

焊前及焊后热处理对30CrMnSiA钢搅拌摩擦焊组织及性能研究

仇一卿, 袁杏, 陆伟, 何强, 姚徐伟, 倪林斌

上海航天精密机械研究所 上海 201600

摘要: 对不同热处理状态的2mm厚30CrMnSiA高强钢进行了搅拌摩擦焊接, 焊接参数分别为: 旋转速度250r/min, 焊接速度30mm/min, 分别对试板进行了焊前热处理、焊后热处理及未热处理。结果表明: 热处理能够显著提升焊接接头力学性能, 尤其是焊前热处理的过程, 能够得到高强度的马氏体组织, 且使得在相同条件下这种工艺所得到的焊前晶粒最细小, 由此能够在拉伸测试中展现出更高的强度; 而焊后热处理后由于较多含有塑性较好的铁素体, 也能够展现出高的抗拉强度。

关键词: 30CrMnSiA钢; 搅拌摩擦焊; 热处理; 组织; 力学性能

Research on the microstructure and properties of 30CrMnSiA steel friction stir welding before and after heat treatment

QIU Yiqing, YUAN Xing, LU Wei, HE Qiang, YAO Xuwei, NI Linbin

Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China

Abstract: Friction stir welding was carried out on 2mm thick 30CrMnSiA high-strength steel in different heat treatment states. The welding parameters are as follows: rotation speed is 250r/min, welding speed is 30mm/min. The test plates were subjected to pre-welding heat treatment, post-welding heat treatment and non-heat treatment. The results show that heat treatment can significantly improve the mechanical properties of welded joints. Especially the pre-welding heat treatment process, the pre-weld heat treatment process results in a high-strength martensitic organization with the smallest pre-weld grain size of any process under the same conditions, which results in higher strengths in tensile tests; The post-weld heat treatment due to the more plastic ferrite, can also show high tensile strength.

Keywords: 30CrMnSiA steel; friction stir welding; heat treatment; microstructure; mechanical property

1 序言

30CrMnSiA高强钢为典型的Cr-Mn-Si系中碳调质钢。30CrMnSiA钢碳含量高, 熔焊时淬硬性大,

有较大的冷裂倾向, 焊接性差; 同时热影响区存在马氏体, 进一步增加了焊缝冷裂纹倾向^[1]。搅拌摩擦焊(FSW)作为一种固相焊接技术, 可在焊接接

第一作者: 仇一卿, 高级工程师, 主要从事搅拌摩擦焊工艺工作, E-mail: 811286648@qq.com。

头处产生细小的等轴晶粒；焊接时的温度较低，对热影响区组织的粗化作用小^[2-5]，同时，FSW为塑性焊接过程，可避免常规熔焊过程中容易产生的气孔、冷裂纹和成分偏析等问题。因此，FSW可有效地解决中碳钢板焊接的缺陷问题。

针对钢的搅拌摩擦焊研究，谷松伟等^[6]对8mm厚Q235B钢进行FSW，发现Q235B钢FSW接头的焊核区、热机影响区、热影响区的硬度都高于母材，试样断裂的位置均在靠近热影响区的母材上。MESHRAM等^[7]对马氏体时效钢进行了FSW试验，并与传统熔化焊进行了对比，研究发现，采用FSW能够抑制熔化焊时合金元素的偏析等问题，同时FSW接头相比熔化焊接头具有较高的抗应力腐蚀开裂能力。GONÇALO等^[8]研究了不同的FSW峰值温度和冷却速率对高强度钢接头性能的影响，结果表明，在高焊接速度条件下，接头获得了良好的拉伸性能，FSW焊缝的冲击韧度与母材的性能一致，甚至超过母材的性能，高焊接速度下焊缝整体冲击韧度最好，甚至发现在-40℃和-60℃条件下接头的冲击韧度均优于母材。MIRONOV等^[9]研究了TRIP钢FSW接头的微观组织和力学性能，研究发现，焊接过程的热输入导致热影响区发生了软化，搅拌区发生了马氏体相变。在后续的拉伸试验中，上述微观结构的变化引起接头区域应变分布不均匀，从而导致接头过早失效。MAHMOUDINIYA等^[10]对2mm厚的DP700钢进行了FSW试验，结果发现，齐纳-霍洛蒙参数随转速的增大而减小，从而导致搅拌区晶粒粗化。同时，由于搅拌头的磨损，在搅拌区发现了WC颗粒。

本文将30CrMnSiA高强钢为研究对象，对不同热处理状态的焊接试板采用搅拌摩擦焊进行焊接试验，对比热处理前后焊接接头的组织及性能，为后续该材料的工程应用提供支撑。

2 试验方法

采用2mm厚的30CrMnSiA高强钢薄板通过搅拌摩擦焊进行对接焊，以搅拌头的旋转速度以及热处理工艺为变量，开展30CrMnSiA钢搅拌摩擦焊工艺试验。30CrMnSiA钢化学成分见表1。

试验采用W-25%Re合金搅拌头，为了尽可能节约原料和加工成本，搅拌头部分采用分体式结构，

表1 30CrMnSiA钢化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
0.28~0.35	0.8~1.1	0.9~1.2	0.8~1.1	≤0.3	≤0.03	≤0.03

即焊接用搅拌针和轴肩采用一体式，与焊接设备主轴连接部段夹持柄采用工具钢制备，搅拌头形貌如图1所示。其中，轴肩直径为 $\phi 15\text{mm}$ ，为内凹形轴肩，搅拌针根部直径为 $\phi 7.5\text{mm}$ ，搅拌针长度为1.9mm。



图1 搅拌头形貌

为测试焊缝热处理前后组织及性能的变化，分别采用了焊前热处理，未热处理及焊后热处理3种形式，其中热处理工艺为淬火（900℃±10℃，保温30min，油冷）后回火（500℃±10℃，保温75min，炉冷），焊接速度设定为30mm/min，下压力为0.1mm，焊接试验方案见表2。

表2 试验方案

试样编号	热处理工艺	旋转速度/（r/min）
1 [#]	未热处理	250
2 [#]	焊后热处理	250
3 [#]	焊前热处理	250

焊后采用线切割的方法，以焊缝为中心取大小为30mm×5mm×2mm的金相试样，以及3块相隔30mm垂直于焊接方向的拉伸试样，并在母材中取2块拉伸试样进行对比。将金相试样镶嵌后清洗，并用砂纸打磨、抛光作为金相试样，利用4XB-TV型倒置光学金相显微镜（OM）及PZ3020MZ手动影像测量仪观察焊接接头横截面的微观组织和宏观形貌。利用INSTRON5540型电子精密拉伸机在室温下进行拉伸测试，得出各焊接接头中母材与焊缝处的抗拉强度。

3 试验结果及分析

3.1 不同热处理状态对组织的影响

搅拌头旋转速度为250r/min，焊接速度为

30mm/min时,经过焊前热处理、焊后热处理及未热处理的焊件宏观组织如图2所示。其中,热处理工艺为淬火($900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,保温30min,油冷)后回火($500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,保温75min,炉冷)。在PZ3020MZ手动影像测量仪下观察试样的宏观组织。从图2a、c可看出,未热处理与焊前热处理的焊缝接头形貌大致相同,可清晰观察到焊缝与母材间的熔合区,由此可知,FSW焊接接头可分为基材区、熔合区及焊缝区。从图2b可看出,焊缝、母材与熔合区几近融为一体。

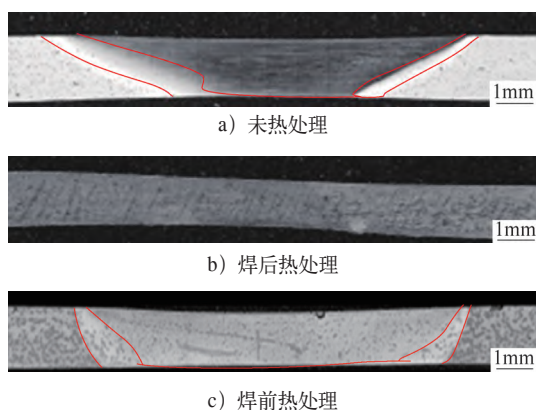
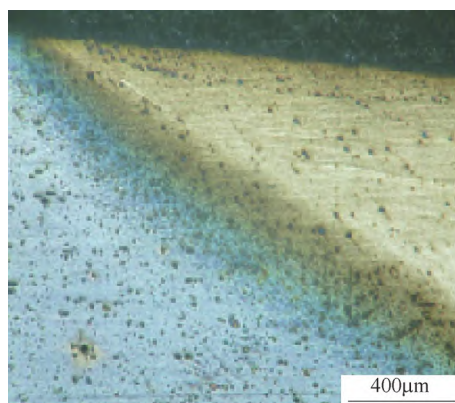


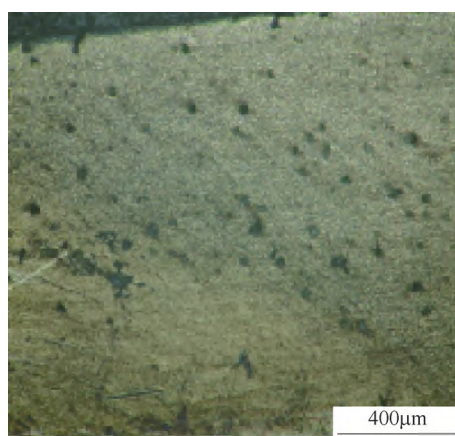
图2 PZ3020MZ手动影像测量仪下的组织形貌

在金相显微镜下,以 $50\times$ 的放大倍数观察,在焊前热处理、未热处理及焊后热处理状态下的组织形貌如图3所示。从图3a、c可看出,未热处理与焊前热处理的焊缝熔合线更加明显。从图3b可知,经焊后热处理后,焊缝熔合线浅显。另外还发现,在3种热处理形式下,熔合区两侧的晶粒大小存在差异,从图3b能够明显观测到,在焊缝中的晶粒数目更多、尺寸更小。此外,在3种不同工艺下的焊接接头均不存在气孔、裂纹等焊接缺陷。

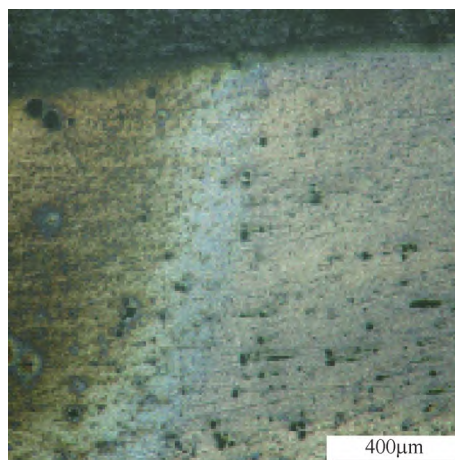
在金相显微镜下,以 $500\times$ 观察时,经过了焊前热处理、未热处理及焊后热处理的焊缝组织形貌如图4所示。由图4a、b可知,在未热处理状态下母材中的组织为铁素体与珠光体,焊缝中的组织以铁素体为主,其中含有少量的珠光体、残留奥氏体和马氏体,且焊缝中的铁素体组织更加细小,排列更致密。分析认为可能是由于焊缝处经过FSW搅拌针的搅拌作用,焊缝区的晶粒破碎,该区域所经受的大变形为再结晶提供动力。当搅拌头与工件摩擦时,所产生的热量使得近焊缝处的形变晶粒由等轴新晶粒取代,从而起到细晶的作用。同时,在焊接高温



a) 未热处理



b) 焊后热处理



c) 焊前热处理

图3 不同热处理状态焊缝微观组织 ($50\times$)

下,一部分珠光体分解,当其冷却时,形成了奥氏体及少量马氏体。

由图4c可知,焊接后进行调质处理,焊缝区为铁素体、马氏体与珠光体,焊接接头HAZ组织由魏氏体与少量马氏体所构成,近母材的HAZ为铁素体与少量的魏氏体。与母材区相比,焊缝区的晶粒尺寸更小,原因是焊缝区在焊接时发生了再结晶。从

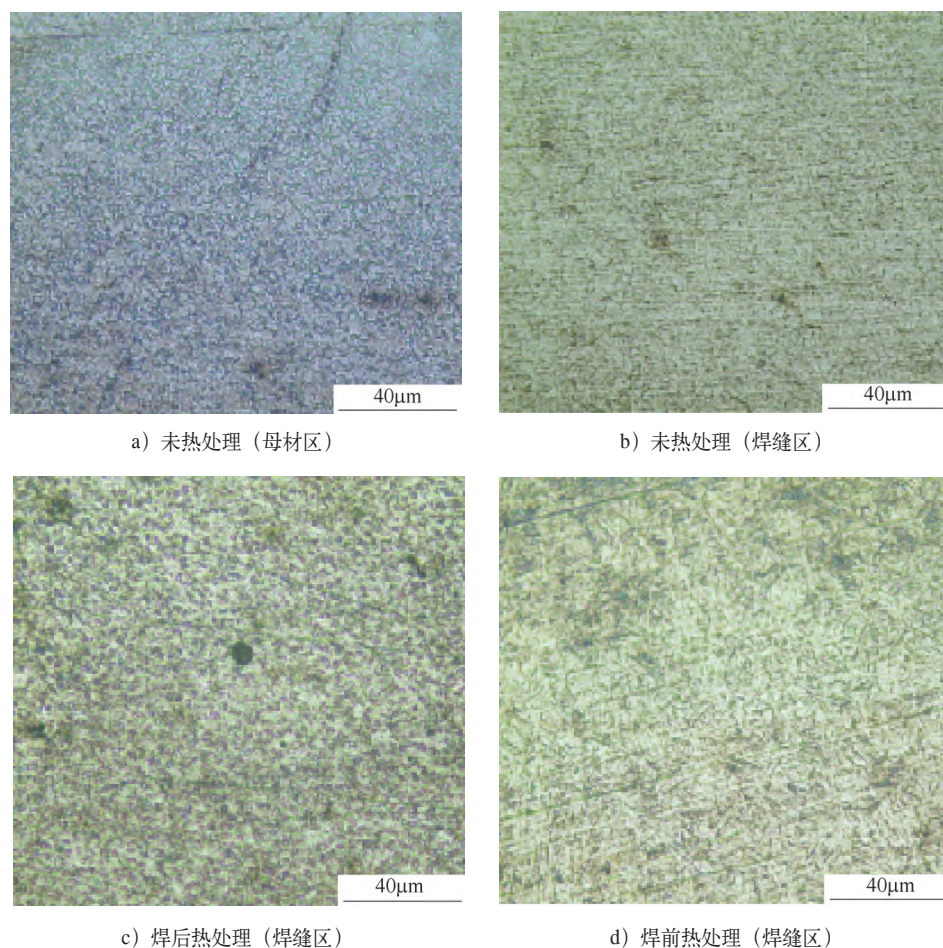


图4 不同热处理状态焊缝微观组织 (500×)

图4d可看出,焊前热处理的焊缝区组织为典型的过热淬硬组织,其晶粒相当细小,难以辨别。淬火的过程为加热、保温、冷却,一般加热温度为880℃,以得到成分均匀的奥氏体组织,随后的保温过程则是为了使碳与合金元素能够进行充分的扩散,经过淬火后可得到马氏体组织,马氏体具有高的强度和较差的塑韧性,需要高温回火来进一步改善其性能。回火分为3个阶段,即加热、保温、冷却,与淬火的不同之处在于其冷却是采用炉冷。经过调质处理后,得到回火索氏体,这在李召华等^[11]所分析的30CrMnSiA高强钢在不同工艺下的组织与性能变化中得以证实。经田向群^[12]的分析,焊缝区组织应为细小的板条状马氏体及一些隐晶组织细化的混合型马氏体,而母材区组织为回火索氏体,且焊缝区的组织排列更加致密。

综上所述,经过焊前调质处理后,焊接接头出现了复合型的马氏体组织,在热影响区会出现一

定的脆化、软化现象,但是由后续的力学性能分析可知该问题并不突出。焊前热处理后的焊缝组织由马氏体、铁素体、珠光体所构成,且其晶粒更加细小,性能优异,组织优良,HAZ在脆化、软化等问题上并不突出,展现出很高的强度与较好的塑韧性,在焊后可无需热处理。而在焊后热处理后,母材与焊缝处的组织均匀。

3.2 焊缝性能

焊前及焊后热处理后,焊接接头抗拉强度如图5所示。由图5可知,未热处理的焊接接头具有最低的抗拉强度,其焊缝处的抗拉强度为688MPa,为母材的76.9%;经过焊前热处理的焊接接头具有最高的抗拉强度,其焊缝处的抗拉强度为1168MPa,达到母材的65%;经焊后热处理后,焊缝处的抗拉强度为910MPa,为母材的54%。

若不经热处理直接进行FSW,则由于焊接接头的组织中存在珠光体、铁素体、残留奥氏体和少量

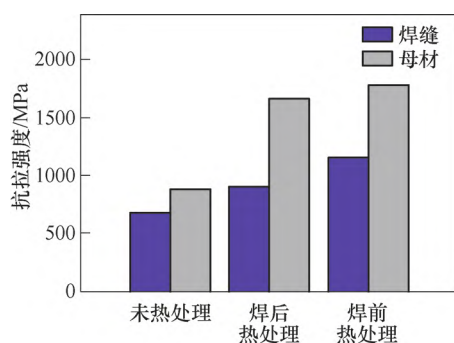


图5 热处理工艺对接头拉伸性能的影响

的马氏体，因此强度低，致使往往在焊后要采取热处理方式来提升其性能，否则残留的组织应力将会影响接头的性能。经焊后热处理，母材与焊缝的抗拉强度均有所提升，这与其组织变化有关。焊缝区组织为铁素体、珠光体与马氏体，焊接接头HAZ组织由魏氏体与少量马氏体构成，近母材的HAZ组织为铁素体与少量的魏氏体。分析认为，热处理后的焊缝接头中铁素体的含量升高了，这种铁素体组织中含更高的可动位错，能够与马氏体在拉伸过程中协同变形，从而展现出更高的抗拉强度。

观察断裂后的拉伸试样发现，经焊前热处理的焊缝处拉伸试样断裂在热影响区，断裂形式为沿 45° 方向的单系滑移剪切型断裂，呈现韧性断裂特征。30CrMnSiA高强钢的 A_{c1} 、 A_{c3} 相变点分别为 653°C 、 807°C ，即经过焊前调质处理后，这种高强钢的组织为回火索氏体。在FSW后，由于搅拌区受到了搅拌针强烈的搅拌以及挤压作用，在高温下发生动态再结晶的过程，因此焊缝组织为混合型马氏体，马氏体是硬而脆的相，具有高的强度与硬度，这使焊前热处理的焊接接头具有很高的抗拉强度。而热影响区的组织与母材一样仍为回火索氏体，区别在于热影响区受到了热循环的作用后出现了晶粒长大现象，故热影响区的组织要比母材的晶粒略大一些，这往往使该区域在拉伸过程中因晶粒粗大而成为最薄弱的位置。此外，由于在焊接前经历了热处理，能够起到细化晶粒的作用，因此在焊接前其初始晶粒与未进行焊前热处理的晶粒相比更加细小，在经历了FSW后，动态再结晶的过程又能够得到致密的组织，使其表现出高的抗拉强度。

综上所述，热处理工艺能够有效提升母材与焊接接头的抗拉强度。尤其是焊前热处理的过程，能够得到高强度的马氏体组织，由此能够在拉伸测试

中展现出更高的强度。

4 结束语

采用搅拌摩擦焊对30CrMnSiA高强钢进行焊接，分析对比了焊接接头热处理前后的微观组织及抗拉强度，得出以下结论。

1) 热处理工艺能够有效提升母材与焊接接头的抗拉强度，其中热处理工艺为淬火($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温30min，油冷)后回火($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温75min，炉冷)。尤其是焊前热处理的过程，能够得到高强度的马氏体组织，且在相同条件下这种工艺所得到的焊前晶粒最细小，由此能够在拉伸测试中展现出更高的强度(1168MPa)；而焊后热处理后由于含有较多塑性较好的铁素体，也能够展现出高的抗拉强度(910MPa)。

2) 焊前热处理能够有效提高母材的抗拉强度，保证材料的使用要求，焊后无需再进行热处理。

参考文献:

- [1] GURU P D, RAMAKRISHNAN A. Friction stir welding of high-strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103 (9-12) : 4763-4769.
- [2] THOMAS W M, JOHNSON K I, WIESNER C S. Friction stir welding—recent developments in tool and process technologies[J]. Advanced Engineering Materials, 2003, 5 (7) : 485-490.
- [3] 司福建. 搅拌摩擦焊在汽车工业中的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (4) : 6-12.
- [4] LIU H J, FUJII H, MAEDA M, et al. Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142 (3) : 692-696.
- [5] KHANDKAR M Z H, KHAN J A, REYNOLDS A P. Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding—input torque based model[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8 (3) : 165-174.
- [6] 谷松伟, 赵佳, 于海东. Q235B钢FSW接头显微组织及力学性能分析[J]. 金属加工 (热加工), 2019 (6) : 41-45.
- [7] MESHAM S D, PARADKAR A G, REDDY G M, (下转第55页)

交流与合作日益增多,培养具有国际视野的焊接专业青年人才已经成为时代的要求。与世界领先的高校、科研机构和企业建立合作关系,推动国际化的学术交流、科研合作与技术培训。通过国际化交流项目,增强学生的全球竞争力和跨文化沟通能力。融入国际焊接技术标准和认证体系,借鉴国际先进的教育模式和焊接技术,为学生提供国际化的技术认证与职业发展通道。组织学生参与国际企业的合作项目与实习,提供跨国公司或全球制造企业的实习机会,帮助学生积累国际化的工作经验,提升他们的全球适应能力。

5 结束语

本文从未来产业的视角出发,探讨了焊接专业青年人才培养模式面临的挑战及未来改革路径。研究表明,在未来产业需求下,焊接技术的未来将向智能化、自动化、精密化和绿色化发展,通过课程体系、教学方法、实践环节、产学研合作、国际化视野等方面对焊接专业青年人才培养模式进行改革,能够培养出具备创新能力、跨学科知识、全球化视野和实际操作能力的复合型人才,满足未来产业对高素质焊接技术人才的需求,推动我国焊接行业迈向全球价值链高端。

参考文献:

- [1] 王建峰, 占小红, 李斌斌, 等. 新质生产力视角下激光焊接技术课程教学创新改革的思考与实践[J]. 金属加工(热加工), 2025(4): 87-92, 96.

- [2] 刘新文, 史占中. 新质生产力背景下未来产业形态演化及培育路径研究[J]. 当代经济管理, 2025, 47(5): 1-10.
- [3] 陆维康, 林成华. 面向未来产业的研究生教育结构改革逻辑、困境与路径[J]. 国家教育行政学院学报, 2024(11): 41-49, 68.
- [4] 陈婧怡, 史建锋. 专利合作视角下山东未来产业发展现状与对策[J]. 山东宏观经济, 2024(6): 17-25.
- [5] 王珏. 未来产业: 指标体系与生态架构[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2024, 46(3): 81-92.
- [6] 陈海燕, 王星星, 宋晓国, 等. 新形势下高等院校中传统工科面临的挑战与应对——以“焊接”学科为例[J]. 焊接技术, 2022, 51(7): 108-112.
- [7] 沈坤荣, 金童谣. 以未来产业发展加快形成新质生产力[J]. 江苏社会科学, 2024(6): 57-66, 242.
- [8] 张启媛, 王宏起, 李晓莉, 等. 政府架构下未来产业创新生态系统形成机理研究[J/OL]. 科研管理, 2025, 1-16[2025-01-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1567.G3.20241231.1422.016.html>.
- [9] 纪玉山. 未来产业集群谁执牛耳?——基于复杂经济学的理论思考与政策建议[J]. 工业技术经济, 2024, 43(12): 7-13.
- [10] 徐建伟, 李子文. 加快未来产业布局建设: 发展规律、现实制约和生态构建[J]. 经济纵横, 2024(10): 102-109.

(收稿日期: 20250120)

(上接第50页)

- et al. Friction stir welding: An alternative to fusion welding for better stress corrosion cracking resistance of maraging steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 94-103.
- [8] GONÇALO S, SARIKKA T, PEDRO V, et al. Effect of processing temperatures on the properties of a high-strength steel welded by FSW[J]. Welding in the World, 2018, 62: 1173-1185.
- [9] MIRONOV S, SATO Y S, YONEYAMA S, et al. Microstructure and tensile behavior of friction-stir welded TRIP steel[J]. Materials Science &

Engineering: A, 2018, 717: 26-33.

- [10] MAHMOUDINIYA M, AMIR H K, SHAHRAM K, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded ferrite-martensite DP700 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 737: 213-222.
- [11] 李召华, 王春净, 罗湘燕. 30CrMnSiA钢的最终热处理工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2017(10): 1-3.
- [12] 田向群. 30CrMnSiA高强度钢A-TIG焊接技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

(收稿日期: 20250125)