



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.05

焊剂带约束电弧超窄间隙焊接研究现状

程雨潇¹, 蒋小霞^{1*}, 苟宁年¹, 张恒铭¹, 毕学松²

1. 宁夏大学, 宁夏 银川 750021

2. 唐山开元焊接自动化技术研究所有限公司, 河北 唐山 063010

摘要: 超窄间隙焊剂带约束电弧焊接是通过使用一种特制的焊剂带以约束窄间隙坡口电弧攀升、稳定电弧、保护熔池, 从而实现厚板金属材料的窄间隙高质量连接的一种新型的焊接方法。其在船舶制造、油气管道建设和能源行业等领域有着广泛的应用前景。本文梳理和总结了国内超窄间隙焊剂带约束电弧焊接的相关研究及成果, 从焊接工艺参数及窄间隙焊剂带焊接设备等方面进行综述。基于以上分析调研, 对超窄间隙焊剂带约束电弧焊接过程中的难点进行了分析, 介绍了其一些焊接的技术特点和一些亟待解决的问题, 总结和展望了窄间隙焊剂带焊接技术的发展前景。

关键词: 超窄间隙焊接; 焊剂带约束电弧; 电弧特性; 超窄间隙焊枪

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0041-11

Research Status of Ultra-narrow Gap Arc Welding with Flux Band Confinement

CHENG Yuxiao¹, JIANG Xiaoxia^{1*}, GOU Ningnian¹, ZHANG Hengming¹, BI Xuesong²

1. Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2. Tangshan Kaiyuan Welding Automation Technology Institute Co., Ltd., Tangshan 063010, China

Abstract: The ultra-narrow gap flux-belt confined arc welding is a novel welding method for achieving high-quality narrow gap connections in thick metal materials by using a specially designed flux-belt to constrain the arc climb, stabilize the arc, and protect the molten pool. It has broad application prospects in fields such as shipbuilding, oil and gas pipeline construction, and energy industry. This paper reviews and summarizes the relevant research and achievements of ultra-narrow gap flux-belt confined arc welding in China, and provides a comprehensive review from welding process parameters and other aspects. Based on the above analysis and investigation, the difficulties in the ultra-narrow gap flux-belt confined arc welding process are analyzed, the technical features and some urgent problems of the welding process are introduced, and the development prospects of the flux-belt welding technology for narrow gap are summarized and discussed.

Keywords: ultra-narrow gap welding; flux-band confined arc; arc characteristic; ultra-narrow gap welding torch

引用格式: 程雨潇, 蒋小霞, 苟宁年, 等. 焊剂带约束电弧超窄间隙焊接研究现状[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 41-51.

Citation: CHENG Yuxiao, JIANG Xiaoxia, GOU Ningnian, et al. Research Status of Ultra-narrow Gap Arc Welding with Flux Band Confinement[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 41-51.

收稿日期: 2025-03-12 修回日期: 2025-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(52165052); 宁夏回族自治区重点研发计划(2021BEE03001)

作者简介: 程雨潇(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事窄间隙焊接研究。

通讯作者: 蒋小霞(1984—), 博士, 副教授, 主要从事先进连接技术及结构轻量化方面的研究。E-mail: jiangxiaoxia402@126.com。

0 引言

厚板焊接在船舶制造^[1]、油气管道建设^[2]、能源行业和桥梁建设等领域有着广泛的应用,在这些行业中许多厚壁构件无法一次成形,需要高质量焊接来对构件进行拼接,因此如何精密焊接成为了制造过程中的关键技术^[3]。对于此类厚板焊接,窄间隙焊接相对传统焊接方式更加高效、质量更高,但目前窄间隙焊接的应用也面临着各种问题。

如今在进行超窄间隙焊接时,通常采用的是方法有两类,其一是大功率激光焊接或者激光-MIG 电弧复合焊,其在焊接时具有焊接效率高、线能量低等优点,但是相对于传统电弧焊,激光焊接的操作相对繁琐,灵活性较差且成本较高。其二是药芯焊丝窄间隙焊、窄间隙埋弧焊和窄间隙电渣焊等传统焊接方法,一般的窄间隙焊中约束电弧方法有利用氛围气体约束电弧、施加纵向磁场约束电弧和利用器壁约束电弧等。

在超窄间隙中进行常规电弧焊时,在高压作用下,电极间空气被击穿形成电弧,当电弧长度到达一定程度,电压无法维持条件而消失,在空气流动和电力等共同作用下,电弧向上移动,从而导致电弧攀升的现象,因此超窄间隙电弧焊一直缺乏研究。为了解决超窄间隙电弧焊中电弧攀升这一难题,Nakamura^[4]设计了一套同步控制系统,通过控制电流的脉冲循环,控制焊丝固液端头在超窄间隙坡口中进行上下位置的周期性变化,以此来防止焊接时的电弧攀升,使电弧热在超窄间隙中合理分布,从而使电弧有效地加热两侧。但此方法电弧的散发程度较高,不能有效的加热间隙底部,易造成底部熔合不良。

Wang^[5]在 2007 年设计了一套通过电机驱动的旋转电弧系统,通过提高转速降低了焊接时熔滴的半径,提高了焊丝的熔化效率,改善了焊缝的形貌。随后 2011 年在其基础上将旋转改进为摆动,做出了一套通过摆动电弧实现窄间隙焊接的装置^[6],通过试验发现,随着摆动频率和停留时间的增加,侧壁的熔深和焊缝表面的曲率都会增加,对焊缝成形有着明显的改善效果。Wu、Xiao^[7]等人对超窄间隙活性气体保护焊(Ultra-Narrow Gap Metal Active Gas

Arc Welding, Ultra-NGMAGW)和窄间隙埋弧焊(Narrow Gap Submerged Arc Welding, NGS AW)进行了系统的对比,结果发现使用 ultra-NGMAGW 方式焊接的焊接接头的焊缝区存在针状铁素体,并且晶粒细小,局部位错密度高,接头抗拉强度和显微硬度好于使用 NGS AW 方式焊接的焊接接头,这都得益于 Ultra-NGMAGW 有着热输入较小,冷却速度快的优势。

还有部分学者在尝试窄间隙双丝焊接,以求通过一次焊接得到良好的焊缝质量,例如 Xiao 等人^[8]将两个窄间隙焊炬固定在一起,对 Q235 厚板进行了窄间隙焊接,结果表明在合适的速度下窄间隙双丝焊接可以在提高焊接效率的同时保持良好的焊缝质量。

而朱亮^[9]等人对约束电弧的方法上进行了创新,设计出一种用 U 型焊剂带对超窄间隙电弧约束的方法,可以有效防止电弧攀升。这种焊接方法生产效率高、适用于热输入敏感材料,可以控制焊接热输入至 0.5 kJ/mm 左右,并且同时具有焊接接头性能优异、残余变形小等特点^[10],可以有效的减小焊接后焊缝的过热区^[11]。

本文总结我国多年来超窄间隙焊剂带焊接技术的发展过程,展望焊剂带焊接技术在窄间隙焊接领域的应用前景和发展方向,可以为要从事该方向研究的学者提供一定参考。

1 超窄间隙焊剂带焊接

1.1 焊接方法

朱亮、那雪冬^[12]等人,在常规电弧焊的基础上提出了使用贴覆式焊接片来进行辅助焊接,并取得良好的焊缝。在最初的窄间隙焊接试验中,在焊接前,将特制的焊接片用无机胶粘结于 I 型坡口中,采用 3~5 mm 的坡口间隙进行焊接。对窄间隙焊剂片焊接不断进行改进,研究出了一种通过玻璃纤维绳连接的焊剂带,并且可以通过设计一种可以深入窄间隙中的板式焊枪将焊丝与焊剂带同步送入超窄间隙坡口中,以实现自动化焊接。为了深入探究这种焊接方法的性能与规律,研究人员开展了大量试验,并取得了一系列重要成果。

1.2 试验结果

那雪冬^[12]等人通过大量试验数据的总结分析,确定了超窄间隙焊焊接电压与电流的匹配关系,主要与空载电压有关。此外,还发现焊接电压的增加会增强电弧对坡口侧壁的作用,导致熔宽增加。

基于那雪冬对焊接电压与电流关系的研究,郑韶先^[13]等人进一步聚焦于焊剂带约束电弧方法对焊接过程的影响,证明焊剂带约束电弧的方法可以解决窄间隙焊接时坡口侧壁根部不易加热的问题,具体约束示意图如图1所示,焊接效果如图2所示。并且可以调节焊剂带送进速度或焊剂带与熔池中心距离来获得不同程度的电弧约束。

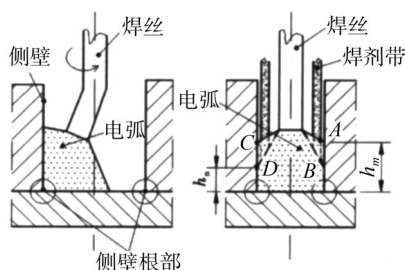


图1 焊剂带约束电弧对超窄间隙侧壁加热示意^[13]

Fig. 1 Heating of the side wall of ultra-narrow gap by confined arc of flux belt^[13]

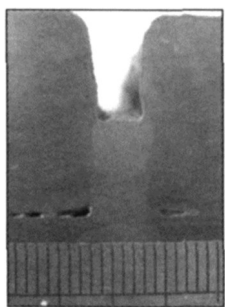


图2 焊剂带约束电弧超窄间隙焊缝截面^[13]

Fig. 2 The flux belt constrains the arc ultra-narrow gap weld section^[13]

朱亮、黄斌维^[14]等人在窄间隙焊剂带约束电弧的基础上,通过对坡口中焊剂带对电弧的几何分析,如图3所示,对其作用机理进行了进一步的阐释。在图中 l_s 是电弧在间隙侧壁的弧长, l_0 是电弧稳定燃烧时工件底部的弧长,由此从几何关系上分析,只有在 l_s 和 l_0 长度接近的时候,才能保证电弧对侧壁和底部的均匀加热。在 l_s 和 l_0 相等的条件下根据图3几何关系可以得出:

$$c = \sqrt{l_0^2 - \frac{1}{4}\omega^2} \quad (1)$$

式中 ω 是坡口间隙的宽度; c 是焊剂带作用长度。可以看出,在焊接过程中,当焊接电压增大,所对应的电弧长度增加,要保证 l_s 和 l_0 相等,需要较长的焊剂带作用长度 c ,所以随焊接电压提高,能满足间隙侧壁和底部均匀加热的送带速度呈增大趋势。

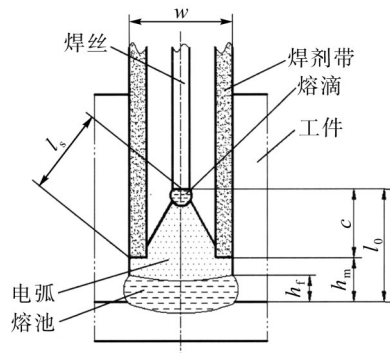


图3 窄间隙中焊剂带与电弧的几何关系^[14]

Fig. 3 Geometrical relationship between flux strip and arc in narrow gap^[14]

在之后的研究中,汤国玺^[10]对焊剂片与电弧相互作用的机制进行了具体分析,其设计了一种快速中断电弧的方法,从而可以得到熄弧位置的熔池形态和焊剂片瞬时熔化形貌。通过分析发现,增加焊剂片送进速度或减少电弧电压可使焊剂片对电弧的作用长度增长,从而可以使电弧有效的被约束在坡口底部,从而对坡口侧壁进行均匀加热。若是焊剂片作用长度不够,则会导致电弧加热区域集中在坡口侧壁,无法形成有效熔池,最终形成有大量气孔的焊缝。龚练^[15]等人对焊剂片成分对焊剂片融化的影响进行了研究,研究发现焊剂中锰铁含量不同的焊剂片对电弧的约束效果有着重要影响,因为锰铁的熔点低于焊剂成分大理石和萤石,所以在焊接时,锰铁含量越高,焊剂带融化越快,以至于底部熔深减小,侧壁熔化高度增加,如图4所示。试验结果不仅揭示了超窄间隙焊剂带焊接的内在规律,也为其在实际工程中的应用提供了坚实的理论基础和技术支持,使其在多种场景中得以成功应用。

1.3 多场景应用

在实际应用中,符平坡^[16]等人在铁路钢轨焊接中应用了超窄间隙焊剂带焊接,并取得良好的效果。由于窄间隙焊剂带焊接有着焊接线能量低、焊接效率高、残余变形小等特点,有效地解决了使用常规钢轨焊接方法会出现不同程度的接头软化现

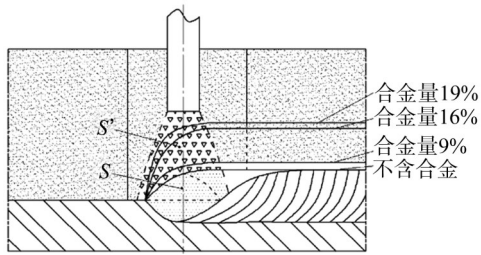


图4 合金含量对焊剂带与电弧相互作用面积的影响^[15]

Fig. 4 Influence of alloy content on interaction area of flux band and arc^[15]

象。并在后续过程中设计了钢轨焊接的完整设备,如图5所示。此后周鸿翔^[17]等人将窄间隙焊剂带焊接应用到异种焊接,在上部为耐磨钢、下部为低碳钢的槽型护轨与道岔对接处进行焊接。焊接接头的焊缝硬度为390 HV,道岔侧热影响区的硬度为410 HV,护轨侧热影响区的硬度为730 HV,均高于母材平均硬度140 HV,如图6所示。结果表明,超窄间隙焊接方法适用于异种钢的焊接,可以实现高质量的焊接接头。

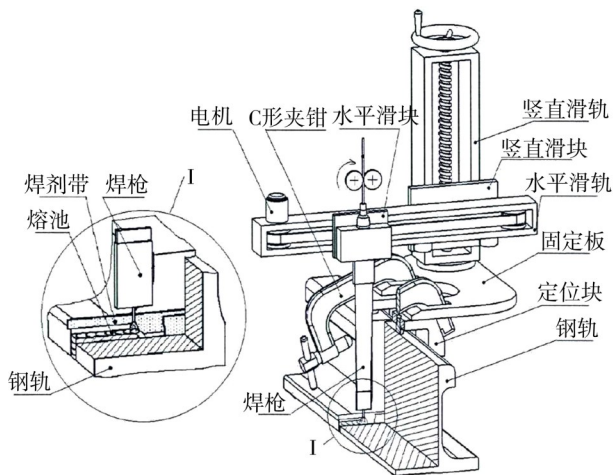


图5 钢轨的超窄间隙焊接装置^[16]

Fig. 5 Ultra-narrow gap welding device for rail^[16]

在窄间隙焊接领域中,管道全位置焊接一直是国内外的研究重点,其关键问题是熔池在交变重力场作用下失稳,影响焊接质量^[3]。张兴有等^[18]人针对铸钢接管横向焊接设计了对应的横焊设备,并做了一系列超窄间隙焊剂带焊接试验,其基本原理如图7所示,试验结果表明,坡口宽度4.5 mm,电弧电压20.5~22 V,焊接电流175~195 A,并且焊接速度在8~10 mm/s时可以明显减少电弧攀升和熔池在重力作用下的下淌,形成质量较好焊缝。后续试验也表

明^[19],窄间隙焊剂带焊接在横焊时可以在0.5 kJ/mm的焊接热输入下,使电弧同时熔化坡口两侧壁,使得熔池的固液接触面积明显扩大,增加了熔池表面张力,由此可知,此方法可以在不降低焊接效率的同时,提高横焊焊缝质量。

通过上述研究可知,窄间隙焊剂带焊接在大型厚板焊接、异种焊接和横向焊接等应用场景都有着良好的焊接效果,已经可以说明焊剂带约束电弧的焊接方式的优势,并且可以针对不同应用场景设计不同的焊接设备。但是由于不同焊接母材和焊接环境对应适用的焊接参数都不同,所以可以开发出对应的仿真程序,以此来降低焊接前期的调试成本,并能找到最优的焊接参数。

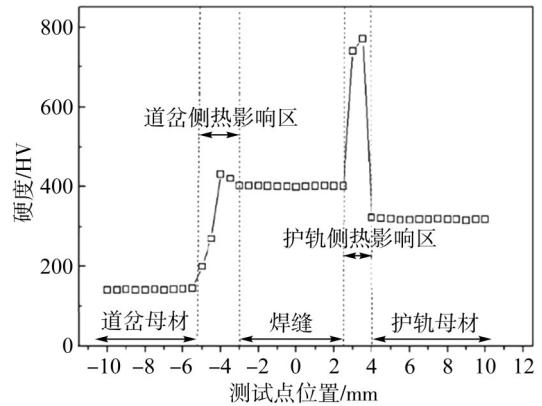


图6 接头垂直于焊缝方向的硬度分布^[17]

Fig. 6 The hardness distribution of the joint perpendicular to the weld^[17]

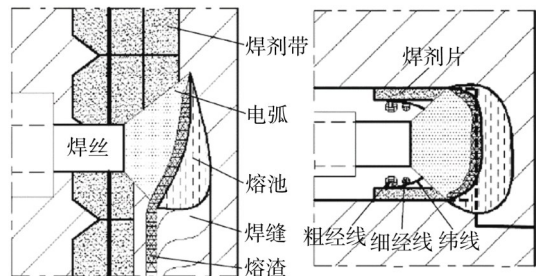


图7 超窄间隙横焊基本原理^[18]

Fig. 7 Basic principle of ultra-narrow gap transverse welding^[18]

2 超窄间隙焊剂带焊接设备

在超窄间隙焊剂带焊接方法出现之初直至如今,实现自动化、多场景适应性都是其发展的关键问题。因此在此后的十多年中对应焊接设备的设

计一直为研究的重点之一。

在最初的设计中,使用的是预置式焊剂带,焊接设备设计如图8所示^[20]。其中焊丝采用的是H08Mn2Si,焊丝直径为1.6 mm,焊枪能在一定范围升降,可以适应不同的焊丝伸出长度,并且可以调节小车的行走速度。

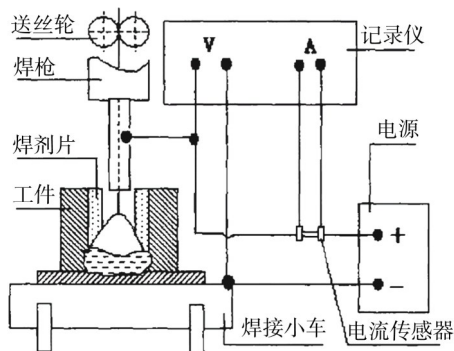


图8 贴覆焊剂片超窄间隙焊试验装置^[20]

Fig. 8 Experimental equipment for welding with super narrow gap of solder sheet^[20]

在窄间隙焊接过程中,焊剂带可以起到很好的约束电弧作用,但是,通过试验发现,电弧区的保护不能仅依靠增加焊剂带的送进速度,因为当送带速度过快时会造成侧壁熔合不良,甚至可能出现焊渣量过多而发生熔渣前流,导致电弧在前流的熔渣表面燃烧而不能充分加热焊缝底部,从而使得焊缝后端的根部产生未熔合或者夹渣现象。因此选择合适的气保护方法来辅助焊剂带约束电弧是必要的。对此郑韶先等^[21]对窄间隙焊剂带焊接的气保护方法进行研究,对多种不同的气保护方法进行了试验和分析,最后确定了粗扁管单侧倾斜送气方法,如图9所示。这种方法具有距离电弧距离较远、导气管口截面面积较大,导气管不易烧损,气体流速较小,气保护面积大,不易形成紊流等优点。因此在其后一段时间的设计中,多沿用此方法。

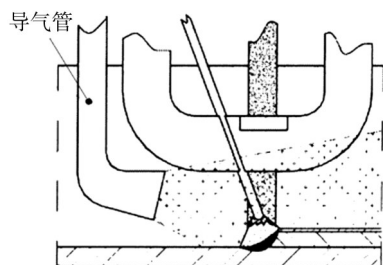


图9 粗扁管单侧倾斜送气^[21]

Fig. 9 Thick flat tube one-sided inclined gas supply^[21]

张旭磊等人^[22]对焊枪的设计主要包括双铜板结构的导电嘴和弹簧片的设计,通过合理选择参数和计算,实现了焊丝的可靠导电和焊剂带的准确输送,如图10所示。这种设计能够满足超窄间隙焊接的要求,并提高焊接效果。

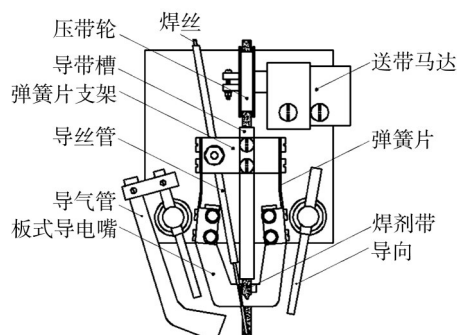


图10 焊枪结构^[22]

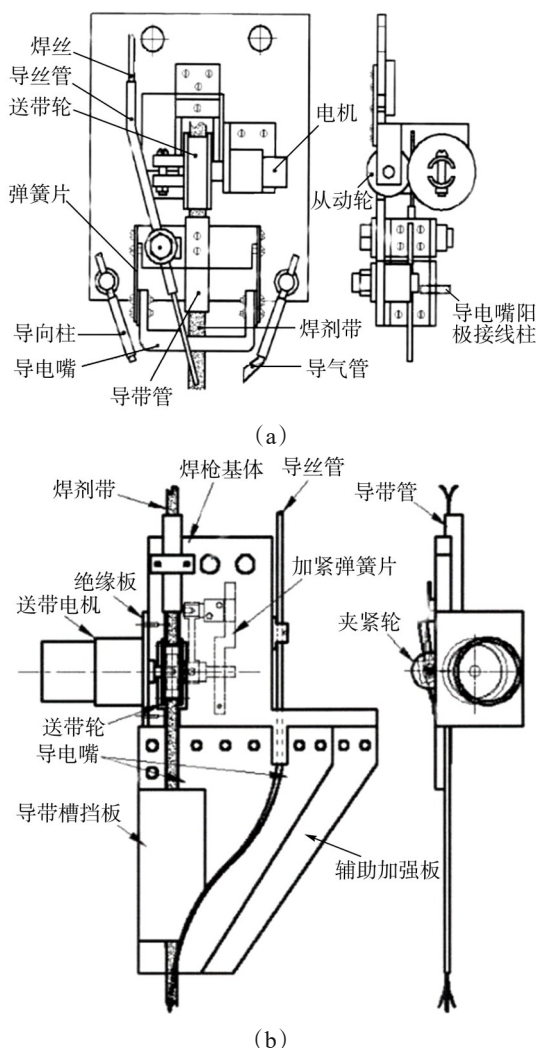
Fig. 10 Welding gun structure^[22]

在之后的研究中,通过不断的试验,发现在超窄间隙焊接过程中由于间隙过小使得飞溅物容易附着在保护气的喷嘴处,导致空气卷入而造成焊缝缺陷。与此同时,由于焊剂带与药芯焊丝窄间隙焊中的药皮类似,其主要成分是大理石(CaCO_3)、萤石(CaF_2)粉末和硅溶胶^[14],所以在焊接时由于电弧热的作用,焊剂带会熔化生成大量气体,因此在之后的研究中增加了焊剂片的厚度^[23],从而可以在焊接时产生更多气体,起到保护气的作用^[24],所以在后期的焊接设备研究中不再设置气保护装置。在周鹏博^[25]对焊枪设计时,去除了气保护装置,减小了导带管的间隙,减小了焊丝的倾斜角度,优化了焊枪的结构,使用辅助加强板使焊枪的稳定性更好,可拆卸性更好,具体方案如图11所示。

通过上述不同窄间隙焊剂带焊接设备的介绍,可以知道在此类焊接方法上已有不少人进行了改进,并且在试验中都有着十分优秀的焊接效果。但如今依旧存在一些问题,比如焊接设备的行走装置,若在之后的研究中可以设计一种适应多形状母材的行走装置和固定装置,将在全位置焊接中的应用中有很大的前景。

3 窄间隙焊剂带

在最初焊剂带是以焊剂片的形式制造,随着之

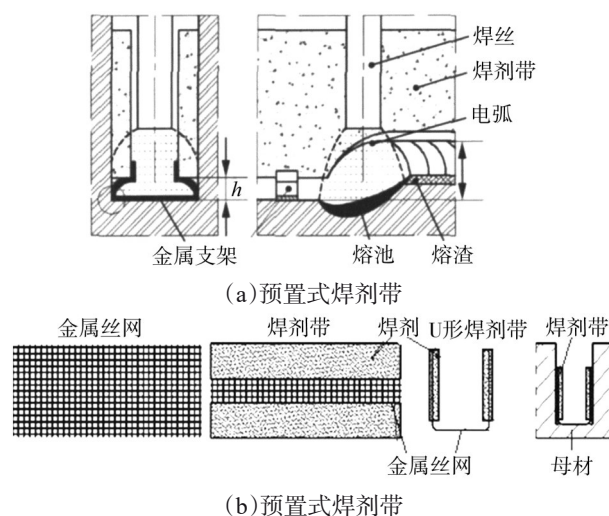
图 11 坡口两侧自动垂直送带式焊枪^[25]Fig. 11 Automatic vertical tape feed welding torch on both sides of the groove^[25]

后不断地改进才出现了链状的焊剂带,由于焊剂片在焊接时需要具有造气造渣,稳定电弧等作用,于是在制作材料上与药皮类似。但药皮有多种制作成分,不同成分药芯在焊接时效果不同。那雪冬对钛钙型、氧化铁型、纤维素型和低氢型四种成分的焊剂片分别进行研究,最后确定了钛白粉 7 大理石 40 云母 2 萤石 27 纯碱 1 的焊剂片配方,其在合适的焊接参数下,电弧稳定性好,也可以解决夹渣问题,此后焊剂带的成分都是在此基础上进行改进。

3.1 焊剂带的制备工艺

伴随着窄间隙焊剂带焊接设备的不断改进与发展,焊剂带的制备工艺也不断的在进行发展。在一开始,焊剂片的制作使用水玻璃作为粘合剂,将

焊剂压制成 0.6~0.8 mm 的片状,用无机胶作为粘合剂粘合到坡口中,并将焊接试板在 200 °C 下保温两到三小时才能焊接^[10]。在此之后,郑韶先对其制备工艺进行改进并设计了制带装置,设计出了连续送带式焊剂带,具体做法是将焊剂片中间通过厚度为 0.1 mm 的薄钢带进行连接,使焊剂片连接成为焊剂带,使用起来更加方便,并且在焊剂中加入萤石成分,可以改变焊接熔渣的粘度和流动性^[12],但由于连续送进时,无法保证焊剂带与坡口侧壁的贴合,所以在之后的研究中又提出的两种预置式焊剂带。其一是苗红丽^[26]等人设计出一种金属支架,提前放入坡口,以此来固定焊剂片,见图 12a。

图 12 两种预置式焊剂带^[26]Fig. 12 Two preset flux belts^[26]

虽然金属支架可以在一定程度上解决焊剂片与坡口侧壁贴合的问题,但是因为坡口间隙较窄,所以金属支架尺寸较小,不易加工并且不好放置,所以焊接效率不高。因此在此基础上设计出了第二种预置式焊剂带,见图 12b。此种焊剂带由金属丝网为框架,用环氧树脂制成环氧树脂胶,涂抹在金属丝网表面,以达到定型和金属丝网边缘绝缘的作用,之后将焊剂粘结在金属丝网两侧,通过金属丝网自身的弹性,可以保证焊剂带两侧与坡口侧壁贴合。在张巨莉对钢轨焊接的研究中,对第二种预置式焊剂带进行改进,在焊剂带的两端增加了一个由焊剂制作的堵头,可以在防止熔池流动的同时更好的保护熔池^[27],具体成形如图 13 所示。但由于焊剂带中间连接处的金属丝网与坡口底部直接接触,若

是坡口两侧的焊剂带有部分没被焊剂或环氧树脂胶覆盖,在电弧经过时,金属丝网与侧壁之间将会形成带电通道,最终造成电弧攀升^[28]。

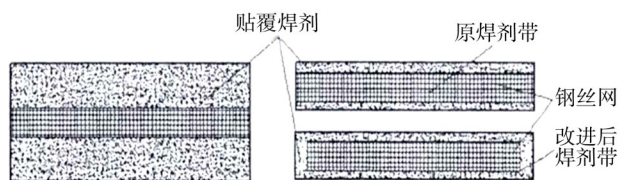


图13 焊剂带示意^[27]

Fig. 13 Schematic diagram of flux belt^[27]

为了解决金属丝网可能造成的电弧攀升问题,在之后的研究中提出了两种解决方法,其一由耐高温弹性绳对焊剂片进行连接^[29],其二由玻璃纤维连接的焊剂带,其具体又分为玻璃纤维网格式焊剂带和玻璃纤维线编制的网状式焊剂片链^[30]两种。在之后,为了更好的控制焊丝与焊剂片之间的距离,并且制作工艺简单,设计了一种特殊的玻璃纤维网状焊剂片链,并设计了对应的玻璃纤维网编制设备^[31]。其中玻璃纤维网在焊接过程中会因为高温分解,大部分会脱离熔池以熔渣的形式排出,结构如图14所示。

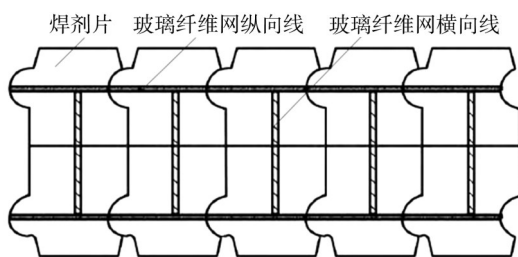


图14 玻璃纤维网状焊剂片链结构^[31]

Fig. 14 Fiberglass mesh flux sheet chain structure^[31]

虽然不断改进的预置式焊剂带在焊接中有着不错的效果,但是由于预置式焊剂带只能调节焊剂带厚度一种焊接参数,所以在实际试验中还是不够实用,所以提出了一种由焊丝送入联动焊剂带送入的自动化送进式焊剂带^[32],如图15所示,并制作了对应的焊剂带送入装置^[10],如图16所示。这种装置在焊剂带送入坡口的最后将焊剂带与焊丝进行贴合,形成图15的结构,随后联动送入坡口中进行焊接。而焊剂带的间隙宽度提前根据坡口的宽度进行对照制作,在实际试验中已达到焊剂带进入坡口时与侧壁贴附的目的。

这种自动送进式焊剂带的设计,可以大大提高

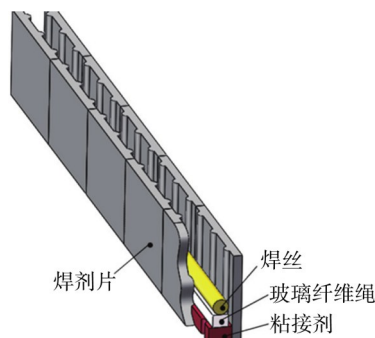


图15 送进式焊剂带结构^[32]

Fig. 15 Feed flux belt structure^[32]

焊接效率,试验中在调节焊剂带厚度的基础上,增加对送带速度的调节,并且由于新的焊剂带结构,可以减少在送带时焊剂带两侧与坡口侧壁不贴合的情况,因此这是至今使用最多的焊剂带形式。

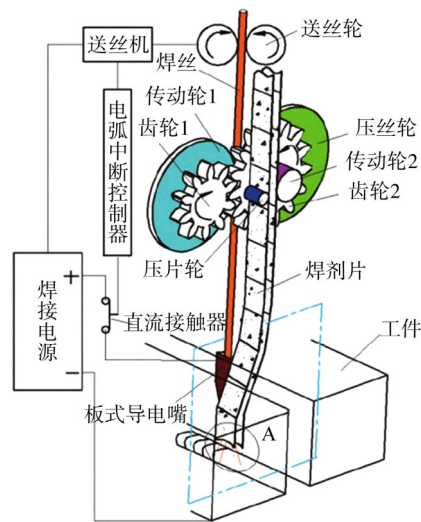


图16 送带机构^[10]

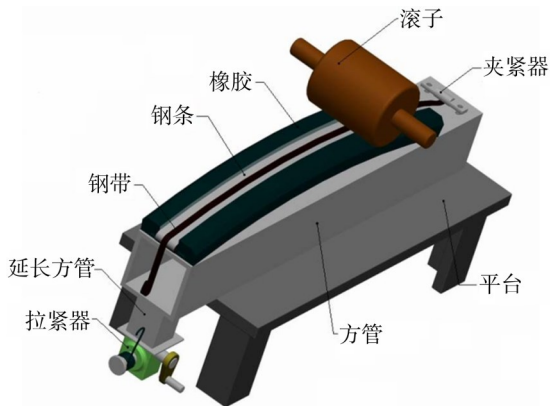
Fig. 16 Tape-feed^[10]

3.2 焊剂带制作设备

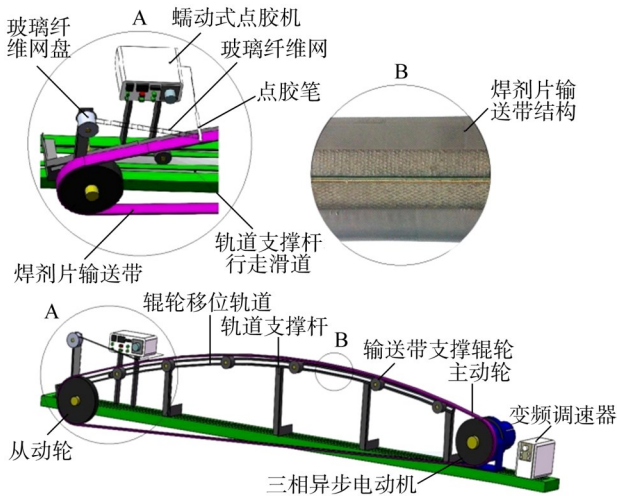
上述提到了多种不同的焊剂带制备工艺,对应不同的工艺,也开发了多种焊剂带辅助制作设备和两代焊剂带制作设备。

在制作以金属丝网为框架连接的焊剂带时,冯志鹏为更加便利的将焊剂固定在金属丝网上,设计了三种滚压模具,分别为平板式滚压模具、水平式滚压模具和拱形式滚压模具,并最终通过对比使用了拱形式滚压模具,其可以基本控制焊剂带厚度,可将金属丝网固定且提升了焊剂带的制作效率,结构如图17所示^[33]。

在早期除了压片以外,焊剂带其他的制作流程

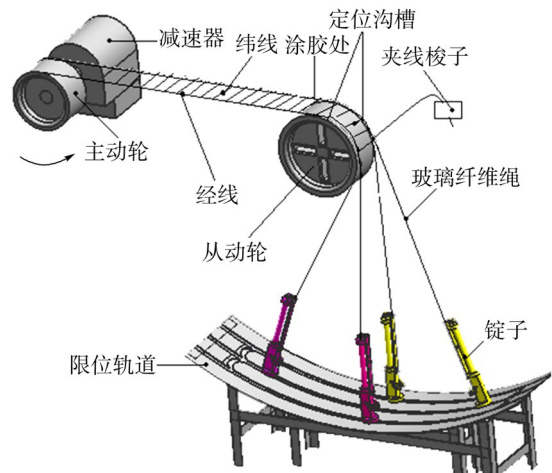
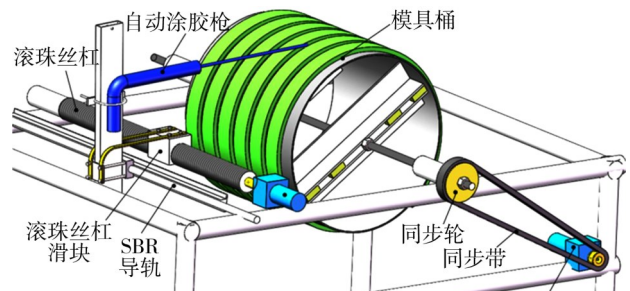
图 17 拱形式滚压模具^[33]Fig. 17 Arch form rolling die^[33]

基本都是手工制作,因此在之后的制作玻璃纤维网式焊剂带时,为了保证焊剂片链的制作效率和精度,设计了对应的焊剂片链半自动生产设备和玻璃纤维网编织设备,如图 18、图 19 所示^[34-35]。

图 18 焊剂片链半自动生产设备^[34]Fig. 18 Flux sheet chain semi-automatic production equipment^[34]

其中焊剂片链半自动生产设备通过三相异步电动机带动焊剂片输送带和蠕动式点胶机进行配合,将焊剂片与玻璃纤维网黏连在一起,并且可以通过调节输送带的速度来改善二者的黏连效果,如此大大提高了玻璃纤维网式焊剂带的制作效率。

在此之后陈欢^[35]对其自动送进式焊剂带的自动化制作进行了研究,设计出了对应的焊剂带制作设备,如图 20 所示。该装置通过调节自动涂胶装置的出胶速度,与模具桶转速进行匹配,设计出了符合实际需求的送进式焊剂带自动生产设备。并且对于粘结剂的选择和用量做出了研究,在多种粘结

图 19 焊剂片链半自动生产设备^[35]Fig. 19 Flux sheet chain semi-automatic production equipment^[35]图 20 送进式焊剂带制作设备^[35]Fig. 20 Feeding flux belt making equipment^[35]

剂中筛选出了耐高温导热硅橡胶,以此来提高焊剂片与玻璃纤维绳粘连的可靠性。

以上便是目前对于不同种类焊剂带的制作设备设计,初步解决了之前纯手工制作焊剂片然后黏连的问题,实现了半自动化生产。但是在实际应用中,这些设备还存在着一定的问题,比如在送进式焊剂带制作设备作业之前,还需要做很多的前期工作,要将焊剂片人工插入到耐高温橡胶带与弹性硅胶管中,玻璃纤维绳还需要人工放入橡胶带槽中。所以在以后对于焊剂带自动化生产设备的研究还有很大的发展空间,对于此设备的研究也可以更好的助力超窄间隙焊剂带焊接的实际应用。

4 发展趋势与展望

超窄间隙焊剂带焊接由于其焊剂带约束电弧的焊接形式,焊接线能量低,使得成形焊缝质量好,是一种优良的窄间隙焊接方式,也因为其电弧

焊的形式,所以有着焊接便利,条件要求少的优点,有着向全位置焊接发展的潜力。基于这些优势,研究人员围绕超窄间隙焊剂带焊接开展了一系列深入研究,尤其在设备研发和工艺优化方面取得了诸多进展。

(1)超窄间隙焊剂带焊接设备从一开始的无气保护装置的较简单的电弧焊设备到后来设计的粗扁管单侧倾斜送气的气保护装置,再到最后通过增加焊剂片厚度,增加焊剂带在焊接过程中自身产生的气体,从而舍弃了气保护装置,并且将焊剂带送带设备与送丝装置进行联动,使得焊丝和焊剂带可以同时送入坡口。经过一代代的不断改进,已经成为了一种可以在实际应用中发挥作用的窄间隙焊接方式。但由于焊剂带上部在焊接后的不完全燃烧和无外部保护气的原因,导致每焊一道后都有残余焊剂带和飞溅产生的焊渣需要人为的清理,由此导致效率不高,并且目前窄间隙焊接的应用场景多为大型厚壁件或大型管件,所以在实际应用中,对于焊枪的行走机构也有着许多考验,因此在之后的研究方向中,降低其焊后焊剂带残余的清理难度和实现全位置焊接是其重要的发展方向。

(2)同时,由于受到超窄间隙厚板焊接的坡口尺寸的限制,每道填充后焊缝形貌和缺陷的检测比较困难,所以后续应对焊缝追踪和焊缝检测进行配套的设计,并且通过深度学习,对焊接时焊缝的形貌进行预测,并根据预测实时对焊接的工艺参数进行调整,以此保证每道焊缝的质量。

(3)对于提高焊接质量,焊接过程中焊剂带约束电弧行为的仿真模拟也将是一个十分重要的研究方向。焊接过程中工艺参数对熔滴过渡影响的仿真、焊剂带与熔池相互作用的过程进行仿真,或者对于焊接过程的温度场和应力场的仿真,都对后续理论试验研究有着良好的指导作用。

(4)焊剂带从一开始的纯手工制作,经过不断发展,目前已经设计出了对应的半自动化制带机,但在实际应用时,生产效率仍不高。未来可以向自动化和集成化方向发展,将制带的各个步骤集成在一起,实现通过工控机控制的自动化流水线,并配套开发PC端的数字孪生系统,实时监控各个环节的工况,以此来提高焊剂带的制作效率和可视

性,达到高效、可控且安全的生产。

参考文献:

- [1] 高志国,吴毅雄,黄坚,等.船用大功率激光焊接技术[J].电焊机,2006,36(05):55-58.
GAO Z G, WU Y X, HUANG J, et al. Marine high power laser welding technology[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(05): 55-58.
- [2] 韩荣生.激光焊技术在管道焊接中的应用[J].科技创新与应用,2016(04):125.
HAN R S. Application of laser welding Technology in Pipeline welding[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2016(04): 125.
- [3] 孙清洁,李军兆,刘一搏.大型厚壁构件窄间隙激光焊接研究现状[J].电焊机,2020,50(07):9-17.
SUN Q J, LI J Z, LIU Y B. Research status of narrow gap laser welding for large thick wall Components[J]. Electric Welding Machine, 2019, 50(07): 9-17.
- [4] Nakamura T, Hiraoka K. Ultranarrow GMAW process with newly developed wire melting control system[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6(6), 355-362.
- [5] Wang J Y, Ren Y S, Yang F, et al. Novel rotation arc system for narrow gap MAG welding[J]. Science and Technology of Welding and joining, 2007, 12(6): 505-507.
- [6] Wang J Y, Zhu J, Fu P, et al. A swing arc system for narrow gap GMA welding[J]. ISIJ International, 2012, 52(1): 110-114.
- [7] Wu S, Xiao W K, Gong L F, et al. Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-Narrow Gap Metal Active Gas Arc Welded and Narrow Gap Submerged Arc Welded Q235A Low Carbon Steel[J]. Materials, 2023, 16(19): 6601.
- [8] Xiao N, Kong H Y, Sun Q J, et al. Study of Process, Microstructure, and Properties of Double-Wire Narrow-Gap Gas Metal Arc Welding Low-Alloy Steel[J]. Materials, 2024, 17(24): 6183.
- [9] 朱亮,金将,苗红丽,等.焊剂带约束超窄间隙焊接母材熔化及熔池形成[J].焊接学报,2010,31(09):9-12.
ZHU L, JIN W, MIAO H L, et al. Fusion and pool formation of base metal in ultra-narrow gap welding restrained by flux band[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31(09): 9-12+113.
- [10] 汤国玺,朱亮,张爱华,等.超窄间隙焊接中送进焊剂片与电弧相互作用机制分析[J].焊接学报,2023,44(03):54-60.

- TANG G X, ZHU L, ZHANG A H, et al. Analysis of interaction mechanism between flux sheet and arc in ultra-narrow Gap Welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(03): 54-60.
- [11] 龚练, 朱亮, 杨韬君. 钢轨对接的焊剂带约束电弧超窄间隙焊[J]. 电焊机, 2016, 46(08): 43-47.
- GONG L, ZHU L, YANG T J. Welding of Rail Joint with confined arc ultra-narrow Gap with flux belt [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(08): 43-47.
- [12] 那雪冬, 朱亮. 细晶粒钢的涂覆焊剂片超窄间隙焊[J]. 电焊机, 2004, 34(08): 20-23.
- NA X D, ZHU L. Ultra-narrow Gap Welding of Fine Grain Steel Coated with flux Sheet [J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(08): 20-23.
- [13] 郑韶先, 朱亮, 张旭磊, 等. 焊剂带约束电弧特性的试验分析[J]. 焊接学报, 2007(08): 57-61.
- ZHENG S X, ZHU L, ZHANG X L, et al. Experimental analysis of confined arc Characteristics of flux belt [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2007(08): 57-61.
- [14] 朱亮, 黄斌维, 郑韶先, 等. 焊剂带控制超窄间隙坡口内电弧加热区域的机制[J]. 焊接, 2008(05): 19-22.
- ZHU L, HUANG B W, ZHENG S X, et al. Mechanism of flux belt controlling arc heating zone in ultra-narrow gap Groove [J]. Welding & Joining, 2008(05): 19-22.
- [15] 龚练, 朱亮, 张爱华, 等. 超窄间隙焊接中焊剂片与电弧相互作用机制分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 57-60.
- GONG L, ZHU L, ZHANG A H, et al. Analysis of interaction mechanism between flux sheet and arc in ultra-narrow gap welding [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017, 38(12): 57-60.
- [16] 符平坡. 钢轨超窄间隙焊接装备研制及工艺试验[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- FU P P. Development and Process Test of Ultra-Narrow Gap Welding Equipment for rail [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [17] 周鸿翔, 朱亮, 王秀菊, 等. 槽型护轨与道岔对接的超窄间隙焊接工艺方法[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 158-161.
- ZHOU H X, ZHU L, WANG X J, et al. Trough type guardrail docking with the switch of the ultra narrow gap welding process [J]. Hot Working Technology, 2019(11): 158-161.
- [18] 张兴有, 朱亮, 杨永吉, 等. 铸钢接管超窄间隙横向焊工艺试验[J]. 焊接技术, 2021, 50(10): 52-56.
- ZHANG X Y, ZHU L, YANG Y J, et al. Cast steel to take over the lateral ultra narrow gap welding process test [J]. Welding Technology, 2021, 50(10): 52-56.
- [19] 董敏, 朱亮, 韩潇潼, 等. 焊剂带约束电弧超窄间隙横焊焊缝成形[J]. 电焊机, 2020, 50(08): 57-61.
- DONG M, ZHU L, HAN X T, et al. Welding seam forming in ultra-narrow gap transverse welding with confined flux band [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(08): 57-61.
- [20] 那雪冬. 贴覆焊剂片超窄间隙焊[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004.
- NA X D. Super narrow gap welding with solder sheet [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2004.
- [21] 郑韶先, 朱亮, 张旭磊, 等. 焊剂带约束电弧超窄间隙焊接的气保护方法[J]. 兰州理工大学学报, 2007(05): 25-28.
- ZHENG S X, ZHU L, ZHANG X L, et al. Gas protection method for confined arc ultra-narrow gap welding with flux belt [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007(05): 25-28.
- [22] 朱亮, 张旭磊, 郑韶先, 等. 焊剂带约束电弧超窄间隙焊接的实现[J]. 兰州理工大学学报, 2007(03): 27-30.
- ZHU L, ZHANG X L, ZHENG S X, et al. Realization of ultra-narrow gap welding with confined arc flux [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007(03): 27-30.
- [23] 苗红丽. 超窄间隙焊接焊剂带研制及电弧特性[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- MIAO H L. Development and Arc Characteristics of welding flux belt for ultra-narrow Gap welding [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [24] 谢玉伦, 朱亮, 柴国云, 等. X70管线钢超窄间隙焊接工艺试验[J]. 热加工工艺, 2016, 45(01): 183-185.
- XIE Y L, ZHU L, CHAI G Y, et al. X70 pipeline steel ultra narrow gap welding process test [J]. Journal of thermal processing, 2016, 45(01): 183-185.
- [25] 周鹏博. 超窄间隙焊接工艺稳定性影响因素的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- ZHOU P B. Research on Influencing Factors of Ultra-Narrow Gap Welding process Stability [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [26] 朱亮, 苗红丽, 金将, 等. 超窄间隙焊剂带约束电弧电压及电流波形特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(08): 85-88.
- ZHU L, MIAO H L, JIN J, et al. Characteristics of confined arc Voltage and current waveform in Ultra-

- narrow gap flux Belt [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31(08): 85-88.
- [27] 张巨莉. 焊剂带约束电弧超窄间隙焊接装置的研制 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- ZHANG J L. Development of welding device for ultra-narrow gap arc confined by flux belt [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [28] 龚练. 钢轨超窄间隙焊接熔池形成及接头性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- GONG L. Research on Weld Pool Formation and Joint Performance of rail Ultra-Narrow Gap welding [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [29] 杨韬君, 龚练, 朱亮. 送置焊剂片链超窄间隙电弧焊接方法 [J]. 电焊机, 2016, 46(08): 33-36.
- YANG T J, GONG L, ZHU L. Ultra-narrow gap arc welding method with flux sheet chain [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(08): 33-36.
- [30] 周鹏博, 朱亮, 张志坚. 焊剂片约束电弧超窄间隙焊接焊丝偏移量的适应性研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(07): 192-194.
- ZHOU P B, ZHU L, ZHANG Z J. Solder pieces the adaptability of the deviation of the ultra narrow gap arc welding wire research [J]. Journal of hot working process, 2018, 47(7): 192-194.
- [31] 霍延通. 焊剂片约束电弧焊接方法开发及其堆焊工艺试验 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- HUO Y T. Development of solder sheet constrained arc welding method and test of surfacing welding process [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [32] 陈欢, 朱亮, 姚仁, 等. 超窄间隙焊接中送进式焊剂带约束电弧的加热特性 [J]. 电焊机, 2021, 51(09): 41-45.
- CHEN H, ZHU L, YAO R, et al. Heating characteristics of confined arc with feed flux in ultra-narrow Gap welding [J]. Electric Welding Machine, 2019, 51(09): 41-45.
- [33] 冯志鹏. 超窄间隙焊接焊剂带开发及工艺试验 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- FENG Z P. Development and Process Test of Ultra-narrow Gap Welding flux belt [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [34] 柴国云. 焊剂片链约束电弧中厚板超窄间隙焊接方法研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- CHAI G Y. Research on ultra-narrow gap welding method of thick plate in confined arc with flux sheet chain [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [35] 陈欢. 超窄间隙焊接的焊剂带的开发及工艺特性 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- CHEN H. Ultra narrow gap welding flux with the development and process characteristics of [D]. Lanzhou: Lanzhou university of technology, 2021.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>