

# 15CrMo 单层堆焊时后续焊道对前期焊道的回火作用研究

冯琳杰<sup>1</sup>, 刘福广<sup>2</sup>, 张巍<sup>1</sup>, 赵永明<sup>3</sup>, 葛军<sup>1</sup>, 韩天鹏<sup>2</sup>, 杨二娟<sup>2</sup>

(1. 华能平凉发电有限公司, 甘肃 平凉 744032; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

**摘要:**采用三维有限元模型表征了 15CrMo 钢单层堆焊时后续焊道对前期焊道的热作用。模型基于实际焊件尺寸建立, 相邻焊缝搭接度为 50%。施加预处理温度为 150℃, 以 Gauss 热源形式加载。结果表明, 在预处理温度、焊接参数、材料相同的情况下, 三个焊道在焊接过程中的温度分布基本相同。焊缝一侧有效回火区总宽度为 3.6~4.6 mm, 仅后续第一道焊缝的焊接过程对前道焊缝存在回火作用, 覆盖区域约为前道焊缝宽度的 25%。因此, 单层堆焊时搭接度达 75% 时后期焊缝的热作用才能达到给前期焊道完全回火的效果。

**关键词:**堆焊; 温度场; 回火作用; 热影响区

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20193006

**中图分类号:** TG455

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3814(2021)17-0122-04

## Tempering Effect of Follow-up Weld Bead on Pre-weld Bead in 15CrMo Single Layer Surfacing

FENG Linjie<sup>1</sup>, LIU Fuguang<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHAO Yongming<sup>3</sup>, GE Jun<sup>1</sup>, HAN Tianpeng<sup>2</sup>, YANG Erjuan<sup>2</sup>

(1. Huaneng Pingliang Power Generation Co., Ltd., Pingliang 744032, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 3. China Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Jiaxing 314300, China)

**Abstract:** The three-dimensional finite element model was used to address the thermal effect of the weld bead on the pre-weld bead during single-layer overlaying of 15CrMo steel. The model was established based on the size of actual weldment, and the overlap degree of adjacent welds was 50%. The pretreatment temperature was 150℃ and heat source with type of Gauss was loaded. The results show that the temperature distribution of the three weld beads is basically identical when the pretreatment temperature, welding parameters and material are the same. The total width of tempering zone on one side of the weld is in the range of 3.6–4.6 mm. The subsequent first weld bead only can be tempered by the welding process of the previous weld, and the width of overlapped area is about 25% of that of the weld. Therefore, the thermal effect of the following weld can completely temper the previous weld bead when the overlap degree of adjacent welds is about 75%.

**Key words:** Surfacing; temperature field; tempering; heat affected zone

15CrMo 耐热钢具有高强韧性、高抗氧化和耐腐蚀等性能, 目前广泛应用于核电厂、石油化工等场合<sup>[1-3]</sup>。由于含有 Cr、Mo 等元素, 15CrMo 具有明显的淬硬倾向, 焊缝和热影响区极易出现马氏体组织, 形成应力, 进而产生裂纹。焊接完成后必须进行回火

处理<sup>[4-6]</sup>。而焊后热处理过程中也可能会生成再热裂纹<sup>[5-7]</sup>。长时间运行后零件内部同样会出现缺陷。由于现场条件的局限性, 缺陷部位修复时焊后热处理的执行性较差。回火焊道工艺是消除焊件缺陷、提高设备运行安全性的关键技术之一<sup>[8-10]</sup>。目前已有相关报道研究了回火焊道工艺参数(如焊接速度)对 35CrMo、SA508-3 等材料组织、力学性能等的影响<sup>[11-12]</sup>, 但是 15CrMo 钢在焊接回火过程中的温度分布特征及其对焊件组织的影响尚不清楚。本文通过焊件温度场模拟研究焊接过程中 15CrMo 后续焊道对前期焊道的影响, 得出在常用焊接参数下 15CrMo 相邻焊道能够完全达到回火效果的临界搭

收稿日期: 2019-10-18

作者简介: 冯琳杰(1963-), 男, 河南郑州人, 高级工程师, 主要从事火力发电厂金属监督及焊接管理工作; 电话: 13909331903;

E-mail: pldcflj@163.com

通讯作者: 杨二娟(1983-), 女, 工程师, 博士, 主要研究方向: 电站材料焊接与表面修复技术; 电话: 029-82002772;

E-mail: yangerjuan@tpri.com.cn

接量,为 15CrMo 回火焊道工艺参数设定提供基础。

## 1 试验方法

### 1.1 焊接试验

采用焊条电弧焊在 15CrMo 钢基体上进行堆焊,基体尺寸为:140mm×100mm×17mm。焊条采用 φ3.2mm 的 R307 焊条。每道焊缝焊接前均预热至 150℃。焊接参数如表 1 所示。

表 1 焊接参数  
Tab.1 Welding parameters

焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(mm·s <sup>-1</sup> )	预热温度及道间温度 /℃
126	26	1.67	150

宏观金相按照 GB/T 13298-2015《金属显微组织检验方法》中规定的步骤进行。焊件腐蚀后采用 AutoCAD 软件进行焊缝、焊接热影响区轮廓的描绘与尺寸表征,为模型建立提供数据。

### 1.2 有限元模型

基于宏观金相建立有限元模型,模型示意图如图 1 所示。模型尺寸为 140mm×100mm×17mm。相邻焊缝搭接度为 50%。选择热传导单元作为分析单元。为提升运算准确性,缩小焊道位置的网格尺寸。焊接接头区域宽度方向的单元尺寸为 1mm,长度方向单元尺寸为 2mm。15CrMo 热物理参数如表 2 所示。

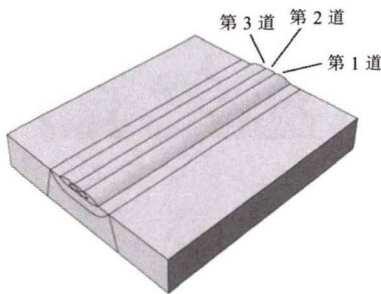


图 1 有限元模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of finite element model

基于焊接过程实际工艺,有限元模型施加 150℃ 的温度作为预热温度。焊接热源以 Gauss 热源形式加载。焊件散热方式包括对流与辐射,模型中将两者统一以综合换热系数(表 3)的形式加载。工件底面散热较快,增加一个底面换热。

## 2 模拟结果及分析

当热源移动到距焊件边缘一定距离部位时焊件

表 2 15CrMo 钢的热物理参数

Tab.2 Thermophysical parameters of 15CrMo steel

温度 /℃	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	熔化潜热 /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	热导率 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热容 /(kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
20	7800	0.485	300	45	-
100				44	0.488
200				43	0.547
300				42	0.607
400				37.5	0.660
500				35	0.710
600				34	-
900				28	-
1200				22	-
1500				17	-
1800	2	-			

表 3 模型边界施加的冷却条件

Tab.3 The cooling conditions loaded on the model boundary

温度 /℃	辐射系数 /(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> )	对流系数 /(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	综合换热系数 /(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
0	4.1	20	24.1
250	13.3	20	33.3
500	33.0	20	53.0
750	67.6	20	87.6
1000	121.2	20	141.2
1500	302.6	20	322.6
1750	439.0	20	459.0
5000	7041.6	20	7061.6

温度场趋于平衡状态,该温度场表征的是正常焊接时焊件的温度场。因此,选用稳定后的温度场表征焊接温度,焊件断面温度如图 2 所示。每道焊缝在焊接前均经过 150℃ 的预热,在焊接工艺参数、焊接材料相同的情况下,三个焊道在焊接过程中的温度分布基本相同。以 1450℃ 为焊接金属熔点。熔池(图中灰色衬度区域)深度为 4.5mm,熔池宽度为 16.9mm,与实际工件焊缝尺寸(4.5mm、17.1mm)基本相同。因此,模拟结果能够准确反映焊缝及热影响区的尺寸。

图 3 为不同焊道焊接过程中焊件表面的温度场分布。与断面结果类似,由于预热,焊接工艺参数、材料等因素相同,焊件表面的温度分布基本相同。受热源影响温度升高的区域为椭圆形,椭圆形的短边直径约为焊缝宽度的 2 倍。但是大部分温升区域的温度低于 600℃,不影响焊件力学性能。焊件温度高于 600℃ 时可达回火效果。由于焊接热源的高斯函数分布特性,熔池外的温度发生骤降,现有焊接参数下焊接过程中后续焊道能够对前一焊道达到回火效果

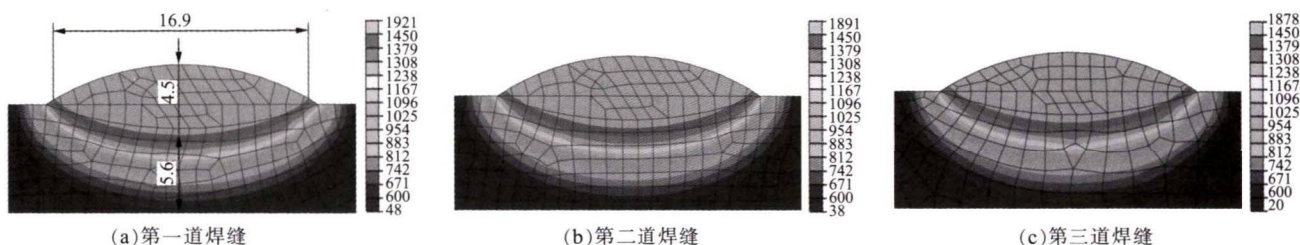


图2 不同焊道焊接过程中的断面温度分布(°C)

Fig.2 Cross-sectional temperature distribution of different weld beads during welding(°C)



图3 不同焊道表面的温度分布(°C)

Fig.3 Temperature distributions of different weld bead surfaces(°C)

的有效区域的宽度约为焊缝宽度的 25%。为准确研究回火区域的有效范围,提取了焊件断面回火区域的温度分布,如图 4 所示。结果表明,焊缝一侧的有效回火范围的宽度约为焊缝宽度的 25%,与表面温度场分析结果一致。

由于三道焊缝的温度场基本相同,提取第一道焊缝的焊接热影响区断面温度场表征三道焊缝的热影响区温度分布特征,结果如图 5 所示。温度介于 1150~1450°C 时为过热区,如图 5(a)所示。由于温

度较高,该区域的晶粒显著生长,为典型的粗晶区,该区域的宽度为 1.6~2.0mm。过热区底部及其周围温度介于 900~1150°C 时区域为正火区,如图 5(b)所示。焊接过程中该区域的金属发生了重结晶,转变为细小的奥氏体晶粒。冷却后得到的晶粒均匀而细小,力学性能优越<sup>[13]</sup>。该区域的宽度小于粗晶区,为 1.2~1.6mm。正火区周围温度介于 727~900°C 的区域为部分相变区,如图 5(c)所示。焊接过程中珠光体和部分铁素体发生重结晶,转变为细小的奥氏体,

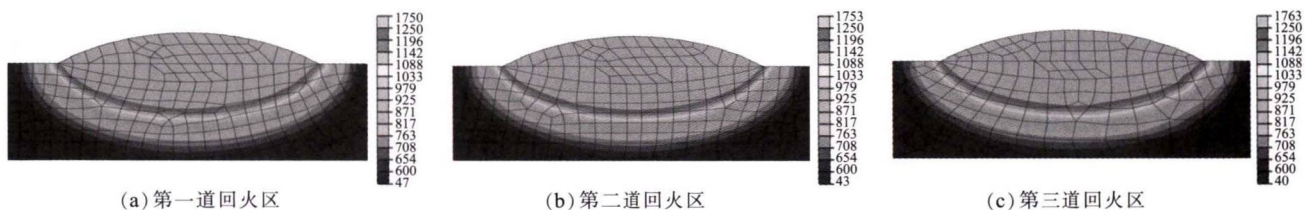


图4 三个焊道的回火范围(°C)

Fig.4 Tempering range of three weld beads(°C)

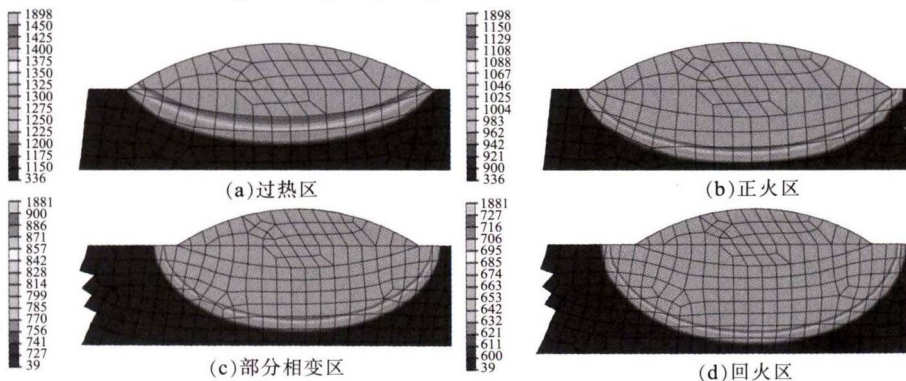


图5 第一道焊缝热影响区不同区域断面温度分布(°C)

Fig.5 Cross-sectional temperature distributions in different areas of the first weld heat affected zone(°C)

部分铁素体不发生相变,但其晶粒在焊接过程中长大。冷却后该区域的晶粒大小不均匀,力学性能比正火区稍差<sup>[3]</sup>。部分相变区的尺寸为1.2~1.5mm。另外,焊缝周围温度介于600~727℃的区域为回火区,如图5(d)所示。该区域的温度处于回火温度范围内,可以达到回火的效果。回火区域的尺寸为1.2~1.5mm。回火区、部分相变区、正火区三个区域的总宽度为3.6~4.6mm,约为焊缝与过热区总宽度的25%。

取第一个焊道中心下部的点分析其热循环过程,如图6所示。在第一个焊道作用下其峰值温度达到了1360℃,属于过热区。第二个焊道焊接过程中,该位置在一定时间段内温度高于600℃,显著低于1150℃。因此,在焊接第二个焊道过程中,第二个焊道的热作用对第一个焊道过热区(粗晶区)不仅有回火的作用,还有起到部分正火的作用。焊接第三道过程中,该位置的最高温度仅为242.2℃,显著低于15CrMo的回火温度。第三道焊接过程对第一道焊缝没有影响。因此,在本文焊接参数下,后一道焊接过程能够对前一道焊缝进行回火乃至正火,即只有相邻的两道焊缝才有回火作用。

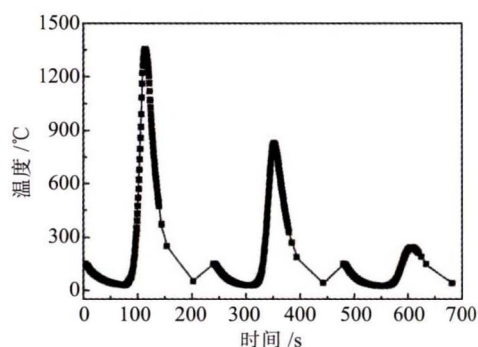


图6 第一道焊缝过热区在整个焊接过程中的热循环  
Fig.6 Thermal cycle of the first weld superheat zone in the whole welding process

单层堆焊时各焊道回火区的位置关系如图7(a)所示。后续第一个焊道的回火区能够覆盖前一个焊道约25%的区域。因此,在搭接度为50%的情况下单层堆焊仅有约25%的区域能够达到被回火的效果。搭接度为75%时单层堆焊才能达到近似完全回火的效果。基于温度场分析结果(图2、3),在焊接参数、材料等相同的情况下,第二层堆焊时的温度分布应该与第一层的温度分布类似。因此,本文预测了堆焊第二层时的回火效果,如图7(b)所示。在第一层余高磨掉1mm的情况下,第二层第一个焊道对

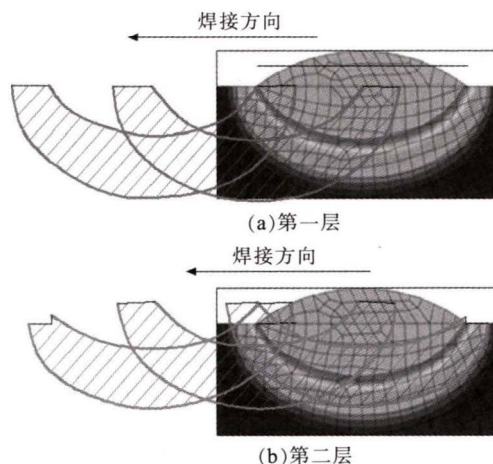


图7 回火区的位置关系(搭接度50%)  
Fig.7 Position relation of tempering zone (overlap degree 50%)

第一层第一个焊道有显著的回火作用,与第一层第二个焊缝协同作用下能够使得第一层第一个焊缝的大部分区域得到回火。本文焊接参数在搭接度为50%的情况下可以堆焊多层时,除最后一层外,其余堆焊层均能较好地得到回火。因此,多层多道焊接时,上面焊层能够显著扩大下层焊道的回火区域,但是需要将最后一层焊层进行单独的升温处理以达到回火效果。

### 3 结论

(1)每道焊缝在焊接前均经过150℃的预热,在焊接工艺参数、焊接材料相同的情况下,三个焊道在焊接过程中的温度分布基本相同。

(2)焊缝搭接度为50%时,单层堆焊时焊缝一侧回火区域的总宽度为3.6~4.6mm,约为焊缝宽度的25%。

(3)在本文焊接条件下,单层堆焊时仅后续第一道焊缝的焊接过程对前道焊缝存在回火作用,覆盖区域约为焊缝宽度的25%。因此,单层堆焊时搭接度达到75%以上时后期焊缝的焊接过程才能达到给前期焊道完全回火的效果。

#### 参考文献:

- [1] 田龙标,朱志平,张春雷,等. 尿素对燃煤电厂水冷壁管15CrMo钢腐蚀特性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2019,39(2):114-122.
- [2] 韦丽娃,谷昭阳,王云峰. 注汽锅炉用水中20G和15CrMo腐蚀速度的研究[J]. 热加工工艺,2016,45(2):72-75.

(下转第131页)

艺。经过实验验证,本文提出的修正策略切实可行,在同一偏转角度下修正后的束斑大小较修正前直径小0.2mm,代表了在目前的工艺标准下,修正后的设备可以加工更大的零件而不降低零件的加工精度。

大角度偏转时的电子束散焦现象是造成增材制造设备工艺水平下降的重要因素,通过修正聚焦电流减小散焦程度提高工艺水平是研究方向之一,但是聚焦电流修正法也有其局限性,其修正效果还可以提升。在本次实验中发现,通过补偿电子束束流可以一定程度上弥补聚焦电流修正法的局限性,这将是未来研究的方向。这些提高工艺水平方法的研究对未来增材制造行业的发展有着深远的意义。

### 参考文献:

- [1] 刘勇,任香会,常云龙,等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺,2018,47(19):15-19.
- [2] 周宸宇,罗岚,刘勇,吴进. 金属增材制造技术的研究现状


### (上接第121页)

- [7] Fujii H T, Goto Y, Sato Y S, et al. Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel [J]. Scripta Materialia, 2016, 116(5): 135-138.
- [8] Chen Q, Lin S, Yang C, et al. Grain fragmentation in ultrasonic-assisted TIG weld of pure aluminum[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 39(3): 403-413.
- [9] Li X, Liang X, Zhang Z, et al. Cold joining to fabricate large size metallic glasses by the ultrasonic vibrations[J]. Scripta Materialia, 2020, 185(6):100-104.
- [10] Ding Y L, Wang J G, Zhao M, et al. Effect of annealing temperature on joints of diffusion bonded Mg/Al alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(2): 251-258.
- [11] Peng H, Chen D L, Bai X F, et al. Microstructure and


### (上接第125页)

- [3] 袁超,胡正飞,吴细毛. 热电厂15CrMo钢管高温蒸汽氧化腐蚀机理研究[J]. 材料热处理学报,2012,33(S1):90-95.
- [4] 祁庆花,刘林,魏海东,等. 模拟焊后热处理对15CrMo钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2018,43(7):127-130.
- [5] Aloraier A, Al-Mazrouee A, Price J W H, et al. Weld repair practices without post weld heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: a review [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2010, 87(4): 127-133.
- [6] 刘伟,康全,李阳,等. 热处理对Inconel625/X90堆焊层组织及性能的影响[J]. 表面技术,2018,47(6):83-88.
- [7] 陈忠兵,李佳良,张汉波,等. 回火焊道技术在含缺陷或损伤部件修复中的应用[J]. 焊接,2018(8):6-10.

[J]. 热加工工艺,2018,47(6):9-14.

- [3] 产玉飞,陈长军,张敏. 金属增材制造过程的在线监测综述[J]. 材料报,2019,33(17):2839-2846.
- [4] 张学军,唐思熠,肇恒跃,等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程,2016,44(2):122-128.
- [5] 沈春龙,彭勇,周琦,等. 高能电子束活性区空间能量密度测量系统[J]. 焊接学报,2017,38(10):16-20.
- [6] 张业成,周琦,彭勇. 焊接用三极电子枪设计及电磁聚焦系统研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(4):9-11.
- [7] 蔡树立,张向东,张建飞,等. 单线横沟式电子束聚焦线圈聚点束斑试验研究[J]. 装备制造技术,2019(5):64-67.
- [8] 朱进鹏,韦寿祺,刘胜. 一种用于偏扫电流校正的特征点参数采集装置[J]. 强激光与粒子束,2017,29(7):64-70.
- [9] 王丹,贺永宁,李韵. 电子束撞击介质表面引发的带电现象分析[J]. 中国空间科学技术,2017,37(2):1-10.
- [10] 李维勤,李超. 数百eV低能电子束照射电介质样品带电效应[J]. 固体电子学研究与进展,2018,38(2):95-100.
- [11] 韦寿祺,李雪娇,莫金海,等. 电子束快速成型机聚焦及偏扫系统的工程实现[J]. 真空科学与技术学报,2015,35(5):634-638.
- [12] 周婧,郭世海,易葵. 计算机控制的电子束偏转设备: ZL200610028628.8[P]. 2006-12-13. 

mechanical properties of Mg-to-Al dissimilar welded joints with an Ag interlayer using ultrasonic spot welding [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(2):552-563.

- [12] Macwan A, Patel V K, Jiang X Q, et al. Ultrasonic spot welding of Al/Mg/Al tri-layered clad sheets [J]. Materials & Design, 2014, 62(10): 344-351.
- [13] 张义福,张华,况菁,等. 铜/铝铝耳超声波焊接响应曲面优化分析[J]. 材料导报,2019,33(6):1842-1847.
- [14] 赵玉津,陈瑶,罗震,等. 铝铜超声波焊接接头性能的正交试验分析[J]. 天津大学学报,2018,51(7):735-740.
- [15] 胡赓祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,2010:128-139.
- [16] 谷晓燕,刘婧,刘东锋,等. 焊接能量对Mg/Al超声波焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 机械工程学报,2019,55(6):23-31. 

[8] 张亦良,石显,赵建平,等. 基于新型回火焊道的焊接残余应力评价[J]. 焊接学报,2012,33(7):49-52.

- [9] Hirano S, Hamasaki K. Maintenance activities for alloy 600 in PWR plants [J]. Journal of Advanced Maintenance, 2010, 2: 12-20.
- [10] 秦建,吕晓春,杜兵,等. 回火焊道焊接技术中焊接接头几何尺寸影响因素的分析[J]. 焊接学报,2014,35(6):17-20.
- [11] Chih C W, Wen T L. A study of temper bead technique on A508 steel welds [J]. Advanced Materials Research, 2011, 295-297: 1938-1942.
- [12] 胡志全,郭利峰,邹贵生,等. SA508-Gr.3钢变参数回火焊道焊接接头组织与性能研究[J]. 焊接,2015(7):21-25.
- [13] 邓文英,宋立宏. 金属工艺学(上册)[M]. 第六版. 北京:高等教育出版社,2016年. 