脆”开裂。通过分析表明, 对于需要进行热弯加工的钢管, 生产过程中不能使用铜质配件及类似的低熔点金属材料配件, 避免出现“铜脆”开裂及低熔点金属材料污染导致的开裂; 同时, 在转移及装卸和存储过程中, 也应注意避免接触铜质配件及类似的低熔点金属。

关键词: SA-106B; 钢管; 热弯; 铜脆; 晶界开裂; 富 Cu 相

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00234 **中图分类号:** TG335. 71

Analysis and Process Improvement of Hot Bending Cracking of SA-106B Seamless Steel Pipe

Li Yong^{1,2}, Ni Yanhong^{1,2}, Liu Guanghui^{1,2}, Zhu Zhibao^{1,2}, Zhang Yinqiao^{1,2}, An Tao¹

(1 Daye Special steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2 Hubei province Key Laboratory for High Quality Special Steel, Huangshi 435001, China)

Abstract: After induction heating, the SA-106B seamless steel pipe has cracks during hot bending process, the physical and chemical properties of the SA-106B seamless steel pipe and the hardness uniformity of the full cross-section were analyzed, and the cracking samples were tested by optical microscope. Combined with energy spectrum analysis, the hot bending cracking was confirmed to be caused by the contact between the surface of the steel pipe and the Cu parts during the production process. Caused by Cu adhesion to the surface of the steel pipe, the formation of a molten Cu-rich phase during induction heating, the rich Cu-rich phase erosion of the steel pipe surface of the grain boundary, and along the grain boundary to spread inward, resulting in "copper brittle" cracking under tensile stress. After a comprehensive investigation, the improvement measures are proposed to replace the material of the outlet guide barrel of the straightener from "brass" to nylon sheet, which can effectively avoid "copper brittle" cracking. The analysis shows that copper fittings and similar low melting point metal fittings cannot be used in the production process of steel pipes that need to be hot bent, so as to avoid cracking caused by "copper brittleness" and cracking caused by pollution of low melting point metal materials. At the same time, during the transfer, loading, unloading and storage process, care should also be taken to avoid contact with copper fittings and similar low-melting metals.

Key Words: SA-106B; Steel Pipe; Hot Bending; Copper Brittle; Grain Boundary Cracking; Cu-rich Phase

无缝钢管作为现代工业的基础材料之一, 不仅在建筑、交通、机械制造等领域有着广泛的应用, 更在能源、化工等关键行业中发挥着不可替代的作用^[1]。SA-106B 无缝钢管因具有高强度、良好的韧性和耐腐蚀性等特点, 在锅炉、石油、化工等行业中得到广泛应用。特别是在锅炉制造和石油化工领域, SA-106B 无缝钢管被大量用于制造水冷壁、过热器、预热器、热交换器和管道等部件, 使用压力通常为 6~14 MPa, 属于压力容器用材料, 这些管件在保障设备运行的安全性和稳定性方面起着至关重

要的作用^[2]。

在锅炉管道配件的制造过程中, 弯管的成型工艺是一个关键环节。根据管件尺寸和材质的不同, 弯管的成型方式也有所差异。常见的弯管成型工艺分为两种, 一种是冷加工成型, 之后再行回火热处理, 这种冷成型工艺一般适用于小口径弯管的加工; 另一种是加热弯制成型, 这种工艺是加热与成型同时进行, 成型后再行回火热处理。通常情况, 感应加热温度在 950 °C 左右, 之后在空气中冷却, 这种成型工艺一般适用于大口径弯管的加工^[2]。

SA-106B属于珠光体钢,钢中较高的C、Mn含量在一定程度上能够提高其强度和耐磨性,但同时也会造成其过热敏感性增加,导致塑、韧性下降,冷加工成型易开裂^[3]。而热弯成型工艺是通过感应炉对钢管进行局部加热,钢管局部温度达到950℃左右时具有较好的塑性,然后进行弯制加工^[4],成型后,再进行回火热处理,以进一步消除残余应力,提高管件的综合性能,在保证管件质量的同时,能提高生产效率,降低生产成本。因此,SA-106B无缝钢管更适合采用热弯成型工艺。

钢管厂在使用 $\phi 219.1 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的SA-106B无缝钢管造锅炉管道配件,热弯成型过程中,部分配件出现了开裂问题。当钢管加热至900~950℃,进行弯曲时,弯管后部分工件存在裂纹。试验采用了多种分析手段进行深入研究,同时,对生产流程的相关要求进行了优化调整,解决了SA-106B热弯开裂的问题。

1 试验材料及方法

试验材料采用钢管厂生产的SA-106B钢管,规格为 $\phi 219.1 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,其生产工艺流程为:120 t转炉→LF精炼→RH真空脱气→连铸 $\phi 230 \text{ mm}$ 圆管坯→加热→穿孔→轧管→定减径→正火→校直→探伤→检查、包装、标识→入库。试验钢管经过900~950℃感应加热弯制成型,热弯制后出现裂纹。在开裂处沿壁厚截面剖开,切取试样,利用ARL 4460直读光谱仪,进行化学成分分析,分析结果见表1,开裂钢管的化学成分符合ASME SA-106标准和协议标准要求。

对材料的理化性能和全截面的硬度均匀性进行分析,对同批次尚未加工的弯管,进行了布氏硬度、抗拉强度、屈服强度、压扁试验,组织、晶粒度、非金属夹杂物测试,并在弯管开裂处取样,首先检查裂纹外观形貌,并用布氏硬度计检查硬度均匀性,Axiovert 200MAT光学显微镜测量裂纹深度,再用4%硝酸酒精溶液腐蚀4~5 s,观察裂纹附近的组织情况,并借助INCA能谱仪(EDS)进行能谱分析。

2 试验结果

2.1 力学性能

对客户尚未弯制加工的同批次SA-106B钢管进行了布氏硬度、抗拉强度、屈服强度测试,同时验证了压扁试验,检测了组织、晶粒度、非金属夹杂物;测试时沿钢管轴线方向,在距离钢管端部1、3、5、7 m处分别取样,硬度检验沿钢管表面,进行360°表面硬度检测,如图1所示。

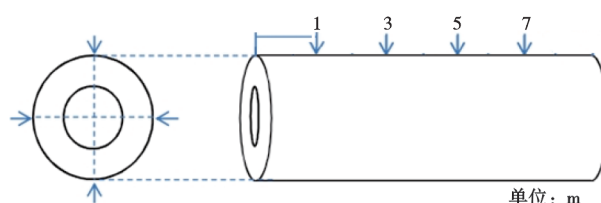


图1 SA-106B钢管取样示意图

Fig. 1 Sampling schematic diagram of SA-106B steel pipe

结果表明,在360°全长范围内的布氏硬度均匀,抗拉强度、屈服强度均满足标准要求,测试结果数值均在合理区间,试验结果如图2所示。未加工的钢管,1、3、5、7 m处的压扁试验均合格,钢管在冷态压至闭合后未发现裂纹、分层等缺陷,且与出厂检验结果一致,说明材料的冷塑性良好。

2.2 金相检验

按照GB/T 13298—2015标准检验,组织为F+P,全长组织均匀,如图3所示。按照GB/T 6394—2017标准检验,晶粒度为8.0~7.0级;按照GB/T 10561—2023标准检验非金属夹杂物,A细、B细、D细、D粗评级为0.5级,A粗、B粗、C细、C粗为0级,DS评级为0.5级,质量正常。

2.3 其他辅助检测

该批次的SA-106B钢管出厂前经过了逐支全长超声波探伤,全部合格。检测标准为ASTM E213—14,对比验收级别为5%壁厚,实际超声波样管的尺寸 \times 宽 \times 深为25 mm \times 0.5 mm \times 1.0 mm,纵向、横向、斜向均检测合格,分层、测厚检测合格;在用户的弯管生产现场,再次超声波检测待弯制的该批次的SA-106B钢管,未发现缺陷。

表1 SA-106B试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of SA-106B test steel

项目	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
标准	≤ 0.25	0.29 ~ 1.35	≥ 0.10	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.40	≤ 0.15
试验钢	0.19	1.09	0.27	0.010	0.002	0.12	0.03	0.03	0.03

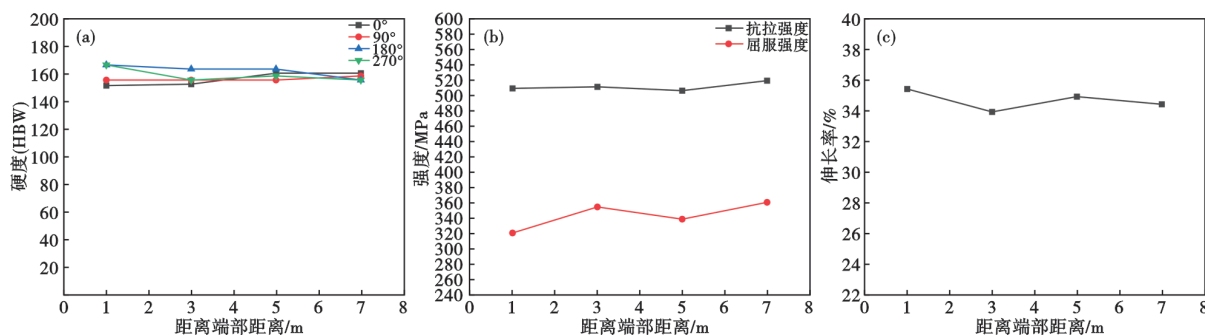


图2 未弯制加工的SA-106B钢管的力学性能:(a)表面硬度,(b)抗拉强度和屈服强度,(c)伸长率

Fig. 2 Mechanical properties of SA-106B steel pipe without bending : (a) surface hardness, (b) tensile strength and yield strength, (c) elongation

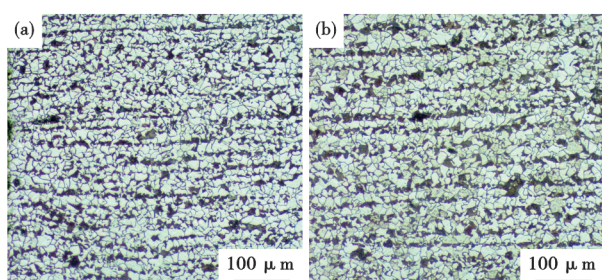


图3 SA-106B钢管的金相组织:(a)1 m处,(b)5 m处

Fig. 3 Metallographic structure of SA-106B steel pipe: (a) at 1 m, (b) at 5 m

2.4 裂纹宏观形貌

SA-106B钢试验钢管总长度约8m,其中热弯加工部位的距离端部长度约为2.7 m,开裂位置位于试验钢管热弯加工部位的外弧侧,外弧表面开裂处有多条横向细小裂纹,裂纹整体呈螺旋状分布,如图4(a)所示,裂纹附近有刮擦痕迹,且表面黏附有黄色斑点,如图4(b)所示。

2.5 裂纹微观形貌

将弯制开裂的SA-106B钢管沿纵向切割,取其中两处裂纹进行微观形貌分析,对试样进行编

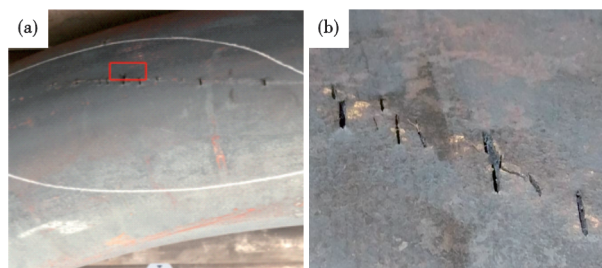


图4 SA-106B钢管弯管裂纹宏观形貌:(a)裂纹整体呈螺旋状分布,(b)裂纹处的刮擦痕迹和黄色斑点

Fig. 4 SA-106B steel pipe bending crack macroscopic appearance : (a) the overall crack distribution is helical, (b) scratch marks and yellow spots at the crack

号,分别编为1#、2#试样,在光学显微镜下进行高倍观察,其中,1#试样的裂纹深度为3.77 mm,2#试样的裂纹深度为1.94 mm,裂纹附近有细小的微裂纹,呈沿晶开裂特征。

2.6 裂纹钢管的金相组织

进一步对1#、2#试样分析,同时在远离热弯开裂部位,未加热处取样,编为3#试样,3个试样均用4%硝酸酒精溶液腐蚀4~5 s后,观察其组织情况,1#、2#试样裂纹处的组织均为铁素体+珠光体,3#试样的金相组织为铁素体+珠光体,如图5所示。根据文献^[5-6]可知,SA-106B钢正火状态下的显微组织为铁素体+珠光体,3#试样为正火态,1#、2#试验为900~950℃感应加热后弯制加工状态,两种状态下,试验的组织一致,均为铁素体+珠光体。

2.7 裂纹钢管的能谱分析

进一步对1#、2#试样裂纹附近进行扫描分析,发现1#、2#试样裂纹边缘均存在少量白色异物,未见非金属夹杂。对白色异物进行能谱分析,由分析结果可知,白色异物处存在Fe、Cu、Zn、O等元素,其中Zn、O含量较低,Cu含量较高,约为56.5%~77.5%,由此判定,试样中的白色异物为Cu-Zn合金,又称“黄铜”^[7]。

因裂纹周边有黄色斑点,为进一步确定黄色斑点的成分,对该黄色斑点进行电镜扫描及能谱分析,如图6所示,由能谱分析可知,存在Fe、Cu、O等元素,其中Cu、O含量远高于Fe,由此判定,试样裂纹周边的黄色斑点处的主要成分为CuO,另有少量铁的氧化物。

3 结果分析与讨论

钢管弯制开裂是钢管弯制加工过程中最常出现的问题之一,造成弯管开裂的原因较多,主要原

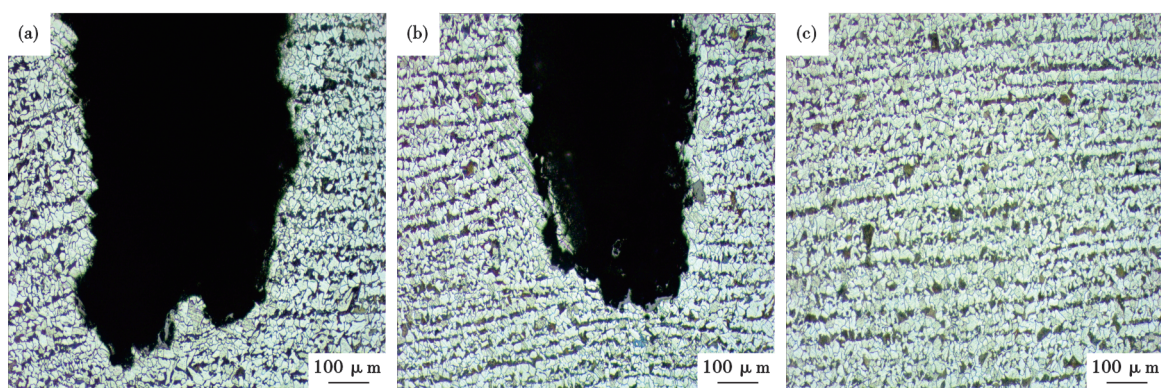


图5 SA-106B钢试验钢管的组织形貌:(a)1#试样,(b)2#试样,(c)3#试样

Fig. 5 The microstructure morphology of SA-106B tested steel pipe : (a)1# sample, (b)2# sample, (c)3# sample

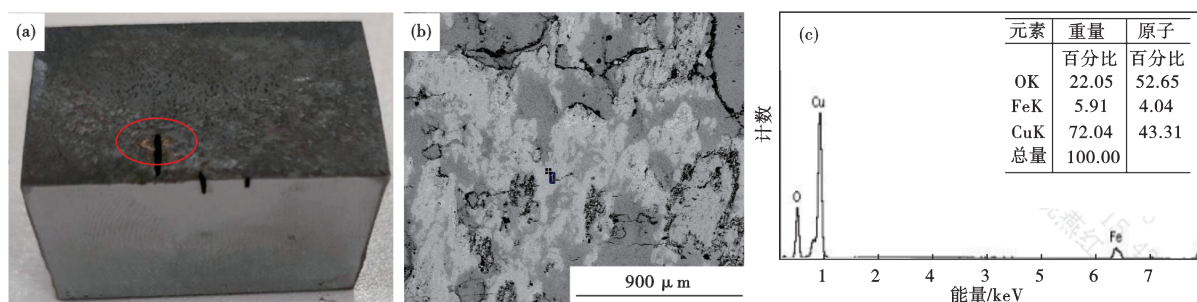


图6 SA-106B钢试样表面的黄色斑点(a)和黄色斑点处能谱分析(b)(c)

Fig. 6 Yellow spots on the surface of SA-106B steel specimen (a) and energy spectrum analysis at yellow spots (b) (c)

因包括材料性能差、热弯工艺和材料表面缺陷三大方面。表面缺陷通常是造成热弯开裂的最主要原因,表面常见的缺陷类型有裂纹、折叠、结疤、划伤、摩擦碰伤等;材料性能方面,多数是由于化学成分、非金属夹杂或强度不满足要求、硬度不均匀等;热弯工艺方面,主要是指弯制过程的加热温度不合理等。

通过检验分析,钢管的抗拉强度、屈服强度均远高于标准,360°环形检测硬度,硬度偏差 $\leq 10\text{HBW}$,均匀性良好,冷态下压扁试验合格,塑性良好;冶金质量良好,组织、晶粒度均匀,钢管内外表面无裂纹、折叠等缺陷。

开裂试样和同批次未开裂的试样对比,金相组织均为铁素体+珠光体,组织形态正常。通过对开裂试样的分析,成分符合标准要求,未见明显偏析,开裂试样未见非金属夹杂。由此,可知,材料性能方面不是造成开裂的原因。用户加工工艺为:钢管($\phi 219.1\text{ mm} \times 20\text{ mm}$) \rightarrow 下料 \rightarrow 感应加热($920 \sim 950\text{ }^\circ\text{C}$) \rightarrow 热弯成型,该工艺成熟,已使用多年,可以排除热弯工艺方面的问题。

通过对开裂钢材的出厂探伤情况统计,和对客

户未加工材料的表面进行检查,均未发现表面裂纹、折叠、结疤,但部分实物表面有螺旋状刮擦痕迹,与热弯加热的裂纹呈螺旋状分布的情况一致,因此,判断开裂与此表面刮擦有关。根据分析结果,试样开裂处均发现了“黄铜”及CuO。查阅文献可知,当“黄铜”中 $w[\text{Cu}]$ 为56%~68%时,黄铜的熔点为 $934 \sim 967\text{ }^\circ\text{C}$,感应加热时,钢管表面的“黄铜”逐渐溶解,Cu向近表面扩散,扩散速度随温度的升高而加快。根据Fe-Cu相图^[8],随温度的升高,铜在铁中的溶解度逐渐增加,当温度达到一定程度时,铜会与铁发生反应,生成富铜相。热弯前的感应加热,促使Cu及Cu的氧化物在钢管表面形成熔点较低(约 $950\text{ }^\circ\text{C}$)的富铜相,富Cu相沿晶界向基体内渗入^[9],富铜相的形成使得钢管表面的铜含量增加,改变了原有的化学成分平衡。钢管表面的Cu及Cu的氧化物在感应加热的作用下,当温度达到 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时,形成熔融的富Cu相并侵蚀钢管外壁的晶界,逐渐沿晶界向内扩散^[10],在晶界上形成Cu与基体的共晶体,共晶体较脆,容易导致基体晶界脆化^[11],即为“铜脆”^[9]。随着相变反应的进行,富铜相逐渐析出,析出的富铜相呈颗粒状或网状分布,与钢

管基体之间形成明显的界面,界面处容易产生应力集中,导致钢管在受到外力作用时易于开裂^[12-13]。钢管弯制时,弧形外侧表面受到拉应力,基体晶界会产生微小的裂缝,形成沿晶微裂纹。晶间微裂纹的存在,使晶粒之间结合力下降,钢管外壁弧形外侧金属的强度和塑性迅速降低,在钢管弯曲时无塑性变形的能力,容易发生脆性破坏^[5],从而引起开裂。

综上所述,SA-106B热弯加工过程中出现热弯开裂因为“黄铜”黏附在钢管表面,弯管感应加热时,“黄铜”熔化,铜沿表面渗入钢管晶界,在弯制加工时,钢管表面受到拉应力的作用,导致“铜脆”开裂。进一步分析可知,对于客户需要进行热弯加工的钢管,生产过程中要避免接触铜质配件及类似的低熔点金属材料配件,防止“铜脆”开裂及低熔点金属材料污染导致的开裂现象。同时,对于需要热弯加工的钢管,在转移及装卸和存储过程中,也应注意避免接触铜质配件及类似的低熔点金属。当钢管表面发现类似污染物后,建议采用抛丸或修磨清理,消除低熔点金属对后续热弯加工的影响。

4 工艺改进

SA-106B钢管的生产工艺流程为:高炉铁水→120 t转炉→(LF+RH)→连铸 ϕ 230 mm圆坯→钢坯加热→穿管机→轧管→定减径→正火→矫直→探伤→精整、入库。通过上述分析,确定开裂原因是钢管外壁表面局部黏附有Cu,根据图5可知,Cu尚停留在钢管表面,未渗入表层,故与Cu件接触的工序应为正火后工序,同时,结合SA-106B钢管的生产流程,全面排查可能与Cu件接触的工序,最终确认矫直机后出口处导筒材质为“黄铜”,该材料的含铜

量为62%,结合矫直机的工作原理,钢管矫直过程中,钢管为螺旋式前进,外表面局部与该Cu件导筒发生摩擦,导致外表面局部有螺旋状摩擦痕迹,摩擦处粘有Cu,是导致弯管开裂的根本原因。为避免后期生产钢管与Cu件接触,同时,更好地保护钢管表面,防止受硬质材料摩擦污染表面,将矫直机后出口导筒材质更换为尼龙板。更换后再次安排SA-106B钢管批量生产,出厂检查表面,未再发现表面有Cu的黏附。对改进工艺后生产的这批SA-106B钢管的使用情况进行了跟踪,客户使用相同的热弯工艺生产,未出现热弯开裂现象。

5 结论

1)SA-106B钢管在热弯加工过程中出现热弯开裂因为铜元素黏附在钢管表面,弯管感应加热时,铜渗入钢管晶界,在弯制加工时,钢管表面受到拉应力的作用,导致“铜脆”开裂。

2)矫直机出口导筒材质更换为尼龙板,有效避免了钢管表面与Cu件接触,杜绝了Cu黏附在钢管表面的可能性,改进后批量生产的SA-106B钢管交付用户使用未再出现“铜脆”开裂。

3)对于客户需要进行热弯加工的钢管,生产过程中要避免接触铜质配件及类似的低熔点金属材料配件,防止“铜脆”开裂及低熔点金属材料污染导致的开裂现象。

4)对于需要热弯加工的钢管,在转移及装卸和存储过程中,也应注意避免接触铜质配件及类似的低熔点金属。当钢管表面发现类似污染物后,建议采用抛丸或修磨清理,消除低熔点金属对后续热弯加工的影响。

参考文献

- [1] 何建中,丰晓东. 27SiMn无缝钢管开裂原因分析与对策[C]. //无缝钢管生产技术研讨会. 北京科技大学, 2011.
- [2] 闻小德,刘利,吕安明. 高压锅炉管用钢SA106C的生产实践[J]. 轧钢, 2016, 33(1): 81-83.
- [3] 夏云峰,周仲成,邵忠伟,等. SA-106C厚壁无缝钢管冷弯裂纹原因浅析[J]. 大型铸锻件, 2020(5): 43-44.
- [4] 王高峰,刘东亮,王鹏军,等. 成品油输送用X60感应加热弯管开裂原因分析[J]. 压力容器, 2019, 36(1): 72-77.
- [5] 郭涛,竺哲明,陈仙凤,等. 某高压锅炉水冷壁管开裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(8): 39-42.
- [6] 赵波,王善宝,解德刚,等. 无缝钢管Gr. 6轧制及正火后的组织和性能分析[J]. 特殊钢, 2024, 45(6): 102-107.
- [7] 柳泉,赵宏达,刘革,等. 装饰用铜锌仿金合金的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(11): 123-125.
- [8] 吴德海,王怀林,张伯明. 铜对铸铁组织和性能的影响[J]. 铸造工程, 20.46(05):18-26.
- [9] 陈爱华,岳重祥,吴圣杰,等. 345MPa级耐候钢中Ni对Cu富集行为的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(2): 35-40.
- [10] 李娜. 铜在钢中的作用综述[J]. 辽宁科技大学学报, 2011, 34(2): 157-162.
- [11] 李青,佟文伟,王全,等. 航空发动机供油管裂纹失效分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(1): 75-79.
- [12] 肖杰玉,方伟. 管子弯管断裂原因分析[J]. 特种设备安全技术, 2015,(5): 29-31.
- [13] 孙欣,宣云静. 影响热裂形成的因素及防治措施[J]. 农机使用与维修, 2013,(4):52-52.