

焊接机器人在大厚板多层多道焊接的 轨迹规划研究与实现

刘崇林¹ 黄 箫²

1. 江西青年职业学院 江西南昌 330045;

2. 中建钢构股份有限公司 广东惠州 518000

摘要: 随着我国制造强国建设的不断推进,焊接机器人在工业焊接领域应用愈加广泛,并取得较好的成效。然而,由于大厚板人工焊接难度大、要求高,大厚板焊接仍面临焊接不连续、焊接易变形、焊接接头质量低的问题。焊接机器人在大厚板多层多道焊接领域应用对降低工人劳动强度、稳定焊接质量、减少成本支出具有重要意义。据此,本文通过对机器人在大厚板多层多道焊接过程中V型坡口路径规划、焊接速度以及焊接顺序以及焊枪位置进行轨迹规划并验证路径规划的可行性,以期为大厚板多层多道焊接发展提供理论借鉴。

关键词: 焊接机器人; 大厚板焊接; 多层多道焊接; 轨迹规划

Research and Implementation of Trajectory Planning of Welding Robot in Multi-layer and Multi-pass Welding of Large Thick Plate

Chonglin Liu¹, Xiao Huang²

1. Jiangxi Youth Vocational College, Nanchang 330045, China;

2. China Construction Steel Structure Co., LTD., Huizhou 518000, China

Abstract: With the continuous advancement of the construction of China's manufacturing power, welding robots are more widely used in the field of industrial welding and have achieved better results. However, due to the difficulty and high requirement of manual welding of large thick plates, the welding of large thick plates still faces the problems of discontinuity, easy deformation and low quality of welded joints. The application of welding robot in the field of large-thick plate multi-layer and multi-pass welding is of great significance to reduce labor intensity, stabilize welding quality and reduce cost. Accordingly, this paper conducted trajectory planning for the path planning, welding speed, welding sequence and welding gun position of the V-groove of the robot in the process of multi-layer and multi-pass welding of large thick plate, and verified the feasibility of path planning, in order to provide theoretical reference for the development of multi-layer and multi-pass welding of large thick plate.

Keywords: Welding robot; Large thick plate welding; Multi-layer and multi-pass welding; Trajectory planning

引言

党的二十大提出“到2035年基本实现新型工业化,加快建设制造强国”。工业是立国之本、富国之源,亦是建设社会主义现代化强国的重要支撑。随着人工智能以及计算机技术的不断发展,工业机器人已逐渐渗透到我国工业现代化发展过程中^[1]。在工业机器人中焊接机器人的应用最普遍,且焊接机器人技术正在由“示教-焊接”、通过传感器在线识别优化的“示教-焊接”到利用传感器传递信息进行自主决策的过程,并在多个领域中得到广泛应用与发展^[2]。

其中,在重型机械、船舶工程以及交通运输等领域厚板焊接应用十分广泛。在大厚板焊接领域中,由于焊接材料具有强度高、焊接性较差、板材厚等特点,一定程度上需要工人承受更大的健康与体力压力,而焊接机器人所具有的智能化、自动化焊接特点,有利于强化钢结构组装以及焊接质量。同时,这也对提升焊接效率、降低成本、缩短劳动时间发挥积极作用。但仍需注意到,当前焊接机器人在大厚板中开展多层多道焊接作业时,仍存在焊道焊接人工在线示教编程效率低、强度大的难题。据此,本文对焊接

机器人在大厚板多层多道焊接轨迹进行重新规划,以期为大厚板多层多道焊接更好确定焊缝初始位置以及提高焊接精度提供一定理论借鉴。

1 大厚板多层多道焊接的现状

我国将板带钢按厚度分为极薄带、薄板、中板、厚板和特厚板五大类,将厚度为20~60mm的钢板称为厚板。大厚板多层多道焊接是一个极其复杂的非线性过程,在重型机械、船舶工程以及交通运输等领域应用中,由于工作环境复杂、焊接分段工件较大、焊缝较多、焊接位置精度较低,常常会造成焊接不连续、易变形以及焊接接头质量差等问题。

1.1 大厚板多层焊接不连续

大厚板在进行多层多道焊接时,由于焊接层数较多,往往会出现焊接不连续的问题。不连续出现主要是由于在对大厚板焊接时,对其平整结构中引入了不规则的结构而造成。而常见的不连续表现为裂纹、未熔合、未焊透、夹渣和气孔,其中在大多数规范中允许有少量未焊透、夹渣与气孔存在,极少数的情况下也允许未熔合产生。目前,大厚板进行多层多道焊接时,部分焊接作业过程中缺乏对母材料耐温性做出合理判断,使得在连续施焊过程中间隔时间掌握不准确,造成裂纹的出现。一是,焊接时间间隔过长,在连续施焊过程中未进行重新预热,使得大厚板焊接在层间出现冷裂纹。二是,焊接时间间隔过短,焊接温度超过900℃,在连续施焊过程中使焊缝中出现焊接晶粒粗大、焊接材料韧性与塑性降低。

1.2 大厚板多层焊接易变形

由于多层多道焊接对焊接热量输入较小、降低焊接缺陷等优势,大厚板焊接中得到广泛应用。但大厚板在采取多层多道焊接方式开展作业时,其过程涉及力学、传热以及冶金等多个物理过程,并且由于焊道之间的“层一道”之间的相互影响,使得焊接工件极易出现变形。具言之,大厚板多层多道焊接过程中,通常会利用熔化焊将焊接间局部加热至溶化状态,待冷却后形成新的焊缝,进而使不同大厚板实现连接。但由于部分大厚板焊接加热过程中接头受热不均匀,冷却后出现热传递现象,使焊缝及附近区域产生拉应力,远离焊缝区域受到压应力,继而造成塑性形变,促使大厚板出现变形。

1.3 大厚板多层焊接接头质量低

厚板焊接接头分为T型接头、十字接头、角接头等,且对于不同的接头焊接的顺序、焊缝填充与方式也不尽相同。一方面,大厚板在多层多道焊接过程中多数会选取焊条头或者铁块作为焊缝填充,但由于选取的焊条头或铁块填充焊缝,无法保证材料是否与母材料形成一致,出现未熔合、未熔透等缺陷,促使焊接接头质量大大降低。另一方面,大厚板多层多道焊接过程中角焊的位置由于焊接参数、焊接电流过大以及焊枪角度不合适,使得焊接接头处出现焊偏、夹渣以及气孔等焊接缺陷,导致焊接接头质量

达不到焊缝标准的要求。

2 焊接机器人在大厚板多层多道焊接中的优势

2.1 降低工人劳动强度

焊接机器人具有灵活、精准复制的特点,可应用于高熟练度以及要求较高的大厚板焊接,极大程度取代工人的焊接工作,提升生产效率、减少工人劳动量。一是,焊接机器人在进行大厚板多层多道焊接时,不会受到时间以及体力的限制,可搭配一些辅助设备对厚板焊件采取自动翻转以及重复作业,将工人从复杂繁重的焊接工作解放出来。二是,工人在对大厚板多层多道焊接过程中会面临恶劣的工作环境和条件制约,这会对工人的身体健康存在一定威胁。由于焊接机器人的使用则在一定程度上改善工作条件以及环境,工人在进行焊接作业时避免大量高强度的体能消耗,只需重复进行简单地装卸工作,因而极大减少工人工作强度。

2.2 稳定焊接质量

焊接机器人在对大厚板多层多道焊接过程中可有效稳定焊接时的电流大小、焊接电压以及焊接速度,对于减少焊接过程中未熔合、未焊透、夹渣和气孔等缺陷具有重要意义。一方面,焊接机器人在焊接作业时,可通过电脑离线编程所设定的标准程序运行,有效控制焊接过程中焊枪中的电流与电压,并使得电流、电压始终保持一致,减少焊缝出现未熔合、未焊透的问题,在提升生产质量的同时保证了焊接的质量稳定。另一方面,焊接机器人在大厚板开展多层多道焊接时,会对焊缝进行自动识别,并依据不同焊接母体材料下放焊缝填充材料。这不仅提升焊件的一致性,使得焊缝美观牢固,而且可有效稳定焊接质量,提高焊件合格率。

2.3 减少成本支出

传统人工焊接中,由于工人在大厚板多层多道焊接作业中无法对焊接的电流、电压大小、焊角的位置以及焊枪角度实现精准控制,会出现夹渣、气孔、少焊、焊偏、过度焊接等缺陷,造成焊接材料成本增加。焊接机器人则可通过传感技术实时监测、焊缝自动跟踪技术以及机器人之间相互协作等方式,降低焊接过程中的生产成本。具言之,焊接机器人能够有效提升焊接效率、精准度以及焊接质量,减少因焊缝填充材料、焊接环境、大厚板焊接过程复杂而造成的人财物力的浪费,缩短焊接时间,减少焊接成本支出。

3 焊接机器人在大厚板多层多道焊接应用的轨迹规划

3.1 大厚板多层多道的焊缝路径规划

焊接机器人焊接路径规划是实现大厚板多层多道焊接的关键所在。本研究选取60~80mm的V型坡口大厚板高强度钢多层多道焊接进行路径规划,采用CO₂气体保护焊作为大厚板焊接工艺,利用等高层焊缝填充方式建立包括焊枪位置、焊接电压、焊接电流以及送丝速度等参数焊接路径模型,提高机器人离线编程示教效率,提高大厚板多道多层

焊接质量。

3.1. 1V型坡口路径规划

等高型填充要保持每一层的高度大致相等，首先根据实际经验选择打底焊道与填充焊缝的高度。之后根据坡口层高计算单道菱形焊缝横截面积。最后利用坡口总高度计算出坡口每层总面积除以单道焊缝的面积，便可得到焊缝则总层数与焊道数。

$$N = \frac{T - H_d}{H} + 1 \quad (1)$$

$$S_i = H^2 \cdot \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$L = \frac{H}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

$$S = H(L + Q) \quad (4)$$

上述公式中， N 表示焊缝层数， H 、 H_d 分别为填充焊道高度、打底焊道高度， S_i 与 S 为第 i 层总面积与焊道总面积， L 表示焊道边长， θ 表示坡口角度， Q 为熔池形状与焊枪摆动修正因子，通常取值为1-3mm。最后通过 S_i/S 计算得到焊道数。

3.1. 2焊接速度以及焊接顺序

为保证焊接机器人在大厚板多层多道焊接过程中，避免发生碰撞、提升焊接精准度，通过利用单道面积 S_i 、输入电流 I 以及焊机专家数据库查询所得的送丝速度 v_e 、焊丝直径 d 、焊缝填充熔敷率 η ，计算焊接机器人焊接速度。焊丝直径与电力流查询对照表如下：

$$v = \frac{\pi d^2 v_e}{4 S_i} \quad (5)$$

其中，焊丝直径与电流查询对照表如下：

表1 焊丝直径与电流查询对照表

焊丝直径d (mm)	电流I (A)
0.8	150-250
1.2	200-300
1.6	350-500
2.4	500-750

为减少焊接过程中焊道变形对焊缝填充造成的影响，进一步调整焊道焊接顺序，减少由热量不平衡带来的塑性形变。借鉴王江超等（2019）研究，使用OpenMP多线程秉性技术与Dummy单元技术，通过电弧焊接工艺对焊缝实现焊接。具体而言，焊接机器人在焊接过程中，将第二道焊缝两端焊接温度差距控制在300度，第三道焊接温度差距控制

在330度，这样可以使焊接过程中的变形程度较小，减少成本以及材料浪费。同时，焊接过程中焊接电流以220A起步，对每一层焊接开始之前均需要对焊缝熔渣进行清理，减少未熔透缺陷。

3.1. 4焊枪位置

本文以焊接机器人底座与大厚板焊接起弧点位置作为坐标点，构建焊枪在焊接过程中的移动方向，使得焊枪在焊接移动中避免与坡口发展碰撞。借鉴廖伟东等（2021）研究，计算出焊枪与焊接坡口横截面坐标 z 轴的夹角 α ：

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \left(\beta + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (6)$$

α 即为焊枪在某一焊道的偏移角度。

3.2大厚板多层多道焊接焊缝实现

采用常用的六自由度工业机器人进行离线编程实验，选取焊丝直径为1.2mm。设置总焊接层数为4层。通过离线编程软件对上文坡口、焊结速度、焊接顺序以及焊枪位置规划进行试验，其中，各焊接层焊道以及焊接电流以及焊接速度如表2所示。由实验验证结果可知，实际的焊道数与此次规划的焊道数趋于一致，对比每层焊道的 y 、 z 轴坐标均有部分误差存在，且每层焊缝的 z 坐标部分低于规划结果。

表2 焊接参数

焊接层	焊道数	电流/A	速度/(mm/s)
1	1	200	7.32
2	3	250	8.58
3	5	250	8.58
4	7	280	8.98

4 结语

随着我国制造产业转型升级需求的影响下，焊接机器人越来越广泛应用到制造业产业各个领域，其中，在大厚板焊接领域，焊接机器人的应用所占比重量愈加庞大。针对当前大厚板多层多道焊接过程中存在的问题，本文根据焊丝直径、焊接电流以及焊接速度等参数，对焊接机器人在大厚板多层多道焊接中的路径进行优化，并通过离线编程仿真实验验证其正确性，为后续工业焊接机器人在该领域的应用提供参考。

参考文献：

- [1] 王飞, 盛仲曦, 陈奔, 陈华斌. 基于WebGL的焊接机器人仿真及多层多道路径规划[J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 27-32+130.
- [2] 郝巨, 李玉杨, 朱永苗, 张家豪, 占小红. 厚板Invar钢多层多道焊与多层摆动焊效率与接头质量对比分析[J]. 焊接, 2020(5): 17-23+62.

作者简介：刘崇林（1987.5.6—），男，江西赣州市人，江苏科技大学硕士研究生，江西青年职业学院讲师，研究方向：焊接自动化技术；

黄潇（1998.8.2—），男，江西宜春市人，大专，中建钢构股份有限公司，研究方向：焊接机器人技术员。