

大熔深焊接技术研究及其应用进展*

李代龙¹, 赵 干², 张建勋¹

(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;
2. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 新乡 453000)

摘 要: 大熔深焊接技术作为一种新型的焊接技术, 其对于厚板或者中厚板焊接质量的保证和生产效率的提高有着极其重要的意义。因此, 制定一套大熔深焊接技术工艺规范, 生产相应的焊接设备是从事相关研究工作人员的主要目标。目前大熔深焊接技术主要分为两大类: 以激光、电子束为主的高能束深熔焊, 以及在传统的气体保护焊基础上升级而来的高效大熔深焊接技术。从应用背景、产生过程以及技术特点等方面综述了这两类大熔深焊接技术的研究进展, 为相关研究工作提供一定的参考。

关键词: 大熔深焊接技术; 高能束深熔焊; 气体保护焊

中图分类号: TG47

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.02.001

Research and Application of Deep Penetration Welding Technology

LI Dailong¹, ZHAO Gan², ZHANG Jianxun¹

(1. Xi'an Jiaotong University, State Key Laboratory of Mechanical Behavior for Materials, Xi'an 710049, China;
2. China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Xinxiang 453000, Henan, China)

Abstract: As a new welding technology, deep penetration welding technology is of great significance to ensure the welding quality and improve the production efficiency of thick plates or plates. Therefore, it is the main goal of relevant researchers to formulate a set of technical specifications for deep penetration welding and produce corresponding welding equipment. At present, deep penetration welding technology is mainly divided into two categories: high-energy beam deep penetration welding mainly using laser and electron beams, and efficient deep penetration welding technology upgraded from traditional gas shielded welding. The research progress of deep penetration welding technology is summarized from the application background, production process and technical characteristics, which provides certain reference for related research work.

Key words: deep penetration welding technology; high energy beam deep penetration welding; gas shielded welding

0 前 言

焊接技术作为制造业生产中的一个环节, 在支撑国民经济中扮演着重要的角色^[1], 随着时代的不断进步, 出现了各种不同的焊接技术。大熔深焊接技术因其熔深大而得名, 作为一种新型的焊接技术, 其对于厚板或者中厚板焊接质量的保证和生产效率的提高有着极其重要的意义。目前

对于板材厚度大、坡口尺寸大、焊缝质量要求高的产品, 国内外依然主要采用普通的熔化极气体保护焊进行焊接, 这在一定程度上限制了产品的生产效率, 特别是对于钝边尺寸较长的厚板, 普通的熔化极气体保护焊很难一次性穿透, 而大熔深焊接电流变化范围较大, 可以实现普通焊机无法达到的深度 (一次性穿透 3 mm 以上), 大大提高了生产效率。

*基金项目: 国家自然科学基金“双金属层状复合材料共熔池激光穿透焊物理机制及‘三明治夹层’接头组织性能调控研究”(项目编号 51875442)。

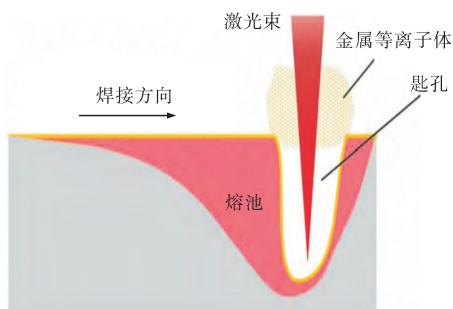
国内外对于大熔深焊接技术的研究,主要从大熔深工艺探索及相关设备开发等方面进行。但很多情况下,设备进步伴随着新工艺开发,而探索先进工艺也需成熟的设备,因此,二者相辅相成,不可分割。大熔深焊接技术主要分为两大类:一种是以激光、电子束为主的高能束深熔焊;另一种是在传统气体保护焊接基础上升级而来的高效大熔深焊接技术。无论是高效的打底穿透技术还是填充、盖面技术,除施加外部辅助措施外,其熔深增加的主要机理都是电流密度的提高^[2]。本研究从以上两个方面综述了国内外大熔深焊接技术的研究现状,为相关科研人员提供一定的参考。

1 高能束深熔焊技术

高能束按照形成原理主要分为激光束、电子束、离子束三类,由此也产生了常用的三种焊接技术,即激光焊接、电子束焊接、等离子弧焊接。高能束焊接热输入大,能量密度集中,焊缝熔深大,焊接效率较高。

1.1 激光深熔焊

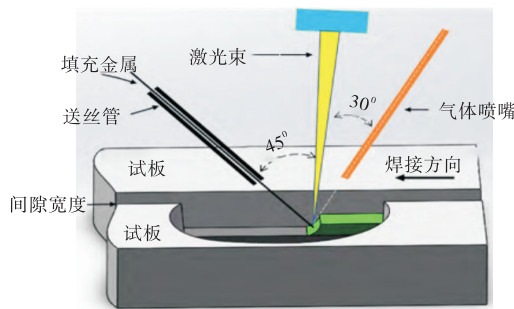
激光焊接是近年发展起来的新型焊接技术,



(a) 激光深熔焊

图1(a)为激光深熔焊示意图。自1916年爱因斯坦提出受激发射和辐射吸收(激光)的概念后^[3],随着科技的进步,各种激光器层出不穷,从功率只有几毫瓦的微型激光器到几万瓦、几十万千瓦的超高功率激光器^[4],其基本原理都是一致的,即当激光能量作用在材料上,使其表面发生汽化,从而形成匙孔;孔内金属蒸汽压力与四周液体的静压力和表面张力达到动态平衡时,激光可通过匙孔照射到孔底;随着激光束的运动,形成连续的焊缝^[5]。

由于激光深熔焊的诸多优点,大量研究人员采用激光深熔焊进行了大熔深焊接研究。方荣超等^[6]采用图1(b)所示的超窄间隙摆动填丝焊装置实现了22 mm厚Q355B钢与35钢异种管的环形工件焊缝成形,其自熔焊的最大熔深达到了4.87 mm。滕彬等^[7]对比了GH536合金激光焊与钨极氩弧焊接头组织性能,发现采用激光焊接可以实现3 mm厚GH536合金的单面焊双面成形,相比氩弧焊的双面填丝焊接成形,显著地提高焊接效率。德国亚琛工业大学焊接研究所采用真空激光进行星齿轮轴架的焊接,在激光功率7.5 kW、焊接速度0.42 m/min、环境压力2 kPa条件下获得了熔深25 mm的高质量焊缝^[8]。



(b) 窄间隙填丝焊

图1 激光焊接示意图

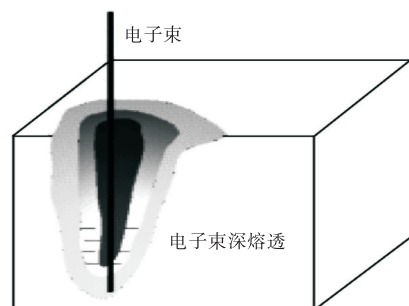
1.2 电子束深熔焊

电子束焊接是一种利用电子束作为热源的深熔焊技术。其基本原理为:处于高真空环境中的电子枪阴极被加热后,表面发射电子,形成能量密度极高的电子束,电子束高速撞击待焊工件,其巨大的动能转化成热能,使撞击部位的温度瞬时升高,迅速熔化金属,形成熔池^[9],图2(a)所示为电子束深熔焊示意图。与激光焊一样,电子束焊接也存在着高能束焊接都有小孔效应。

高功率的电子束焊接在厚板焊接中占据着极其重要的地位,对于厚度200 mm的钛、250 mm的钢以及500 mm的铝可实现无需开坡口,一次性焊透,焊接效率极高^[10]。

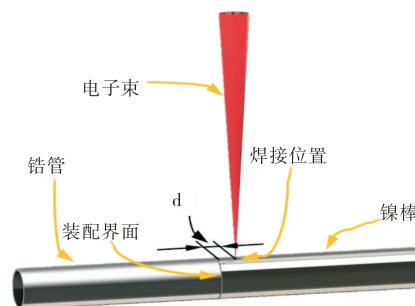
电子束在19世纪中后期被发现^[11-12],20世纪三四十年代应用在焊接领域,1956年世界上出现了第一台电子束焊机,在那之后,电子束焊接技术迅速发展^[13]。国内最早对电子束深熔焊的研究可以追溯到20世纪八九十年代,刘方军等^[14]研究了

大熔深电子束紫铜焊缝，采用横枪电子束焊接方法在含气量较高的试件上获得了 25 mm 熔深的焊缝。Lu 等^[15]采用电子束焊接技术对 50 mm 厚的 TC4 试板进行了焊接，与母材相比，TC4 焊缝展现出更高的强度和硬度，随着焊缝深度



(a) 电子束深熔焊

的增加，强度和硬度增加。滕新颜^[16]采用图2(b)所示的偏束电子束焊接对直径 9.5 mm 的 R60702/N6(锆、镍)进行了焊接，研究发现采用偏束焊接的接头强度相比于非偏束的 36.4 MPa 提升至 180 MPa。



(b) 偏束焊

图2 电子束焊接示意图

1.3 等离子弧深熔焊

等离子弧焊接是在传统的钨极氩弧焊的基础上，增加了水冷喷嘴，并将钨极内缩到水冷喷嘴内，通过喷嘴对电极进行三重压缩，高温等离子体从喷嘴中以很快的速度喷出，获得了密度更为集中、电弧挺度更大的等离子弧，其在焊接过程中也存在小孔效应，因此也属于高能束焊接的一大类。根据焊接电流的大小和对工件形成的焊接状态不同可分为微束等离子焊接、熔透等离子焊接和穿孔等离子焊接三类，三种焊接方式适用于不同的使用场景，当电流小于 30 A 时称为微束等离子焊接；电流在 15~150 A 时称为熔透等离子焊接；电流大于 150 A 时称为穿孔等离子焊接，此时电弧可直接穿透工件^[17-18]，图3^[19]为穿孔等离子弧焊接示意图。

等离子弧深熔焊相比于激光焊、电子束焊更加普遍，适用性更强，因此国内外研究人员从等

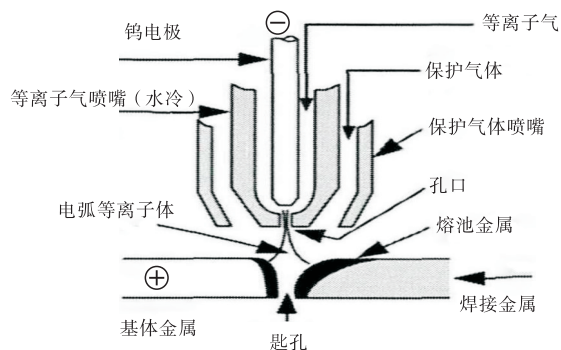


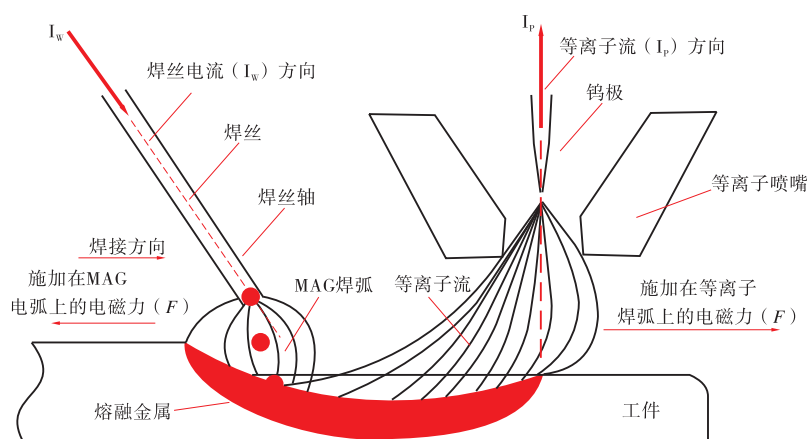
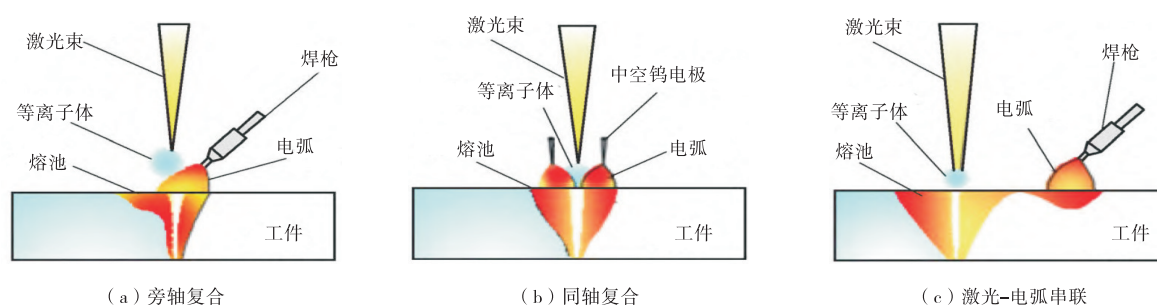
图3 穿孔等离子弧焊接示意图

离子弧焊接的原理、设备等方面展开研究。NASA 工程师^[20]开发了三重气体等离子弧焊枪，其使用了空心钨极代替传统的钨极，使等离子气体可同时从钨极中心和旁边通过，从而提高电弧的稳定性。韩永全等^[21]以双逆变型铝合金变极性等离子弧穿孔立焊设备实现了 15 mm 厚 LD10 铝合金焊接，其研究表明：铝合金变极性等离子穿孔焊接中正极性电弧对力更具影响，而反极性电弧对热更具影响。山东大学贾传宝课题组^[19,22]针对大熔深穿孔等离子弧焊接技术展开了系列研究，最终成功获得了正背面成形良好的 14 mm 厚不锈钢焊缝。

1.4 高能束-电弧复合深熔焊

高能束-电弧复合深熔焊是将高能束与普通的气体保护焊技术（TIG、MIG/MAG、CMT 等）通过旁轴、同轴或串联等方式结合形成的一种复合焊接技术，其综合了两种焊接方式的优点，在各种材料的焊接中得到了广泛的应用。图4^[23]和图5^[24]分别为激光-电弧复合焊与等离子-电弧复合焊接示意图。

高能束-电弧复合深熔焊技术起源于 20 世纪 70 年代，Steen 等^[25]首次提出电弧可以强化激光焊的概念，同一时期，荷兰的 Philips 公司提出了等离子-MIG 复合焊^[26]，随后国内外众多研究者针对高能束-电弧复合焊接技术展开研究。DIL THEY 等^[27]将激光与双 MIG 电弧进行复合焊接，发现与单 MIG 复合焊相比，双 MIG 焊接速度更快、



热输入更小、装配要求更低。朱晓明等^[28]采用 15 kW 大功率 CO₂ 激光对 20 mm 厚的 AH32 船用高强钢进行了激光-电弧复合焊接, 研究发现: 通过激光功率等焊接规范匹配, 激光-电弧复合焊接能实现 20 mm 厚板的全熔透单道对接。朴圣君等^[24]模拟了稳态等离子-MIG/MAG 复合电弧的行为特征及焊接熔池的形态, 结果显示等离子体电弧可以与 MIG/MAG 电弧形成非常良好的复合效果, 二者在电磁力的作用下相互耦合, 形成形态较好的电弧高温区。张强^[29]分别采用了 MAG 焊、电子束焊、激光-MAG 复合焊对 10 mm 厚的调制高强钢 HG785D 进行焊接, 发现激光-电弧复合焊接可实现在较高速度下的高质高效焊接, 同时通过光谱诊断结果表明, 整体上复合焊产生的光谱强度高于单 MAG 焊接时产生的光谱强度。

综上所述, 高能束深熔焊是当下主流的焊接技术, 但其复杂的焊接工序、昂贵的焊接设备、较为严苛的焊接条件是限制其广泛应用的主要因素, 因此未来如何简化焊接流程及焊接条件、降低焊接成本是其主要的发展方向。

2 高效气体保护焊接技术

气体保护焊技术主要分为两大类，一类是非熔化极气体保护焊（TIG焊），另一类是熔化极气体保护焊。传统的气体保护焊技术电流较小，难以实现大熔深焊接（一次性熔透深度 $>3\text{ mm}$ ），因此如何提高电弧的穿透能力是高效气体保护焊技术发展的方向。

2.1 高效TIG焊

常规的TIG焊由于钨极的载流能力有限,因此导致熔深浅,焊接效率低,制约了TIG焊的应用。国内外学者经过长期实践研究开发了各种高效的大熔深TIG焊接技术,如K-TIG焊、磁控窄间隙TIG焊、A-TIG焊、DP-TIG焊、热丝TIG焊、脉冲TIG焊等^[2,30],本节针对常用且发展较为成熟的K-TIG焊、磁控窄间隙TIG焊、A-TIG焊进行简要介绍。

2.1.1 K-TIG 焊

20 世纪 90 年代末, 澳大利亚学者提出通过增大钨电极的直径来提高钨极的载流能力, 由此发明了 K-TIG 焊。K-TIG 焊的电流通常在 300~1 000 A, 大的电流使 K-TIG 焊产生了类似

高能束焊的小孔的焊接过程,极大地提高了焊接效率^[31-32],K-TIG焊原理如图6^[33]所示。

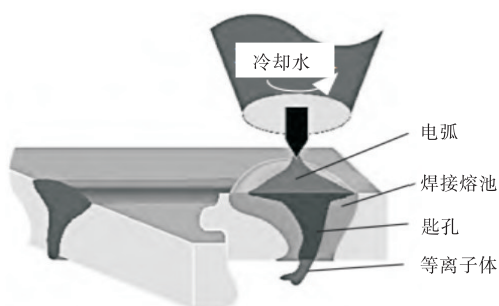


图6 K-TIG焊原理示意图

K-TIG焊在保留了TIG焊的优点外,还具有焊接速度快、节省填充材料等优点。因此在不锈钢、钛合金、铝合金等材料的焊接中得到了广泛的应用。赵方方等^[34]采用K-TIG焊对10 mm厚C-276哈氏合金进行了单面焊双面成形,焊缝表面无气孔、未熔合、裂纹等缺陷,接头的平均抗拉强度为735.5 MPa,接头的硬度一致性也较好。唐君才等^[35]对3 mm、5 mm、8 mm、10 mm厚的304不锈钢平板进行了K-TIG焊接试验,得出了不同板厚

的临界焊接电流。尽管K-TIG焊有以上诸多优点,但是由于其焊接电流大,导致焊接稳定性较差,同时在进行碳钢等合金钢的焊接时,工艺窗口小,焊接可重复性不高,因此在如何提高其焊接稳定性和扩大工艺窗口等方面,还有待研究。

2.1.2 磁控窄间隙TIG焊

窄间隙焊接技术是在焊接过程中采用U形或者I形的坡口,可有效减少焊接材料、降低能耗,其坡口深且窄,因此焊缝金属得到保护,纯度较高^[36]。窄间隙TIG焊在焊接过程中采用小尺寸I形坡口或者小角度U形坡口,焊丝通常选择杂质含量较少、与母材成分相同或相近的合金作为填充金属,从而可以降低热输入和减少焊接耗材,由此可以获得高质量的焊接接头,在厚板焊接中极具优势^[37]。但厚板窄间隙焊接坡口狭窄,极易造成电弧沿壁厚爬升,导致侧壁熔合不良,乌克兰巴顿研究所首次将交变磁场引入窄间隙TIG焊中,磁场的引入改变了电弧形态和分布,有效地解决了侧壁熔合不良的问题^[38],图7^[39]所示为巴顿研究所的磁控窄间隙TIG焊设备。

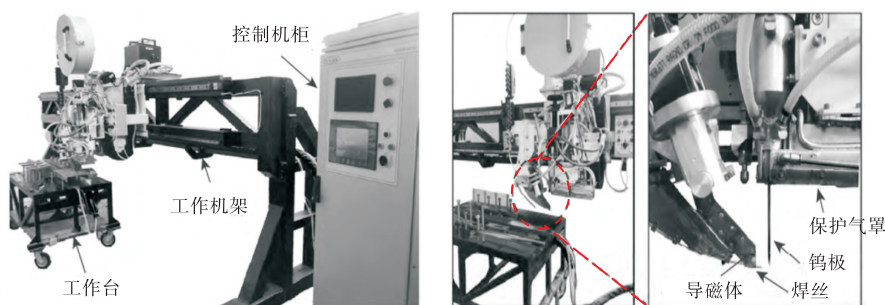


图7 磁控窄间隙焊接设备

磁场的引入不仅改变电弧形态,还可以通过压缩电弧来提高电弧的能量密度,从而提高焊缝的熔深,因而,国内外学者针对磁控窄间隙大熔深TIG焊展开了相关研究。丛成明等^[39]采用磁控窄间隙TIG焊技术对100 mm厚的Ti-6Al-4V板进行了焊接,研究发现:接头的整体强度达893 MPa,但延伸率仅为3.8%,热影响区是整个接头最薄弱的区域。胡金亮等^[40]对120 mm的TA17钛合金板进行了磁控窄间隙TIG焊接试验,研究结果表明:沿着接头横向明显存在着显微组织不均匀性,熔合区为整个接头最薄弱的区域。磁控窄间隙TIG焊在厚板焊接有显著的优势,但目前主要应用在钛合

金领域,在其他材料的焊接研究还相对比较少,同时自动化程度也相对较低,未来应重点在其适用领域和设备自动化程度方面展开研究。

2.1.3 A-TIG焊

20世纪60年代,巴顿研究所为了解决传统TIG焊接熔深潜的缺点,通过向熔池中引入活性剂,实现了增大焊缝熔深的目的。随着时间的推移,出现了各种较为成熟的活性-TIG焊接技术,如A-TIG、FZ-TIG焊、FB-TIG焊、AA-TIG焊、GPCA-TIG焊、GTFA-TIG焊等,其中应用最为广泛的是A-TIG焊接技术。A-TIG焊是在待焊接工件的表面涂覆一层活性剂,然后

再进行TIG焊接操作,通过活性剂引起电弧收缩或熔池表面张力梯度的改变,从而使焊缝熔深增加^[2],相比于传统的TIG焊,A-TIG焊的效率可增加1~3倍。

选择和开发适合不同材料的活性剂以及明确活性剂增加熔深的机理是目前A-TIG焊的研究热点。在活性剂选择方面,Balos^[41]使用金属氧化物的纳米颗粒作为活性剂进行A-TIG焊,不仅提高了焊缝熔深,而且增加了接头的力学性能。杨成刚等^[42]使用了4种不同成分的活性剂进行了A-TIG焊,发现相比于不加活性剂,涂敷活性剂后的接头强度和焊缝熔深均有增加。关于活性剂机理方面的研究目前主要有电弧收缩理论、表面张力梯度理论和热输入增加理论三个方面^[43],但尚没有形成国际上统一的理论基础,因此未来对活性剂增加熔深的机理还有待更深一步研究。

2.2 高效MIG/MAG焊

前文所述高效大熔深MIG/MAG焊基本原理都是电流的提高,但当电流过大时,一方面,熔滴过渡方式会转变为旋转射流过渡导致电弧不稳^[2],另一方面持续的热输入会使得熔池金属飞溅严重,从而导致焊缝成形变差。因此如何在增大焊接电流的同时保持电弧的稳定性成为了研究学者关注的焦点。目前常用的方式是通过改变焊接电源的波形来解决这个问题,也就是常说的脉冲MIG/MAG焊。脉冲熔化极气体保护焊能够使低于临界电流的平均电流值实现稳定的喷射过渡,通过扩大电流范围能够有效控制熔滴过渡、熔池尺寸和热输入,同时可以搅拌熔池、改变接头性能^[44]。

Wu等^[45]研究发现高频脉冲MAG焊对电弧有压缩作用,与常规脉冲MAG相比,高频脉冲MAG焊余高降低,根部熔化深度提高20%,侧壁熔化深度提高30%,两种方式接头的宏观形貌如图8^[45]所示。刘志新^[46]采用HD高速脉冲MAG焊实现了T形角焊缝的不清根熔透焊,焊缝根部熔合良好,焊缝成形美观。孙科等^[47]采用单脉冲MAG焊和强力焊实现了T形角焊缝免清根熔透焊,同时力学性能检验合格,大幅度提升了生产效率。

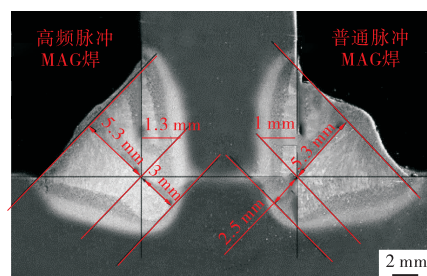


图8 脉冲MAG焊接接头的宏观形貌

3 结 论

(1) 大熔深焊接技术目前在厚板和中厚板焊接中得到诸多应用,并取得了一定的经济效益,随着技术进步,将会更加普及的应用于各行各业。

(2) 高能束深熔焊技术已经比较成熟,但其复杂的焊接程序、昂贵的焊接设备、较为严苛的焊接条件依然制约其快速发展,未来在实际应用中,应着重针对这些问题提出相应的解决方案。

(3) 气体保护焊技术作为传统的焊接方式,依然占据着主要地位,但如何在不改变其焊接特性的前提下提高熔透能力是亟需解决的问题。

参考文献:

- [1] LIX Y. Study on the progress of welding science and technology in china[J].Journal of Mechanical Engineering,2012(6):19-31.
- [2] 石珂,王文楷.中厚板高效焊接技术的研究进展[J].电焊机,2020,50(9):69-78.
- [3] EINSTEIN A. Emission and absorption of radiation in quantum theory [J]//KOX AJ, KLEIN MJ, Schulmann R, et al. The Collected Papers of Albert Einstein. The Berlin Years: Writings, 1914-1917:212-216.
- [4] 王小林,王鹏,吴函,等.LD泵浦高亮度光纤激光器:设计、仿真与实现(特邀)[J].红外与激光工程,2023,52(6):111-139.
- [5] 王瑜,舒乐时,耿韶宁,等.汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势[J].中国激光,2022,49(12):184-201.
- [6] 方荣超,张军,曾军河,等.35钢/Q355B钢窄间隙摆动激光填丝焊研究[J].中国激光,2022,49(16):135-142.
- [7] 滕彬,潘士建,蒋宝,等.GH536合金激光焊与钨极氩弧焊接头组织性能对比研究[J].电焊机,2022,52(5):106-111.
- [8] REISGEN U, OLSCHOK S, JAKOBS S, et al. Welding with the laser beam in vacuum[J].Laser Technik Journal,2015(2):42-46.
- [9] 高奇,廖志谦,蒋鹏,等.大厚度钛合金的电子束焊接技术研究现状[J].材料开发与应用,2018,33(2):118-129.
- [10] 何景山,张秉刚,张亚斌,等.电子束深熔焊匙孔的研究现状[J].焊接,2007(6):28-30,63.

- [11] PATTERSON T, HOCHANADEL J, SUTTON S, et al. A review of high energy density beam processes for welding and additive manufacturing applications[J]. *Welding in the World*, 2021(65): 1235–1306.
- [12] STEIGERWALD K H, SAYEGH G, POWERS D, et al. An international history of electron beam welding [M]. [S. l.]: pro beam, 2007.
- [13] STOHR J A. Procédé de soudure des métaux par bombardement électronique: FR70883(E) [P]. 1956–12–29.
- [14] 刘方军, 王世卿, 陈晓风, 等. 大厚度紫铜电子束焊接的研究[J]. *中国机械工程*, 1996(3): 101–102, 126.
- [15] LU W, LI X Y, LEI Y P, et al. Study on the mechanical heterogeneity of electron beam welded thick TC4–DT joints[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012(A540): 135–141.
- [16] 滕新颜. 钎焊电子束焊接工艺及接头组织转变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [17] 张金衡. 大熔深穿孔等离子弧焊接闭环控制系统及不锈钢焊接工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [18] 熊健强. Inconel625等离子焊接工艺与接头性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [19] 李云. 大熔深穿孔等离子弧焊接熔池及电弧行为的视觉检测[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [20] MCGEE W F, RYBICKI D J, WALDRON D J. Ternary gas plasma welding torch: US05399831A [P]. 1995–03–21.
- [21] 韩永全, 陈树君, 殷树言, 等. 大厚度铝合金变极性等离子弧穿孔立焊技术[J]. *机械工程学报*, 2006(9): 144–148.
- [22] 于长海. 大熔深穿孔等离子弧焊接工艺试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [23] 耿占一, 胡连海, 霍佳磊, 等. 激光复合焊技术研究及应用进展[J]. *金属加工(热加工)*, 2023(4): 1–9.
- [24] 朴圣君, 金成. 等离子MIG/MAG复合焊接电弧及熔池的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(23): 202–205, 209.
- [25] STEEN W M, EBOO M A. Augmented Laser Welding[J]. *Metal Construction*, 1979, 11(7): 332–333.
- [26] ANDRE A D R, FERRARESI V A, SCOTTI A, et al. Influence of welding current in plasma – MIG weld process on the bead weld geometry and wire fusion rate[J]. *Welding International*, 2011, 25(12): 910–916.
- [27] DILTHEY U, KELLER H. Laser-arc hybrid welding [C]//The 7th International Welding Symposium. Proceedings of the international symposium of the Japan welding society. Tokyo, Japan: Japan Welding Society, 2001: 397–402.
- [28] 朱晓明, 蔡艳, 吴毅雄. 大厚度船用高强度钢激光-电弧复合焊接技术研究[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(21): 122–125.
- [29] 张强. HG785D调质高强度钢焊接特性及组织性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [30] 刘自刚, 梅亚泽, 张建峰, 等. 深熔TIG焊研究现状与展望[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(1): 6–11.
- [31] JARVIS B L, AHMED N U. Development of keyhole mode gas tungsten arc welding process [J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2000, 5(1): 21–28.
- [32] LATHABAI S, JARVIS B L, BARTON K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2001, 299(1): 81–93.
- [33] 刘红兵, 宣扬, 李一凡, 等. Invar36合金中厚板K-TIG焊接接头组织及性能分析[J]. *农业装备与车辆工程*, 2023(2): 95–100.
- [34] 赵方方, 杨继超, 郭小辉, 等. 10 mm厚C-276合金K-TIG焊接组织和性能[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(2): 23–26.
- [35] 唐君才, 陈和, 魏占静. 304不锈钢K-TIG焊接工艺[J]. *机械制造文摘(焊接分册)*, 2022(3): 37–40.
- [36] 宁浩楠. TC4钛合金窄间隙TIG焊接接头高周疲劳行为的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [37] WAN L, HUANG Y, LYU S, et al. Narrow-gap tungsten inert gas welding of 78-mm-thick Ti–6Al–4V alloy [J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(15): 1545–1552.
- [38] 胡金亮, 曾才有, 余陈, 等. 厚板钛合金磁控窄间隙TIG焊接技术发展现状[J]. *精密成形工程*, 2020, 12(4): 10–20.
- [39] 丛成明, 曾才有, 张宇鹏, 等. 钛合金厚板磁控窄间隙TIG焊接接头的组织与性能[J/OL]. [2023–12–25]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20220524>.
- [40] 胡金亮, 胡永俊, 曾才有, 等. 大厚度TA17钛合金磁控窄间隙TIG焊接接头组织和力学性能[J]. *热加工工艺*, 2023(9): 42–46, 50.
- [41] BALOS S, DRAMICANIN M, JANJATOVIĆ P, et al. Influence of metallic oxide nanoparticles on the mechanical properties of an A-TIG welded 304L austenitic stainless steel [J]. *Materials*, 2020, 13(20): 4513–4513.
- [42] 杨成刚, 任泽良, 宋友民, 等. 奥氏体不锈钢A-TIG焊工艺研究[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(5): 50–54.
- [43] 刘自刚, 周晓静, 朱婷婷, 等. A-TIG焊接方法研究现状及展望[J]. *材料导报*, 2021, 35(增刊2): 353–357.
- [44] WANG T H, LI Y W, MAO Y H, et al. Research status of deep penetration welding of medium-thick plate aluminum alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022(120): 6993–7010.
- [45] WU X Y, TIAN R Y, ZHANG Z Y, et al. Study on the deep penetration welding procedure and microstructure property of weather-resistant steel SMA490BW welded [J]. *Electric Weld Machine*, 50(10): 65–69, 128.
- [46] 刘志新, 刘斌, 乔春江. 利用深熔焊机焊接熔透焊缝技术研究[J]. *金属加工(热加工)*, 2019(4): 11–13.
- [47] 孙科, 胡相伟, 钱燕波, 等. 熔化极气体保护焊大熔深焊接技术的研究及应用[J]. *焊接技术*, 2019, 48(9): 77–80.

作者简介: 李代龙 (1998—), 男, 硕士, 主要从事电弧焊接与电弧增材制造等研究工作。

通讯作者: 张建勋 (1958—), 男, 博士, 二级教授, 主要从事材料合成与焊接、智能焊接与再制造、焊接结构可靠性等研究。

收稿日期: 2023–10–07

编辑: 黄蔚莉