

# 焊前及焊后热处理对 30CrMnSiA 搅拌摩擦焊组织及性能研究

仇一卿, 袁杏, 陆伟, 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 高强钢进行了焊接, 焊接参数分别为: 旋转速度为 250rpm, 焊接速度为 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, 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; 搅拌摩擦焊; 热处理; 组织; 力学性能;

Research on the Microstructure and Properties of 30CrMnSiA Friction Stir Welding Before and After Heat Treatment

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** 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 250rpm, welding speed is 30mm/min. The test plates were subjected to pre-welding heat treatment, post-welding heat treatment and non-heat treatment. 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.

**Key words:** 30CrMnSiA, friction stir welding, Heat Treatment, Microstructure, Mechanical property

## 0 序言

30CrMnSiA 高强钢为典型的 Cr-Mn-Si 系中碳调制钢。30CrMnSiA 碳含量高, 熔焊时淬硬性大, 有较大的冷裂纹倾向, 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<sup>Error: Reference source not found</sup>。搅拌摩擦焊 (FSW) 作为一种固相焊接技术, 可在焊接接头处产生细小的等轴晶粒; 焊接时的温度较低, 对热影响组织的粗化作用小<sup>[2-4]</sup>, 同时

FSW 为塑性焊接过程，可避免常规熔焊过程中容易产生气孔、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。

针对高强钢的搅拌摩擦焊研究，Meshram 等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 焊缝的冲击韧性与母材的性能一致，甚至超过母材的性能，高焊接速度下焊缝整体冲击韧性最好，甚至发现在  $-40^{\circ}\text{C}$  和  $-60^{\circ}\text{C}$  条件下接头的冲击韧性均优于母材。Mironov 等研究了 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以及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的不均匀性，从而导致了接头的过早失效。Mahmoudiniya 等对 2mm 厚的 DP700 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组织及性能，为后续该材料的工程生产提供支撑。

## 1 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 搅拌摩擦焊工艺试验。

表 1 30CrMnSiA 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	$\leq 0.3$	$\leq 0.03$	$\leq 0.03$

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，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  $\Phi 15\text{mm}$ ，搅拌针根部直径  $\Phi 7.5\text{mm}$ ，为内凹形轴肩，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三种形式，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 75 分钟，炉冷），焊接速度设定为 30mm/min，下压量为 0.1mm，焊接试验方式如表 2 所示。

表 2 试验方案表

试样编号	热处理工艺	旋转速度
------	-------	------

1#	未热处理	250 rpm
2#	焊后热处理	250 rpm
3#	焊前热处理	250 rpm

焊后采用线切割的方法以焊缝为中心，取大小为  $30\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$  的金相试样以及三块相隔  $30\text{mm}$  垂直于焊接方向的拉伸试样，并在母材中取两块块拉伸试样进行对比。将金相试样镶嵌后清洗、用砂纸打磨、抛光作为金相样，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，测出各块焊材中母材与焊缝处的抗拉强度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同热处理状态对组织影响

搅拌头旋转速度为  $250\text{rpm}$ ，焊接速度为  $30\text{mm}/\text{min}$ ，进行了焊前热处理、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  $30\text{min}$ ，油冷) 后回火 ( $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温  $75$  分钟，炉冷)。在 PZ3020MZ 手动影像测量仪下观测焊件的宏观组织，图 2a 和图 2c 的焊缝接头形貌大致相同，可清晰观测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。而在图 2b 中，焊缝、母材与熔合区几近融于一体。

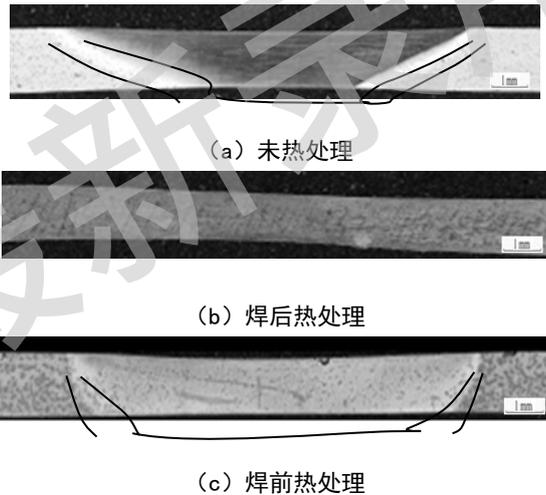


图 2 PZ3020MZ 手动影像测量仪下的组织形貌

在金相显微镜下，以  $50\times$  的放大倍数观察，经过了焊前热处理、未热处理及焊后热处理的组织形貌图如图 3 所示。图 3a 与图 3c 中的熔合线更加明显，而图 3b 中，可观察到一条浅显的熔合线。且能够发现在三张图中，熔合区两侧的晶粒大小存在差异，图 3b 中能够明显观测到，在焊缝中的晶粒数目更多，尺寸更小。此外，在三种不同工艺下的焊接接头都不存在如气孔、裂纹等焊接缺陷。



(a) 未热处理



(b) 焊后热处理



(c) 焊前热处理

图5 不同热处理状态焊缝微观组织微观组织

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组织形貌图如图4所示。由图可知，在图4a与图4b中，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、残留奥氏体以及少量的马氏体，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搅拌针的搅拌作用下，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所取代，从而起到细晶的作用。同时，在焊接高温下，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。

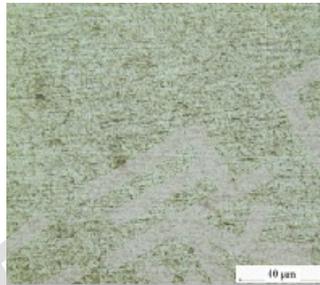
在图4c中，焊接后进行调质处理，焊缝区为铁素体、马氏体与珠光体，焊接接头HAZ组织由魏氏体与少量马氏体所构成，近母材的HAZ为铁素体与少量的魏氏体。与母材区相比，焊缝区的晶粒尺寸更小，原因是焊缝区在焊接时发生了再结晶。图6d为进行了焊前热处理的焊缝区组织图，焊缝区组织为典型的过热淬硬组织，其晶粒相当细小，难以辨别。淬火的过程为加热保温冷却，一般加热温度为 $880^{\circ}\text{C}$ 以得到成分均匀的奥氏体组织，随后的保温过程则是为了使碳与合金元素能够进行充分的扩散，经过淬火后可到马氏体组织，马氏体具有高的强度和差的塑韧性，需要高温回火来进一步改善其性能。回火分为三阶段即加热保温冷却，与淬火的不同之处在于其冷却是采用炉冷。在经过调质处理后，得到回火索氏体，这可由李召华等人所分析的30CrMnSiA高强钢在不同工艺下的组织与性能变化中得

以证实。经田向群等人的分析，焊缝区组织应为细小的板条状马氏体及一些隐晶组织的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。

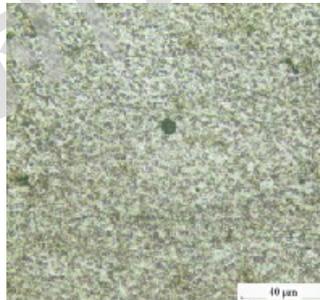
综上所述，焊前调质处理，焊接接头出现了复合型的马氏体组织，在热影响区处可能会出现一定的脆化、软化现象，但是由后续的力学性能分析可知该问题并不突出。焊前热处理后的焊缝组织由马氏体、铁素体、珠光体所构成，且其晶粒更加细小，性能优异组织优良，HAZ 在脆化、软化等问题上并不突出，展现出很高的强度与较好的塑韧性，在焊后可无需热处理。而在焊后热处理后，母材与焊缝处的组织均匀。



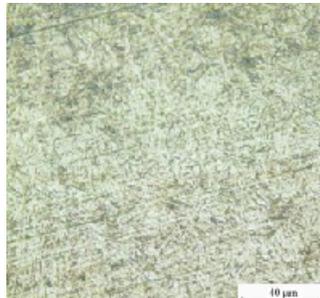
(a) 未热处理 母材区



(b) 未热处理 焊缝区



(c) 焊后热处理 焊缝区



(d) 焊前热处理 焊缝区

图 4 不同热处理状态焊缝微观组织

## 2.2 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，未热处理的焊材具有最低的抗

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材具最高的抗拉强度，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%。

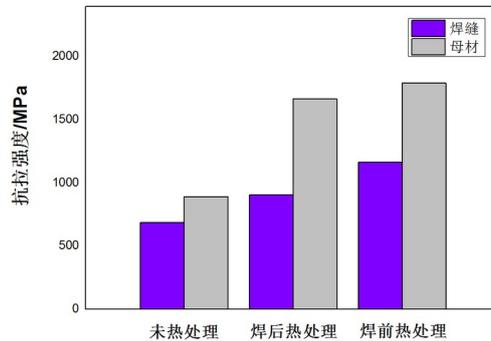


图5 热处理工艺对接头拉伸性能的影响

若不经热处理直接进行FSW，则由于焊接接头处存在的组织有珠光体、铁素体、残留奥氏体或者还有少量的马氏体组织，强度低，往往在焊后要采取热处理的方式来提升其性能。否则残留的组织应力将会影响接头的性能。经焊接后热处理，母材与焊缝的抗拉强度都有所提升，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所构成，近母材的HAZ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的过程中协同变形，从而展现出更高的抗拉强度；

对断裂后的拉伸试样观察发现，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Ac1、Ac3相变点分别为653、807℃，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，搅拌区由于受到了搅拌针强烈的搅拌以及挤压作用后，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，这使得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的现象，故热影响区的组织要比母材的组织略大一些，这往往使得该区域在拉伸的过程中由于粗大的晶粒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尺寸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一致密的组织，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。

### 3 结论

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以及抗拉强度，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℃±10℃，保温30min，油冷)后回火(500℃±10℃，保温75分钟，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，为1168MPa；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，为910MPa。

(2) 焊前热处理能够有效提高母材的抗拉强度，焊后无需进行热处理，能够保证材料

的使用要求。

### 参考文献:

- [1]Guru P D, A Ramakrishnan. Friction stir welding of high-strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9-12): 4763-4769.
- [2] W.M.Thomas, K.I.Johnson, C.S.Wiesner. Friction Stir Welding - Recent Developments in Tool and Process Technologies[J].Advanced Engineering Materials. 2003, 5(7):485-490
- [3] H. J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi. 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
- [4] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan, A. P. Reynolds. 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
- [5] Meshram S D, Paradkar A G, Reddy G M, et al. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25,94.
- [6] Gonçalo S, Sarikka T, Pedro V, et al. Welding in the World, 2018, 62 (6),1173.
- [7] Mironov S, Sato Y S, Yoneyama S, et al. Materials Science & Engineering A, 2018, 717,26.
- [8] Mahmoudiniya M, Amir H K, Shahram K, et al. Materials Science and Engineering A, 2018, 737, 213.
- [9]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.
- [10]田向群. 30CrMnSiA高强度钢A-TIG焊接技术研究[D]. 陕西:西北工业大学, 2006.

**作者简介:** 仇一卿, 男, 1989 出生, 高级工程师; 主要从事搅拌摩擦焊工艺工作, E-mail: [811286648@qq.com](mailto:811286648@qq.com).