

P92 无缝钢管内表面裂纹分析及工艺优化

张国忠, 窦志超, 王正, 闵杰, 黄大兵
(浙江泰富无缝钢管有限公司, 绍兴 312367)

摘要: 采用斜轧穿孔工艺生产大口径 P92 铁素体耐热无缝钢管过程中, 钢管内表面易产生细小裂纹。通过金相分析、高温相变计算和高温加热试验等研究表明, 内表面裂纹产生的主要原因是: 中心有通孔的 P92 管坯在坯料加热过程中, 由于加热温度过高和在炉时间过长(即表面氧化脱碳加重), 导致管坯通孔近内壁产生大量的高温 δ -铁素体相, 管坯在随后的斜轧穿孔中, 裂纹在塑性较差的高温 δ -铁素体处产生和扩展。根据内表面裂纹的产生机制, 通过对 P92 钢管化学成分的铬当量、镍当量按 $Cr_{eq} < 13\%$ 、 $Ni_{eq} > 4\%$ 进行控制, 坯料保温温度由原工艺的 $1\ 220 \sim 1\ 250\ ^\circ C$ 降为 $1\ 190 \sim 1\ 220\ ^\circ C$, 对穿孔机轧辊转速、辊距和顶伸量参数优化等工艺改进措施, 有效地解决了大口径 P92 无缝钢管内表面易产生裂纹的问题, 提高了 P92 无缝钢管的成材率和生产效率。

关键词: P92; 无缝钢管; 斜轧穿孔; 内表面裂纹; 高温 δ -铁素体

Inner-surface Cracks Analysis and Process Optimization of P92 Seamless Steel Pipe

Zhang Guozhong, Dou Zhichao, Wang Zheng, Min Jie, Huang Dabing
(Zhejiang Pacific Seamless Steel Tube Co., Ltd., Shaoxing 312367)

Abstract: During the production of large-sized P92 ferrite heat-resistant seamless steel pipe by rotary piercing process, the inner surface of the steel pipe is prone to produce small cracks. Through metallographic analysis, high-temperature phase transformation calculation and high-temperature heating test, the studies show that because of the higher heating temperature and the longer heating time, which increases the surface oxidation and decarburization, during the heating process of the P92 billet with a through hole in the center make a large number of high temperature δ ferrite phases near the inner wall and then the cracks generate and propagate around the δ Ferrite phases at the subsequent process of rotary piercing. According to the mechanism of internal surface cracks, through the control of the $Cr_{eq} < 13\%$, $Ni_{eq} > 4\%$ for P92 pipe chemical composition, the lowering of the billet heating temperature from $1\ 220\text{-}1\ 250\ ^\circ C$ to $1\ 190\text{-}1\ 220\ ^\circ C$, and the improvement parameters of roll speed, roll distance and the piercing point, the problem of cracks on the internal surface of large-diameter P92 seamless steel pipe is effectively solved, and the yield and production efficiency of P92 seamless steel pipe are improved.

Key Words: P92; Seamless Steel Pipe; Rotary Piercing; Inner Surface Cracks; High Temperature δ Ferrite

P92 铁素体耐热无缝钢管因其优异的抗氧化性能、耐腐蚀、高温强度和蠕变性能, 能够大幅提高机组的热效率, 成为超超临界火电机组四大管道的首选管材, 主要应用于四大管道的主蒸汽管道、高温再热蒸汽管道以及旁路管道和联络管等关键管道和管件^[1-6]。当前国内生产 P92 无缝管材的热加工方式主要有挤压、快锻和斜轧三种, 其中斜轧生产方式由于成材率高、生产成本较低和生产效率高等特点, 是目前国内的主要生产方式之一。P92 管材具有合金含量高, 在热加工生产时具有变形抗力大、塑性低和变形温度范围窄等特点^[7]。

浙江泰富无缝钢管有限公司(简称浙江钢管)

主要生产外径 406 mm 及以上规格的大口径无缝钢管, 采用 $\Phi 820$ 精密轧管机组生产 P92 无缝钢管的主要生产工艺为: 管坯通孔→管坯加热→穿孔→精轧→定径→冷床冷却→热处理→矫直→精整→探伤→切定尺→喷标、包装。

$\Phi 820$ 精密轧管机组的穿孔工艺属于斜轧穿孔, 在斜轧穿孔生产 P92 无缝钢管过程中, 钢管内壁表面易产生细小裂纹, 如图 1, 这些小裂纹深度约 0.5 ~ 2.0 mm, 虽然可以在后续的精整工序中通过增加内表面修磨道次将裂纹修磨掉, 但这不仅增加了修磨成本和占用修磨工序产能, 还降低了 P92 管材的成材率。本文分析了 P92 管材内表面裂纹产生

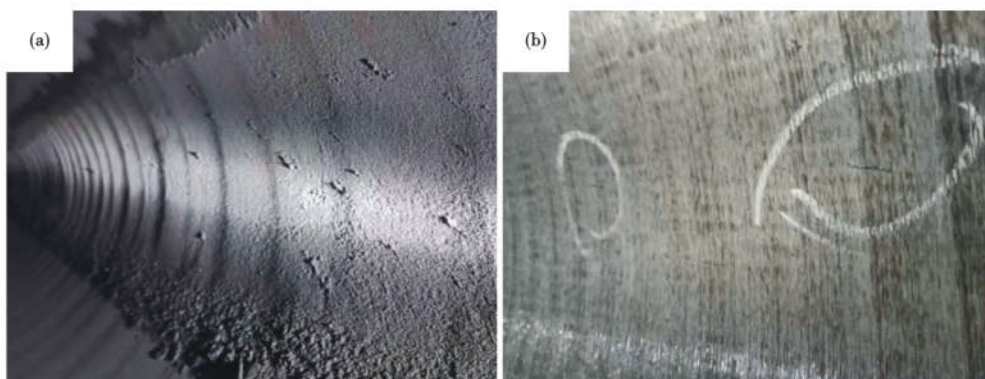


图 1 P92 无缝钢管(规格:Φ660 mm×24 mm)内表面裂纹形貌:(a)热轧后的 P92 内表面裂纹,(b)修磨掉氧化铁皮后的 P92 内表面裂纹

Fig. 1 Inner surface cracks morphology of P92 seamless steel pipe (size: Φ660 mm×24 mm): (a) inner surface cracks of P92 after hot rolling, (b) inner surface cracks of P92 after grinding off iron oxide scale

的原因和机制,并提出了相应的工艺优化措施。

1 内表面裂纹原因分析

1.1 内表面裂纹金相分析

对钢管内表面缺陷处进行金相分析,金相组织如图 2 所示。从缺陷处的金相组织可以看出,P92 基体为回火马氏体组织,裂纹附近存在较多的白色相。对裂纹周围进行扫描电镜能谱(EDS)分析,分析结果如图 3 和表 1 所示,结果表明此白色相为含高 Cr、高 W 的高温 δ-铁素体相。高温 δ-铁素体相的存在容易对不锈钢和耐热钢无缝钢管的表面质量产生影响^[8-10]。高温 δ-铁素体相为脆性相,钢管在二辊斜轧穿孔的切应力下,由于奥氏体和铁素体两相组织高温塑性和变形抗力差异比较大,两相组织变形不协调,从而导致奥氏体和铁素体结合处发生撕裂而形成细小裂纹。

1.2 加热过程中 δ-铁素体相的转变机理

由金相分析可以看出,P92 管材内壁产生裂纹的主要原因是坯料在加热后近内表面产生了 δ-铁素

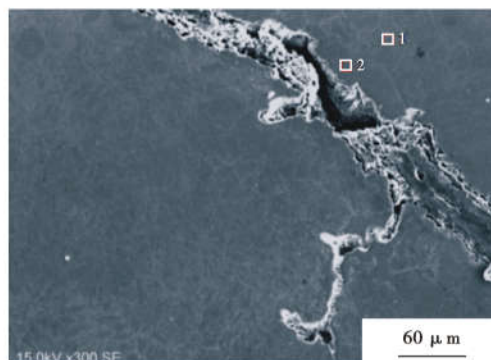


图 3 内表面裂纹附近的能谱分析(EDS)
Fig. 3 Energy spectrum analysis (EDS) near the inner surface crack

表 1 裂纹附近能谱分析(EDS)结果

Table 1 Energy spectrum analysis (EDS) results near cracks

分析方法	序号	位置	Cr/%	W/%
能谱分析 (EDS)	1	远裂纹边缘(回火马氏体)	8.38	1.26
	2	近裂纹边缘(δ-铁素体)	16.20	4.60
光谱分析		钢管(横截面)	8.77	1.72

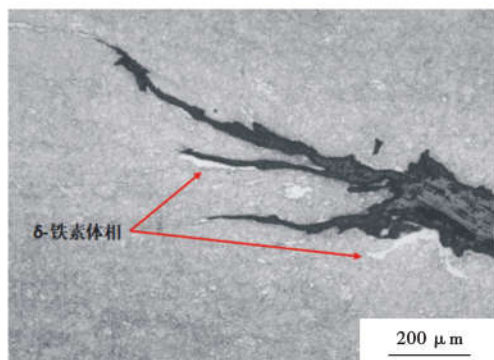


图 2 内表面裂纹及附近的 δ-铁素体相
Fig. 2 Inner surface crack and the nearby δ-Ferrite phase

体相,以下分析 P92 管坯加热过程中产生 δ-铁素体相的主要机理。

1.2.1 加热温度

为研究坯料加热温度对 δ-铁素体相产生的影响,根据 P92 管坯的化学成分通过相变计算得出高温 δ-铁素体相的转变温度,如图 4,计算结果显示,P92 管坯高温加热过程中,超过 1 220 ℃,高温 δ-铁素体相开始生成,随着加热温度继续升高,P92 管坯中 δ-铁素体相的含量将快速升高。

1.2.2 高温氧化脱碳

为了去除锻制管坯中心偏析、裂纹等缺陷和改善管坯在坯料加热过程中的传热条件,管坯加热前

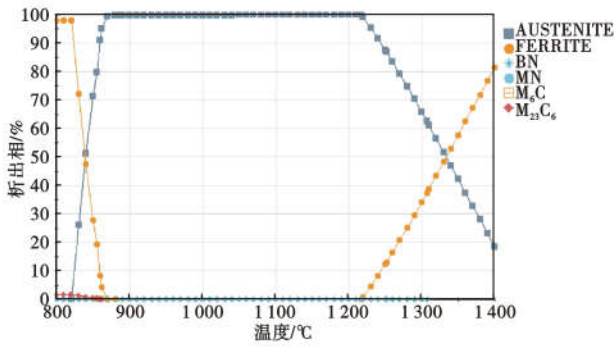


图 4 P92 钢各个相的转变温度

Fig. 4 Transition temperature of each phases in P92 steel

要在中心打贯穿的通孔。管坯通孔表面即相当于轧管的内表面,在加热过程中会产生表面脱碳,管坯的加热温度越高、时间越长,表面脱碳就越严重。通过相变计算,在其它化学成分不变的前提下,0.10% C 和 0.05% C 的高温 δ -铁素体相转变温度如图 5 所示。从计算结果可以看出,假设由于加热保温过程中的氧化脱碳,管坯通孔表面的碳含量(质量分数)从 0.10% C 降低到 0.05% C,则高温 δ -铁素体相转变温度从 1 220 °C 降低到 1 150 °C 左右,即在 1 220 °C 加热保温下,管坯内部由于无氧化脱碳, δ -铁素体含量

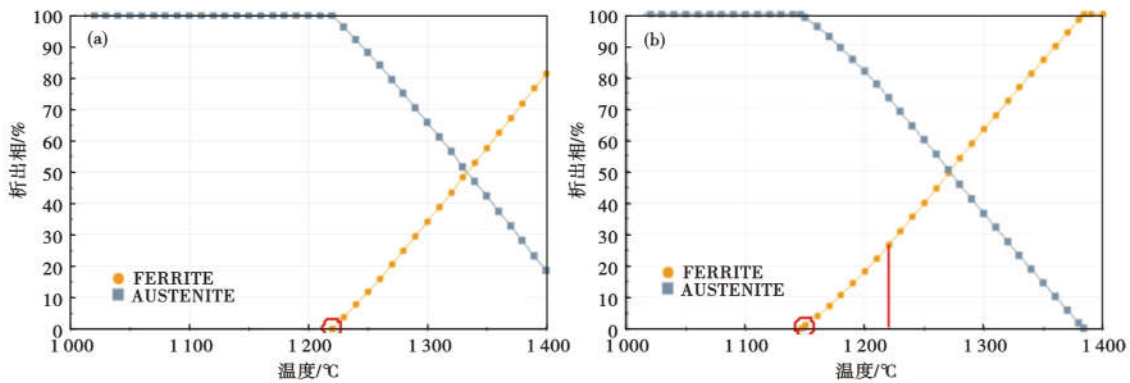


图 5 0.10% C (a) 和 0.05% C 含量 (b) 的 P92 δ -铁素体相转变温度

Fig. 5 P92 δ -Ferrite phase transition temperature of 0.10% C (a) and 0.05% C content (b)

表 2 P92 钢试样高温加热试验方案

Table 2 Test scheme of high temperature heating for P92 steel sample

试样编号	加热温度/℃	保温时间/h	冷却方式
1	1 220	2.5	水冷
2	1 250		

为 0,而管坯通孔表面由于氧化脱碳,会产生含量近 30% 的 δ -铁素体相,这说明表面氧化脱碳对 δ -铁素体相的产生有很大的影响。

1.2.3 高温加热试验

为验证加热温度及氧化脱碳对高温 δ -铁素体

相生成的影响,取管坯近内壁试样做试验室高温加热试验。试样分别在 1 220 °C 和 1 250 °C 加热 2.5 h,为观察高温下的 δ -铁素体相的状态,保温结束后直接将试样水冷至室温,试验方案见表 2。

高温加热试验后的试样 1、试样 2 金相分析如图 6 所示,由金相照片可以看出:(1)1 220 °C 加热后的 1 号试样内部, δ -铁素体相非常少,含量低于 3%,而 1 250 °C 加热后的 2 号试样内部, δ -铁素体相明显较多,含量接近 10%;(2)两个试样的边缘(即近氧化脱碳面处)的 δ -铁素体相含量显著高于试样

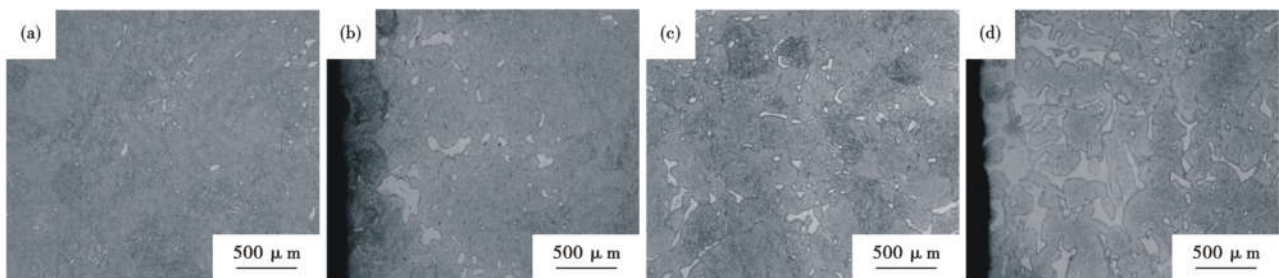


图 6 高温加热试验后的试样 1 (1 220 °C) 内部 (a)、边缘 (b) 和试样 2 (1 250 °C) 内部 (c) 和边缘 (d) 的金相组织

Fig. 6 Metallographic structures of sample 1 (1 220 °C) internal (a), edge (b) and sample 2 (1 250 °C) internal (c) and edge (d) after high temperature heating test

内部,其中 1 220 ℃ 加热后的 1 号试样边缘的 δ -铁素体相含量接近 15%,而 1 250 ℃ 加热后的 2 号试样边缘的 δ -铁素体相含量超过 30%。

通过小样试验结果验证了加热温度和氧化脱碳对产生高温 δ -铁素体相的影响,即中心通孔后的 P92 管坯近内壁的 δ -铁素体相含量,随坯料保温温度的升高和保温时间延长(即表面氧化脱碳的加重)而增多,从而导致管坯穿孔时内壁裂纹的产生。

1.3 裂纹产生原因分析

(1) 由于坯料在加热后,近通孔内表面处产生了高温 δ -铁素体相,该相含有比基体高得多的 Cr 和 W,为脆性相,钢管在二辊斜轧穿孔的切应力下,由于奥氏体和铁素体两相组织高温塑性和变形抗力差异比较大,从而导致奥氏体和铁素体结合处发生撕裂而形成细小裂纹;

(2) 通过相变计算和小样试验结果表明,P92 管坯近内壁的 δ -铁素体相含量,随坯料加热温度的升高和保温时间延长(即表面氧化脱碳的加重)而增多。由于 $\Phi 406$ mm 及以上大口径 P92 无缝钢管所需的坯料规格($\Phi 450 \sim 1\,000$ mm)比 $\Phi 406$ mm 以下小口径无缝钢管的坯料规格(一般 $\Phi 150 \sim 400$ mm)大,坯料加热的保温时间也就比小规格坯料长,坯料通孔表面的氧化脱碳也相对严重,容易产生较多的高温 δ -铁素体相。

2 工艺优化

根据以上对 P92 管材内壁裂纹产生原因和机理的分析,对 P92 无缝钢管的热轧工艺从化学成分、坯料加热制度和穿孔工艺三个方面进行了优化。

2.1 化学成分优化

化学成分对 δ -铁素体相的形成有明显的影响。当 Cr、W、Mo、V、Nb 等铁素体形成元素较多时,较易形成 δ -铁素体相;当 C、N、Mn、Cu、Ni 等奥氏体形成

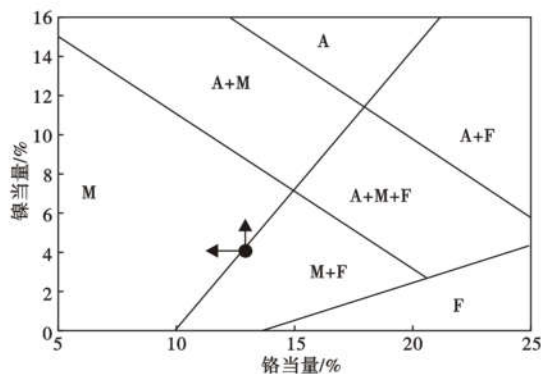


图 7 舍夫勒(Schäffler)组织图
Fig. 7 Schäffler phases chart

元素较多时,不易形成 δ -铁素体相^[11-12]。根据舍夫勒(Schäffler)组织图,如图 7 所示,铬当量和镍当量按以下公式^[13]计算: $Cr_{eq} = Cr + 0.75W + 1.5Mo + 2Si + 5V + 1.75Nb + 1.5Ti + 5.5Al$, $Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn + Co + 0.3Cu + 25N$,适当降低铬当量,提高镍当量,使 P92 钢的化学成分完全落在图 7 的马氏体(M)单相区内,这样只要将坯料加热温度控制在合理的范围内,就会避免或减少高温 δ -铁素体相的产生,为此,将现有 P92 钢化学成分按 $Cr_{eq} < 13\%$, $Ni_{eq} > 4\%$ 进行控制。

2.2 坯料加热制度优化

由于 P92 钢高温变形抗力高于碳钢和低合金钢^[14],因此,原 P92 管坯加热温度和保温时间都高于和长于同规格的碳钢和低合金坯料。为避免和减少 P92 管材内壁裂纹的产生,同时保证 P92 管坯穿孔时不超过穿孔机的最大工作载荷,将 P92 管坯加热制度进行以下优化:

(1) 坯料加热温度根据坯料规格由原工艺的 1 220 ~ 1 250 ℃ 降为 1 190 ~ 1 220 ℃;

(2) 坯料在加热炉的总加热和保温时间减少为原工艺的 80%,从而减轻管坯中心通孔表面的氧化脱碳。

2.3 穿孔工艺优化

斜轧穿孔工艺参数对 P92 钢的轧管质量有着重要影响。通过对文献[15-16]研究表明,降低穿孔机的轧辊转速和增大轧辊入口角有利于改善难变形合金无缝钢管的轧管质量。为此,根据坯料规格调整 P92 钢穿孔机轧辊转速为碳钢、低合金钢的 75% ~ 80%,同时适当放大辊距和减少顶头顶伸量,以便减轻坯料咬入时的变形程度。

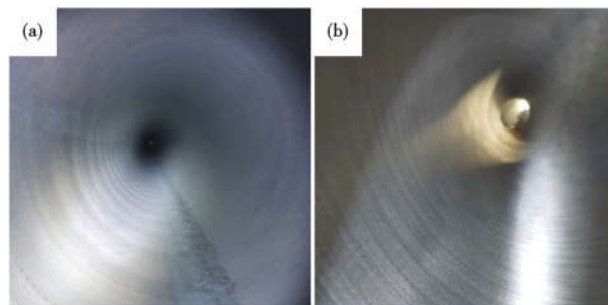


图 8 工艺优化后的 P92 无缝钢管(规格: $\Phi 711$ mm \times 27 mm)内表面形貌:(a) 热轧后钢管内表面,(b) 成品钢管内表面

Fig. 8 Inner surface morphology of P92 seamless steel pipe (size: $\Phi 711$ mm \times 27 mm) after process optimization: (a) inner surface of steel pipe after hot rolling, (b) inner surface of finished steel pipe

2.4 优化后的效果

通过对 P92 钢管化学成分、坯料加热制度和穿孔工艺等方面的优化改进,P92 无缝钢管的内表面质量得到了明显改善,如图 8 所示。表面质量的改善减少了 P92 钢管的修磨道次和返修次数,提高了 P92 无缝钢管的成材率,加快了生产和交货周期。

3 结论

(1)通过金相分析、高温相变计算和小样高温加热试验等研究表明,P92 无缝钢管内表面裂纹产生的主要原因是由于坯料加热后,近通孔内表面处产生了较多的高温 δ-铁素体相,该相含有比基体高得多的 Cr 和 W,为脆性相,钢管在二辊斜轧穿孔的切应力下,由于奥氏体和铁素体两相组织高温塑性和变形抗力差异比较大,两相组织变形不协调,从而

导致奥氏体和铁素体两相结合处发生撕裂形成细小裂纹;

(2)通过相变计算和小样试验结果表明,P92 管坯近内壁的 δ-铁素体含量,随坯料加热温度的升高和保温时间延长(即表面氧化脱碳的加重)而增多;

(3)根据 P92 管材内壁裂纹的产生机制,通过采取对 P92 钢化学成分的铬当量、镍当量按 $Cr_{eq} < 13\%$ 、 $Ni_{eq} > 4\%$ 进行控制;坯料加热温度由原工艺的 1 220 ~ 1 250 ℃降为 1 190 ~ 1 220 ℃,坯料在加热炉的总加热和保温时间减少为原工艺的 80%;对穿孔机轧辊转速、辊距和顶伸量参数优化等工艺改进措施后,有效地解决了大口径 P92 无缝钢管内表面易产生裂纹的问题,提高了 P92 无缝钢管的成材率和生产效率。

参考文献

[1]刘正东,程世长,王起江,等.中国 600 ℃火电机组锅炉钢进展[M].北京:冶金工业出版社,2011.

[2]何晓梅,罗昌福,刘漫博.超超临界火电机组的选材及国产化进程[J].材料热处理技术,2012,41(22):116-119,124.

[3]周荣灿,范长信.超超临界火电机组材料研究及选材分析[J].中国电力,2005,38(8):41-47.

[4]戴长青,田富强,轩福贞.超超临界锅炉管道用 T92/P92 钢蠕变性能[J].压力容器,2010,27(3):40-45.

[5]张伟,白银,包汉生,等.超超临界电站锅炉用耐热钢的水蒸气氧化行为[J].特殊钢,2019,40(6):23-27.

[6]Brozda J. New generation creep-resistant steels, their weld ability and properties of welded joints : T/P92steel[J]. Welding International, 2005, 19(1): 5-13.

[7]尹元德,李胜祗,康永林,等.工艺参数对二辊斜轧延伸大口径 P92 厚壁管分层缺陷的影响[J].材料科学与工艺,2014,22(6):123-128.

[8]唐科,彭俊,付克刚,等.SUS410 半马氏体不锈钢厚壁无缝钢管内表面裂纹缺陷分析及工艺改进[J].特殊钢,2021,42(5):46-48.

[9]王小萍,董易森,朱雄明,等.07Cr18Ni11Nb 不锈钢斜轧穿孔分层的原因[J].机械工程材料,2020,44(8):97-102.

[10]郭元蓉,陈雨,詹勇,等.P91 热轧无缝钢管中 δ 铁素体的研究[J].钢管,2011,40(5):17-20.

[11]石如星,刘正东,张才明. P92 耐热钢 δ-铁素体含量的热力学计算与试验分析[J].钢铁,2011,46(11):89-92.

[12]敬和民,陈立柱,王波,等. P92 钢管坯的 δ 铁素体组织控制 [C]//600/1000MW 超超临界机组技术交流 2009 年会议论文集.上海:中国动力工程学会,2009:294.

[13]包汉生,程世长,刘正东,等.化学成分和热处理温度对 T122 耐热钢中 δ-铁素体含量的影响[J].钢铁,2009,44(12):74-78.

[14]赵勇桃.超超临界锅炉用 P92 钢的组织性能及应用[M].北京:冶金工业出版社,2015.

[15]田党.关于难变形钢和合金管坯的二辊斜轧穿孔问题[J].钢铁,1998,33(1):33-36.

[16]尹元德,李胜祗,康永林,等.二辊斜轧延伸 9Cr-1Mo 钢厚壁管内表裂纹形成倾向性模拟研究[J].特殊钢,2012,33(4):18-21.

欢迎订阅 2023 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:25.00 元/期、150.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、大冶特殊钢有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 6292935