

# 热处理工艺对 P91 耐热钢中 $\delta$ -铁素体和冲击性能的影响

张建斌<sup>1</sup>, 刘帆<sup>1</sup>, 薛飞<sup>2</sup>

(1 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2 苏州热工研究院有限公司, 苏州 215004)

**摘要** P91 耐热钢热加工(轧制、焊接、热处理)过程中易产生  $\delta$ -铁素体, 且其形态、数量和分布与热加工温度关系密切。通过设计 P91 耐热钢热处理工艺, 在 1 150 °C、1 250 °C、1 300 °C 温度下正火获得马氏体+ $\delta$ -铁素体混合组织, 并对 1 300 °C 正火组织进行 1 050 °C(油冷)+760 °C(空冷)。采用金相显微镜、显微硬度计和扫描电子显微镜等技术研究  $\delta$ -铁素体数量、形态、分布的变化, 并测试各热处理状态下的冲击韧性和失效模式。结果表明, P91 钢随着正火温度升高,  $\delta$ -铁素体数量增加; 形态呈细条状、细条状+块状和多边形块状分布; 1 050 °C 正火+760 °C 回火不能消除在 1 300 °C 正火时产生的  $\delta$ -铁素体, 但能减少其数量、改变其形态与分布。随  $\delta$ -铁素体含量增加冲击功减小, 冲击断口形貌从韧/脆混合断裂转变为脆性断裂, 边界平直的块状多边形  $\delta$ -铁素体较条状形态更不利于冲击韧性。

**关键词** 耐热钢 热处理  $\delta$ -铁素体 冲击韧性

中图分类号: TG161 文献标识码: A DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.08.021

## Effect of Heat Treatment on Delta-ferrite and Impact Toughness of P91 Heat-resistant Steel

ZHANG Jianbin<sup>1</sup>, LIU Fan<sup>1</sup>, XUE Fei<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050; 2 Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004)

**Abstract** Delta-ferrite, whose morphology, content and distribution depended on hot processing temperature, readily generated in P91 heat-resistant steel during hot processing, such as hot rolling, welding and heat treatment. The mixed microstructure, including martensite and delta-ferrite, was obtained by normalizing at different temperatures (1 150 °C, 1 250 °C, 1 300 °C) in accordance with the designed heat treatment processing, and the normalizing microstructure (1 300 °C) undertook oil cooling (at 1 050 °C)+air cooling (at 760 °C). The content, morphology and distribution of delta-ferrite were observed by OM (optical microscope), SEM (scanning electron microscope) with EDS (energy-dispersive spectrometry), and the microhardness, impact toughness and fracture failure mode of that were tested. The results demonstrated that delta-ferrite content of P91 steel increased along with the increase of normalizing temperature, and its morphology presented thin strip, strip and bulk, and bulk polygon. The delta-ferrite generated due normalizing at 1 300 °C could not be eliminated by normalizing at 1 050 °C and tempering at 760 °C, while the content decreased, morphology and distribution of delta-ferrite altered. The impact energy reduced with increase in delta-ferrite content, and the impact fracture failure mode converted to brittle fracture from ductile-brittle fracture. In contrast with strip morphology, the bulk polygon of delta-ferrite at boundaries was not conducive to impact toughness.

**Key words** heat-resistant steel, heat treatment, delta-ferrite, impact toughness

## 0 引言

T/P91 耐热钢在正火和回火状态下使用时为马氏体组织。T/P91 耐热钢适用于蒸汽温度在 593 °C 以下的锅炉内部(如过热器、再热器)和锅炉外部(如管道)零部件。与传统锅炉用钢 T22、TP304H 相比, T/P91 耐热钢的高温强度、抗氧化性能和抗蠕变性能有了极大的提高<sup>[1-3]</sup>, 从而可提高蒸汽参数(温度和压力), 减小管壁厚, 提高机组的热效率, 进而降低煤耗和减少 CO<sub>2</sub> 的排放量<sup>[4-5]</sup>。

在 9%~12%Cr 耐热钢/不锈钢热加工(轧制、焊接、热处理)过程中易产生  $\delta$ -铁素体。如大直径厚壁 P91 钢管在轧

制中, 若控制穿孔温度在 1 270 °C 左右, 并且材料成分没有进行工艺优化或出现成分偏析, 轧制出的成品组织中会含有大量的  $\delta$ -铁素体<sup>[6]</sup>; 在 P92/S30432、P92/HR3C、P92/TP347H 等异种钢焊接中也发现了  $\delta$ -铁素体的存在,  $\delta$ -铁素体呈块状多边形出现在 P92 一侧的热影响区中的熔合线处, 且焊接接头处的热循环变化造成  $\delta$ -铁素体的形态、数量不同<sup>[7]</sup>; P91 钢 TIG 焊接接头组织中  $\delta$ -铁素体分布不均匀, 呈多边形分布于热影响区, 并有少量呈条状分布于焊缝, 随着  $\delta$ -铁素体含量增多, 接头的冲击韧性下降<sup>[8]</sup>。此外, 在热处理过程中发现 P92 母材中的  $\delta$ -铁素体的含量在 900~1 200 °C 之间呈现先降低后升高的变化趋势, 并且  $\delta$ -铁素体总体均沿加工方向呈

张建斌:男, 1972 年生, 博士, 副教授, 研究方向为先进钢铁材料焊接和表面改性 E-mail: jbzhangjb@qq.com 薛飞:通信作者, 男, 1975 年生, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为电站用金属部件的老化、失效分析与评估 E-mail: xuefei@cgnpc.com.cn

条带状分布,而在  $\delta$ -铁素体的形成中,铁素体形成元素的偏聚会使平衡态相图中的奥氏体区缩小<sup>[9]</sup>。而 12Cr-2W-Mo-V-Nb-N-B 钢在 980~1 160 °C 不同温度正火后组织均为板条马氏体和块状铁素体混合组织,在此温度区间,块状铁素体含量随正火温度的升高而先升高后下降,但形态尺寸没有明显变化。块状铁素体体积分数在 980~1 010 °C 时约为 10%,1 040 °C 时约为 25%,1 070~1 100 °C 时约为 35%,1 160 °C 时约为 20%<sup>[10]</sup>。可见 9%~12%Cr 耐热钢/不锈钢中  $\delta$ -铁素体的数量、形态、尺寸与热加工温度的关系尚需进一步分析。此外, $\delta$ -铁素体组织对 9%~12%Cr 钢的冲击韧性性能也有不同的影响,赵义瀚等发现钢中  $\delta$ -铁素体对韧性的影响是体积分数和形态分布共同作用的结果,当  $\delta$ -铁素体体积分数达到 1.9% 且集中于原奥氏体晶界处时,会降低材料的韧性;而当  $\delta$ -铁素体体积分数在 2%~3% 且  $\delta$ -铁素体/板条马氏体界面仅有少量碳化物析出时,对材料的韧性影响不大<sup>[11]</sup>;但是也有学者认为,当  $\delta$ -铁素体体积分数小于

1% 时,9%~12%Cr 钢的断裂韧性与  $\delta$ -铁素体影响不大,并且还有益于低温时的冲击韧性,当其体积分数超过 1% 时才会有较大的影响<sup>[12-13]</sup>。

本工作通过设计 P91 耐热钢热处理工艺在 1 150 °C、1 250 °C、1 300 °C 条件下获得马氏体+ $\delta$ -铁素体混合组织,并对 1 300 °C 条件下已形成  $\delta$ -铁素体的试样进行 1 050 °C (油冷)+760 °C (空冷)处理来研究  $\delta$ -铁素体组织形态、数量的变化以及对冲击韧性和失效模式的影响。

### 1 实验

实验用材料为 ASTM A335 P91 钢,规格为 6 mm 厚度的板材,供货态热处理状态为 1 050 °C 正火+760 °C 回火。表 1 为用放电质谱法(GDMS)测量的 SA335 P91 钢的化学成分,Cr 含量为 8.68%,P、S 含量均小于 0.010%,其成分符合 ASTM 标准规定的成分范围,P91 国标(GB)为 10Cr9Mo1VNbN,属中 Cr 合金钢。

表 1 SA335 P91 钢的化学成分(质量分数/%)  
Table 1 Chemical compositions (wt%) of SA335 P91 steel

Element	C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	P	S	V	Nb	N
P91	0.09	0.39	0.12	8.68	0.96	0.28	0.010 0	0.000 7	0.18	0.076	0.038
ASTM-P91	0.08—0.12	0.30—0.60	≤0.40	8.00—9.50	0.85—1.05	0.20—0.50	≤0.020	≤0.010	0.03—0.07	0.06—0.1	0.03—0.07

图 1 为供货态金相组织,包括珠光体(黑)和铁素体(白),硬度为 215HV<sub>0.5</sub>。P91 钢的马氏体转变开始温度( $M_s$ )在 400 °C 左右,马氏体转变终了温度( $M_f$ )在 100 °C 左右并随原奥氏体起始晶粒度的变化而变化。图 2 是 P91 耐热钢 CCT 曲线<sup>[14]</sup>,可见 P91 从奥氏体温度冷却到室温,在比较宽的冷却速度范围,奥氏体组织完全转化为马氏体组织。

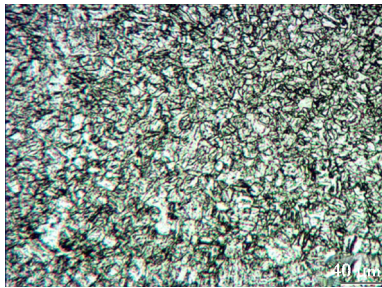


图 1 P91 供货态金相组织  
Fig.1 Optical microstructure of P91 steel

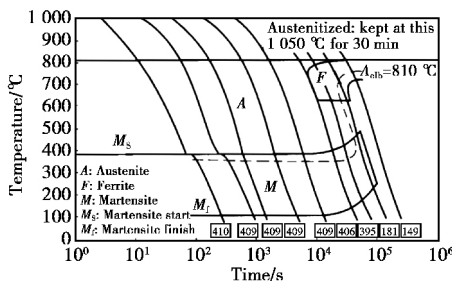


图 2 P91 钢 CCT 曲线  
Fig.2 CCT curve of P91 steel

P91 耐热钢在实际热加工(如焊接)时易形成  $\delta$ -铁素体<sup>[6,8]</sup>,组织为马氏体+ $\delta$ -铁素体混合组织。基于此,本工作

设计的热处理工艺参数如表 2 所示,热处理试样尺寸为 70 mm×20 mm×6 mm。采用 1 300 °C (油冷)+760 °C (空冷)、1 250 °C (油冷)+760 °C (空冷)和 1 150 °C (油冷)+760 °C (空冷)热处理方法制造马氏体+ $\delta$ -铁素体混合组织试样(分别为 1#、2# 和 3#);选取 1 300 °C 正火试样再进行 1 050 °C (油冷)+760 °C (空冷)制备对比试样(4# 和 5#),金相组织依据 ASM 手册<sup>[15]</sup>和 YB/T4402-2014《马氏体不锈钢中铁素体含量金相测定法》选择用 Vilella 试剂(苦味酸 1~2 g+盐酸 5 mL+酒精 95 mL)腐蚀显示  $\delta$ -铁素体金相组织,腐蚀时间为 20~30 s,观察仪为 4XC 型金相显微镜。通过热处理后组织中的衬度和颜色的反差及两组织之间的硬度差别来甄别  $\delta$ -铁素体与马氏体。

表 2 热处理工艺参数  
Table 2 Heat treatment processing parameters

Sample	Heat treatment method
1#	1 150 °C × 1 h (Oil cooling) + 760 °C × 1 h (Air cooling)
2#	1 250 °C × 1 h (Oil cooling) + 760 °C × 1 h (Air cooling)
3#	1 300 °C × 1 h (Oil cooling) + 760 °C × 1 h (Air cooling)
4#	1 300 °C × 1 h (Air cooling), 1 050 °C × 30 min (Oil cooling) + 760 °C × 1 h (Air cooling)
5#	1 300 °C × 1 h (Air cooling), 1 050 °C × 1 h (Oil cooling) + 760 °C × 1 h (Air cooling)

$\delta$ -铁素体的体积分数检测借鉴 YB/T4402-2014《马氏体不锈钢中铁素体含量金相测定法》,并配以图像分析软件(Image J)对钢中组织进行定量分析。热处理冲击试样根据 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》在 JB-

300B 半自动型冲击试验机上进行测试, 试样尺寸为 55 mm×10 mm×5 mm, 冲击断口形貌采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 热处理制度对试样组织的影响

图 3 是 P91 耐热钢在不同正火温度、相同回火温度热处理工艺下对应的光学组织,  $\delta$ -铁素体在金相显微镜下呈现亮白色且边界明显。由此可见, 在 1 150 °C、1 250 °C 和 1 300 °C (油冷)+760 °C (空冷) 回火试样组织均为板条马氏体和  $\delta$ -铁素体。对比图 3(a)、(b) 和 (c) 可以发现, 随正火温度升高,  $\delta$ -铁素体形态产生显著变化, 从细条状、条状+块状并存向大块状多边形变化。图 3(a) 为 1 150 °C (油冷)+760 °C (空冷) 回火组织, 由图 3 可以发现, 原奥氏体晶界明显, 细条状  $\delta$ -铁素体沿晶界分布或在晶粒内与马氏体成一定夹角; 图 3(b) 为 1 250 °C (油冷)+760 °C (空冷) 回火组织,  $\delta$ -铁素体呈条状、块状多边形孤立分布; 图 3(c) 为 1 300 °C (油冷)+760 °C (空冷) 回火组织,  $\delta$ -铁素体呈大块状团聚, 部分区域连接成片, 此时所占比例相对较大。对 1 300 °C (油冷)+760 °C (空冷) 试样进行电子显微镜和能谱分析 (如图 4 所示)。图 4(a) 背散射电子图像中  $\delta$ -铁素体表面平整; 而马氏体表面有浮凸, 内部有碳化物呈点状分布。图 4(b)、(c) 能谱分析结果表明铁素体形成元素 Cr、Si 在  $\delta$ -铁素体中的含量稍高于马氏体, 奥氏体形成元素 Mn 含量稍低于马氏体。这与文献 [11] 的研究结果类似, 但相对比而言, 3# 试样组织中  $\delta$ -铁素体形成元素的分布并不均匀, 这可能是在高温下发生了  $\delta$ -铁素体组织向其他组织的转化, 从而引起了部分元素的迁移及偏聚。

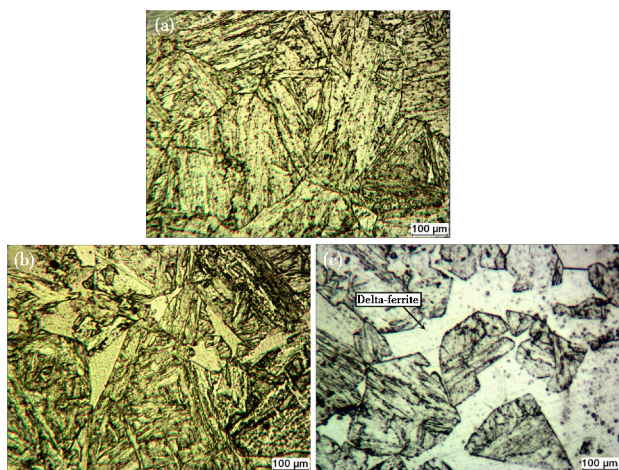


图 3 不同正火温度下的光学组织: (a) 1# 试样, (b) 2# 试样, (c) 3# 试样

Fig.3 Optical microstructure of normalizing samples: (a) sample 1#, (b) sample 2#, (c) sample 3#

将试样在 1 300 °C 保温 1 h, 再降温到 1 050 °C 进行不同时间保温, 760 °C (空冷) 回火, 研究其组织变化, 见图 5。可以发现组织仍为板条马氏体和  $\delta$ -铁素体。但  $\delta$ -铁素体的形态与图 3 中明显不同, 边界清晰的块状多边形形貌显著减少, 主要以条状分布在原奥氏体晶界处。随正火保温时间的延长,  $\delta$ -铁素体分布由连续的细条状向孤立的细条状和小块

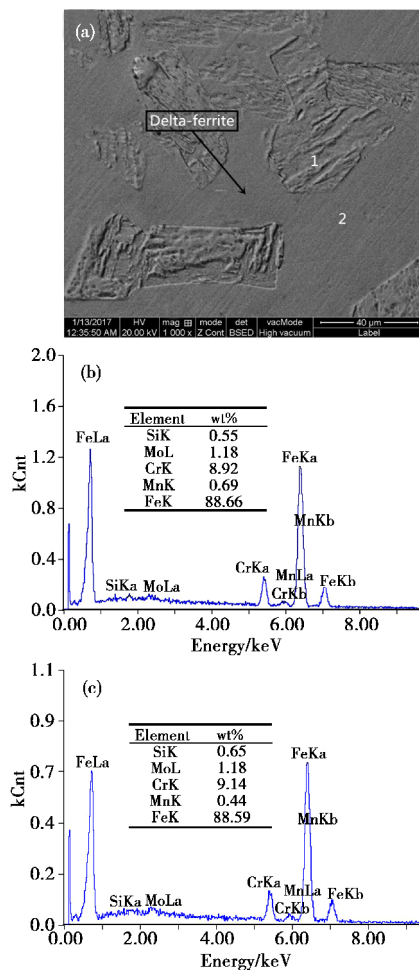


图 4 (a) 3# 试样 SEM 图像, (b) (a) 中 1 处的 EDS 图, (c) (a) 中 2 处的 EDS 图

Fig.4 (a) SEM image of the sample 3#, (b) EDS image of the area 1 in (a), (c) EDS image of the area 2 in (a)

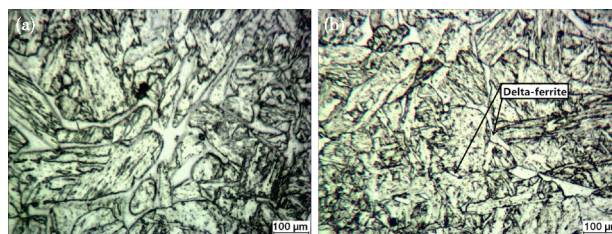


图 5 热处理工艺对组织的影响: (a) 4# 试样, (b) 5# 试样  
Fig.5 Optical microstructure of heat treatment samples: (a) sample 4#, (b) sample 5#

状转变, 文献 [7-8] 表明, 无论  $\delta$ -铁素体形态如何, 都将对材料的性能产生不良影响。

### 2.2 热处理制度对试样性能的影响

对不同热处理制度下的硬度和冲击韧性进行了测量, 采用图像分析软件 (Image J) 计算了相应的  $\delta$ -铁素体含量, 见图 6 和图 7。图 6(a) 中维氏硬度值均为五个点的平均值。除对 3# 试样中呈块状的  $\delta$ -铁素体单独进行测试外, 其余试样因  $\delta$ -铁素体尺寸较小, 可认为硬度计压痕反映了组织中马氏体的硬度值 (图 6(b)), 3# 试样中  $\delta$ -铁素体硬度为 169 HV<sub>0.5</sub>。

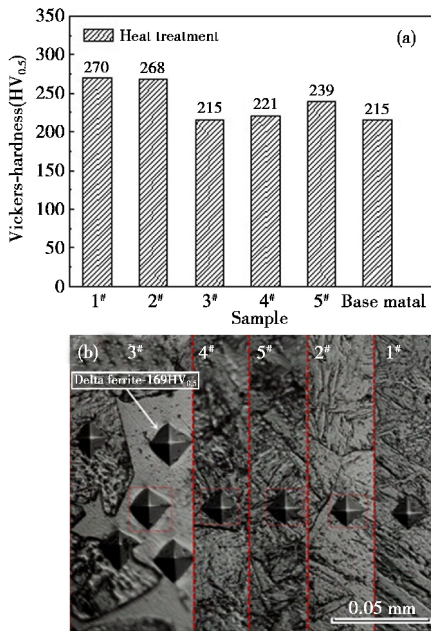


图6 各热处理制度下的显微硬度及维氏硬度计压痕:

(a) 维氏硬度值, (b) 维氏硬度计压痕

Fig.6 Microhardness and indentation of heat treatment samples:

(a) Vickers-hardness, (b) Vickers-hardness indentation

分别对 1#、2#、3#、4#、5# 和母材试样进行常温冲击试验,各试样  $\delta$ -铁素体含量与冲击功的关系如图 7 所示。由图 7 可见,1#、2# 和 3# 试样随着正火温度的降低,冲击功增大, $\delta$ -铁素体数量减少,而将 3# 试样经过处理后得到的 4# 和 5# 试样的冲击功都将增大,且 5# 试样冲击功最接近母材。这是由于不同制备条件下试样中  $\delta$ -铁素体含量不同而导致试样冲击功不同。由于 3#、4# 和 5# 三个试样晶粒度大致相同,因此影响其冲击性能的因素只有  $\delta$ -铁素体,图 7 显示除了母材试样外,只有 5# 试样的冲击性能最好,为 78 J,且对比 3#、4# 和 5# 试样发现,随着  $\delta$ -铁素体含量的减小,试样的冲击功不断升高。结合图 3 的试样组织图可知,在 3# 试样中的块状多边形  $\delta$ -铁素体和 4#、5# 试样在晶界位置分布的  $\delta$ -铁素体都将明显影响 P91 钢的冲击性能,可见硬度值、冲击功与  $\delta$ -铁素体数量、形态和分布密切相关。随  $\delta$ -铁素体含量增加,材料的硬度降低, $\delta$ -铁素体连续分布时材料的硬度与孤立分布相比更低;随  $\delta$ -铁素体含量增加,材料的冲击功减小, $\delta$ -铁素体呈边界平直的块状多边形的材料的冲击韧性呈条状形态的材料相比更低。

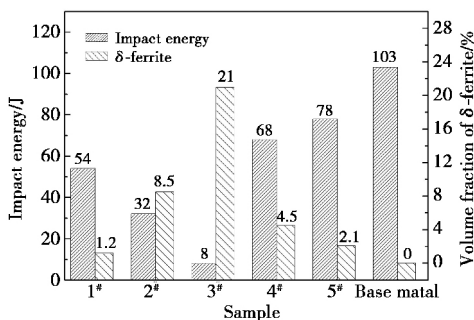


图7 不同  $\delta$ -铁素体含量下的试样冲击功

Fig.7 Volume fraction of delta-ferrite vs. impact energy

图 8 为试样冲击断口形貌。由图 8 可见,3# 试样为扇形解理脆性断裂,断口呈亮灰色,显示明显的扇形花样,从裂纹源开始以放射状向前扩展,阶梯的高度沿着扩展方向增加,直至晶粒边界,为典型的脆性断口,并伴有二次裂纹,这也与试样的冲击吸收功 8 J 相对应,也与文献[13]所研究的断口有相似之处。4# 和 5# 试样在冲击载荷作用下出现的伸长或抛物线状的韧窝为撕裂韧窝,表现为韧性断裂,在抛物线韧窝方向上,大撕裂韧窝周围出现较小的撕裂韧窝,韧窝底部有“涟波”滑移痕迹。由于钢比较纯净,夹杂物较少,所以有的韧窝中有夹杂物,有的韧窝中没有夹杂物。但与 4# 试样相比,5# 试样的韧窝尺寸较均匀一致,因此 5# 试样韧性较好,冲击功也比 4# 试样大。2# 试样断口呈现准解理断裂,并有少量的韧窝,其断口形貌和冲击功(32 J)与 3# 试样相比有明显的差异性;1# 试样为韧脆混合断裂,在扇形解理断裂的边界有细小韧窝,断口上有高密度的短而弯曲的撕裂棱线条,小断裂面上存在一些河流状花样,但在这些小断裂面间的连接处又有撕裂棱和韧窝带等韧性断裂的特征;母材试样的断口形貌与 4# 和 5# 试样的断口形貌一样呈现韧窝状,但 4# 和 5# 试样这种抛物线状的韧窝尺寸更大,说明韧性最好,冲击功相比其他试样最大,为 103 J。

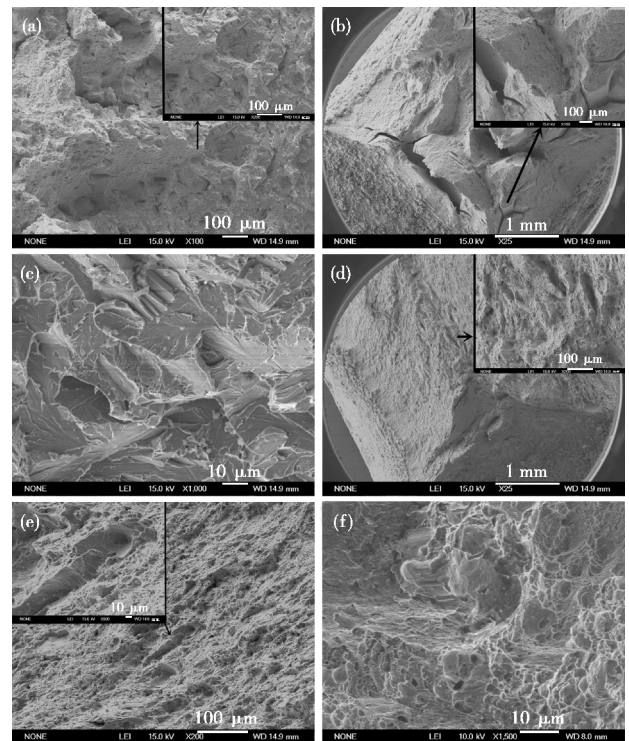


图8 试样冲击断口形貌:(a)1# 试样,(b)2# 试样,(c)3# 试样,(d)4# 试样,(e)5# 试样,(f)母材试样

Fig.8 Impact fracture morphology of tested sample:

(a) sample 1#, (b) sample 2#, (c) sample 3#, (d) sample 4#, (e) sample 5#, (f) base metal

### 3 结论

通过 P91 耐热钢热处理工艺,在 1 150 °C(油冷)+760 °C(空冷)、1 250 °C(油冷)+760 °C(空冷)和 1 300 °C(油冷)+760 °C(空冷)下试样组织均为板条马氏体+ $\delta$ -铁素体

混合组织。随着正火温度升高,  $\delta$ -铁素体数量增加,  $\delta$ -铁素体形态呈细条状、细条状+块状和多边形块状分布, 试样硬度降低, 冲击功降低, 其对应的 1#、2#、3# 试样硬度值分别为  $270\text{HV}_{0.5} > 268\text{HV}_{0.5} > 215\text{HV}_{0.5}$ ; 当  $\delta$ -铁素体体积分数达到 21% 时, 冲击功急剧减小, 对应的断口形貌从韧脆混合断裂向脆性断裂转变; 对 1 300 °C 正火试样进行 1 050 °C (油冷)+760 °C (空冷),  $\delta$ -铁素体形态分布产生变化但未能消除, 随着在 1 050 °C 下保温时间的延长,  $\delta$ -铁素体体积分数从 21% 减少到 2.1%, 冲击功从 8 J 增大到 78 J。

### 参考文献

- Lverde D, Gomez-Acebo T, Castro F. Continuous and cyclic oxidation of T91 ferritic steel under steam[J]. Corrosion Science, 2004, 46(3): 613.
- Zhang Lifang, Zhou Yan, Qiao Zhixia, et al. Kinetics of martensite phase transformation of T91 steels during continuous cooling[J]. Mater Review, 2015(s2): 489 (in Chinese).  
张丽芳, 周严, 乔志霞, 等. T91 钢连续冷却过程中马氏体相变动力学的研究[J]. 材料导报, 2015(s2): 489.
- Yan Chaopeng, Sun Feng, Shan Aidang, et al. Research progress of ferritic heat-resistant steels used for ultra-super critical steam turbine units[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(12): 1 (in Chinese).  
闫超鹏, 孙锋, 单爱党, 等. 超超临界火电机组用铁素体耐热钢的研究现状[J]. 机械工程材料, 2008, 32(12): 1.
- Ning Baoqun, Liu Yongchang, Yin Hongqi, et al. Development and investigation of ferritic heat resistant steels for boiler tube of the advanced power plants[J]. Materials Review, 2006, 20(12): 83 (in Chinese).  
宁保群, 刘永长, 殷红旗, 等. 超高临界压发电厂锅炉管用铁素体耐热钢的发展现状与研究前景[J]. 材料导报, 2006, 20(12): 83.
- Shu Guogang, Ding Hui, Liu Shutao, et al. Fracture morphology microstructure and sbu-microstructure analyses of 9Cr-1Mo-V-Nb-N steel pipe made in china[J]. Electric Power, 2004(7): 58 (in Chinese).  
束国刚, 丁辉, 刘树涛, 等. 国产 9Cr-1Mo-V-Nb-N 钢管的断口、组织及亚结构分析[J]. 中国电力, 2004(7): 58.
- Guo Yuanrong, Chen Yu, Zhan Yong, et al. Research on  $\delta$  ferrite contained in P91 hot-rolled seamless steel tube[J]. Steel Pipe, 2011, 40(5): 17 (in Chinese).  
郭元荣, 陈雨, 詹勇, 等. P91 热轧无缝钢管中  $\delta$  铁素体的研究[J]. 钢管, 2011, 40(5): 17.
- Zhao Lei, Yang Chao, Qiao Hanwen, et al. Effect of welding process on  $\delta$  ferrite in T92/S30432 dissimilar welded joint[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(11): 111 (in Chinese).  
赵雷, 杨超, 乔汉文, 等. 焊接工艺对 T92/S30432 异种钢接头  $\delta$  铁素体的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(11): 111.
- Zhang Jianbin, Liu Fan, Fan Ding, et al. Influence of delta-ferrite content on impact toughness of joint P91 heat-resistant steel[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2017(3): 108 (in Chinese).  
张建斌, 刘帆, 樊丁, 等.  $\delta$ -铁素体对 P91 耐热钢接头冲击性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017(3): 108.
- Liu Jiangnan, Shu Guogang, Wang Zhengpin, et al. Effect of heat treatment on microstructures and properties of 12Cr-2W-Mo-V-N-B steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2004(2): 7 (in Chinese).  
刘江南, 束国刚, 王正品, 等. 12Cr-2W-Mo-V-Nb-N-B 钢的热处理与组织和性能[J]. 金属热处理, 2004(2): 7.
- Shi Ruxing, Liu Zhengdong, Zhang Caiming. Thermodynamic calculation and experimental measurement of  $\delta$  ferrite amount in P92 heat resistant steel[J]. Iron and Steel, 2011, 46(11): 89 (in Chinese).  
石如星, 刘正东, 张才明. P92 耐热钢  $\delta$ -铁素体含量的热力学计算与试验分析[J]. 钢铁, 2011, 46(11): 89.
- Zhao Yihan, Zhao Chengzhi, Wang Jiannan, et al. Forming mechanism of  $\delta$ -ferrite and its effect on martensite heat-resistant steel impact energy[J]. Iron and Steel 2013, 48(4): 70 (in Chinese).  
赵义瀚, 赵成志, 王健楠, 等.  $\delta$ -铁素体形成机制以及对马氏体耐热钢冲击功的影响[J]. 钢铁, 2013, 48(4): 70.
- Anderko K, Schafer L, Materna-Morris E. Effect of the  $\delta$ -ferrite phase on the impact properties of martensitic chromium steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 1991, 179-181: 492.
- Alkan G, Chae D, Kims J. Effect of  $\delta$ -ferrite on impact property of hot-rolled 12Cr-Ni steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 585: 39.
- Yan W, Wang W, Shan Y, et al. 9-12Cr heat-resistant steels[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- Voort G F V, Lucas G M, Manilova E P. Metallography and microstructures of stainless steels and maraging steels[M]. Ohio: The Materials Information Company, 2004.

(责任编辑 李 敏)