

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.002

航空航天材料磁控焊接技术综述

李富祥, 王敏, 林巧力, 石珩

(兰州理工大学 省部共建有色先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 磁控焊接技术作为一种高效、高质量的金属焊接方法,在航空航天材料加工领域具有广泛的应用前景。本文综述了磁控焊接的基本原理、技术分类、航空航天材料的应用以及研究现状与发展趋势。通过分析磁控焊接对电弧形态、熔滴过渡、熔池流动及凝固过程的影响,探讨了其在提高焊缝成形质量、增强力学性能方面的优势。同时,结合具体案例和数据分析,展望了磁控焊接技术在航空航天工业中的未来发展。

关键词: 磁控焊接; 航空航天材料; 电弧形态; 焊缝成形; 力学性能

中图分类号: TG442 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2025)01-0020-14

Review on Magnetically Controlled Welding Technology for Aerospace Materials

LI Fuxiang, WANG Min, LIN Qiaoli, SHI Yu

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Magnetically controlled welding technology, as an efficient and high-quality metal welding method, possesses broad application prospects in the field of aerospace material processing. This paper provides a comprehensive review on the basic principles, technical classifications, applications in aerospace materials, as well as the current research status and development trends of magnetically controlled welding. By analyzing the impact of magnetically controlled welding on arc morphology, droplet transfer, molten pool flow, and solidification processes, the advantages of this technology in improving weld bead formation quality and enhancing mechanical properties are explored. Furthermore, with specific case studies and data analysis, the future development of magnetically controlled welding technology in the aerospace industry is identified.

Key words: magnetically controlled welding; aerospace material; arc shape; weld formation; mechanical property

自 1962 年 Brown 等将磁场引入焊接加工工艺以来,磁控焊接技术的研究呈“遍地开花”式的发展。起初,大部分研究工作集中在辅助磁场对焊接熔池冶金凝固的影响。近些年,磁场辅助焊接多聚焦于外加磁场下电弧热力再构及缺陷控制方面。20 世纪 90 年代后,研究人员开始更多地关注可控磁场对电弧特性(如电弧压力场、电流密度场、焊接

温度场)的影响,以及可控磁场对熔滴过渡、飞溅控制方面的影响^[1-2],学术关注度越来越高,如图 1 所示。多年来研究技术的沉淀,使得磁控焊接技术已广泛应用于多种焊接形式及工艺,如图 2 所示。

航空航天工业要求焊接接头具有高强度、高硬度、高耐腐蚀性和轻量化特点,传统焊接技术往往难以满足这些要求^[3-6]。磁控焊接技术能够对焊接

基金项目: 甘肃省青年科技基金(25JRRA097);国家自然科学基金(52461009)。

收稿日期: 2024-11-19; **修订日期:** 2025-01-10

通信作者: 李富祥,男,博士,讲师, E-mail: lifuxiang163wy@163.com。

引用格式: 李富祥,王敏,林巧力,等. 航空航天材料磁控焊接技术综述[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1):20-33. LI Fuxiang, WANG Min, LIN Qiaoli, et al. Review on magnetically controlled welding technology for aerospace materials[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2025, 57(1):20-33.

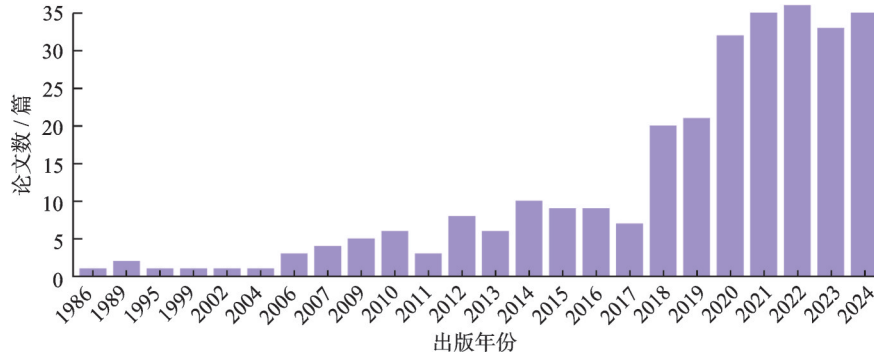


图 1 Web of Science 上统计的关于磁场辅助焊接的论文情况

Fig.1 Situation regarding papers on magnetic field-assisted welding published in Web of Science



图 2 磁控焊接技术在航空航天材料焊接领域的研究现状

Fig.2 Current research status of magnetically controlled welding technology in the field of aerospace material welding

过程进行精确控制,从而实现高质量、高效率的焊接。本文将系统回顾磁控焊接的基本原理、技术分类及其在航空航天材料中的应用,探讨其研究现状与发展趋势。

1 磁控焊接基本原理

磁控焊接技术是利用外加磁场对焊接过程中的电弧行为、熔滴过渡、熔池流动及凝固过程进行干涉和控制的一种焊接方法^[7-9]。磁场的引入能够改变焊

接电弧的形态,并对熔滴的受力状态产生影响,从而改变其过渡方式,最终影响焊缝的成形和性能。基于焊接电弧的导电特性,使外加磁场对电弧空间的带电粒子产生电磁作用力从而影响焊接电弧。通过调节电磁参数使焊接电弧与磁场良性耦合,实现积极的焊接效果,如晶粒细化、增加熔深、消除未熔合等。基于现有文献,电弧焊外加磁场的形式有:外加横向磁场、外加纵向磁场、复杂式尖角磁场^[10-14]。典型的磁场辅助电弧焊原理如图 3、4 所示^[15-16]。

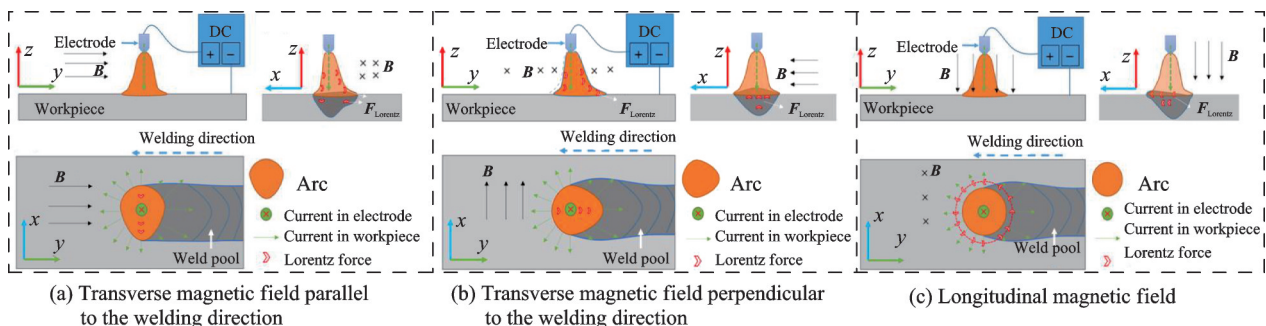


图 3 焊接电弧及熔池与不同磁场的交互作用^[15]

Fig.3 Interaction of the welding arc and molten pool with different magnetic fields^[15]

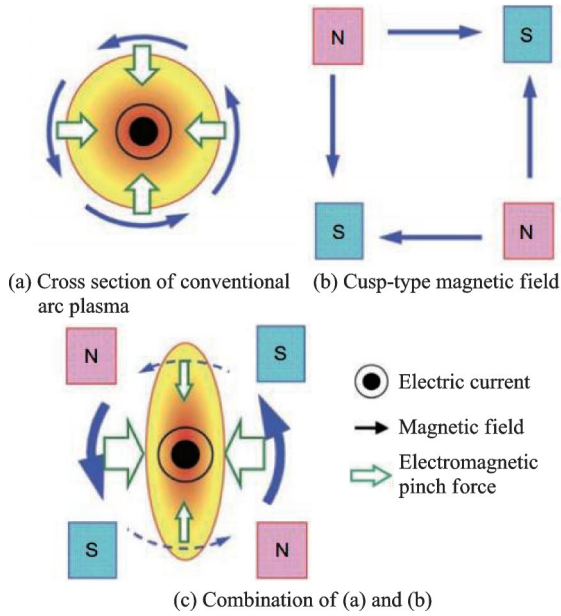


图 4 外加尖角磁场下的焊接电弧^[16]

Fig.4 Welding arc under an applied cusp-type magnetic field^[16]

辅助磁场在高能束焊接领域中也较为常见。尽管已经证实,磁场降低了激光焊中等离子体的屏蔽作用,有助于能量的集中,增加了穿透深度,似乎这一结果仅仅局限于CO₂激光器^[17-19]。当前激光焊接的激光器大都是更为先进的固体激光器,激光焊接过程中没有直接可与磁场作用的导电载体,磁场辅助激光焊接更多是让磁场直接作用于焊接熔池,因此辅助磁场对激光焊接熔池流动影响成为研究焦点^[20-24]。图 5 为两种激光焊接的磁场加载形式^[25-26]。

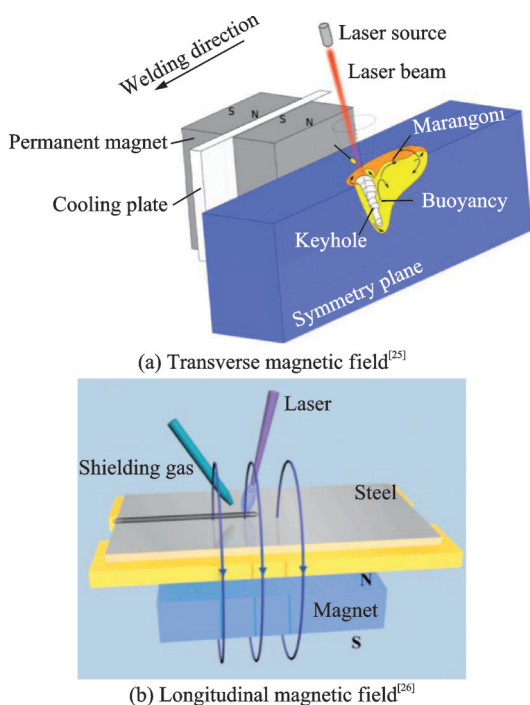


图 5 磁场辅助激光焊接

Fig.5 Magnetic field-assisted laser welding

1.1 磁场对电弧的影响

外加磁场可以通过改变电弧中等离子体的受力情况,从而影响电弧的形态及能量分布^[27]。电弧形态可以从宏观上直接反应磁场对其的作用。横向与纵向外加磁场对其影响有一定的差异。

张九海等^[28]在用小电流进行非熔化极惰性气体保护焊(Tungsten inert gas welding, TIG)焊接时,发现电弧的稳定性欠佳,易于产生电弧偏移现象,不能得到成形良好的焊缝。施加低频横向磁场,电弧会随磁场同步摇摆,造成电弧形态扩大;中频横向磁场对电弧产生显著抑制;而高频横向磁场则明显压缩电弧,使电弧能量密度与电压值升高,电弧刚度加强,有效阻止电弧漂移。常云龙等^[29]在 TIG 焊接试验中,采用了不同种类的磁场,试验效果如图 6 所示:直流横向磁场下,电弧纵截面显现偏斜形态;交流横向磁场时,电弧纵截面则呈扇状。

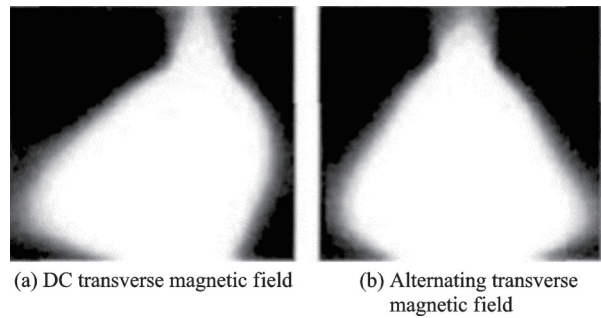


图 6 不同磁场作用下的电弧形态^[29]

Fig.6 Arc morphology under different magnetic fields^[29]

除此之外,在 TIG 高速焊接之中,会发生电弧后拖,进而产生咬边等焊缝成形缺陷,通过施加横向交变或直流磁场,改变激磁电流大小及频率等参数可调整电弧形态,改善电弧后托现象,从而抑制了驼峰缺陷的出现。贾涵浩等^[30]借助高速摄像拍摄了 TIG 高速焊接电弧区施加横向直流磁场与横向交流磁场时的电弧形态,在电场力与磁场力耦合作用下,电弧外观轮廓有明显变动,阳极斑点顺着焊接轨迹延展。这一变动使电弧穿越焊缝截面的时长增加,有助于缩减温度差异,有效防止咬边。

在有关纵向磁场 TIG 焊的研究中,Reis 等^[31]发现恒定频率纵向磁场使焊接电弧空间受力发生改变,尽管电弧呈现为对称的钟罩形,但焊接电弧仍呈“U”形。Xiao 等^[32]采用数值模拟的方法研究了无磁场和施加纵向磁场时阴极、电弧和熔池的温度分布。当施加磁场时,阴极和电弧的峰值温度升高,电弧在阴极附近收缩但在阳极处分散。如图 7 所示,熔池的峰值温度降低,同时熔池的深度也减小。常云龙等^[33]利用高速摄像机捕捉了在交变纵

向磁场作用下的 TIG 焊接电弧形态, 研究结果显示, 当施加纵向磁场时, TIG 焊接电弧发生了显著的收缩现象。在保持激磁电流恒定的情况下, 激磁频率越高, 电弧的收缩现象就越为明显。在特定的磁场参数条件下, 电弧的形态由原本的锥形转变为钟罩形, 并且伴随着一定程度的旋转, 如图 8 所示。

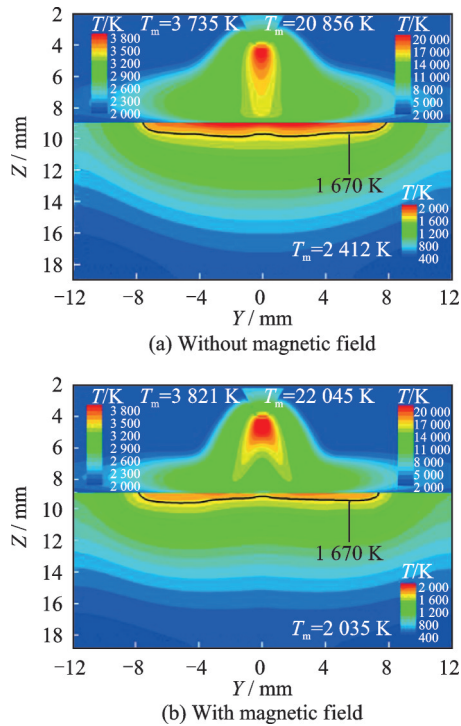


图 7 有无磁场下钨极、熔池的温度场分布^[32]

Fig.7 Temperature field distributions of tungsten electrode and molten pool with and without magnetic field^[32]

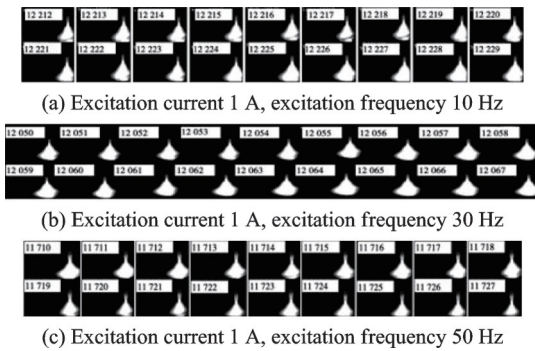


图 8 不同激磁频率时的电弧形态^[33]

Fig.8 Arc shapes at different excitation frequencies^[33]

Janarthini 等^[34]在 TIG 焊接中采用了尺寸小、强度高且无需外部电源的永磁体, 使其产生尖角磁场并用来控制电弧。在电磁作用力的影响下, 等离子体的截面由原来的圆形被压缩成了椭圆形。同样的, 解晓梅等^[35]在等离子弧中施加了一个特定方向的尖角磁场, 并观察到了相应的现象。磁场不仅能有效限制等离子弧的横向扩散, 还可提升电弧的均匀性、稳定性和刚度, 从而增强了等离子弧的能效利用与加工质量。刘翠荣等^[36]则观察到, 当

电弧受到双尖角磁场的作用时, 电弧形态转变为椭圆形, 其电弧压力和电流密度的峰值都实现了提升, 极大地增强了电弧的穿孔能力。

1.2 磁场对熔滴过渡的影响

熔滴过渡形式对焊接的稳定性、焊缝成形及飞溅率等起着至关重要的作用。熔滴的受力状态影响其过渡形式^[37-39]。研究表明, 随着外部磁场强度和频率增加, 熔滴过渡频率也会相应变化。Sun 等^[40]对纵向磁场作用下的熔滴过渡行为进行了深入研究, 他们发现熔滴过渡过程中主要受到 5 种力的作用: 重力、等离子流力、表面张力、电磁力以及斑点压力。在这些力中, 重力、等离子流力和电磁力起着推动熔滴下落的作用, 而表面张力和斑点压力则阻碍熔滴的下落。在没有施加磁场的情况下, 熔滴过渡方式主要是喷射-短路混合过渡, 如图 9 所示。然而, 当施加磁场后, 由于洛伦兹力的影响, 喷射过渡受到抑制, 熔滴偏离其轴线发生旋转, 并且从球形转变为椭球形。随着励磁电流的增加, 熔滴过渡的频率呈现出降低的趋势。常云龙等^[41]利用高速摄像机拍摄熔化极惰性气体保护焊 (Metal inert gas welding, MIG) 熔滴过渡的方法研究了纵向磁场脉冲 MIG 焊接铝合金熔滴过渡形式变化的规律和原因。熔滴过渡不仅与焊接电流、电弧电压有关, 而且外加纵向磁场的电流和磁场频率也显著影响熔滴过渡方式。在不改变脉冲 MIG 焊接参数的情况下, 改变外加交变纵向磁场的激磁电流和频率可以改变熔滴的过渡形式及熔滴的形状。Zhu 等^[42]对交变纵向磁场作用下的 MIG 熔滴过渡行为进行了探索。发现在没有施加磁场的情况下, 熔滴呈现为球形, 并沿着焊丝的轴向方向向熔池转移。然而, 当施加纵向磁场时, 熔滴会围绕焊丝顺时针和逆时针方向交替旋转, 导致熔滴的形状变得扁平, 并且其过渡方向偏离了焊丝的轴线。随着励

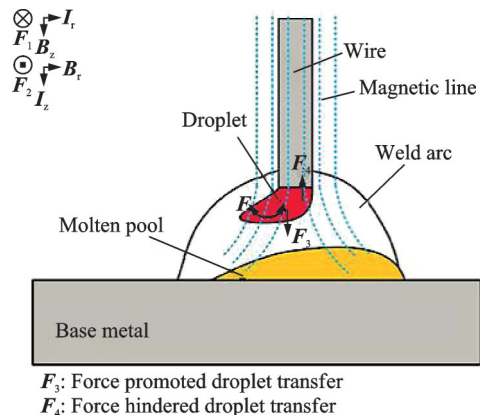
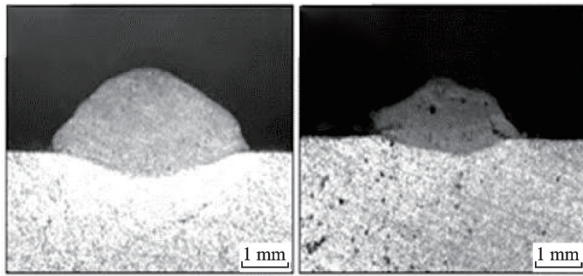


图 9 磁场对熔滴的受力情况示意图^[40]

Fig.9 Schematic diagram of forces on the droplet under the influence of the magnetic field^[40]

磁电流的逐渐增大,熔滴偏离焊丝轴线的程度也随之增加。从图 10 中可以清晰地观察到,当激励电流为 10 A 时,熔滴的过渡过程相对稳定,且焊接成形的质量良好。然而,当激励电流增加到 30 A 时,熔滴无法成功地过渡到焊接熔池中,导致焊接成形的质量显著下降。这一研究结果表明交变纵向磁场对 MIG 焊熔滴过渡行为的显著影响,以及励磁电流大小对焊接过程稳定性和焊接质量重要性的影响。



(a) $I_e = 10 \text{ A}$ (b) $I_e = 30 \text{ A}$

图 10 纵向磁场对熔滴的影响^[42]

Fig.10 Influence of longitudinal magnetic field on the droplets^[42]

张顺善等^[43]探究了磁场作用下的双丝间接电弧气体保护焊过程中熔滴过渡的演变规律,他们利用励磁线圈向电弧区域引入了外部横向与纵向磁场。研究结果显示(图 11),随着正向横向磁场强度的逐步提升,熔滴形态趋于细长,且过渡更为频繁;而负向横向磁场强度的增强则导致熔滴体积膨胀,过渡频率相应降低。此外,在纵向磁场的施加

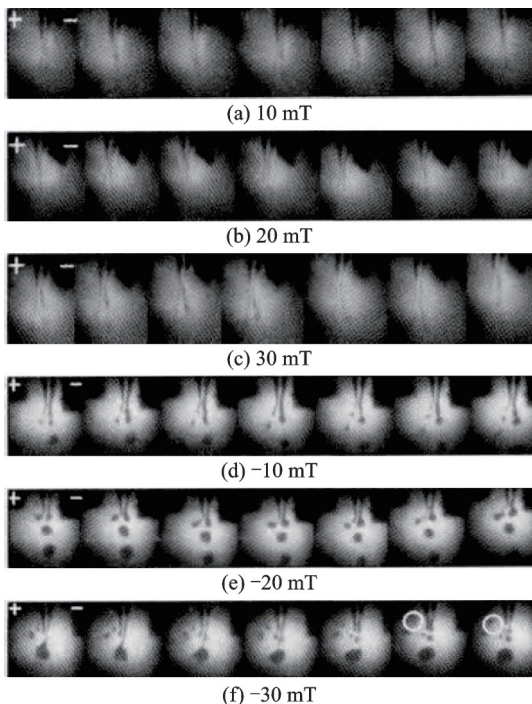


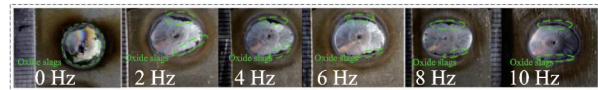
图 11 不同横向磁感应强度下的熔滴过渡^[43]

Fig.11 Droplet transfer under different transverse magnetic induction intensities^[43]

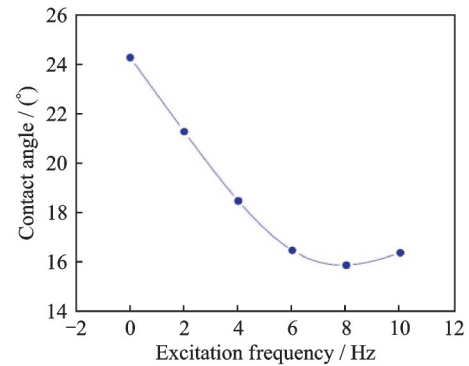
下,熔滴一旦脱离焊丝便会出现偏转现象,且偏转程度随磁场强度的增加而增大。在正向纵向磁场作用下,熔滴向阴极焊丝一侧偏转,在负向纵向磁场作用下,熔滴向阳极一侧焊丝偏转。

1.3 磁场对熔池流动及凝固过程的影响

外加磁场可以对熔池的流动施加电磁力的作用,经电磁搅拌促进熔池流动细化焊缝晶粒,改善焊接质量,提高焊缝性能^[44-47]。同时,磁场还能影响焊缝金属的结晶条件,进而改善焊缝组织。Li 等^[48]发现,在交变横向磁场作用下,磁控摆动电弧打破熔池表面的氧化膜,最终促进熔池边缘液态金属的润湿行为(图 12)。在此基础上,通过考察磁控电弧在窄间隙侧壁的热力状态,建立了单侧壁熔池模型,此模型对于磁控电弧窄间隙焊接工艺优化具有一定的指导意义。



(a) Morphology of the molten pool after solidification



(b) Changes in contact angle at the edge of the molten pool

图 12 磁控电弧改善熔池的润湿行为(此处 0 Hz 指无磁场)^[48]

Fig.12 Wetting behavior improvement of molten pool by magnetically controlled arc (where 0 Hz indicates no magnetic field)^[48]

Wang 等^[49]研究磁场辅助 MIG 高速焊熔池中,利用近似球形的 SiC 颗粒追踪熔池流动轨迹,并通过高速摄像技术记录。研究发现,磁控电弧能够调节熔池的温度分布,并通过抑制熔池金属的逆向流动来有效防止驼峰现象,其工作原理如图 13 所示。具体而言,垂直于焊接方向施加的横向磁场与焊接电流相互作用,产生指向熔池前部的附加电磁力,这一力量阻止了熔池中金属的向后流动,进而显著减少了高速 MIG 焊中驼峰的出现,提升了焊缝的外观和内在质量。

Zhou 等^[50]为了考察稳定纵向磁场对镁/铝激光焊接熔池的影响,建立了磁场辅助激光焊接平台。模拟结果表明,熔池温度梯度减小,热分布趋于均匀。此外,磁场的施加还提高了熔池的流动速

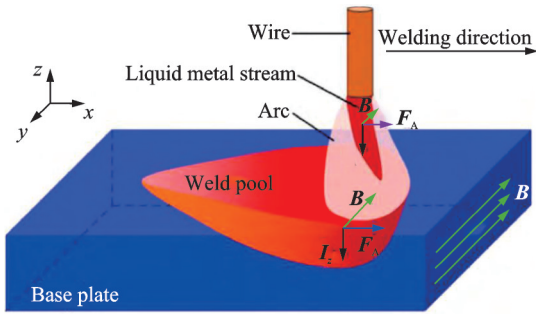


图 13 附加电磁力原理图^[49]

Fig.13 Schematic diagram of the additional electromagnetic force^[49]

度,提高了熔池温度,扩大了液态金属的流动区域。如图 14 所示,磁场作用下熔池温度梯度减小,热分布趋于均匀。此外,磁场的施加还提高了熔池的流动速度,扩大了液态金属的流动区域。磁场作用下熔池渗透更深,熔池形状趋于对称,熔池中 Al 元素分布密度增大。因此,磁场的作用促进了焊接熔池内的传热传质,加速了液态金属的对流和元素扩散,使镁/铝化合物在洛伦兹力的搅拌下弥散分布。可见,磁场对镁铝激光焊接中镁/铝化合物的分布有积极影响,有利于控制焊接质量。

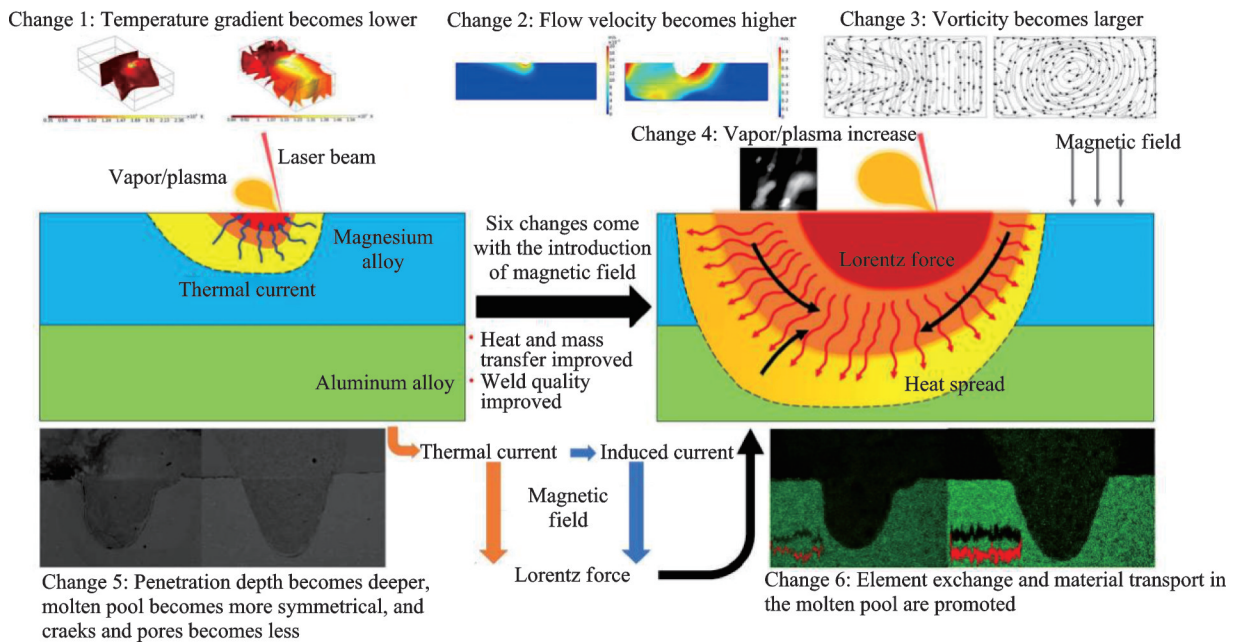


图 14 纵向磁场作用于熔池示意图^[50]

Fig.14 Schematic diagram of the longitudinal magnetic field acting on the molten pool^[50]

2 航空航天材料磁控焊接技术分类

航空航天材料主要包括钛、铝、镁等其他高温合金,磁控焊接技术在这些材料中的应用具有不同的特点和优势^[51-53]。

2.1 钛合金的磁控焊接

钛合金的优势在于强度高、密度低、耐腐蚀性能好,是航空航天工业中广泛使用的材料之一^[54-55]。磁控焊接技术可以显著提高钛合金焊缝的成形质量和力学性能。通过外加磁场,可以细化焊缝晶粒,使焊接缺陷减少,焊缝的强度和韧性得到提高。

Sundaresan 等^[56]采用横向磁场摆动电弧对 α - β 类薄板钛合金进行了焊接,证实了摆动电弧对钛合金有明显的晶粒细化作用(图 15)。同时摆动电弧焊接状态下接头的力学性能要优于未施加磁场的焊后热处理接头。王立祥等^[57]考察了辅助磁场励磁电流对薄板 TA2 钛合金力学性能的影响,发现

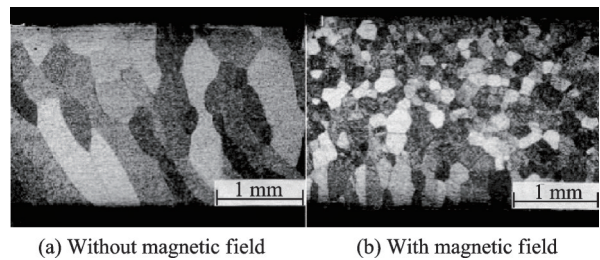


图 15 有无磁场下 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 合金焊缝组织^[56]
Fig.15 Microstructure of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy welds with and without magnetic field^[56]

施加磁场后,接头强度并不是单调地增加,即存在一个最佳的磁场励磁电流值,接头强度和塑性取得最大值,力学性能的改善归因于磁场作用下焊缝的细晶强化(图 16)。

随着钛合金板厚增加,焊接难度增大^[58]。孙清洁等^[59-60]针对厚度为 56 mm 厚 Ti-6Al-4V 合金材料,实施了窄间隙磁控电弧 TIG 焊接,获得了无未熔合缺陷的焊接接头,并对比了接头各区域微观

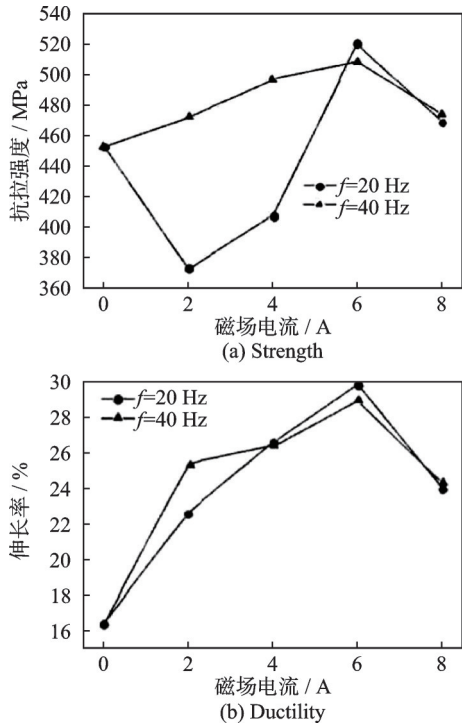


图 16 TA2 钛合金接头性能^[57]

Fig.16 Properties of TA2 titanium alloy joints^[57]

组织的差异。如图 17、18 所示,电磁效应显著增强了平面状结晶前沿的稳定性,并促进了后续等轴晶的形成与稳定性,随着磁场强度的逐步增强,熔合线附近原本的柱状晶逐渐过渡为等轴晶。而在焊缝中心区域,磁控电弧的作用进一步提升了等轴晶

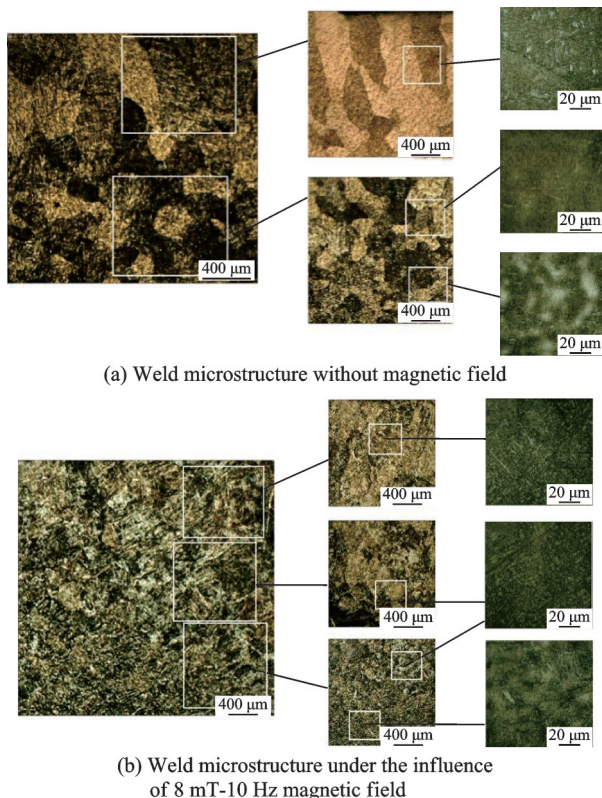


图 17 钛合金接头焊缝组织^[59]

Fig.17 Microstructure of titanium alloy joint welds^[59]

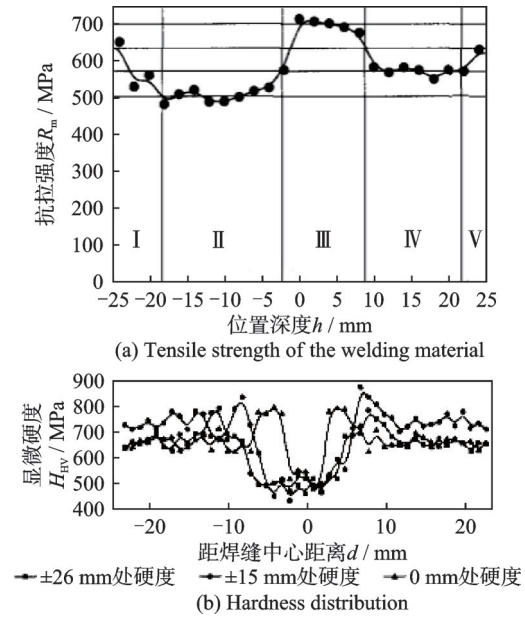


图 18 焊缝力学性能分析^[60]

Fig.18 Analysis of mechanical properties of the weld^[60]

的稳定性,随着磁场强度的增大,等轴晶开始沿特定方向延伸,特别是在热传导的主导方向上,形成了更为粗大的柱状晶结构。因此,焊缝的强度高于填充金属的原始性能值,这是通过针状组织的啮合强化效果来实现的。而由于焊缝横截面沿厚度方向上的内应力分布导致后焊侧的中心线附近的强度及韧性明显提高。同一位置深度上,焊接热影响区熔合线附近的硬度最高。这是由于大量蓝网状分布的针状 α 相存在的原因。

2.2 铝合金的磁控焊接

铝合金跟钛合金一样,同样具有密度低、强度高、耐腐蚀性好等特点,在航空航天领域应用广泛。然而,航天航空用铝合金存在以下焊接难点,如易出现焊接气孔和裂纹^[54,61-62]。鉴于磁控焊接技术的优势,可以改善铝合金焊缝的成形,提高焊缝性能。同时,磁控焊接还可以提高铝合金焊接过程的稳定性和效率。

陈保帆^[63]报道了交变振荡磁场可明显改善激光焊接过程中的气孔问题。王沐^[64]研究了恒定磁场下激光扫描模式对 10 mm 航空铝合金 6061T6 气孔率的影响,如图 19 所示,发现扫描激光下的焊缝的气孔率要低于常规焊接,施加了磁场后,气孔率会进一步的降低,佐证了磁场在铝合金焊接气孔抑制方面的积极作用。

航空航天用国产高强铝合金 LD10CS、LY12CZ 的焊接问题日益突出,尤其焊接时的热裂倾向是技术难点^[65]。卢焯等^[66]借助横向磁场摆动电弧焊接方法寻求解决上述铝合金的焊接问题。如图 20 所示,研究结果表明,对于 LD10CS、

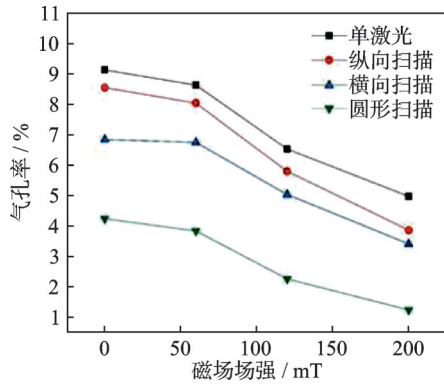


图 19 磁场与激光扫描模式对铝合金焊接气孔率的影响^[64]

Fig.19 Influence of magnetic field and laser scanning mode on the porosity of aluminum alloy welds^[64]

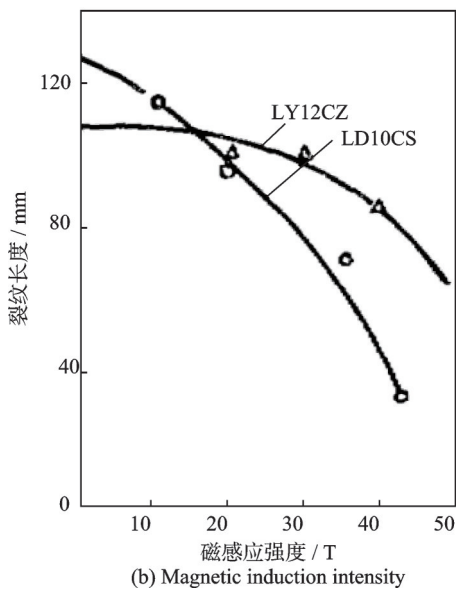
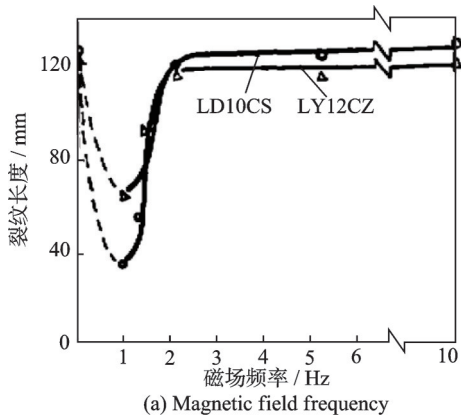


图 20 磁场参数对铝合金焊缝裂纹长度的影响^[66]

Fig.20 Effects of magnetic field parameters on crack length in aluminum alloy welds^[66]

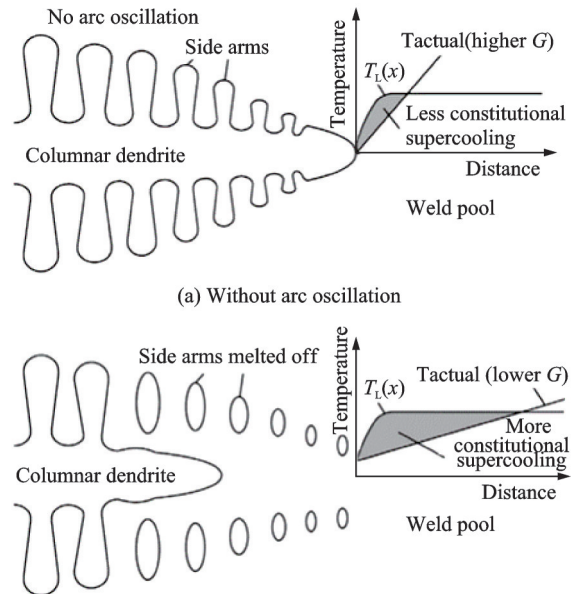
LY12CZ 两种铝合金,焊后结晶裂纹长度最短时存在最佳的磁场频率为 1 Hz,随着磁感应强度的增强,裂纹长度逐渐减小。这主要归因于低频磁场时焊缝形成交错的柱状晶,导致裂纹扩展的形式出现差异,增大了裂纹扩展的阻力。同时低频磁场在一

定程度上使低熔点共晶组织弥散、细小,也不利于裂纹的扩展。然而磁场是如何导致这种组织差异的,作者并未给出深入的分析。

2.3 镁合金磁控焊接

镁合金因具有轻质高强、良好的减振性和抗电磁干扰性等特点,在航空航天领域的应用前景非常广泛^[67-68]。然而,镁合金往往焊接性能较差,难以实现可靠焊接,这限制了其进一步发展。磁控焊接技术的出现,为镁合金的焊接提供了新的解决方案。镁合金的熔点低、热导率高,焊接时需要大功率的热源。然而,这容易导致焊缝及热影响区出现过热、晶粒长大等现象,导致接头力学性能降低。粗晶的形成会使焊缝的力学性能下降,影响焊接接头的质量。

Yuan 等^[69]系统研究了磁控电弧焊接 AZ31、AZ91 镁合金晶粒细化的机理。通过重叠焊工艺,确定了晶粒细化机制为枝晶破碎。焊接过程中记录的冷却曲线表明(图 21),电弧振荡在凝固过程中引起再加热的同时会增加成分过冷,这样使焊缝枝晶臂熔化导致枝晶破碎,并可保证细碎的枝晶可以存活。试验结果强调晶粒细化是焊接过程中枝晶的重熔破碎,而不是机械破碎。



(b) Arc oscillation promotes dendrite fragmentation by reheating and constitutional supercooling, reducing temperature gradient G

图 21 电弧振荡对晶粒细化的有利影响^[69]

Fig.21 Positive effects of arc oscillation on grain refinement^[69]

Wu 等^[70]研究了尖角磁场 AZ91 镁合金焊缝成形的影响。发现在适当的磁场参数下,磁场可增加电弧的熔透能力(图 22、23),这主要归因于磁场对电弧的压缩作用。尖角磁场下,焊缝晶粒细化较为显著,但缺乏深入的晶粒细化机理分析。

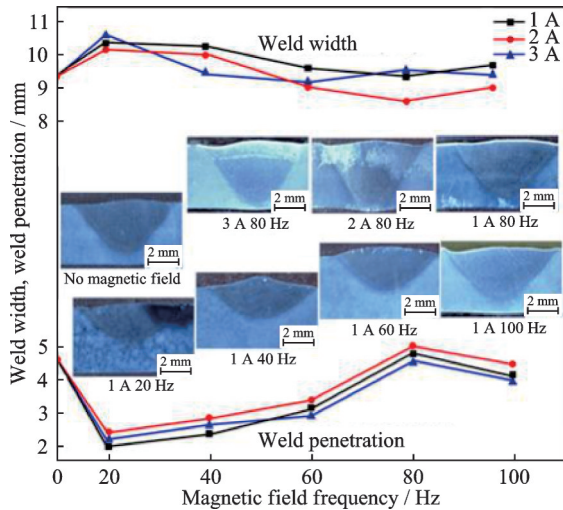


图 22 磁场频率对焊缝截面轮廓的影响^[70]

Fig.22 Influence of magnetic field frequency on the cross-sectional profile of the weld^[70]

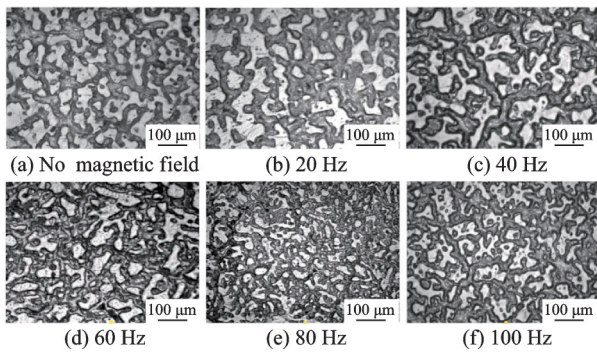


图 23 激励频率对焊缝组织的影响^[70]

Fig.23 Effect of excitation frequency on weld microstructure^[70]

2.4 异种金属的连接

尽管异种金属的连接技术在航空航天领域的应用前景很广泛,但也面临着一些挑战^[71-74]。由于不同的金属在元素的组成、物理性能、化学性能等方面存在显著差异,异种金属间的连接难度相对较大。为了解决这些问题,研究工作者不断探索和改进异种金属连接方法与工艺。

钛/钢、铝/钢复合结构兼具钛、铝的轻质性和钢的高强性,可以使整体构件在满足使用性能的前提下降低能耗,节约航空航天构件的制造成本。Jin等^[75]采用轴向磁场对钛/钢组合进行了冷金属过渡焊接技术(Cold metal transfer, CMT)熔钎焊,从润湿的角度出发,考察了磁场对纯铜填充金属在钛、钢基板上的润湿行为。如图 24 所示,试验结果表明,施加磁场后,填充金属在钛基板和钢基板上的润湿性均得到了提高,并从溶体铺展动力学的角度解释了钛/钢异种金属连接时的焊缝成形机制。在磁场作用下,界面金属间化合物(Intermetallic

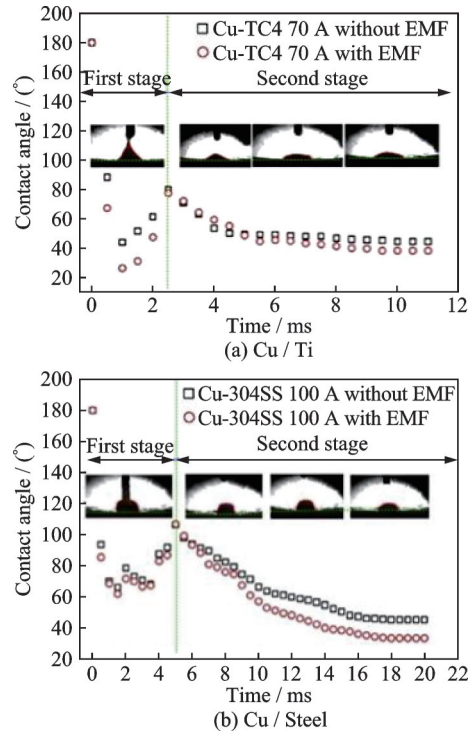


图 24 异种金属润湿性熔钎润湿性改善^[75]

Fig.24 Improvement in wettability in dissimilar metal wetting brazing^[75]

compounds, IMCs)的厚度在一定程度上变薄了,这可能源于磁场下热输入减小和液态金属流动性增强。Kang等^[76]在 Al/steel 的 CMT 磁场复合焊接中,也发现磁场作用下界面 IMCs 层变薄的现象。然而关于脆性化合物 IMCs 减薄的内在机理仍需要进一步探究。

闫飞等^[77]通过借助纵向交变磁场对 6061T6 铝合金/DP592 钢的组合进行焊接,发现外加磁场下铝/钢接头焊缝的熔宽减小、熔深增加,交变磁场诱导的电磁力使界面层 IMCs 由连续分布向离散分布转变,磁场作用下接头的载荷能力提高,这主要归因于接头结合面积增加和界面产物的形态发生改变,如图 25 所示。可见异种金属连接时,较厚且连续的 IMCs 层会削弱构件的承载能力,因此磁场辅助焊接在异种金属连接应用中值得进一步的拓展与应用。

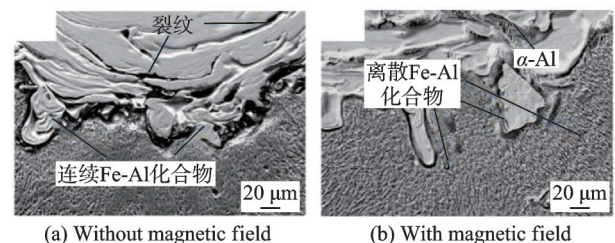


图 25 有无磁场下接头界面组织形貌^[77]

Fig.25 Morphology of the joint interface microstructures with and without magnetic field^[77]

3 结 论

磁控焊接技术相比于传统的焊接技术,适当外部磁场加入所产生的诸多物理现象在焊接过程中扮演者积极的作用,航空航天材料磁控焊接涉及的材料种类及焊件的尺寸规格也较为全面。目前,材料连接或焊接过程中涉及电、热、金属热流动,可借助辅助磁场进行过程调控。就焊接热源本身而言,磁场辅助电弧焊,高能束焊在航空航天领域均得到应用,且热源不同,磁场辅助焊接效果有所不同。相对而言,TIG电弧比MIG电弧更加稳定且易于控制,且TIG焊本身焊接质量高,这使得磁场辅助TIG焊在航空航天材料的应用中更具优势,同时对于电弧焊而言,磁场辅助焊接要想取得积极的冶金效果,需充分认识到磁场下电弧热-力的重构。磁场辅助激光焊接相对电弧焊而言,焊接装置较为复杂,灵活度较低,不像磁控电弧焊可与焊枪灵活集成。在成形控制方面,根据缺陷类型而选择磁场类型焊接方法则更为有效。对于焊缝组织晶粒细化,对于不同材料,辅助磁场可细化组织已得到证实。需要注意的是,相同焊接方法,磁场作用下晶粒细化的机理未有统一定论,有电磁搅拌占主导的,也有磁控电弧对枝晶重熔形成成分过冷占主导的。枝晶重熔已由文献通过实验证实,然后电磁搅拌焊缝组织晶粒细化仍缺乏直观的证据。总体而言,在航空航天背景下,磁场辅助焊接可选形式多样且有效可达,依然会保持一定的工业制造竞争力。

磁控焊接技术作为一种高效的焊接方法,其具有广阔的应用前景和发展潜力。在理论角度层面,磁场下焊接熔池电磁搅拌晶粒细化及界面脆性产物减薄可借助X射线等手段进行原位观察,进一步丰富相应的内在机制。在工艺角度层面,当下磁控焊接的工艺参数的优化由于多物理场的引入还是较为繁琐,随着工业4.0的推进,磁控焊接技术正向自动化和智能化方向发展。通过应用人工智能和机器学习算法,焊接过程的实时监控和调整变得更加高效,提升了焊接质量和生产效率。另外,焊接过程中产生的烟尘和有害气体一直是工业生产中的环境问题。未来,磁控焊接技术将更加注重环保和节能方面的研发和应用。通过研发低烟、低毒、低腐蚀性的焊接材料和优化焊接工艺,降低有害气体和粉尘的排放,实现绿色生产。随着航空航天新材料技术的不断发展,磁控焊接技术将面临更多新材料的焊接挑战和机遇。

参考文献:

[1] 王立军,贾申利,史宗谦,等. 电弧电流以及纵向磁

场对小电流真空电弧特性影响的数值仿真[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 54-61.

WANG Lijun, JIA Shenli, SHI Zongqian, et al. Numerical Simulation of the influence of arc current and longitudinal magnetic field on the characteristics of low-current vacuum arcs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 54-61.

[2] 胡明,万树德,夏洋洋,等. 外部磁场对直流电弧等离子体放电特性的影响及其机理[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1655-1660.

HU Ming, WAN Shude, XIA Yangyang, et al. Influence and mechanism of external magnetic field on the discharge characteristics of DC arc plasma[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7): 1655-1660.

[3] 吴林,张广军. 航空航天焊接若干新技术进展[C]// 航空航天焊接国际论坛. 北京,中国:中国机械工程学会,2004.

WU Lin, ZHANG Guangjun. Progress in several new technologies for aerospace welding [C]//Proceedings of International Forum on Aerospace Welding. Beijing, China: Chinese Mechanical Engineering Society, 2004.

[4] ELREFAEY A. High-temperature brazing in aerospace engineering[J]. Welding & Joining of Aerospace Materials, 2012, 49(1): 345-383.

[5] FREEMAN R. Welding and joining developments in the aerospace industry[J]. Welding and Cutting, 2008, 7(5): 274-275.

[6] 马青军,韦晨,方乃文,等. 磁控焊接技术的研究现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2019, 47(1): 8-13, 31.

MA Qingjun, WEI Chen, FANG Naiwen, et al. Research status of magnetically controlled welding technology[J]. Machinery Manufacturing Digest (Welding Edition), 2019, 47(1): 8-13, 31.

[7] 贾思峰,郑卫刚. 磁控技术在窄间隙焊接和高速TIG焊接上的应用研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(13): 154-155.

JIA Sifeng, ZHENG Weigang. Application research of magnetic control technology in narrow gap welding and high-speed TIG welding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(13): 154-155.

[8] LIU Y B, SUN Q J, LIU J P, et al. Effect of axial external magnetic field on cold metal transfer welds of aluminum alloy and stainless steel[J]. Materials Letters, 2015, 152: 29-31.

[9] WANG L, CHEN J, WU C S, et al. Backward flowing molten metal in weld pool and its influence on humping bead in high-speed GMAW[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 342-350.

[10] NOMURA K, OGINO Y, HIRATA Y. Shape control of TIG arc plasma by cusp-type magnetic field with

- permanent magnet[J]. *Welding International*, 2012, 26(10): 759-764.
- [11] SUN Q J, WANG J F, CAI C W, et al. Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1): 761-767.
- [12] XIAO L, FAN D, HUANG J K, et al. Mild steel metal rotating spray transfer behavior in magnetically controlled gas metal arc welding[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103352.
- [13] WANG X M, LIANG W, SUN S H. The influence of rotating magnetic field on DCEN MAG industry welding based on properties of welding materials[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 675: 148-151.
- [14] XU T, SHI Y H, CUI Y X, et al. Effects of magnetic fields in arc welding, laser welding, and resistance spot welding: A review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(5): 2200682.
- [15] FAN D, WANG Y Z, ZHANG C, et al. Numerical analysis of arc-droplet-pool coupling behavior in magnetically controlled high current MIG welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 126: 402-412.
- [16] LI Y W, ZOU W F, LEE B, et al. Research progress of aluminum alloy welding technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 109(5): 1207-1218.
- [17] LI Y, WU C S, WANG L, et al. Analysis of additional electromagnetic force for mitigating the humping bead in high-speed gas metal arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 207-215.
- [18] WANG L, WU C S, CHEN J, et al. Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116: 1282-1291.
- [19] 江淑园, 陈焕明, 刘志凌. 磁控技术在焊接中的应用及进展[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(21): 1876-1879.
JIANG Shuyuan, CHEN Huanming, LIU Zhiling. Application and progress of magnetically controlled technology in welding[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(21): 1876-1879.
- [20] 张新戈, 王群, 李俐群, 等. 电、磁场辅助激光焊接的研究现状[J]. *材料导报*, 2009, 23(9): 39-42.
ZHANG Xinge, WANG Qun, LI Liqun, et al. Research status of electric and magnetic field-assisted laser welding[J]. *Materials Review*, 2009, 23(9): 39-42.
- [21] WANG C M, CHEN H W, ZHAO Z Y, et al. Influence of axial magnetic field on shape and microstructure of stainless steel laser welding joint[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(9): 3051-3060.
- [22] MOUSAVI M G, HERMANS M J M, RICHARDSON I M, et al. Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, 8(4): 309-312.
- [23] TURYK E. Electromagnets for the induction of a magnetic field into the welding zone in TIG welding[J]. *Welding International*, 1993, 7(12): 929-931.
- [24] BACHMANN M, AVILOV V, GUMENYUK A, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60: 309-321.
- [25] CHEN R, KONG H J, LUAN J H, et al. Effect of external applied magnetic field on microstructures and mechanical properties of laser welding joint of medium-Mn nanostructured steel[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2020, 792: 139787.
- [26] 陈杰, 王小明, 张振兵, 等. 新型磁控-TIG电弧熔-钎焊技术[J]. *电焊机*, 2012, 42(6): 129-132.
CHEN Jie, WANG Xiaoming, ZHANG Zhenbing, et al. A novel magnetically controlled-TIG arc fusion-brazing technique[J]. *Electric Welding Machine*, 2012, 42(6): 129-132.
- [27] 贾传宝, 杜永鹏, 武传松, 等. 厚板窄间隙磁控电弧TIG焊接自动控制系统设计[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 40-46.
JIA Chuanbao, DU Yongpeng, WU Chuansong, et al. Design of automatic control system for thick plate narrow gap magnetically controlled arc TIG welding [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(9): 40-46.
- [28] 张九海, 王其隆, 韦伟平. 小电流TIG焊电弧磁控特性的研究[J]. *焊接学报*, 1990, 11(1): 43-49.
ZHANG Jiuhai, WANG Qilong, WEI Weiping. A study of the characteristics of magnetic control for low current TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1990, 11(1): 43-49.
- [29] 常云龙, 路林, 李英民, 等. 磁控TIG高速焊焊缝成形机理[J]. *焊接学报*, 2013, 34(6): 1-4, 113.
CHANG Yunlong, LU Lin, LI Yingmin, et al. Mechanism of weld formation in magnetically controlled TIG high-speed welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(6): 1-4, 113.
- [30] 贾涵浩, 马春伟, 韩宁. 外加横向磁场在焊接中的应用及发展[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(5): 14-15, 19.
JIA Hanhao, MA Chunwei, HAN Ning. Application

- and development of externally applied transverse magnetic fields in welding[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(5): 14-15, 19.
- [31] REIS R P, SCOTTI A, NORRISH J, et al. Investigation on welding arc interruptions in the presence of magnetic fields: Arc length, torch angle and current pulsing frequency influence[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(1): 133-139.
- [32] XIAO L, FAN D, HUANG J K. Tungsten cathode-arc plasma-weld pool interaction in the magnetically rotated or deflected gas tungsten arc welding configuration [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32: 127-137.
- [33] 常云龙, 白金, 刘丹, 等. 纵向磁场对 CO₂ 焊接电弧及焊缝成形的影响[J]. *沈阳工业大学学报*, 2016, 38(6): 612-617.
- CHANG Yunlong, BAI Jin, LIU Dan, et al. The influence of longitudinal magnetic field on CO₂ welding arc and weld formation[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2016, 38(6): 612-617.
- [34] JANARTHINI M S, BARATH C V R, RAMACHANDRAN K. Behavior of plasma parameters under mirror and cusp magnetic fields in DC glow discharge—a numerical study[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(12): 125604.
- [35] 解晓梅, 陈集, 夏萍. 尖状磁场约束等离子弧的实验研究[J]. *齐齐哈尔轻工业学院学报*, 1996(1): 56-59, 62.
- XIE Xiaomei, CHEN Ji, XIA Ping. Experimental study on plasma arc confined by pointed magnetic field [J]. *Journal of Qiqihar Institute of Light Industry*, 1996(1): 56-59, 62.
- [36] 刘翠荣, 赵彭生. 双尖角磁场再压缩等离子弧厚板焊接[J]. *山西机械*, 1998(4): 21-23.
- LIU Cuirong, ZHAO Pengsheng. Thick plate welding using double-pointed magnetic field recompressed plasma arc[J]. *Shanxi Machinery*, 1998(4): 21-23.
- [37] 蒋萍, 高顶, 王村伟, 等. 电磁场对 CO₂ 焊接电弧及熔滴过渡的影响[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(5): 137-139, 143.
- JIANG Ping, GAO Ding, WANG Cunwei, et al. The influence of electromagnetic field on CO₂ welding arc and droplet transfer[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(5): 137-139, 143.
- [38] AMBROSY G, BERGER P, HUEGEL H, et al. The use of electromagnetic body forces to enhance the quality of laser welds[C]//*Proceedings of XIV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers*. Wroclaw, Poland: SPIE, 2003.
- [39] KUTSUNA M, CHEN L. Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel [C]//*Proceedings of the First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing*. Osaka, Japan: SPIE, 2003.
- [40] SUN Q J, LI J Z, LIU Y B, et al. Arc characteristics and droplet transfer process in CMT welding with a magnetic field[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32: 48-56.
- [41] 常云龙, 车小平, 李敬雅, 等. 外加磁场对 MIG 焊熔滴过渡形式和焊缝组织性能的影响[J]. *焊接*, 2008, 52(10): 25-28, 70.
- CHANG Yunlong, CHE Xiaoping, LI Jingya, et al. Influence of external magnetic field on droplet transfer mode and weld microstructure and properties in MIG welding[J]. *Welding*, 2008, 52(10): 25-28, 70.
- [42] ZHU S, WANG Q W, YIN F L, et al. Research on droplet transfer of MIG welding with alternating longitudinal magnetic field[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 189: 993-996.
- [43] 张顺善, 邹勇, 邹增大. 磁场对双丝间接电弧焊熔滴过渡的影响[J]. *焊接学报*, 2011, 32(6): 69-72, 116.
- ZHANG Shunshan, ZOU Yong, ZOU Zengda. Influence of magnetic field on droplet transfer in twin-wire indirect arc welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(6): 69-72, 116.
- [44] 杨文艳, 樊丁, 张俊喜, 等. 外加磁场对 TIG 焊接弧行为及焊缝成形的影响[J]. *兰州工业学院学报*, 2023, 30(2): 6-9.
- YANG Wenyan, FAN Ding, ZHANG Junxi, et al. Influence of external magnetic field on TIG welding arc behavior and weld formation[J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2023, 30(2): 6-9.
- [45] ZHU S, WANG Q, YIN F, et al. Research on thermal process of MIG welding of aluminum alloy with longitudinal magnetic field[J]. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2011, 5(1): 32-38.
- [46] YAMAMOTO H, HARADA S, UEYAMA T, et al. Beneficial effects of low-frequency pulsed MIG welding on grain refinement of weld metal and improvement of solidification crack susceptibility of aluminium alloys: Study of low-frequency pulsed MIG welding[J]. *Welding International*, 1993, 7(6): 456-461.
- [47] GUAN Z Q, ZHANG H X, LIU X G, et al. Effect of magnetic field frequency on the shape of GMAW welding arc and weld microstructure properties[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(8): 0865e5.
- [48] LI F X, SUN Q J, JIN P, et al. Wetting behavior of melt and its effect on lack of fusion in arc oscillating NG-GTAW[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 296: 117176.
- [49] WANG L, WU C S, CHEN J, et al. Influence of

- the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116: 1282-1291.
- [50] ZHOU J F, ZHOU D W, LIU J S. Numerical and experimental investigation of magnesium/aluminum laser welding with magnetic field[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(1): 545-559.
- [51] RYAN P, PRANGNELL P B. Grain structure and homogeneity of pulsed laser treated surfaces on Al-aerospace alloys and FSWs[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 479(1): 65-75.
- [52] DA COSTA A P, BOTELHO E C, COSTA M L, et al. A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications[J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2012, 4(3): 255-266.
- [53] SEXTON L, LAVIN S, BYRNE G, et al. Laser cladding of aerospace materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(1): 63-68.
- [54] VAIRIS A, FROST M. High frequency linear friction welding of a titanium alloy[J]. *Wear*, 1998, 217(1): 117-131.
- [55] ZAHS A, SPIEGEL M, GRABKE H J. Chloridation and oxidation of iron, chromium, nickel and their alloys in chloridizing and oxidizing atmospheres at 400—700 °C[J]. *Corrosion Science*, 2000, 42(6): 1093-1122.
- [56] SUNDARESAN S, RAM G D J. Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in α - β titanium alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, 4(3): 151-160.
- [57] 王立祥, 苏允海. 磁场电流对 TA2 钛合金焊接接头组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(11): 236-238.
- WANG Lixiang, SU Yunhai. Influence of magnetic field current on the microstructure and properties of TA2 titanium alloy welded joints[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(11): 236-238.
- [58] SUN Q J, LI J Z, LIU Y B, et al. Narrow gap welding for thick titanium plates: A review[C]//*Proceedings of Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Singapore: Springer, 2019: 29-54.
- [59] 孙清洁, 郭宁, 胡海峰, 等. 磁场对厚板 Ti-6Al-4V 合金窄间隙 TIG 焊缝组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(10): 2833-2839.
- SUN Qingjie, GUO Ning, HU Haifeng, et al. Influence of magnetic field on the microstructure of narrow gap TIG welds in thick Ti-6Al-4V alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(10): 2833-2839.
- [60] 孙清洁, 李文杰, 胡海峰, 等. 厚板 Ti-6Al-4V 磁控窄间隙 TIG 焊接头性能[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 9-12, 113.
- SUN Qingjie, LI Wenjie, HU Haifeng, et al. Properties of magnetically controlled narrow gap TIG welded joints in thick Ti-6Al-4V alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 9-12, 113.
- [61] 唐思熠, 张学军, 郭绍庆, 等. 航空铝合金激光焊接的研究进展[J]. *电焊机*, 2014, 44(6): 7-12.
- TANG Siyi, ZHANG Xuejun, GUO Shaoqing, et al. Research progress in laser welding of aerospace aluminum alloys[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(6): 7-12.
- [62] 陈亚莉. 铝合金在航空领域中的应用[J]. *有色金属加工*, 2003, 32(2): 11-14, 17.
- CHEN Yali. Application of aluminum alloy in the aerospace industry[J]. *Nonferrous Metals Fabrication*, 2003, 32(2): 11-14, 17.
- [63] 陈保帆. 电磁控制作用下激光自动化焊接对铝合金焊缝孔隙率及表面粗糙度的影响[J]. *电焊机*, 2015, 45(5): 160-163.
- CHEN Baofan. The impact of laser automated welding under electromagnetic control on weld porosity and surface roughness of aluminum alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(5): 160-163.
- [64] 王沐. 10 mm 厚 6061T6 铝合金磁场辅助激光扫描对接焊工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- WANG Mu. Research on magnetic field-assisted laser scanning butt welding process of 10 mm thick 6061T6 aluminum alloy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [65] 国旭明, 牛鹏亮. LD10CS 高强铝合金脉冲 MIG 焊工艺研究[J]. *电焊机*, 2015, 45(6): 117-120.
- GUO Xuming, NIU Pengliang. Research on pulsed MIG welding process of LD10CS high-strength aluminum alloy [J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(6): 117-120.
- [66] 卢焯, 周万盛, 雅文萃. 磁控电弧摆动对铝合金焊缝结晶裂纹的影响[J]. *焊接学报*, 1991, 12(2): 65-72.
- LU Ye, ZHOU Wansheng, YA Wencui. Influence of magnetically controlled arc oscillation on solidification cracking of aluminum alloy welds[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1991, 12(2): 65-72.
- [67] 冯吉才, 王亚荣, 张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(2): 165-178.
- FENG Jicai, WANG Yarong, ZHANG Zhongdian. Research progress and applications of magnesium alloy welding technologies[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(2): 165-178.
- [68] 钟皓, 刘培英, 周铁涛. 镁及镁合金在航空航天中的

- 应用及前景[J]. 航空工程与维修, 2002, 47(4): 41-42.
- ZHONG Hao, LIU Peiying, ZHOU Tietao. Application and prospects of magnesium and magnesium alloys in aerospace industry[J]. Aeronautical Engineering and Maintenance, 2002, 47(4): 41-42.
- [69] YUAN T, LUO Z, KOU S. Mechanism of grain refining in AZ91 Mg welds by arc oscillation[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2017, 22(2): 97-103.
- [70] WU H, CHANG Y, GUAN Z, et al. Arc shape and microstructural analysis of TIG welding with an alternating cusp-shaped magnetic field[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 289: 116912.
- [71] 陈树君, 夏羽, 于洋, 等. 异种金属材料磁脉冲焊接技术[C]//第三届民用飞机先进制造技术及装备论坛论文汇编. 深圳: [s.n.], 2011: 324-329.
- CHEN Shujun, XIA Yu, YU Yang, et al. Magnetic pulse welding technology for dissimilar metal materials [C]//Proceedings of the 3rd Forum on Advanced Manufacturing Technology and Equipment for Civil Aircrafts. Shenzhen, China: [s.n.], 2011: 324-329.
- [72] 于前, 林飞, 李铁鹏, 等. AZ91 镁合金/7075 铝合金异种金属扩散焊[J]. 焊接技术, 2011, 40(7): 5-8.
- YU Qian, LIN Fei, LI Tiepeng, et al. Diffusion welding of dissimilar metals between AZ91 magnesium alloy and 7075 aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2011, 40(7): 5-8.
- [73] MESHARAM S D, MOHANDAS T, REDDY G M. Friction welding of dissimilar pure metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1): 330-337.
- [74] YAN Y, ZHANG D T, QIU C, et al. Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: s619-s623.
- [75] JIN P, LIU Y B, SUN Q J, et al. Wetting mechanism and microstructure evolution of TC4/304 stainless steel joined by CMT with an assisted hybrid magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 819: 152951.
- [76] KANG K X, LIU Y B, LI J Z, et al. Microstructure and mechanical properties of Al/steel butt joint by hybrid CMT welding with external axial magnetic field [J]. Materials, 2020, 13(16): 3601.
- [77] 闫飞, 周一凡, 唐本刊, 等. 基于磁控冶金铝/钢异种金属焊接特性[J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 98-103, 119-120.
- YAN Fei, ZHOU Yifan, TANG Benkan, et al. Welding characteristics of Al/steel dissimilar metals based on magnetically controlled metallurgy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(5): 98-103, 119-120.

(编辑:张蓓,王婕)