

基于流变应力的角焊缝强度分析评定方法研究*

RESEARCH ON THE STRENGTH EVALUATION METHOD OF FILLET WELD BASED ON FLOW STRESSES

陈明亚^{**1,2} 赵万祥^{1,2} 高红波^{1,2} 周 帅^{1,2} 林 磊^{1,2} 彭群家^{1,2} 史芳杰^{1,2} 余伟炜^{1,2}

(1. 苏州热工研究院有限公司, 苏州 215004)

(2. 国家核电厂安全及可靠性工程技术研究中心, 苏州 215004)

CHEN MingYa^{1,2} ZHAO WanXiang^{1,2} GAO HongBo^{1,2} ZHOU Shuai^{1,2} LIN Lei^{1,2} PENG QunJia^{1,2}

SHI FangJie^{1,2} YU WeiWei^{1,2}

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China)

(2. National Nuclear Power Plant Safety and Reliability Engineering Research Center, Suzhou 215004, China)

摘要 由于施工简单,角焊缝广泛应用于金属部件的连接之中。角焊缝中存在明显非自平衡的拉伸焊接残余应力,现有的评估规范中尚缺乏明确的应力校核方法。在《钢结构设计规范》等评定规范中,给出的强度计算准则未考虑角焊缝的弯矩载荷和焊接残余应力影响,限制了相关方法的应用范围。基于角焊缝连接件的强度实验测试和理论研究,提出了基于焊缝材料流变应力的强度分析评定的方法。角焊缝连接件强度实验的结果表明,最大拉伸载荷对应的焊缝强度与实验测试抗拉和屈服强度差值的均值较为接近。由此可认为,角焊缝中均匀存在接近屈服应力的焊接残余应力,在加载过程中,角焊缝中应力增加到抗拉强度时发生失效。在纯剪切条件下,角焊缝连接件的最大承载载荷与拉伸载荷作用下的数值接近。在考虑角焊缝材料焊接残余应力的条件下,基于流变应力的角焊缝评定准则中材料评定系数为0.8,并间接给出了在拉伸和弯矩载荷作用下的角焊缝连接件的评定准则。

关键词 角焊缝 强度分析 流变应力 实验研究

中图分类号 TL351.6

Abstract Due to the simple construction, fillet welds are often widely used in the connection of metal components. However, the non-self-balancing welding residual stress in the fillet weld is obvious, and the existing evaluation codes and standards still lack a clear stress checking method. In the assessment codes such as Code for design of steel structures, the influence of bending moment load and welding residual stress of fillet weld isn't considered in the given strength calculation criterion, which limits the application range of related methods. Based on the experimental test and theoretical research on the strength of fillet weld joints, a method of strength evaluation based on the flow stress of weld material was proposed. The strength experiment results of fillet weld connectors show that the weld strength corresponding to the maximum tensile load is very close to the mean value of the difference between the tensile and yield strength of the experimental test. It can be considered that the welding residual stress in the fillet weld is close to the yield stress, and the failure occurs when the stress in the fillet weld increases to the tensile strength during the loading process. Under pure shear condition, the maximum load of fillet weld connector is close to the value under tensile load. Under the condition of considering the welding residual stress of fillet weld material, the material evaluation coefficient of fillet weld evaluation criterion based on flow stress is set to be 0.8, and the evaluation criterion of fillet weld connector under tensile and bending moment load is also indirect given.

Key words Fillet weld; Strength analysis; Flow stress; Experimental research

Corresponding author: CHEN MingYa, E-mail: chenmingya200852@163.com

The project supported by the National Key Research & Development Program (No.2020YFB1901500, 2021YFB3702602).

Manuscript received 20230406, in revised form 20230511.

0 引言

角焊缝指的是沿两直交或近直交零件的交线所

焊接的焊缝,常在金属结构的连接中使用。角焊缝中存在明显非自平衡的拉伸焊接残余应力,通常可达到焊缝材料的屈服强度^{[1]84-90[2]334-338}。现有的评估规范中

*20230406收到初稿,20230511收到修改稿。国家重点研发计划(2020YFB1901500,2021YFB3702602)资助。

**陈明亚,男,1985年生,江苏苏州人,汉族,苏州热工研究院有限公司正高级工程师,博士,主要研究方向为反应堆结构力学评定。

尚缺乏角焊缝明确的应力评定方法,多仅给出角焊缝的应力增强系数^[3],如我国行业标准 JB 4732—1995^[4]和 123 和美国机械工程师学会(American Society of Mechanical Engineers, ASME)规范^[5]均都对角焊缝给出了疲劳强度减弱系数,需要在容器的疲劳分析和设计中加以考虑。在国家标准 GB 50017—2017^[6]等参考规范中,给出的强度计算准则未考虑角焊缝的弯矩载荷和焊接残余应力的影响,限制了相关方法的应用范围。

金属结构的强度分析方法包含公式法、应力分类法、弹塑性分析法和实验分析法。现有规范中广泛采用弹塑性的应力分类法是在计算机发展水平较低阶段提出的,是采用了弹性力学技术解决塑性问题的替代手段,或基于理想塑性材料的假设进行简化分析评估^[7]。随着计算机硬件的发展和商用有限元软件的日趋成熟,在工程上直接采用弹塑性分析成为可能。同时,现有的规范^[4]已逐步发展为以失效模式为主线,评定弹塑性分析方法中材料抗拉强度安全系数由 3.0 调整至 2.4^[8]。角焊缝存在明显的非自平衡拉伸焊接残余应力,而在分析设计中采用的理想塑性材料模型中,忽略了材料拉伸时的硬化特性。为了提高塑性极限载荷设计安全裕量的利用率,研究学者提出基于流变应力(屈服强度与抗拉强度的均值)的材料理想塑性分析模型^[9]。

针对上述问题,本文拟基于角焊缝连接件的强度试验测试和理论研究,采用焊缝材料流变应力的强度分析评定方法,研究角焊缝连接件在拉压、弯矩载荷作用下的强度评估准则。

1 角焊缝强度评估方法

1.1 钢结构评估规范中参考方法

如图 1 所示^[5],对于直角焊缝,《钢结构设计规范》提供了焊缝形心位置承受拉压或剪切载荷作用下的强度校核方法。在拉压载荷 N_l 作用下,拉压应力 σ_f 的限值如式(1)所示;在作用力平行于焊缝的剪切载荷 N_s 作用下,剪切应力 τ_f 的限值如式(2)所示。

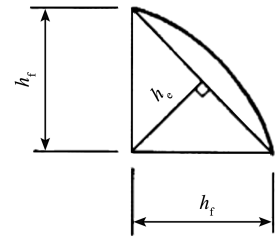
$$\sigma_f = \frac{N_l}{h_e l_w} \leq \beta_f f_f^w \quad (1)$$

$$\tau_f = \frac{N_s}{h_e l_w} \leq f_f^w \quad (2)$$

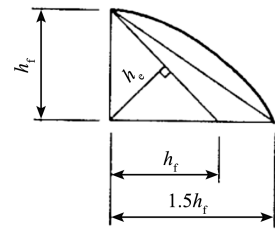
式中, h_e 为角焊缝的计算厚度,对于直角角焊缝等于 $0.7h_f$ (图 1); l_w 为角焊缝的计算长度; f_f^w 为角焊缝强度的设计值; β_f 为角焊缝强度的设计值增大系数,对于承受静力载荷或间接承受动载荷的取值为 1.22,对直接承受动载荷的取值为 1.0。

在组合载荷作用下,结构强度的限值为

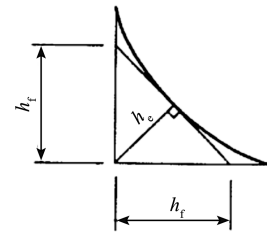
$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w \quad (3)$$



(a)



(b)



(c)

图 1 直角焊缝的截面

Fig. 1 Cross section of right angle weld

1.2 弯矩载荷作用下塑性极限载荷分析

如式(1)~式(3)所示,《钢结构设计规范》未考虑角焊缝承受弯矩载荷的情况,这限制了其实际应用和强度评价。本文基于材料的理想塑性假设,研究角焊缝连接件在弯矩载荷作用下的极限载荷。如图 2 所示,当角焊缝承载截面达到全屈服应力 R_e 时,参考薄壁承载容器的假设,弯矩载荷 M 数值大小可依据式(4)积分获得。

$$M = 2 \left[\int_0^{0.5\pi} t r^2 \sin \psi d\psi R_e + \int_{-0.5\pi}^0 t r^2 \sin \psi d\psi R_e \right] \quad (4)$$

式中, θ 为角焊缝承载截面拉伸区域与压缩区域的夹角; ψ 为弯矩载荷积分角度变量; t 为角焊缝承载截面的壁厚。

当仅受弯矩载荷时,角度伸区域与压缩区域的夹角 θ 为 0,可计算出角焊缝纯弯矩条件下的极限弯矩载荷 M_L 为

$$M_L = 4tr^2 R_e \quad (5)$$

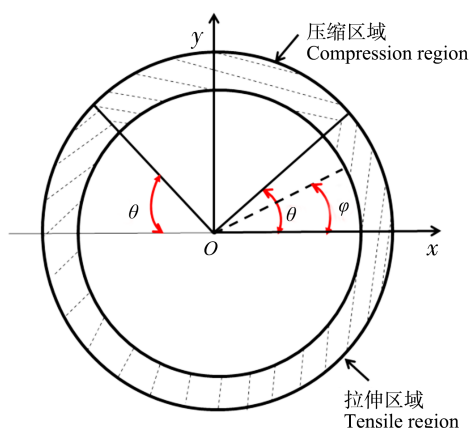


图 2 角焊缝承载截面临界载荷分析

Fig. 2 Analysis of critical loads at the cross section of the right angle weld

1.3 基于流变应力的评估方法

如图 3 所示,在分析设计中采用了理想塑性材料模型,忽略了材料拉伸时的硬化特性。角焊缝存在明显非自平衡的拉伸焊接残余应力,通常是能够达到焊缝材料屈服强度的拉伸应力,这为其强度评价带来了不便。对于一个矩形截面梁,当受拉伸载荷时,应力等于屈服强度便达到结构极限载荷;当受弯曲载荷时,仅矩形表面处应力达到屈服强度时结构仍能承载,只有全截面屈服时才达到结构极限载荷。为了进一步提高塑性极限载荷设计安全裕量的利用率,研究者提出基于流变应力的材料理想塑性分析模型^{[9]188-192}。

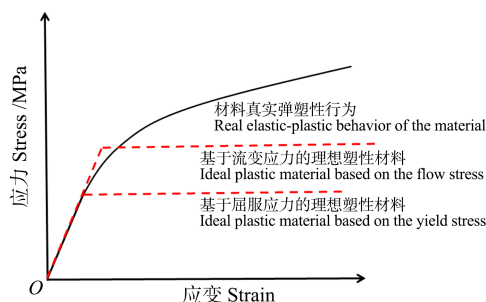


图 3 分析设计中的材料许用应力确定方法

Fig. 3 Determination method of material allowable stress in the design and analysis

角焊缝连接材料通常具有较大的强屈比,即通过硬化可提高屈服强度。对于角焊缝材料承受载荷后,截面位置处的材料会发生硬化,从而提高该处的屈服强度(理论上最多可达材料的抗拉强度)^[10-11]。钢铁材料通过加工硬化提高材料许用应力的方法已在工程领域获得了较广泛的应用^[12]。2004年,韩飞^[13]对 304 不锈钢的加工硬化情况进行了研究;2017年,马吉苗等^[14]分析了 Cu-Ni-Si-P 合金的加工硬化特性;2019年,李凯^[15]研究了核电厂用 304 不锈钢加工硬化对局部力学性能的影响,结果表明随着拉伸率的增大,应力-应变曲线发生了明显变化,达到软化损伤前应变明显减

小(材料塑性明显降低)。

2 角焊缝强度试验测试与分析研究

2.1 强度试验测试

以镍基奥氏体材料 NC30Fe 制备角焊缝样件,角焊缝强度测试样件如图 4 所示。角焊缝通过 NC30Fe 镍基合金焊丝焊接形成^[16],以保证焊缝材料和所连接的圆棒及圆板具有同样的强度。如图 5 所示,在试验中分别施加拉伸和纯剪切载荷。

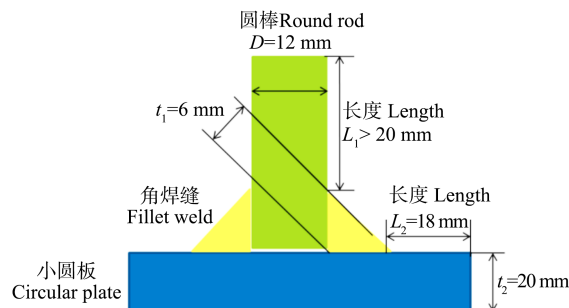


图 4 角焊缝强度测试样件

Fig. 4 Test sample of the fillet weld strength

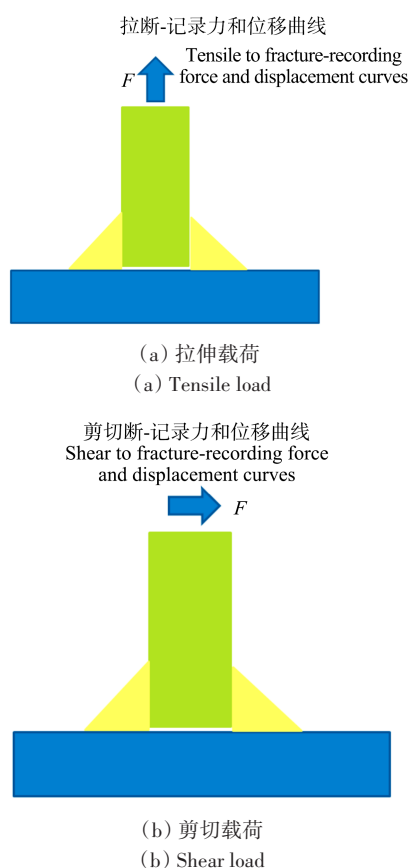


图 5 角焊缝强度测试载荷

Fig. 5 Loads of strength test for the fillet weld

角焊缝强度测试试验在精密电子万能材料试验机上进行,试验样件如图 6(a)所示,在拉伸载荷作用下的断裂件如图 6(b)所示,拉伸载荷作用下试验测试获得的载荷位移如图 7 所示。

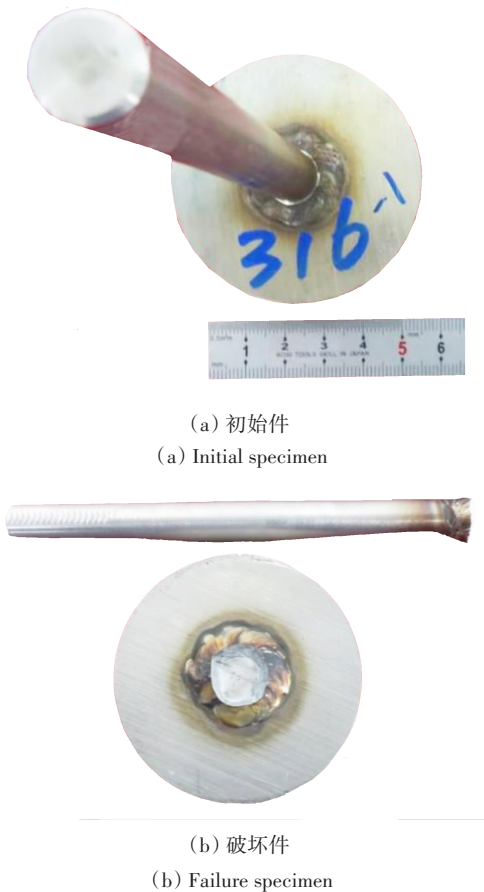


图6 角焊缝强度测试真实样件
Fig. 6 Real specimen of the fillet weld strength test

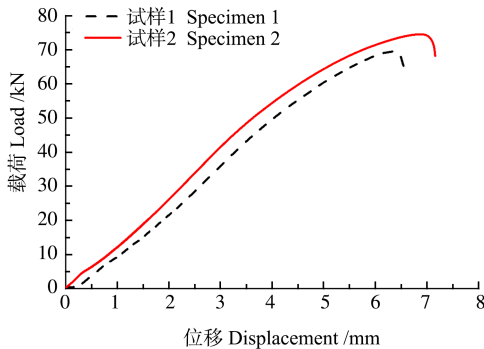


图7 拉伸载荷作用下试验测试获得的载荷-位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curves obtained by the experimental test under the tensile load

2.2 基于流变应力的强度评价

通过拉伸试验获得的NC30Fe材料的拉伸性能数据如表1所示,材料屈服强度的平均值为390 MPa,流变应力为575.5 MPa,抗拉与屈服强度差值的平均值为371 MPa。

角焊缝强度测试结果如表2所示,试验最大拉伸载荷对应的焊缝强度分别为368.97、395.58 MPa,其与试验测试抗拉和屈服强度差值的均值极为接近,偏差仅分别为-1%和7%。由此可认为,角焊缝中均存在接近屈服应力的焊接残余应力^{[1]84-90[2]334-338},在加载

过程中,角焊缝中应力增加到抗拉强度时发生失效。

表1 NC30Fe材料的拉伸性能
Tab. 1 Tensile property of NC30Fe material

编号 Number	屈服 强度 Yield strength/ MPa	抗拉 强度 Tensile strength/ MPa	流变 应力 Flow stress/ MPa	流变应力 平均值 Average value of the flow stress/ MPa	抗拉与屈服 强度差值 Difference between the tensile and yield strength/ MPa	差值的平 均值 Average value of the difference/ MPa
1	387	762	574.5		375	
2	393	766	579.5	575.5	373	371
3	390	755	572.5		365	

表2 角焊缝拉伸载荷作用下的试验测试结果

Tab. 2 Experimental test results of the fillet weld under the tensile load

编号 Number	试验最大拉 伸载荷 Maximum experimental tensile load/ kN	试验最大拉伸载荷 对应的焊缝强度 Weld strength corresponding to the maximum experimental tensile load/ MPa	试验测试抗拉和 屈服强度差值 Experimental test difference between the tensile and yield strength /MPa	偏差 Deviation/ %
1	69.46	368.97		-1
2	74.47	395.58	371	+7

基于流变应力的角焊缝评定准则分析如表3所示,参考EN 13445—2002和ASME规范第Ⅷ卷中结构强度设计2.4倍安全裕量设置的要求,本文所研究材料所能利用的强度裕量为154.6 MPa,其对应于流变应力与屈服强度差值的83%。

表3 基于流变应力的角焊缝评定准则分析

Tab. 3 Analysis on evaluation criterion of the fillet weld based on the flow stress

项目 Item	值 Value/MPa	备注 Note
抗拉与屈服强度差值 Difference between the tensile and yield strength (抗拉与屈服强度差 值)/2.4	371	屈服强度理论上可提高的数值 Theoretical value of yield strength can be improved
(Difference between the tensile and yield strength)/2.4	154.6	考虑2.4倍的安全裕量需求 Consider a safety margin requirement of 2.4 times
流变应力与屈服强度差值 Difference between the yield strength and flow stresses	185.5	基于流变应力强度设计的承 载裕量 Bearing margin based on the flow stress strength design

因此,通过上述试验和理论研究,提出在考虑角焊缝材料焊接残余应力的条件下,基于流变应力的角焊缝评定准则的材料评定系数为0.8,具体评定准则为

$$\sigma \leq 0.8\sigma_f \tag{6}$$

如图5所示,对角焊缝试样施加纯剪切载荷进行强

度测试。在纯剪切载荷作用下,角焊缝样件的最大承载载荷分别为77.79、75.66 kN,在纯拉伸条件下的最大承载载荷数值接近。基于第1.2节推导的角焊缝在弯矩载荷作用下临界载荷,参考式(6),本研究中基于流变应力的角焊缝在弯矩载荷作用下的评定准则为

$$M \leq 4tr^2(0.8\sigma_f) = 3.2tr^2\sigma_f \quad (7)$$

3 结论

本文基于角焊缝连接件的强度试验测试和理论研究,获得以下结论:

1)角焊缝连接件强度试验结果表明,最大拉伸载荷对应的焊缝强度与试验测试抗拉和屈服强度差值的均值极为接近,偏差分别仅为-1%和7%。由此可认为,角焊缝中均在接近屈服应力的焊接残余应力,在加载过程中,角焊缝中应力增加到抗拉强度时发生失效。

2)本文的试验结果表明,在纯剪切条件下,角焊缝连接件的最大承载载荷与拉伸载荷作用下的数值接近。

3)研究提出了在考虑角焊缝材料焊接残余应力的条件下,基于流变应力的角焊缝评定准则的材料评定系数为0.8,并提出了在拉伸和弯矩载荷作用下的角焊缝连接件的评定准则。

参考文献(References)

- [1] 胡珂,魏国前,闫梦煜,等. 晶粒分布形态对焊趾短裂纹疲劳行为影响的模拟[J]. 机械强度,2023,45(1):84-90.
HU Ke, WEI GuoQian, YAN MengYu, et al. Simulation of effects of grain distribution morphology on fatigue behavior of short cracks at weld toe[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1): 84-90 (In Chinese).
- [2] 吴海辉,王峰照,覃全宁,等. 基于焊接仿真的承压管道开孔设计分析[J]. 化工机械,2022,49(2):334-338.
WU HaiHui, WANG FengZhao, QIN QuanNing, et al. Design analysis of pressure-bearing pipe opening based on welding residual stress simulation [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2022, 49(2): 334-338 (In Chinese).
- [3] 郭雪华,王小敏,夏少青,等. 角焊缝对压力容器疲劳强度的影响[J]. 石油化工设备技术,2016,37(6):1-6.
GUO XueHua, WANG XiaoMin, XIA ShaoQing, et al. Effect of fillet weld on fatigue strength of pressure vessel[J]. Petrol-chemical Equipment Technology, 2016, 37(6): 1-6 (In Chinese).
- [4] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 钢制压力容器——分析设计标准:JB 4732—1995[S]. 北京:中华人民共和国机械工业部,2005:6-123.
National Technical Committee of Boiler and Pressure Vessel Standardization. Steel pressure vessels-analytical by design standard: JB 4732—1995[S]. Beijing: Ministry of Machine-Building Industry of the PRC, 2005: 6-123 (In Chinese).
- [5] ASME. ASME boiler and pressure vessel code, section II materials [S]. New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2018: 215-361.
- [6] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范:GB 50017—2003 [S]. 北京:中国计划出版社,2003:21-65.
Ministry of Construction P. R. China. Code for design of steel structures: GB 50017—2003 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2003: 21-65 (In Chinese).
- [7] 苏文献. 承压设备强度数值模拟若干问题及其工程应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2003:2-63.
SU WenXian. Some problems on numerical simulation of strength of pressure equipment and its engineering application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003: 2-63 (In Chinese).
- [8] 陈明亚. 压水堆核电站一回路管道结构完整性评定研究[D]. 济南:山东大学,2022:5-36.
CHEN MingYa. Research on structural integrity assessment of primary loop pipes in pressurized water reactor nuclear power plants [D]. Jinan: Shandong University, 2022: 5-36 (In Chinese).
- [9] 张慧敏. 复杂载荷下含体积性缺陷弯管的塑性极限载荷[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版),2011,11(3):188-192.
ZHANG HuiMin. Plastic limit load of elbow with volume defect under complex load [J]. Journal of Shanghai Institute of Applied Technology (Natural Science Edition), 2011, 11(3): 188-192 (In Chinese).
- [10] PREISS R. On the shakedown analysis of nozzles using elastoplastic FEA[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999, 76(7): 421-434.
- [11] 陈明亚,向文欣,祁爽,等. 基于塑性极限载荷的奥氏体不锈钢承压管道役致裂纹接受标准研究[J]. 机械强度,2023,45(2):469-473.
CHEN MingYa, XIANG WenXiang, QI Shuang, et al. Study on acceptance criteria of service induced cracks for Austenitic stainless steel piping based on plastic limit load criteria [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 469-473 (In Chinese).
- [12] 郭玉梁,魏冰阳,古德万,等. 20CrNiMo材料的强度试验与可靠性评价[J]. 机械强度,2023,45(1):60-67.
GUO YuLiang, WEI BingYang, GU DeWan, et al. Strength test and reliability evaluation of 20CrNiMo material [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(1): 60-67 (In Chinese).
- [13] 韩飞. 304奥氏体不锈钢冷加工硬化及退火软化的研究[D]. 长沙:中南大学,2004:1-103.
HAN Fei. Study on cold work hardening and annealing softening of 304 austenitic stainless steel[D]. Changsha: Central South University, 2004: 1-103 (In Chinese).
- [14] 马吉苗,刘峰,刘龙明,等. Cu-Ni-Si-P合金冷加工硬化及再结晶温度的研究[J]. 有色金属科学与工程,2017,8(2):43-46.
MA JiMiao, LIU Feng, LIU LongMing, et al. Study on cold work hardening and recrystallization temperature of Cu-Ni-Si-P alloy [J]. Nonferrous Metal Science and Engineering, 2017, 8(2): 43-46 (In Chinese).
- [15] 李凯. 冷加工硬化对核电结构局部力学性能影响及获取方法研究[D]. 西安:西安科技大学,2019:23-54.
LI Kai. Research on the influence of cold work hardening on local mechanical properties of nuclear power structure and its acquisition method [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019: 23-54 (In Chinese).
- [16] 谷雨,张俊宝,黄逸峰,等. 焊接工艺对690镍基合金焊丝熔敷金属高温失塑裂纹敏感性影响研究[J]. 电焊机,2019,49(4):206-210.
GU Yu, ZHANG JunBao, HUANG YiFeng, et al. Research on influence of welding technology on DDC susceptibility of deposited metal of 690 nickel base alloy welding wires at high temperature [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(4): 206-210 (In Chinese).