

DOI: 10.11973/jxgccl202112015

热输入对电机支架不同位置 V 型接头焊接热循环和残余应力的影响

李 刚¹, 关 锰¹, 张艳敏¹, 范灵利¹, 李连海¹, 林 斌¹, 杨 康²

(1. 沈阳鼓风机集团核电泵业有限公司, 沈阳 110142; 2. 沈阳航空航天大学, 辽宁省通用航空重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 利用非线性有限元软件 Marc 建立含 6 处 V 型接头的管状电机支架模型, 模拟研究了热输入对 6 处 V 型接头起弧端热循环以及焊缝区残余应力的影响。结果表明: 热输入越高, 起弧端温度峰值越高, 接头在加热和冷却过程中的受热越均匀; 热输入对焊缝前端和末端焊接残余应力的影响较小; 对于焊缝中段, 热输入越大, 焊接残余应力越小, 并且除了接头 II 外, 其他接头焊缝中段残余应力均表现为拉应力。

关键词: 管状电机支架; 多层焊; V 型接头; 热输入; 残余应力

中图分类号: O342

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)12-0084-06

Effect of Heat Input on Welding Thermal Cycle and Residual Stress of V-joints at Different Positions of Motor Bracket

LI Gang¹, GUAN Meng¹, ZHANG Yanmin¹, FAN Lingli¹, LI Lianhai¹, LIN Bin¹, YANG Kang²

(1. Shenyang Blower Group Nuclear Power Pump Co., Ltd., Shenyang 110142, China; 2. Liaoning Key Laboratory of General Aviation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: A tubular motor bracket model with six V-joints was established with a nonlinear finite element software Marc. The influence of heat input on the thermal cycle at the arcing end and the residual stress in welds of six V-joints were simulated and studied. The results show that the higher the heat input, the higher the peak temperature at the arcing end, and the more uniform the heat of the joint during heating and cooling processes. The heat input had a small effect on the welding residual stress at the front and end of the welds. For the middle of the welds, the greater the heat input, the smaller the welding residual stress; except for the joint II, the residual stresses in the middle of welds of other joints were all tensile stresses.

Key words: tubular motor bracket; multilayer welding; V-joint; heat input; residual stress

0 引 言

热输入是指焊接时输入给单位长度焊缝上的热能。热输入过大, 焊接时功率消耗增大, 易使接头中产生咬边等焊接缺陷, 同时也会导致较大的残余应力; 热输入过小, 则会产生未焊透、未熔合等焊接缺陷, 降低接头强度; 另外, 接头不同区域由于受到的热循环作用不同, 硬度和强度等力学性能存在差异,

特别是热影响区, 其力学性能的不均匀性更为严重和复杂。研究人员在焊接热输入对接头焊缝力学性能的影响方面进行了大量研究, 结果表明, 随着热输入的增大, 温度升高, 接头组织粗化, 力学性能下降^[1-10]。

在工业级大型结构件中, 各零部件间的连接主要依靠焊接。焊接过程中因温度变化而产生的残余应力不但会降低结构的刚度和稳定性, 在温度和介质的共同作用下还会降低结构的疲劳强度、抗脆断能力以及抵抗应力腐蚀开裂和高温蠕变开裂的能力。因此, 焊接残余应力是影响结构件使用寿命和制造质量的关键因素之一。工业级大型结构件焊接

收稿日期: 2020-09-23; 修订日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905355)

作者简介: 李刚(1980—), 男, 辽宁营口人, 高级工程师, 学士

接头主要采用V型接头、多层焊方法,多层焊时不同焊道的热胀冷缩会导致焊缝中产生较大应力,焊后消应力处理无法完全消除而形成残余应力。目前,有限元方法已广泛应用于焊接残余应力的研究中^[11-12]。但是,工业级大厚度构件的焊接结构复杂,实际模拟分析困难较大,相关研究报道较少。作者使用非线性有限元软件 Marc 建立了某型核电用泵体电机支架的有限元模型,研究了热输入对焊接热循环和残余应力的影响,并进行了试验验证。研究结果对工程技术人员制定相关焊接工艺具有一定的指导意义。

1 试验方法

整个电机支架为环状结构,如图1(a)所示,其轴向截面形状和接头位置如图1(b)所示,壁厚为50 mm。由图1可见,电机支架轴向从底部到顶部共有6处接头(I~VI),焊接方向沿环向,接头I~IV处的支架半径 R 为1 050 mm,接头V处的支架半径 R_1 为1 095 mm,接头VI处的支架半径 R_2 为1 162.5 mm。

电机支架母材和焊材均为Q235钢,焊丝直径为1.2 mm,材料热物理性能参数见表1。焊接工艺均为气体保护焊,采用直流电源,焊丝与电源正极相连,保护气体为75%Ar+25%CO₂(体积分数),气体流量为15~20 L·min⁻¹,焊接电流为200 A,电弧电压为25 V,热效率系数为0.75,根据电流、电压等参数计算得到的热输入为56.25 kJ·mm⁻¹。接头I~VI连续依次施焊,每个接头的坡口尺寸和焊接顺序均与图2中接头I相同,均为V型坡口,焊接10道次,对称施焊,每条焊道高度均为5 mm。

采用DD12型手持式X射线残余应力测试仪进

行残余应力测试,经过M点(如图2所示)沿环向选取10个等距离点进行测试,测试功率为100 W,扫描角度为-30°~30°,扫描时间为每点40 s。

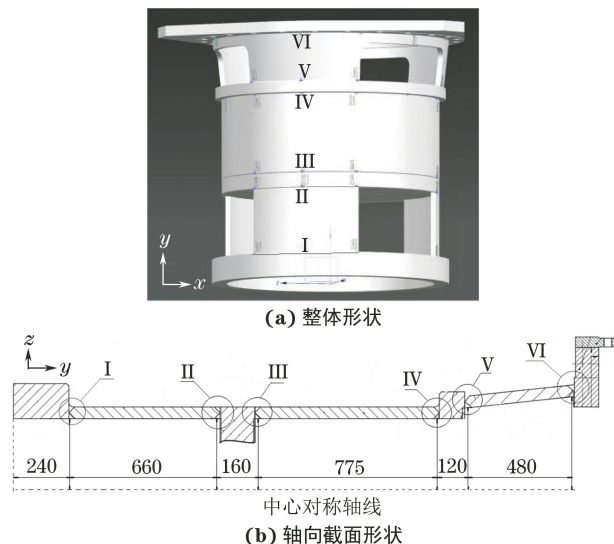


图1 电机支架整体形状和轴向截面形状

Fig.1 Overall shape (a) and axial section shape (b) of motor bracket

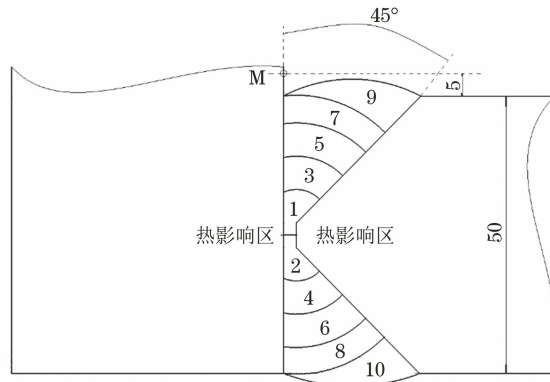


图2 接头I处的V型坡口尺寸和焊接顺序

Fig.2 V-shaped groove size and welding sequence at joint I

表1 Q235钢的热物理性能参数

Table 1 Thermo-physical property parameters of Q235 steel

温度/ ℃	导热系数/ (10 ³ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (10 ³ kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	换热系数/ (10 ² W·m ⁻² ·K ⁻¹)	泊松比	线膨胀系数/ K ⁻¹	弹性模量/ (10 ⁵ MPa)	屈服强度/ MPa
20	0.050	7.80	460	1.0	0.28	1.10	2.05	220.0
250	0.047	7.70	480	3.5	0.29	1.22	1.87	175.0
500	0.040	7.61	530	5.2	0.31	1.39	1.50	130.0
750	0.027	7.55	675	10.0	0.35	1.48	0.70	40.0
1 000	0.030	7.49	670	15.0	0.40	1.34	0.20	25.0
1 500	0.035	7.35	660	30.0	0.45	1.33	0.19	2.0
1 700	0.140	7.30	780	31.0	0.48	1.32	0.18	1.0
2 500	0.142	7.09	820	35.0	0.50	1.31	0.12	0.0

2 有限元模型的建立

为了细化网格、提高计算精度,取1/3电机支架进行建模。由图3可见,在1/3电机支架中,接头I和II处的焊缝长度为 $\pi R/3$,接头III和IV处的焊缝长度为 $2\pi R/3$,接头V处的焊缝长度为 $\pi R_1/3$,接头VI处的焊缝长度为 $2\pi R_2/3$ 。整个模型长度为2 535 mm,划分网格后的1/3电机支架模型如图4所示,焊缝处网格较密,热影响区次之,母材区网格较为稀疏,单元尺寸(长×宽×高)分别为2 mm×2 mm×2 mm,4 mm×4 mm×2 mm,10 mm×4 mm×2 mm。网格类型选用八节点六面体单元HEX(8),单元数为157 434个,节点数为30 896个。模拟时焊接工艺及顺序与试验保持一致,选择3组工艺参数:焊接电流200 A,电弧电压25 V,热效率系数0.75;焊接电流250 A,焊接电压30 V,热

效率系数0.75;焊接电流300 A,电弧电压37 V,热效率系数0.75。焊接速度均为4 mm·min⁻¹,焊接时间由各焊缝长度计算得到。由焊接电流、焊接电压等参数计算得到的焊接热输入分别为56.25, 84.38, 124.88 kJ·mm⁻¹。选择椭球形移动热源进行焊接模拟,其表达式^[8]为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{\pi abc\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \cdot \exp\left\{\frac{-3[z+v(\partial-t)]^2}{c^2}\right\} \quad (1)$$

式中: $q(x, y, z, t)$ 为输入热量; x, y, z 为空间坐标; t 为焊接时间; v 为焊接速度,4 mm·s⁻¹; Q 为热效率系数; a 为椭球形移动热源长度参数,5.0 mm; b 为椭球形移动热源宽度参数,4.0 mm; c 为椭球形移动热源垂直参数,5.0 mm; ∂ 为焊接热源的滞后时间。

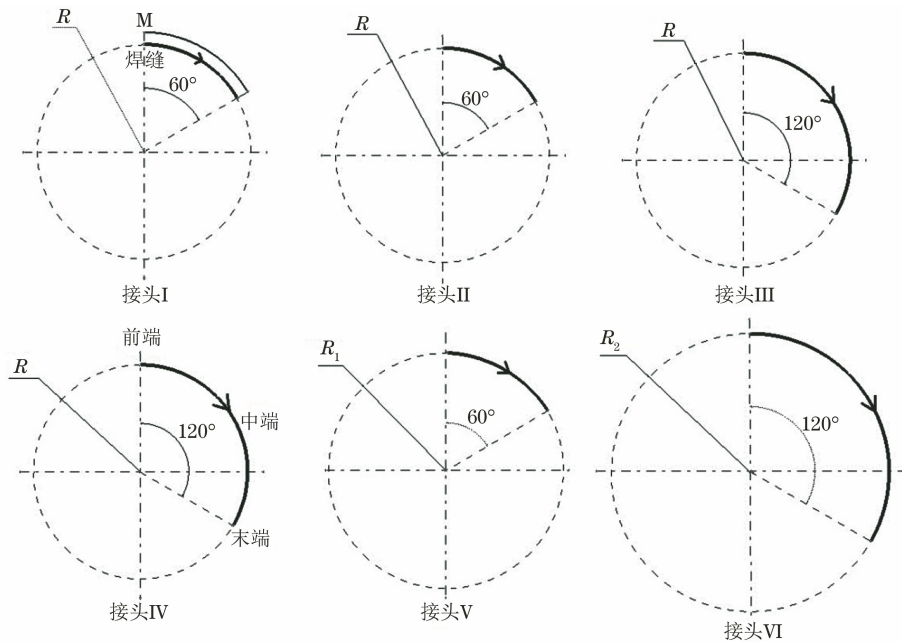


图3 1/3电机支架模型中各焊接接头的焊接方向及焊缝长度示意

Fig.3 Welding direction and weld length diagram of each welded joint in 1/3 motor bracket model

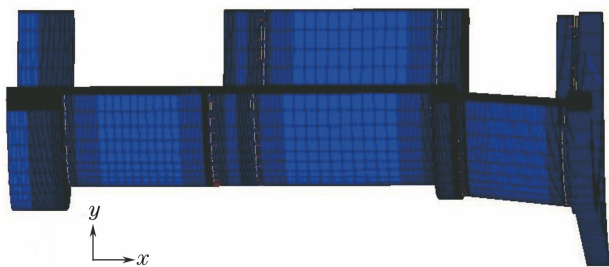


图4 1/3电机支架模型和网格划分

Fig.4 1/3 motor bracket model and mesh generation

3 结果与讨论

3.1 模型准确性验证

由图5可以看出,在位置M处平行于焊接方向的路径上,实际测试与有限元模拟得到的残余应力均为拉应力,沿焊接方向的变化趋势相同,最小残余应力均出现在焊接路径中间位置处。残余应力测试结果与有限元分析结果的相对误差均小于10%,吻合度较高,说明有限元模型的参数设置具有较高的准确度。

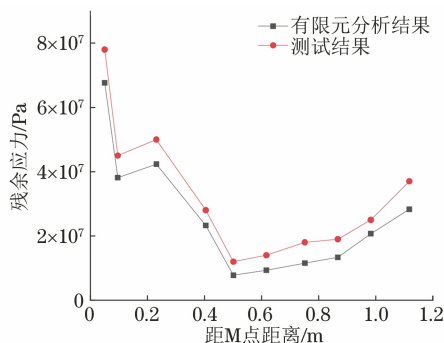
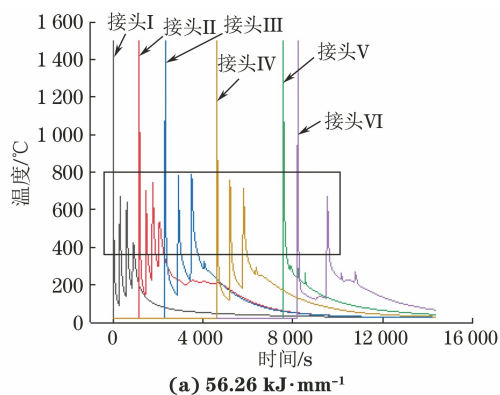
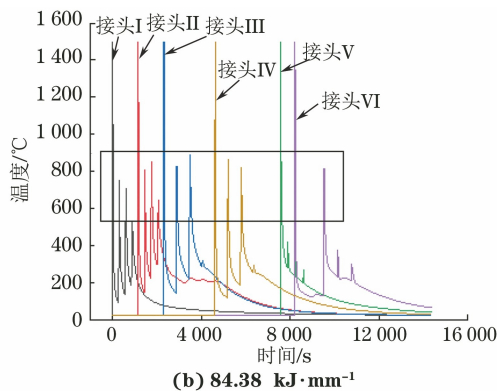


图5 焊接接头I热影响区M处残余应力沿焊接方向的变化曲线(热输入 $56.25 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$)

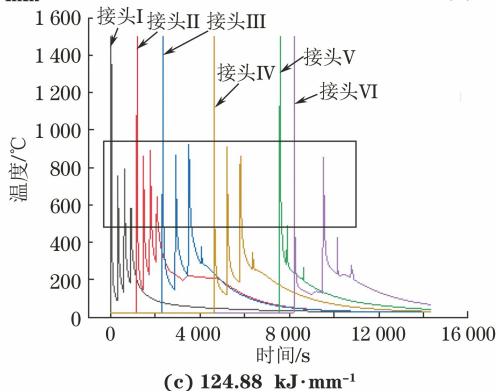
Fig.5 Variation curves of residual stress at heat affected zone M point of welded joint I along welding direction ($56.25 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ heat input)



(a) $56.26 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$



(b) $84.38 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$



(c) $124.88 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$

图6 不同热输入下不同焊接接头起弧端节点处的热循环曲线

Fig.6 Thermal cycle curves at arcing end nodes of different welded joints under different heat inputs

3.3 热输入对残余应力的影响

由图7可以看出:不同焊接接头第10焊道中的纵向(沿 x 轴方向)残余应力沿焊接方向的变化规律基本相同;在焊缝前端和末端,焊接热输入对残余应力的影响不大,在焊缝中段,残余应力均随热输入的增加而减小。接头I和接头VI处除了在焊缝前端出现残余压应力外,其余位置均为拉应力;接头II除了在焊缝前端和末端出现拉应力外,其余位置都是压应力;接头III和接头VI则相反,除

3.2 热输入对焊接热循环的影响

由图6可知:在3种焊接热输入下,不同焊接接头第1道焊起弧端节点的热循环曲线变化趋势相同。与焊接热源直接接触时,起弧端节点温度从室温瞬间升高到 1500°C ,达到焊材的熔点形成熔池;随着焊接时间的推移,起弧端节点因热源逐渐远离,温度下降,熔池凝固形成焊缝;在进行后续第2~10道焊时,第1道焊起弧端节点均会再次受热而温度升高,随后随着热源的远离温度又下降,因此热循环曲线出现多个温度峰值现象(图中方框)。随着焊接热输入的升高,在焊接第2~10道时的峰值温度升高(图中方框),接头加热和冷却时的温度分布更加均匀,这有利于降低焊接残余应力。

除了在焊缝前端和近末端处出现压应力外,其余位置都是拉应力;接头V第10焊道中的残余应力全是拉应力。

4 结论

(1) 建立含6处V型接头的电机支架模型,通过有限元模拟得到其接头I处热影响区的残余应力与实测残余应力沿焊接方向的变化趋势相同,且残余应力的相对误差均小于10%,模型准确。

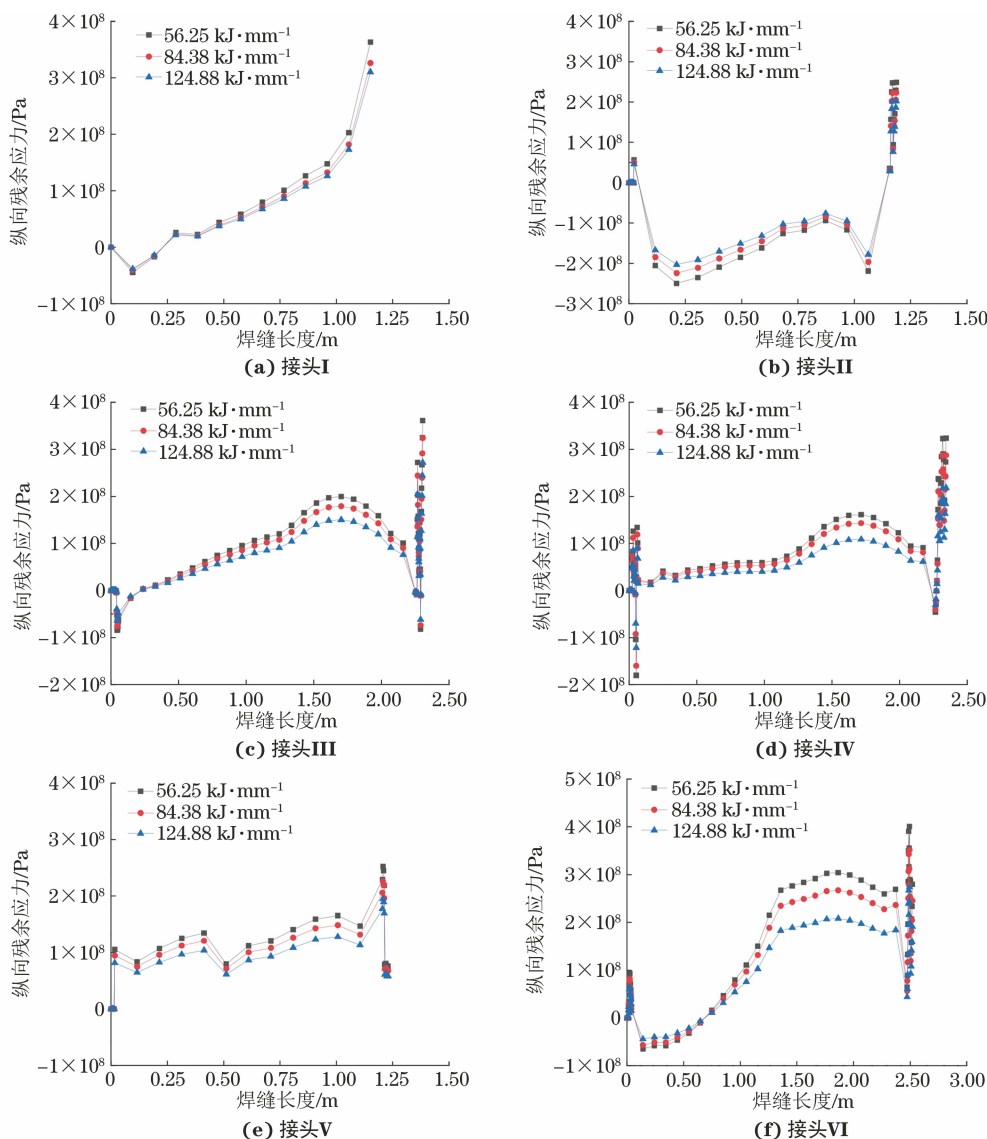


图7 不同热输入下不同焊接接头第10焊道中纵向残余应力沿焊接方向的变化曲线

Fig.7 Variation curves of longitudinal residual stress along welding direction of the tenth pass in different welded joints under different heat inputs: (a) joint I; (b) joint II; (c) joint III; (d) joint IV; (e) joint V and (f) joint VI

(2) 模拟得到电机支架上6处接头焊缝的纵向焊接残余应力的变化规律:对于焊缝前端和末端,热输入对焊接残余应力的影响较小;对于焊缝中段,热输入越大,焊接残余应力越小,并且除了接头II外,其他接头均表现为拉应力。

(3) 在进行多层多道焊时,热输入越大,起弧端峰值温度越高,接头在加热和冷却过程中的温度越均匀,这有利于减小残余应力。

参考文献:

- [1] 赵雷,乔汉文,梁军,等.焊接参数对T92/S30432异种钢焊接接头室温力学性能的影响[J].机械工程材料,2015,39(1):32-38.
- ZHAO L, QIAO H W, LIANG J, et al. Effects of welding

parameters on room temperature mechanical properties of T92/S30432 dissimilar welded joint [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 32-38.

- [2] 代雪佳,吴松林,成应晋,等.热输入对12MnNiCrMoV钢薄板焊接接头粗晶热影响区组织和性能的影响[J].机械工程材料, 2016, 40(11): 63-66.

DAI X J, WU S L, CHENG Y J, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of CGHAZ of 12MnNiCrMoV steel sheets welded joint [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(11): 63-66.

- [3] 王锡岭,李金燕,蔡俊,等.焊接热输入对核I级E2209-15焊条焊接2205双相不锈钢接头组织和性能的影响[J].金属功能材料, 2019, 26(6): 37-43.

WANG X L, LI J Y, CAI J, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of 2205 duplex stainless steel joint welded by nuclear grade I E2209-15 electrode [J].

- Metallic Functional Materials, 2019, 26(6): 37-43.
- [4] 杜全斌,路全彬,秦磊,等.热输入对5052铝合金焊接热影响区软化性能的影响[J].农机使用与维修,2020(1):28-30.
DU Q B, LU Q B, QIN L, et al. Effect of heat input on the softening performance of 5052 aluminum alloy welding heat affected zone [J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2020(1): 28-30.
- [5] 翟战江,曹洋,赵琳,等.热输入对DP600激光焊组织和力学性能的影响[J].钢铁研究学报,2019,31(6):582-591.
ZHAI Z J, CAO Y, ZHAO L, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(6): 582-591.
- [6] 肖波.热输入对S32750超级双相不锈钢TIG焊接接头腐蚀性能的影响研究[J].冶金与材料,2020,40(1):40-40.
XIAO B. Research on influence of heat input on the corrosion properties of TIG welded joints of S32750 super duplex stainless steel[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(1): 40-40.
- [7] 杨林,熊建坤,余勇,等.大热输入对焊条电弧焊低合金钢力学性能的影响[J].材料导报,2019,33(增刊2):424-427.
YANG L, XIONG J K, YU Y, et al. Effect of high heat input on mechanical properties of low alloy steel by electrode arc welding[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2): 424-427.
- [8] 冯祥利,王磊,刘杨.焊接材料及热输入对Q460钢厚板焊接接头拉伸性能的影响[J].机械工程材料,2019,43(3):1-6.
FENG X L, WANG L, LIU Y. Effect of welding material and heat input on tensile property of welded joint of Q460 steel thick plate[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(3): 1-6.
- [9] TSUYAMA T, NAKAI K, AKIYAMA M, et al. Effects of microstructure on mechanical property in weld metal formed with the hot-wire method applying ordinal CO₂ gas shielded arc welding method[J]. Tetsu-to-Hagane, 2013, 99(7): 468-474.
- [10] YAMAZAKI K, SUZUKI R, SHIMIZU H, et al. Spatter and fume reduction in CO₂ gas-shielded arc welding by regulated globular transfer[J]. Welding in the World, 2012, 56(9/10): 12-19.
- [11] 张利国,姬书得,方洪渊,等.焊接顺序对T形接头焊接残余应力场的影响[J].机械工程学报,2007,43(2):234-238.
ZHANG L G, JI S D, FANG H Y, et al. Influence of welding sequence on welding stress of T joint[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 234-238.
- [12] 姬书得,方洪渊,刘雪松,等.焊接顺序对混流式水轮机转轮焊接应力的影响[J].机械工程学报,2005,41(8):224-227.
JI S D, FANG H Y, LIU X S, et al. Effect of welding sequence on welding stress of francis turbine runner [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 224-227.

(上接第83页)

- [5] PIJERS R J M, KOLSTEIN M H, ROMEIJN A, et al. Fatigue strength of base material and butt welds made of S690 and S1100[C]//5th International Conference on Advances in Steel Structures. London: Taylor and Francis, 2007.
- [6] KIM I T, KAINUMA S. Fatigue life assessment of load-carrying fillet-welded cruciform joints inclined to uniaxial cyclic loading[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(11): 807-813.
- [7] FRICKE W, DOERK O. Simplified approach to fatigue strength assessment of fillet-welded attachment ends [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 141-150.
- [8] KAI X, YONG L, LIE S T. Loading-carrying welds joints analysis using boundary element method [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9/10): 2965-2975.
- [9] 谭真,郭广文.工程合金热物性[M].北京:冶金工业出版社,1994.
TAN Z, GUO G W. Thermophysical properties of engineering alloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
- [10] 王文东,姜勇,胡聪,等.复杂环境下对接焊缝疲劳性能数值分析[J].公路,2020,65(5):155-159.
WANG W D, JIANG Y, HU C, et al. Numerical analysis of fatigue performance of butt welds in complex environment [J]. Highway, 2020, 65(5): 155-159.
- [11] 刘兵,何国球,蒋小松,等.材料疲劳寿命的影响因素和研究方法[J].材料导报,2011,25(9):103-106.
LIU B, HE G Q, JIANG X S, et al. Review on effect factor and research method of material fatigue life [J]. Materials Review, 2011, 25(9): 103-106.

欢迎来稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告