雷达天线骨架高强钢机器人焊接工艺分析

金志飞，张印
安徽博微长安电子有限公司　安徽六安　237010

摘要：在某型雷达的研制中，实现了国产 Q690D 高强度结构钢（以下简称高强钢）替代以往进口高强钢的应用。介绍了采用机器人焊接技术对某型雷达天线骨架 Q690D 高强度钢进行焊接，对其进行焊接性能分析，并针对焊接性能开展机器人焊接工艺分析。结果表明：经渗透检测，机器人焊后焊缝质量良好，满足技术要求。该工艺已成功应用于雷达天线骨架高强钢机器人焊接生产中。

关键词：高强钢；机器人焊接；寻位编程

Welding process analysis of high strength steel robot for radar antenna skeleton

JIN Zhifei, ZHANG Yin
Anhui Brainwave Chang'an Electronics Co., Ltd., Lu'an 237010, Anhui, China

Abstract: Domestically produced Q690D high-strength structural steel has gradually replaced the application of imported high-strength steel in the development of a certain type of radar. This article introduces the use of robot welding technology to weld the Q690D high-strength steel of a certain radar antenna skeleton, analyzes its welding performance, and conducts robot welding process analysis based on the welding performance. The conclusion is that after robot welding, non-destructive penetration testing shows good weld quality, meeting technical requirements, and ultimately applied to the production task of robot welding of high-strength steel of radar antenna skeleton.

Keywords: high-strength steel; robot welding; positional programming

1　序言

某型雷达是我国自主研发的中低空警戒雷达，为替代进口，该雷达天线骨架采用了国产Q690D 高强度结构钢（以下简称高强钢）进行组焊，机动性能好，整机性能稳定，主要用于担负指定地区中低空警戒监视任务。采用机器人焊接具有较高的运动精度和焊接精度，可以实现对焊接位置、角度、深度等方面的精确控制，具有较高的运动速度和焊接速度，具有很强的适应性和灵活性，可适应不同的焊接工件和工艺要求，满足可靠的高效率和高质量要求[1]。然而，在雷达行业，国产 Q690D 高强钢采用机器人焊接的应用较少。因此，本文以国产 Q690D 高强钢采用机器人焊接为研究对象，重点分析机器人的焊接工艺性能。

2　焊接性分析

2.1　Q690D高强钢化学成分及力学性能

Q690D属于高强度结构钢，w_C≤0.18%，具有较好的焊接性能，焊接后的钢板可以保持较高的强度和韧性，并且在焊接过程中不易产生裂纹，可适用于多种重载结构和设备的制造。其化学成分及力学性能见表1、表2[2]。

表1　Q690D高强钢化学成分（质量分数）　（%）

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	V
≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤
0.18	2.0	0.60	0.025	0.02	0.08	1.00	0.30	0.11	0.20	0.004	0.12

表2　Q690D高强钢力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率（%）	硬度HBW
770～940	≥690	≥14	235～293

2.2　Q690D高强钢焊接性分析

采用德国KUKA生产的KR16型号机器人，配有弧焊软件包及伏能士TPS 500 MIG焊接系统。机器人具有6个关节，使用关节坐标、WORLD坐标、TOOL坐标及BASE坐标基本上能满足对焊枪位置和空间姿态的控制要求。

Q690D高强钢焊接时热影响区的过热区易产生粗晶区脆化，降低韧性，熔合区易于产生热应变脆化，焊接时冷裂纹、热裂纹倾向一般比较小。在T形接头或角接接头的厚板结构焊接时，钢材厚度方向会承受较大的拉伸应力，可能会沿钢材轧制方向发生阶梯状的层状撕裂[3]。综上可知，Q690D高强钢具有优良的焊接性。

3　焊接工艺分析

3.1　焊前清理

机器人焊接前，将拼接成方管的纵梁进行喷砂处理，保证坡口及坡口周围焊接区域内没有油污、铁锈、水及其他氧化物，避免机器人焊接时产生气孔、夹渣等缺陷。

3.2　保护气体

保护气体采用Ar与CO_2混合气体，混合比例约为Ar：CO_2＝4：1，通常CO_2占比为18%～22%。

3.3　焊接参数

Ⅰ级焊缝要求焊缝均匀整齐、无焊接缺陷，因此对焊接参数有很高的要求。试件焊接过程中，在合理的范围内调整焊接参数，见表3。合理焊接参数对纵梁焊接的双面成形合格率影响较小，见表4。

表3　机器人焊接参数[3]

焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/（m/min）	气体流量/（L/min）	摆幅/mm	摆长/mm
160～200	28～30	0.55～0.65	10～15	0～3	0～3

表4　合理焊接参数焊后表面质量检查结果

焊缝编号	焊缝成形	焊缝余高/mm	焊缝宽窄差/mm	焊脚尺寸/mm	未焊透	咬边	裂纹	弧坑	气孔	夹渣	表面质量评定等级
1	优	0.8	0.2	—	无	无	无	无	无	无	Ⅰ
2	优	1.0	0.4	—	无	无	无	无	无	无	Ⅰ
3	优	0.4	0.3	—	无	无	无	无	无	无	Ⅰ
4	优	0.6	0.2	—	无	无	无	无	无	无	Ⅰ
5	优	0.5	0.3	—	无	无	无	无	无	无	Ⅰ

3.4　试件坡口形式

试件采用30°、45°、60°等3种V形坡口，并对焊后余高进行测量，得出30°、60°角度坡口焊后余高差别较大，30°坡口h＞1.5mm，焊缝太凸；60°坡口h＜0mm，焊缝太凹。采用倒角机械加工试件的坡口，坡口为45°V形，焊后满足余高0~1mm，如图1所示。

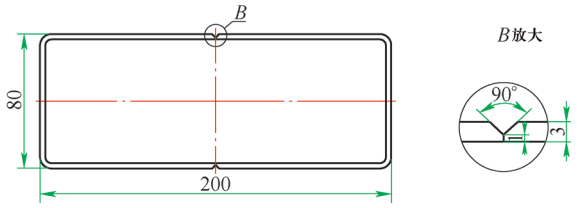

图1　45°V形坡口形式

3.5　焊接顺序

在焊接过程中，试件会产生焊接变形和应力。为减小焊接变形和应力，采用对称焊接顺序（见图2），可使焊后变形和应力得到一定减弱，保证纵梁的正常焊接质量，焊后的天线骨架梁如图3所示。

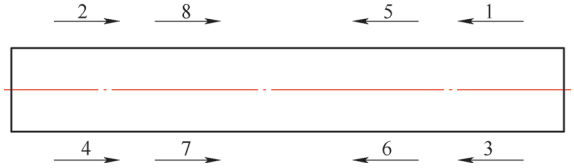

图2　对称的焊接顺序

注：1~8代表焊接顺序。

图3　焊后的天线骨架梁

3.6　机器人焊接工艺过程

（1）焊接机器人运动方式　KUKA焊接机器人采用示教编程，有PTP（点到点）、LIN（直线）、CIRC（圆弧）3种基本运动方式[4]。在雷达部件焊接编程轨迹时，采用准确定位、近似定位的PTP、LIN、CIRC运动类型配合使用，使机器人焊枪以规定的速度沿空间位置移动至焊缝焊接初始位置，以合理的焊缝长度为一个精确编程路径。用示教器工艺编写出焊接程序，要准确预判焊枪空间位置不能行走的路径，防止焊接过程发生撞枪、走偏等问题，如图4～图9所示。

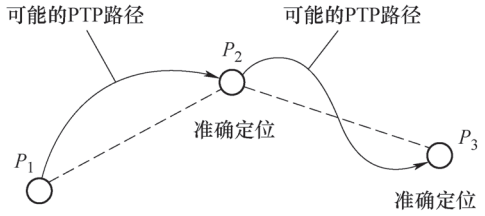

图4　准确定位的 PTP 运动

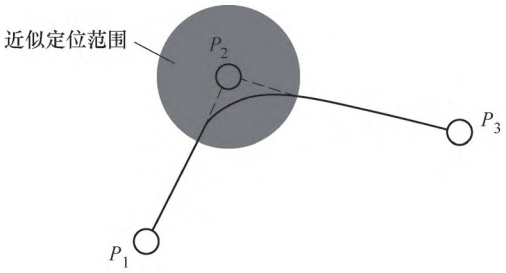

图5　近似定位的PTP运动

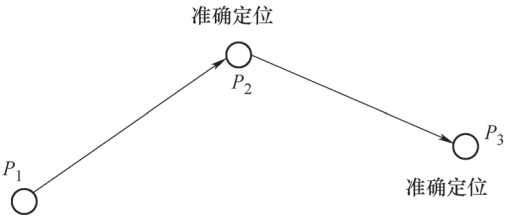

图6　准确定位的 LIN 运动

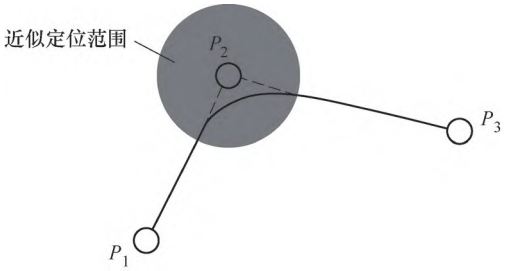

图7　近似定位的 LIN 运动

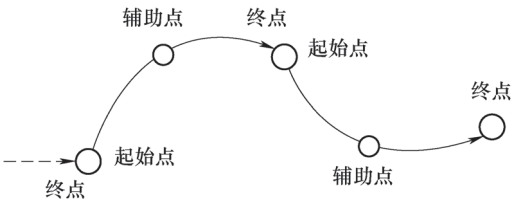

图8　准确定位CIRC 运动

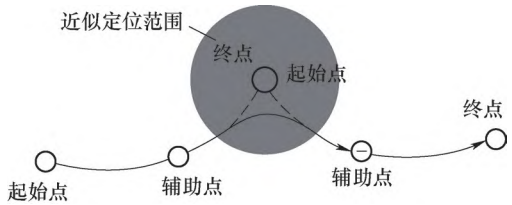

图9　近似定位的 CIRC 运动

（2）焊接机器人寻位编程　在寻位过程中，当焊丝碰到天线骨架纵梁起始点时，通过寻位传感器发送至机器人控制系统，快速测量并记录当时的空间点坐标位置。用同样运动参数使焊丝去接触工件更多点位，机器人相应会记录相应点位的空间位置坐标，且计算出实际位置与示教位置的偏移量，并补偿偏移，自动变更机器人路径，从而保证准确找到纵梁的每段焊缝。

寻位时注意事项[4]主要包括以下几点。

1）保持纵梁表面清洁。

2）保证干伸长一致。焊丝伸出的长度发生变化时会导致焊接寻位编程位置不精确，电弧电压不稳定，造成焊接焊偏、焊缝咬边不规则。

3）设置正确的向量起始点位置，修改空间点位置时，注意点是否带有向量。

4）设置正确的查找距离、寻找速度、返回速度。

5）保证搜寻点和焊缝点是不变的相对位置关系，在查找完、修正后将向量关闭，注意赋值的对象和位置。

6）保证搜寻点和焊缝点是不变的相对位置关系。

4　焊后检测

按以上焊接工艺步骤实施焊接后，对焊缝进行外观检测、超声波检测和渗透检测，结果表明，焊后焊缝未发生焊偏、焊缝咬边不规则、气孔和焊缝余高过高等焊接缺陷和焊接质量问题。

5　结束语

通过Q690D高强钢机器人焊接工艺分析，设置合理的焊接参数，焊缝质量达Ⅰ级；雷达天线骨架焊后变形小，天线骨架组焊后精度及结构性能指标良好。Q690D高强钢机器人焊接工艺的成功应用，对指导机器人今后焊接各种材料钢的生产具有重要参考意义。

参考文献：

[1] 孙燕华. 先进制造技术[M]. 北京：电子工业出版社，2014.

[2] 郭咏华，张斌，张建明. Q690钢管塔试验及工程应用[M]. 北京：中国电力出版社，2013.

[3] 邹增大. 焊接材料、工艺及设备手册[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

[4] 张向明. KUKA焊接机器寻位程序设计[J]. 化工设计通讯，2016，42（7）：178.

MW 20240413