

# 30CrMnSiA 与 1Cr18Ni9Ti 异种钢 TIG 自动焊工艺研究

岳海金 房冬青 邹鹤飞 彭 铮 周 栓 李文武 崔新浩

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 本文针对 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 异种钢焊接难点, 开展 TIG 自动焊接工艺研究。采用 TIG 自动焊工艺所获得的焊接接头表面及内部质量均无缺陷。通过对焊缝显微组织进行分析, 1Cr18Ni9Ti 侧热影响区组织晶粒粗化, 而 30CrMnSiA 侧热影响区出现了比母材细小的组织。经力学性能测试发现室温拉伸强度接近于 1Cr18Ni9Ti 母材, 应用 TIG 自动焊接工艺能够获得良好的力学性能。

**关键词:** TIG 自动焊; 异种钢; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG445; V463 **文献标识码:** A

## Study on the TIG Automatic Welding Process of Dissimilar Steel of 30CrMnSiA and 1Cr18Ni9Ti

Yue Haijin Fang Dongqing Zou Hefei Peng Zheng Zhou Shuan Li Wenwu Cui Xinhao

(Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

**Abstract:** In this paper, TIG automatic welding process was studied aiming at the difficulties in welding 30CrMnSiA and 1Cr18Ni9Ti dissimilar steel. There was no defect on the surface and internal quality of welding joint obtained by TIG automatic welding process. The microstructure of weld was analyzed, and the grain coarsening in the heat affected zone of 1Cr18Ni9Ti side was found in the heat affected zone of 30CrMnSiA. It was found that the tensile strength at room temperature was close to 1Cr18Ni9Ti parent material. Good mechanical properties can be obtained by using TIG automatic welding process.

**Key words:** TIG automatic welding; dissimilar steel; microtissue; mechanical properties

### 1 引言

30CrMnSiA 钢具有较高的强度和韧性, 在军民品零部件的生产与制造中得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。30CrMnSiA 钢是一种典型的 Cr-Mn-Si 系统中的中碳调质钢。按照国际焊接学会推荐的碳当量公式计算, 其  $CE=0.73\%$ , 具有较高的淬硬倾向, 焊接接头极易出现硬脆的马氏体组织, 增大了焊接接头的冷裂倾向。不锈钢具有良好的耐蚀性能、高温性能、高强度和焊接性能, 在宇航、汽车、机械、仪器仪表和能源等领域得到了广泛的应用<sup>[2]</sup>。这两种材料多应用于航天火箭发动机零部件上, 所以两种材料的焊接结构比较常见, 例如氢氧发动机起动机便涉及到 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢的焊接。

目前, 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 异种钢主要采用手工惰性气体保护焊, 由于 30CrMnSiA 钢的特殊性, 而且这两种材料属于异种金属焊接, 焊接接头极容易出现热裂纹或冷裂纹, 严重影响接头强度、韧性等综合力学性能<sup>[3]</sup>。而对于薄壁零件的焊接, 采用手工惰性气体保护焊会因热输入较大而造成产品变形较大, 即使采取工装夹具和焊后校形措施, 也很难有效解决产品焊接变形问题, 严重影响了产品质量和生产成本。TIG (Tungsten Inert Gas) 自动焊接工艺由于具备焊接参数、焊枪角度稳定等优点, 可在一定程度上改善焊接变形问题。

本文对 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 异种钢的 TIG 自动焊工艺进行研究, 并对接头的变形情况、显微组织、拉伸性能及显微硬度进行分析, 为薄壁件异种钢

材料 TIG 自动焊焊接的工程化应用提供试验基础。

2 30CrMnSiA 异种金属焊接性能分析

异种金属在元素性质、物理性能、化学性能等方面的差异，使得异种金属焊接存在一定的难度。发动机用 30CrMnSiA 中碳调质钢的碳含量较高，且合金元素含量较多，具有较高的淬硬性，在焊接应力作用下易产生裂纹缺陷。与 30CrMnSiA 材料相比，1Cr18Ni9Ti 钢的可焊性较好，可用多种焊接方法进行焊接，焊后一般不需要进行热处理。目前，国内外学者针对 30CrMnSiA 同种及异种金属焊接进行了诸多研究。刘涛等<sup>[4]</sup>研究了 T250 马氏体时效钢与 30CrMnSiA 异种材料焊接工艺技术，T250 马氏体时效钢与 30CrMnSiA 钢焊接后，焊缝化学成分偏向中碳高合金钢成分，具有较好的焊接性，选用合适的焊丝，焊接接头强度可达到与 30CrMnSiA 等强度。孔兆财等<sup>[5]</sup>开展了 GH4169 与 30CrMnSiA 异种金属焊接工艺研究，通过试验和产品结构特点确定了满足焊缝要求的焊丝。张兵宪等<sup>[6]</sup>研究了补焊工艺对 30CrMnSiA 接头微观组织及性能的影响，焊缝底部区域组织发生了一定程度的粗化，形成了以马氏体+铁素体为主的微观组织形貌；补焊件接头区域的大角度晶界密度降低，对裂纹扩展的阻碍能力降低；补焊前后原始焊缝区域的马氏体和铁素体交

叉分布，晶粒取向单一，对该区域的韧性产生不利影响。接头抗拉强度较原始焊接件降低了 19.3%，延伸率也有一定程度的下降。理论研究及实验结果表明，在 30CrMnSiA 工程应用中，控制焊缝金属微观组织，特别是初始焊道或根部焊道是很重要的，因为焊缝金属的变化可以是马氏体到奥氏体，或者出现奥氏体、铁素体和马氏体的混合组织。此外，在焊缝金属和母材之间还会有一个成分过渡区，在这个窄区内会有和相邻区域不同的微观组织和性能<sup>[7]</sup>。30CrMnSiA 异种金属众多的试验数据及分析结果表明，30CrMnSiA 在快速冷却时，从奥氏体转变为马氏体的起始温度  $M_s$  点较低，焊后热影响区产生的马氏体难以产生自回火效应，硬度很高，易造成脆化。调质状态下焊接热影响区将出现强度、硬度低于母材的软化区，且焊接时具有较大的热裂纹倾向。针对 30CrMnSiA 材料上述特性，焊接过程中宜采用较小的焊接热输入，以降低焊接热影响区淬火区脆化。在焊接材料的选择上，宜采用低碳合金系焊接材料，降低焊缝金属的 S、P 杂质含量，以确保焊缝金属韧性、塑性及强度。

3 试验材料及方法

3.1 试验材料

表 1 焊接材料及焊丝的化学成分 %

| 材料牌号       | C         | Si        | Mn        | Cr          | Ni         | Fe |
|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|----|
| 30CrMnSiA  | 0.28~0.34 | 0.90~1.20 | 0.80~1.10 | 0.80~1.10   | /          | 余量 |
| 1Cr18Ni9Ti | ≤0.12     | ≤1.00     | ≤2.00     | 17.00~19.00 | /          | 余量 |
| H0Cr21Ni10 | 0.06      | 0.60      | 1.00~2.50 | 19.50~22.00 | 9.00~11.00 | 余量 |
| H18CrMoA   | ≤0.11     | 0.65~0.95 | 1.80~2.10 | ≤0.20       | ≤0.30      | 余量 |

30CrMnSiA 钢焊接用焊丝是 H18CrMoA，1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢采用的焊丝是 H0Cr21Ni10。当异种金属焊缝加热到高温时，由于线胀系数的差别，会产生很大的应变。采用镍基合金填充金属，可以有效降低由于线胀系数不同引起的热应力，从而避免开裂。因此，本项试验采用 H0Cr21Ni10 焊丝，规格  $\Phi 1.2$  mm，具体化学成分如表 1 所示。试验采用焊接材料的状态分为板材和管材两种，板材结构为拉伸强度试验件，管材结构为工程化应用试件。板材外形尺寸为 300 mm×130 mm×5 mm，管材尺寸为  $\Phi 40$  mm×5 mm，接头处加工 35°坡口和 1.5 mm 厚锁底，板材、管材接头结构示意图如图 1 所示。

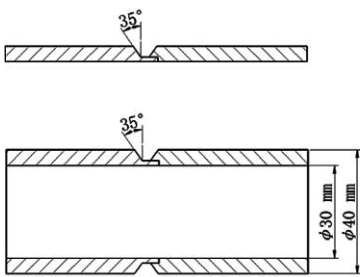


图 1 板材和管材两种接头结构示意图

3.2 焊接工艺及方法

1Cr18Ni9Ti 试件焊前进行酸洗处理，两种材料接头处先用砂纸打磨再用丙酮清洗干净。试验所用设备为 POLYSOUDE 350PC 焊机。焊接方法采用 TIG 自动

焊，分两层焊接，由于焊接热输入对焊缝影响较大，热输入被定义为每单位长度焊缝从移动热源输入的能量，热输入的计算公式为： $E=IU\eta/V$ ，其中， $I$ ——焊接电流， $U$ ——电弧电压， $V$ ——焊接速度， $\eta$ ——热效率。

本实验从影响焊接热输入的电流及焊接速度入手，开展相关的焊接实验，焊接工艺参数如表 2 所示，拉伸试验按照 GB/T228—1987 进行。

表 2 焊接试验工艺参数

| 编号 | 焊接电流/A  | 焊接速度<br>/mm min <sup>-1</sup> | 送丝速度<br>/mm min <sup>-1</sup> | 氩气流量<br>/L min <sup>-1</sup> |
|----|---------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1# | 170~180 | 150                           | 500                           | 12                           |
| 2# | 190~200 | 150                           | 500                           | 12                           |
| 3# | 210~220 | 150                           | 500                           | 12                           |
| 4# | 170~180 | 160                           | 500                           | 12                           |
| 5# | 190~200 | 160                           | 500                           | 12                           |
| 6# | 210~220 | 160                           | 500                           | 12                           |
| 7# | 170~180 | 170                           | 500                           | 12                           |
| 8# | 190~200 | 170                           | 500                           | 12                           |
| 9# | 210~220 | 170                           | 500                           | 12                           |

4 试验结果及分析

应用上述工艺方法焊接的焊缝经 10 倍放大镜表面观察，未见裂纹、咬边、表面气孔等焊接缺陷。对已焊接的焊接接头进行 X 光检测，检查发现 4#、7#、8#、9#试件存在未焊透缺陷，对比剩余试件，2#、3#、6#试件相对变形较大，5#表面成型较 1#美观，且焊接热输入适中。因此，选取 5#试件进行相关数据的分析。

4.1 微观组织分析

图 2a 为 30CrMnSiA 与 1Cr18Ni9Ti 异种钢焊接接头宏观形貌。可以看出，整个焊接接头呈现出典型的对接接头形貌，熔池成型良好，焊缝两侧熔深均匀。对焊缝接头进行腐蚀金相观察，其金相组织结果显示焊缝区域界限明显，热影响区范围较小，未观察到明显的晶粒变化。

图 2b 为焊缝区域显微组织，从图中可以观察到明显的针状铁素体组织，并呈现出模糊晶加等轴晶状态，晶粒尺寸大小一致，无明显缺陷。图 2c、图 2d 分别为 30CrMnSiA 侧与 1Cr18Ni9Ti 侧热影响区组织。与母材相比，靠近 30CrMnSiA 侧热影响区晶粒未出现明显的长大，甚至比母材还要细小，此区域组织经相变重结晶后冷却形成了细小的马氏体组织。将钢铁中各种合金元素对淬硬、冷裂及脆化等的影响折合成碳的相对含量为“碳当量”。碳当量对于材料的焊接性有直接

影响，碳当量越高，材料的淬硬倾向也越大。因此，30CrMnSiA 的淬硬倾向很大，在焊接热影响区会产生大量的马氏体，导致严重脆化。其次，热影响区被加热到超过调质处理时温度的区域，将出现强度、硬度低于母材的软化区。而靠近 1Cr18Ni9Ti 侧热影响区则出现了柱状晶结构，在高温的作用下，奥氏体晶粒急剧长大，冷却后得到晶粒粗大的组织。因此，靠近 1Cr18Ni9Ti 侧热影响区塑性和韧性会有一定程度的降低。

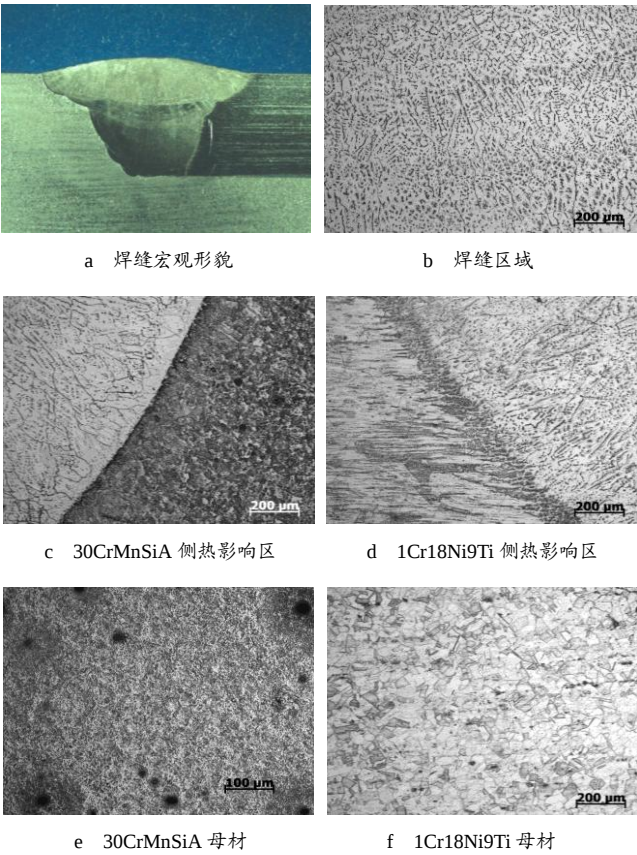


图 2 焊缝各区域显微组织

将图 2a 与采用同等焊接电流手工氩弧焊的焊缝宏观形貌进行对比发现，手工焊接焊缝出现了局部间隙变大、焊缝熔深不一致的情况，焊接变形较自动焊接大。这是由于手工焊接时干伸长、焊接速度、送丝速度是变化的，且受工人操作技术的影响，焊接线能量输入控制不均匀，当线能量较大时，单位长度的焊接热输入变大，导致焊件变形较大。此外，不均匀的焊接线能量导致整周焊缝熔深、焊缝正面余高、焊缝宽度等不一致情况，焊缝质量一致性相对较差。

4.2 显微硬度分析

表 3 呈现了图 2 中不同焊缝区域的显微硬度。对

焊接接头进行微观硬度趋势分析,从图 3 可以看出,从 1Cr18Ni9Ti 母材到 30CrMnSiA 母材,硬度逐渐增大,焊缝硬度与 1Cr18Ni9Ti 母材基本相当,30CrMnSiA 侧熔合线硬度低于 30CrMnSiA 母材,所以接头强度低于 30CrMnSiA 母材。将显微硬度与图 2 的微观组织进行对比,1Cr18Ni9Ti 母材较热影响区晶粒细小,母材硬度低于热影响区硬度。30CrMnSiA 侧热影响区晶粒较母材细小,因此获得了低于母材的显微硬度。这与 30CrMnSiA 与 T250 异种材料焊接<sup>[4]</sup>后焊缝区域的硬度趋势一致。

表 3 焊缝各区域显微硬度值 HV<sub>0.2</sub>

| 1Cr18Ni9Ti 母材 |     |     | 熔合区 1 | 焊缝区 |     |     | 熔合区 2 | 30CrMnSiA 母材 |     |     |
|---------------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|--------------|-----|-----|
| 174           | 178 | 169 | 203   | 201 | 202 | 193 | 256   | 336          | 333 | 325 |
| 179           | 170 | 170 | 189   | 194 | 189 | 174 | 238   | 349          | 355 | 343 |
| 177           | 178 | 173 | 200   | 245 | 243 | 245 | 260   | 281          | 292 | 289 |

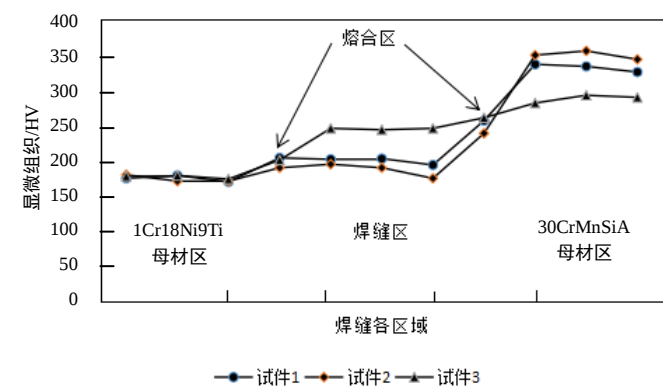


图 3 焊缝各区域显微硬度

4.3 力学性能试验

采用图 1 所示的 3mm 厚度的 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板材进行 TIG 自动焊接,根据 GB/T228—1987 进行焊接试件的拉伸试验,得到了表 4 所示的抗拉强度值。图 4 所示为焊接试件拉伸断裂宏观照片,从图 4 可以看出,拉伸试件均断裂在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢侧母材位置,且距焊缝位置相当,说明 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 异种钢的 TIG 自动焊后焊接接头的强度高于母材的强度。从表 4 可以看出,1Cr18Ni9Ti 母材的抗拉强度明显低于 30CrMnSiA 母材的抗拉强度,符合拉伸试验断裂在不锈钢侧母材的结果。

表 4 焊接试件室温力学性能结果 MPa

| 材料                   | 抗拉强度值 $\sigma_b$ |      |      | 平均值  | 断裂位置   |
|----------------------|------------------|------|------|------|--------|
| 30CrMnSiA/1Cr18Ni9Ti | 570              | 570  | 565  | 568  | 不锈钢侧母材 |
| 30CrMnSiA 母材         | 1120             | 1140 | 1160 | 1140 | /      |
| 1Cr18Ni9Ti 母材        | 579              | 580  | 574  | 572  | /      |



图 4 焊接试件拉伸断裂宏观照片

5 应用

采用上述工艺焊接的某产品如图 5 所示。从图中可以看出,焊缝成型美观,均匀一致,无焊接表面缺陷。内部质量经 X 光检查符合 QJ1842A—2011 I 级要求,未发现裂纹、气孔等缺陷。如图 6 所示,焊接接头经过煤油试验检查及液气压试验检查均未发现渗漏。



图 5 某产品焊缝外观形貌



图 6 某产品液压试验

6 结束语

a. TIG 自动焊接工艺适用于 30CrMnSiA 和

1Cr18Ni9Ti 异种钢的焊接, 采用合理的焊接参数, 焊接接头未出现表面缺陷和内部质量缺陷。

b. 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 异种金属焊接后, 30CrMnSiA 侧热影响区晶粒经相变后出现了比母材细小的组织, 热影响区出现软化现象。而 1Cr18Ni9Ti 侧热影响区则出现了晶粒粗化, 塑性和韧性会有一定程度的降低。

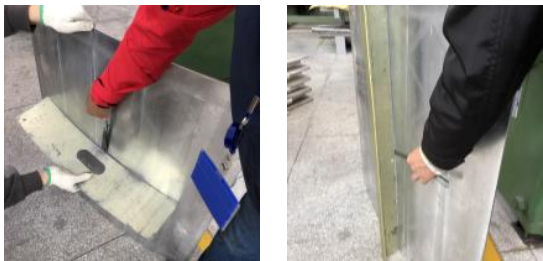
c. 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 异种材料自动焊接，  
选用 H0Cr21Ni10 焊丝，焊接接头强度可达到  
1Cr18Ni9Ti 等强度。

d. 相较于手工氩弧焊接, 30CrMnSiA 和 1Cr18Ni9Ti 的自动焊接可获得焊接变形较小、质量一致性高的焊缝。

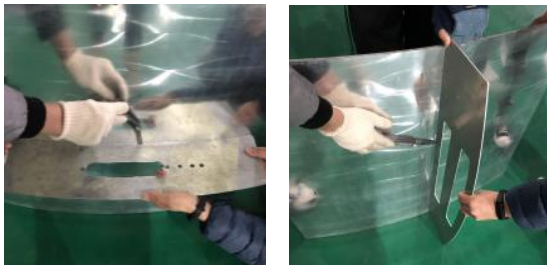
## 参考文献

- [1] 杨建国, 黄鲁永, 张勇, 等. 30CrMnSi 钢 TIG 焊冷裂纹形成机制[J]. 焊接学报, 2011(12): 13-16.
- [2] 徐峰. 不锈钢薄板储能焊点焊接头的显微组织与力学性能[J]. 机械工程材料, 2010(6): 64-66.
- [3] Baue A D, Boothby P J, Rothwell A B. Understanding the weld-ability of Nb-bearing HSLA steels[C]// AIME-TMS Interantional Symp. Niobium 2001, Orlando, USA, 2001, 101-103.
- [4] 刘涛, 王生斌, 袁晓强, 等. T250 与 30CrMnSiA 异种材料焊接工艺技术研究[J]. 航天制造技术, 2011(5): 5-9.
- [5] 孔兆财, 王贺, 马丽翠, 等. GH4169 与 30CrMnSiA 异种金属焊接工艺研究[J]. 航天制造技术, 2017(1): 58-64.
- [6] 张兵宪, 杜明科, 雷龙宇, 等. 补焊工艺对 30CrMnSiA 接头微观组织及性能的影响研究[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 188-192.
- [7] Lippold J C, Kotecki D J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(上接第 6 页)



a 壁板机械校形前



b 壁板机械校形后

图 16 壁板机械校形前后精度检验

## 6 结束语

本文选取了航天典型结构铝合金高筋壁板为对象,开展了铝合金贮箱壁板机械校形工艺研究,通过有限元模拟得到了不同误差壁板所需机械校形力的变化规律及校形力计算公式,并利用公式计算出的校形力进行了壁板校形试验。试验结果显示,公式给出的校形力基本准确,经过机械校形后,壁板表面质量好,

外形精度达到使用要求。研究表明,机械校形方案用于铝合金贮箱壁板的校形工作行之有效,有助于应对未来壁板型号种类增多带来的高质量、高效率制造要求。

## 参考文献

- [1] 曾元松, 黄遐. 大型整体壁板成形技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 721-727.
- [2] 姜亦涛. 航空整体结构件加工变形安全校正关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [3] 孙杰. 航空整体结构件数控加工变形校正理论和研究方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [4] 董亚南. 铝合金整体壁板多点对压成形的裂纹预测与控制[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [5] 王秀凤, 郭晓丽, 陈光南, 等. 整体壁板成形评述[J]. 现代制造技术与装备, 2008(3): 1-6.
- [6] 陈浩, 曲中兴, 张立武. 航空航天整体结构件新型校形技术研究现状[J]. 航天制造技术, 2017(1): 11-16.
- [7] 王秀凤, 郭晓丽, 彭青, 等. 铝合金薄壁件的激光校形试验[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 156-160.
- [8] 陈星. 超声波喷丸校形的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [9] 湛利华, 杨有良. 大型构件蠕变时效成形技术研究[J]. 航空制造技术, 2016(13): 16-23.
- [10] 湛利华, 李杰, 黄明辉, 等. 2524 铝合金的蠕变时效行为[J]. 中国有色金属学报, 2013(2): 320-326.