



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.01

金属复合板组坯焊接技术研究现状与进展

李琦¹, 刘洪昌¹, 武鹏博¹, 刘宏², 孙金峰¹, 滕彬^{1*}

1. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

2. 北京鸿源通达科技发展有限公司, 北京 102412

摘要: 随着制造领域对产品长期服役寿命和经济性的要求日益提高, 金属复合板因其独特优势受到广泛关注, 并在多个领域得到应用。金属复合板融合了各组元金属的优点, 呈现出单一金属所不具备的物理化学性能, 在石油化工、电力等诸多工业领域均展现出显著的应用价值。本文系统阐述了涉及金属复合板制坯工艺中的爆炸焊接、电弧焊接、电子束焊接以及真空激光焊接等方法, 并从技术原理、研究现状、应用领域及性能优缺点等多个维度进行了综合评述, 旨在为相关领域的技术研发与工程实践提供理论参考和指导。

关键词: 金属复合板; 组坯焊接; 制坯工艺; 焊接应用

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0001-14

Research Status in the Batch Welding Technology of Metal Composite Plates

LI Qi¹, LIU Hongchang¹, WU Pengbo¹, LIU Hong², SUN Jinfeng¹, TENG Bin^{1*}

1. Harbin Welding Institute Limited Company, CAM, Harbin 150028, China

2. Beijing Hongyuan Tongda Technology Development Co., Ltd., Beijing, 102412

Abstract: With the increasing demand for the long-term service life and economy of products in the manufacturing field, metal composite panels have attracted wide attention due to their unique advantages and have been applied in multiple fields. Metal composite panels combine the advantages of each component metal and exhibit physicochemical properties that single metals do not possess. Thus, they demonstrate significant application value in many industrial fields, such as the petrochemical and power industries. This paper systematically elaborates on the manufacturing methods related to the billet-making processes of metal composite panels, including explosive welding, arc welding, electron beam welding, and vacuum laser welding. It also conducts a comprehensive review from multiple dimensions, such as technical principles, research status, application fields, and performance advantages and disadvantages, aiming to provide theoretical reference and guidance for technological research and development and engineering practice in related fields.

Keywords: metal composite plate; assembly welding; slab bonding process; welding applications

引用格式: 李琦, 刘洪昌, 武鹏博, 等. 金属复合板组坯焊接技术研究现状与进展[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 1-14.

Citation: LI Qi, LIU Hongchang, WU Pengbo, et al. Research Status in the Batch Welding Technology of Metal Composite Plates[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 1-14.

收稿日期: 2025-10-14 修回日期: 2025-12-26

作者简介: 李琦(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接工艺与装备的研究。

通讯作者: 滕彬(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事激光-电弧复合焊接技术及装备开发。E-mail: tengbin134@163.com。

0 引言

金属复合板是通过复合技术将两种或两种以上物理、化学及力学性能各异的金属材料在界面处实现牢固的冶金结合而制成的复合金属材料^[1]。复层通常选用不锈钢、镍基、钛基或铝基合金提供耐腐蚀性,基层选用碳钢、结构钢或低合金钢承担结构强度,二者优势互补,使复合板兼具耐腐蚀性与经济性,在石油化工、冶金、电力等领域得到广泛应用^[2]。此外,复合板可替代贵重金属整体结构,降低材料成本并减轻结构质量,对交通运输轻量化和节能减排具有重要意义^[3-4]。

轧制法是金属复合板应用最为广泛的制备方法之一,其工艺稳定性高、连续批量生产能力强^[5-8]。在真空轧制复合工艺中,组坯焊接是保证坯料密封性和界面免受氧化的关键环节,焊缝裂纹、未熔透或冶金相容性不佳均会导致轧制过程中界面开裂,直接决定复合板的成品率与界面结合性能。

目前,组坯焊接工艺主要包括爆炸焊接、电弧焊接、电子束焊接和真空激光焊接四种,其技术原理、适用材料体系和工业化程度有明显差异。本文从材料适配性、工艺窗口、经济性和工业化成熟度四个方面对四种组坯焊接工艺进行综合评述,明确各工艺的适用性与技术瓶颈,以期复合板制备的工艺选择和技术研发提供依据。

1 金属复合板制备的发展历史

复合板制造经历了长期的发展历程(见图1)。

20世纪30年代以美国为代表的发达国家率先采用热轧复合技术生产不锈钢复合板;50年代,美国开始探索轧制复合理论,迄今已涌现出多种理论体系,其中N.Bay^[9]理论获得了学术界的广泛认可;60年代Philichuk完成首次爆炸焊接试验,制备出首块铝/钢复合板;70年代,爆炸与热轧相结合成为生产不锈钢复合板的主要工艺;80年代以后,复合板的研究重点转向新型复合板的开发及其物理化学性能等方面^[5]。我国于1968年首次将爆炸焊接技术应用于复合板生产,并在军工产品领域推广了金属复合板的应用;在随后的近60年中,我国陆续开展了多种材料的爆炸焊接产品研发工作,成功制备了不锈钢/钢、钛/钢等多种金属复合板。1983年,营口中板厂探索了爆炸与轧制复合工艺;进入21世纪,我国轧制复合技术迅速发展,采用爆炸加轧制工艺制备不锈钢复合板已成为主流,随后复合板向工艺和品种多样化方向发展,以适应市场的多层次需求。1985年,日本JFE公司将真空电子束焊接技术与热轧工艺相结合,形成了较为成熟的真空轧制工艺技术。该工艺通过真空焊接封装技术有效去除了基材与覆材复合区域中存在的空气,实现了在真空条件下对界面进行加热轧制,从而避免了氧化物对复合界面的不利影响,并显著提高了复合界面的结合性能,最终达到了异种金属高品质复合的目的。这种复合方法现已成为应用最广、研究最深入且最受关注的技术之一。2005年,东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室在国内率先开展了真空轧制工艺的研发工作,并先后将该技术推广应用于国内大型企业^[10]。

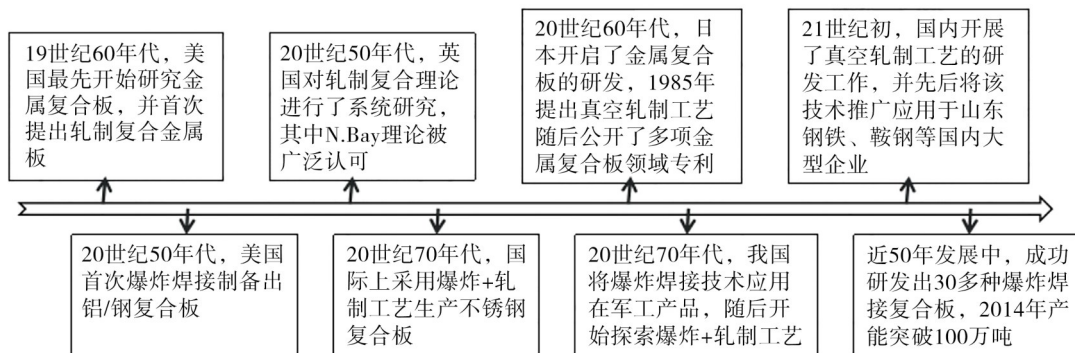


图1 金属复合板发展历程^[11]

Fig. 1 Development situation of metal composite plate

如图2、图3所示,真空轧制工艺主要包括表面处理、组坯、轧制、热处理以及矫直等多个工序。其中,在组坯焊接过程中若出现裂纹或冶金相容性不佳等问题,将可能引发后续轧制过程中开裂。组坯焊接的质量直接影响复合板的最终性能和成品率,是整个生产流程中的关键环节。

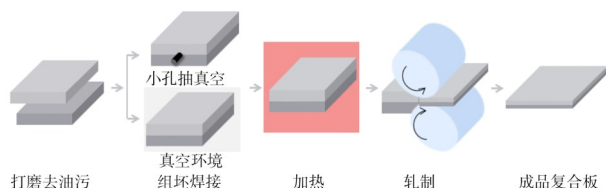


图2 真空轧制工艺生产流程图

Fig. 2 Manufacturing process of metal clad plate

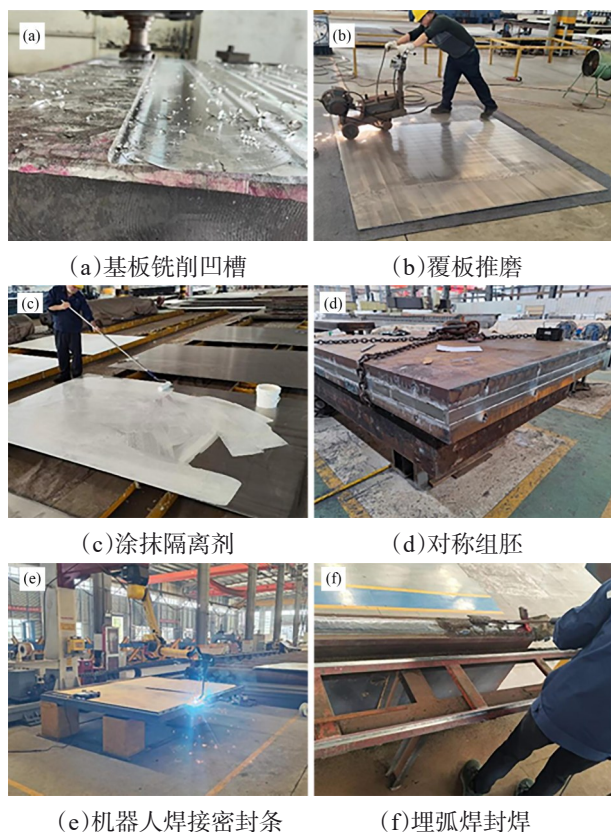


图3 对称组坯焊接工艺流程^[12]

Fig. 3 Symmetric billet assembly welding process procedure

2 金属复合板的组坯焊接方式

2.1 爆炸焊接

2.1.1 技术原理

爆炸焊接是金属复合板固相复合的关键技术

之一,在性能差异悬殊的异种金属组合中具有不可替代的地位。其基本原理为^[13]:引爆覆材表面的炸药产生瞬时推力,驱动覆材以特定角度与基材高速碰撞,因碰撞力超过金属的动态屈服极限,碰撞区域发生剧烈的塑性变形并释放大量热能;碰撞点附近的金属形成高速射流破坏两种金属表面的氧化膜,在高温高压条件下实现原子间的冶金结合。如图4所示,组装方法分为平行法与角度法——平行法适用于大面积金属复合板的制备,界面结合均匀性好;角度法适用于异形、小面积或厚壁件的制备,工艺参数调整灵活。

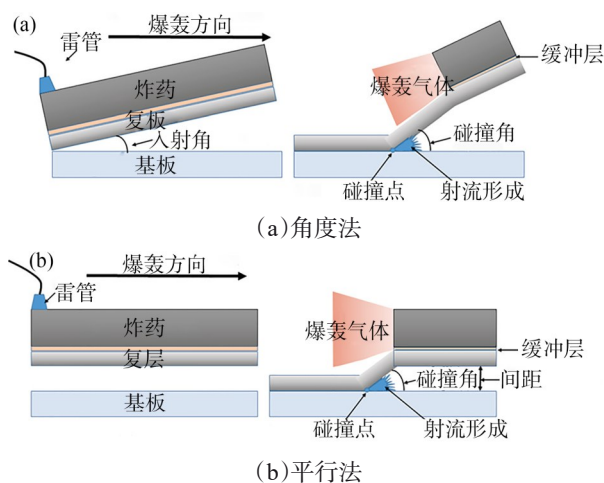


图4 爆炸焊接制坯示意^[14]

Fig. 4 Schematic illustration of the billet preparation process via explosive welding^[14]

2.1.2 界面形成机制

爆炸焊接界面的典型形貌为波状结合,如图5所示,其形成机制至今存在争议,主要有四种理论。“刻入机制”^[15]认同度最高,Bahrani等基于不可压流体推导,认为是周期性的飞板侵入复板作用和再入射流与基板的相互剪切作用共同形成波纹,与数值模拟吻合较好。“流动失稳机制”^[16]从流体角度出发,认为基复板间的界面切向速度差为塑性区失稳提供了能量,失稳朝着涡旋方向发展形成波状界面。“涡街机制”^[17]认为流体遇到障碍物先分离再汇合,当雷诺数达到临界值,汇合的束流会演变为波状界面,但爆炸焊中不存在足以产生扰动的障碍物,且该机制也忽视了材料强度对界面形貌的影响。“应力波机制”^[18]认为碰撞产生的压缩波会在材料界面上发生透反射,而反射回来的稀疏波会在碰

撞点附近相遇并充当扰动源,这些纵波和横波在基复板中传播和反射,引起了界面的不稳定,并最终导致了界面波的形成。由于缺乏对爆炸焊接瞬态过程的试验捕捉技术,上述机制均只能对波状界面形成的部分特征给出定量或定性描述,尚无法全面阐释界面波形成过程中的所有现象。

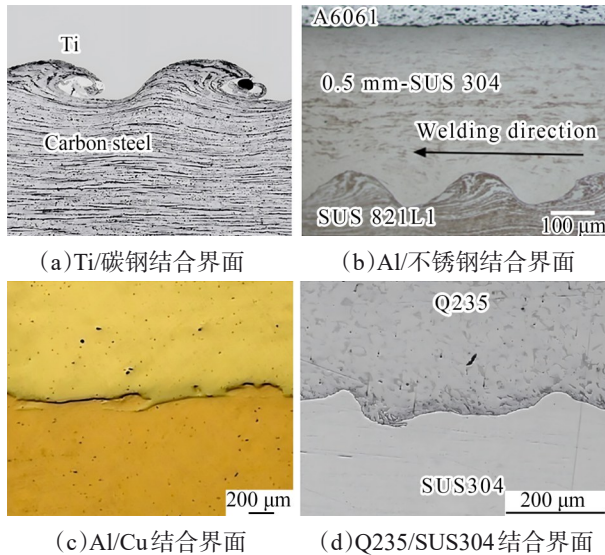


图5 爆炸焊接产生的结合界面^[19-20]

Fig. 5 The interface produced by explosive welding^[19-20]

2.1.3 工艺参数控制

爆炸焊接的质量在很大程度上取决于关键工艺参数的精确控制,主要包括爆轰速度和间隙距离。爆轰速度必须严格匹配工艺窗口,如图6所示:当爆轰速度控制在2~3 km/s时,碰撞速度(v_c)位于波状界面区间,界面形成图5所示的波状结合;若爆轰速度超过3.5 km/s,则可能导致界面局部过热熔化和脆性金属间化合物生成。Sherpa^[21]等人开发的低爆速(低于2 km/s)工艺表明,较低能量输入下仍可获得可靠连接。间隙距离直接影响动态弯曲角与冲击速度,进而决定波状界面的形态与结合机制:随间隙增大,铜-不锈钢复合界面的波长和振幅均显著增加^[22];但间隙增大在增加界面塑性变形、碰撞动能与局部熔化的同时,亦会导致腐蚀速率上升^[23],参数选取需兼顾界面结合强度与耐蚀性能。针对极薄板材或易生成脆性金属间化合物的材料组合,采用中间层与低爆速炸药协同使用的工艺方法,可通过调控爆轰传播及能量分布有效抑制界面反应并提高焊接质量^[24],在异种金属高质量复合领

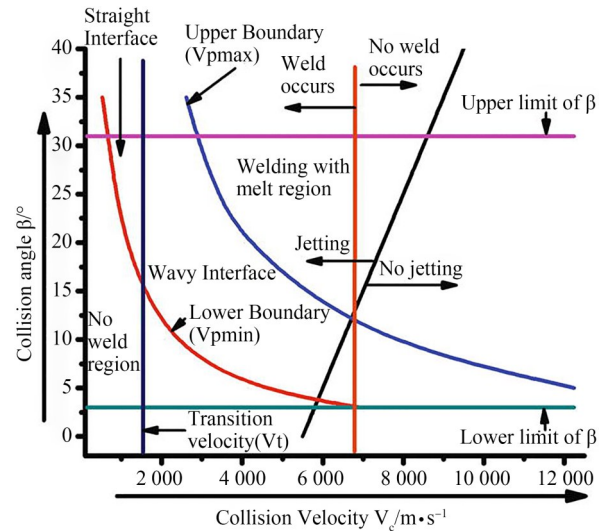


图6 爆炸焊接的工艺窗口^[14]

Fig. 6 Weldability window concepts for explosive welding process

域具有较广阔的应用前景。

2.1.4 材料适配性与应用实例

爆炸焊接的材料适配范围是评估其工程适用性的核心依据。如表1所示,通过爆炸焊接已成功制备不锈钢/钢、钛/钢、钛/铝、铝/镁、镍/钢、铜/钢等多种复合体系。

表1 爆炸焊接生产的金属复合板

材料组合	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	伸长率/%
不锈钢-钢 ^[25]	942	598	20
钢-钢	540	310	24
Ti-钢	563	175	28
Ti-Al	327	—	28.4
Ni-钢 ^[25]	599.8	326.3	12.74
Al-Mg ^[26]	175	62.2	3.3
Cu-钢 ^[27]	395	171	33

吴琼^[26]利用爆炸焊接成功实现了12 mm厚AZ31镁合金基层与2 mm厚1060纯铝复层的面复合,其焊接率高达99.4%,在拉伸断裂过程中两种材料于界面处未出现裂纹,证明界面结合牢固。王小伟^[28]以等厚2A12铝合金和AZ31镁合金为焊接对象,通过爆炸焊接取得了界面结合良好且表面无裂纹的镁铝复合板。房中行^[29]采用平行放置法制备了TA2钛-1060铝-TA2钛三层复合板,其弯曲强度达到288 MPa,抗拉强度为165.5 MPa,界面附近局部显微硬度最高达227 HV,各项性能均满足工业应用标准。韩小敏^[30]对TA10钛合金与Q345R钢进行

爆炸复合研究,结果显示复合板拉伸断口主要表现为韧性断裂,且界面处生成的少量脆性金属间化合物未对整体力学性能造成明显负面影响,符合工程结构要求。综上所述,上述研究表明,爆炸焊接能够有效实现镁/铝、钛/铝、钛/钢等异种金属的高质量复合,其复合板展现出界面结合牢固与优良的综合力学性能,具备较强的工程应用潜力。

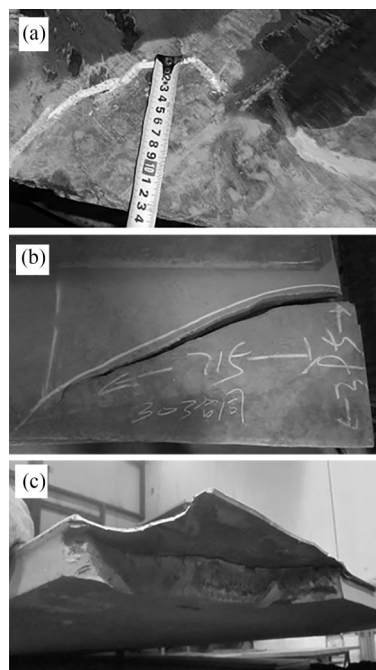
2.1.5 局限性与适用性

爆炸焊接的主要优势体现在:设备投资较低,无需配置真空舱、大功率焊接热源等昂贵设备,仅需使用炸药及简单工装;异种金属的适配性较强,可突破钛/钢等熔焊过程中因脆性金属间化合物生成而导致的技术瓶颈;可生产大尺寸板材,产品规格具有较大灵活性。但其局限性同样突出^[31]:①爆炸过程中产生的粉尘和噪声对周边环境造成显著污染,需选择偏远区域设立专用爆场,环保和安全管理成本大幅提升;②缺陷率较高,如图7所示,常见的缺陷包括局部未结合、不结合区域超标、钢材开裂及角部缺陷等,必须实施100%超声波检测,严重制约了企业效益;③受技术制约,生产厚度低于6 mm的薄板较为困难且成本较高;④户外作业易受雨雪、大风等恶劣天气影响,单批次生产周期延长至7~15天,明显长于真空轧制复合技术,且难以实现连续自动化生产。

2.2 电弧焊接

2.2.1 组坯焊接与密封方式

在复合板制备过程中,界面的密封性与抗氧化能力是确保复合效果的关键因素。与铆接、螺栓连接以及非对称包覆等机械固定方式相比,后者在加热、轧制及热处理过程中往往难以维持可靠密封,容易导致界面氧化,从而影响最终复合质量。电弧焊凭借其优异的密封性能和工艺灵活性,已成为中小型企业中广泛采用的核心组坯焊接方法。采用焊条电弧焊对四周进行密封焊接,并在小孔处抽取真空以使界面达到一定真空度,该方法主要分为两类:其一是直接将基层与复层焊接为一体,形成密闭的“包覆结构”,从而有效隔绝氧气,防止轧制过程中的界面氧化;其二则是在坯内置入经刷涂隔离剂的复层,再通过焊接基层实现整体封装。随着板厚的增加,为确保坯料在轧制过程中不出现开裂,



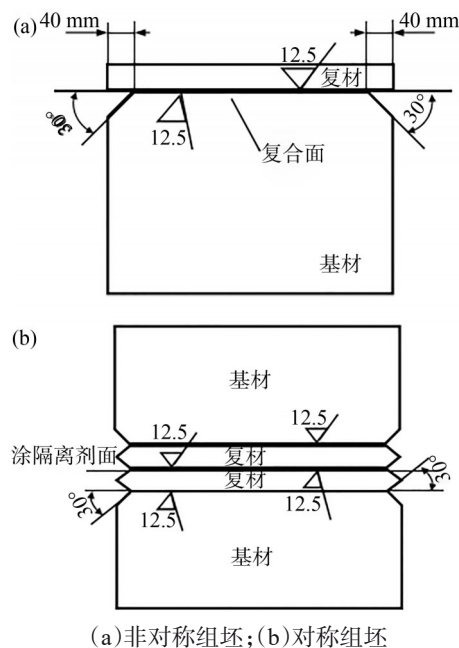
(a)不结合区超标;(b)裂钢;(c)掉角
图7 爆炸焊接复合板常见缺陷^[31]

Fig. 7 Common defects in explosively welded composite plates^[31]

还需合理设计坡口形式,并严格控制焊缝熔合比及热输入量,从而提升接头的强度与可靠性。组坯焊接及后续真空轧制的工艺流程如图8、图9所示。

2.2.2 坡口形式与组坯方式

坡口形式和组坯方式是电弧焊接组坯的两个



(a)非对称组坯;(b)对称组坯

图8 对称组坯及非对称组坯示意^[32]

Fig. 8 Schematic diagram of the billet assembly^[32]



(a) 钻孔; (b) 抽真空; (c) 组坯焊接; (d) 真空轧制
图9 TA1-Q235B 真空轧制工艺的主要工艺流程^[33]
Fig. 9 Main process flow of vacuum rolling of TA1-Q235B^[33]

核心工艺要素,二者共同决定了焊接接头质量及后续轧制性能。在 10 mm 厚 Q345/304 异种钢对接接头中,K 形坡口在异种钢组坯焊接中具有较优的应力分布与变形控制能力,其母材与焊缝交界区域的应力集中程度最低且接头变形量最小^[34]。采用 V 形坡口的 Q345/316L 焊接接头(TIG 焊)虽存在碳迁移现象,但冲击韧性仍保持良好^[35]。针对 30 mm 厚板,K 形坡口结合 SMAW 打底、MAG 盖面及 150℃ 预热工艺,可实现 Q345A 与 304 不锈钢的可靠连接^[36]。

在组坯方式方面,对于高温延展性差异较大的材料组合,非对称复合制坯不适宜采用,对称焊接复合制坯或多层复合工艺更为合理^[32]。对称组坯方式已在多种体系中得到验证:不锈钢/钢体系采用基层直接密封即可满足要求^[37-38];钛/钢体系需引入 Cu-Ni 中间焊丝以规避脆性金属间化合物,波-平轧制后界面清晰且无裂纹缺陷,剪切强度高于国家标准要求^[39];Q235/2205/2205/Q235 型对称组坯借助真空轧制抑制 2205 双相不锈钢的裂纹敏感性^[40];"钢-钛-隔离剂-钛-钢"对称结构可有效防止轧制翘曲变形^[41]。上述结果表明,组坯焊接的核心作用在于确保多层材料在高温变形过程中的结构稳定

性与热力学对称性,为后续均匀应力分布与组织演化提供基础条件。值得注意的是,组坯焊接质量不仅影响界面结合强度,还决定了轧制过程中的元素扩散行为——大面积钛钢复合板真空轧制后,碳元素向界面扩散并与钛生成稳定 TiC,形成明显脱碳层^[33],如图 10 所示。

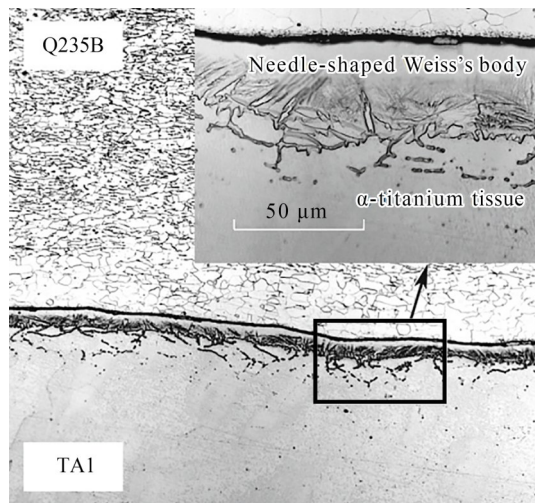


图10 钛钢复合板轧制后的界面组织^[33]

Fig. 10 Phase diagram of titanium-steel cladding plate by vacuum rolling

2.2.3 优势与局限

电弧焊接在复合板组坯制备方面具有设备成本低、适应性强、焊缝质量优异及操作灵活等优势^[42]。然而,该工艺亦存在以下局限:对操作人员技能要求较高,以确保焊接质量和工艺稳定性;厚板焊接过程中容易产生较大变形;多道焊接在满足复合板组坯大熔深要求时的生产效率有限。更为突出的是,采用界面四周焊合抽真空制备的坯料在加热过程中部分坯料出现鼓包现象,如图 11 所示,致使其无法进行后续轧制;且埋弧焊封焊和抽真空过程中耗时较长,制备效率偏低,坯料真空度亦难以有效检测,从而难以精确控制坯料质量^[43]。



图11 界面四周焊合抽真空板坯加热后的鼓包形貌^[43]

Fig. 11 Bulge morphology of heated clad billet prepared by all-around weld of interface

2.3 电子束焊接

2.3.1 基本原理与优势

电子束焊接是一种高能束流焊接技术,其基本原理是在高真空环境中,通过聚焦后的高速电子流对工件进行轰击,使接头处金属迅速熔化并实现冶金结合。该方法具有高能量密度、优异的穿透能力、较大的焊缝深宽比以及无氧化焊接过程等显著优势,因而在组坯焊接技术的发展中展现出广阔的应用前景。与传统电弧焊方法(如TIG、MIG)相比,电子束焊接一次即可完成焊缝成形,可节省约50%的成本与时间^[44-45];其工艺参数(如加速电压、束流、焊接速度等)可通过系统精确控制,实现高质量、高一致性且可重复性良好的焊接效果。尤为重要的是,电子束焊接在真空环境下进行(通常真空度低于 10^{-2} Pa),可排除空气和水分,杜绝待复合界面氧化,为后续轧制提供冶金环境,是实现高性能复合板制备的关键技术^[46]。与电弧焊的“先封焊后抽真空”方式相比,电子束焊接实现了焊接与真空的一体化,从根本上消除了真空度不可控的隐患。



(a)表面形貌;(b)焊缝横截面
图12 电子束焊接的S355壳体形貌^[47]
Fig. 12 Circumferential EBW of a S355 shell

2.3.2 焊接缺陷与工艺参数控制

电子束深熔焊的主要缺陷为钉尖缺陷(Nail-head Defect)与气孔缺陷,其形成均与匙孔(Key-hole)及熔池动态行为密切相关。匙孔壁主要受金属蒸汽反作用力(促使匙孔打开)和表面张力(促使匙孔闭合)的共同作用,二者的动态平衡决定了匙孔稳定性。当匙孔处于不稳定状态时,熔池内液态金属流动紊乱,阻碍气泡上浮逸出,加剧气孔缺陷的形成;当匙孔底部的表面张力大于金属蒸汽压力

时,根部匙孔内壁难以维持稳态,液态金属会向匙孔中心凸起并坍塌,金属蒸汽无法完全逸出,在快速冷却凝固作用下形成钉尖缺陷^[48-49]。

焊接参数对电子束焊缝的形貌及力学性能具有明显影响。焊接电流和焊接速度对熔深的影响远大于对焊缝宽度的影响^[50]:随着焊接电流增大,焊缝深宽比随之增加,而焊接速度提高则深宽比减小。当焊接速度为300 mm/min、焊接电流为60 mA时,焊缝区域残余应力较低,可有效抑制冷裂纹的形成,该优化参数已成功应用于工业实践。熔池内气泡行为亦受重力驱动效应的显著影响^[51],较强的重力驱动效应促进气泡上浮逸出,降低残留气体含量,从而减少气孔缺陷。在高强钢及厚板电子束焊接中,熔合区经受剧烈热循环,易引发残余应力集中、淬硬组织生成及氢聚集现象,进而诱发焊接冷裂纹。焊前预热与焊后保温处理可有效抑制裂纹产生,且对于熔深60 mm的Q345钢板,尺寸低于500 μ m的微裂纹对接头拉伸性能影响不显著,仍可满足封装质量要求^[52]。

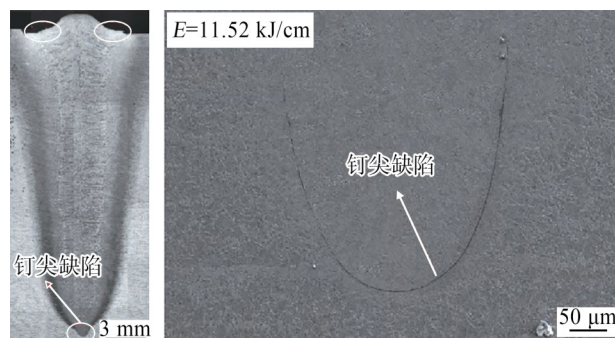


图13 焊缝根部钉尖缺陷^[52]
Fig. 13 Nail defect at root of weld^[52]

2.3.3 中间层与异种金属连接

对于冶金兼容性差的材料组合(如钛/不锈钢),电子束焊接同样面临脆性金属间化合物的挑战,中间层的引入与束流位置的调控是解决这一问题的双重策略。纯铜中间层可在一定程度上减少Ti-Fe、Ti-Cr等脆性相的生成,但无法完全抑制其形成,焊缝抗拉强度仍受限于CuTi₂、FeTi和 α -Ti组成的脆性金属间化合物^[53];在优化工艺下,铜中间层可获得由铜基固溶体及界面处较薄铜钛金属间化合物构成的焊缝,抗拉强度达310 MPa^[54]。Šimeková^[55]的研究进一步指出聚焦位置和束流偏移对

界面反应层厚度具有显著影响:当束流偏向Ti侧(偏移-1 mm)时,Ti-Ni界面金属间化合物层厚度可控制在3 μm 以内,接头抗拉强度达486 MPa(约为钛母材强度的85%);而当束流偏向Ni侧(偏移超过+1 mm)时,反应层迅速增厚至10 μm ,延伸率降低60%,试样在界面处断裂。

2.3.4 工业应用与局限性

目前工业生产中电子束焊接组坯基本采用对称结构,如图12所示,其结构对称性可简化刚度耦合模型并降低轧制工艺复杂性,从而提升生产效率。在不同材料的组坯实践中,电子束焊接较传统电弧焊的界面质量更优:与小孔真空法制坯相比,电子束焊接制坯制备的复合板平行于轧制方向的平均剪切强度分别为225.6 MPa和154.4 MPa^[12],电子束焊接明显更高。在不锈钢/钢材料中,304不锈钢与HSLA钢经电子束封装及4道次轧制后,复合板总厚度由60 mm降至12 mm^[56],实现了优良的复合效果;148 mm厚Q390C钢与11 mm厚316L不锈钢的电子束焊接经超声波检测确认全缝焊透,成功轧制出符合GB/T 8165—2008标准的高质量单面不锈钢复合板^[57]。在钛/钢材料中,Wang F R^[58]等采用电子束焊接对接含铜、钨中间层的Ti-6Al-4V/EH690钢复合坯在真空度低于 1×10^{-2} Pa的条件下进行组坯处理,有效抑制了氧化层生长,同时为轧制过程提供了良好的机械约束。骆宗安等人^[50,59]利用电子束焊接技术对钛/钢/钛对称组坯结构进行封装,有效抑制了钛层在高温氧化,所制备的复合板界面连续,无未结合区且不存在氧化物及其他杂质,剪切强度均满足国家标准要求。

然而,电子束焊接的局限性亦不容忽视:①设备投资极高,真空舱的建造和维护成本显著高于电弧焊设备;②抽真空耗时较长,影响生产节奏;③对焊前装配间隙要求严格,间隙过大易产生未熔合缺陷;④对磁性材料焊接时易出现束偏移;⑤需采取X射线防护措施,增加了安全管理的复杂性。

2.4 真空激光焊接

2.4.1 基本原理与优势

真空激光焊接是一种借助高能量密度激光束在真空条件下实现材料熔化与连接的先进焊接技术。该技术能够有效抑制等离子羽辉(Plasma

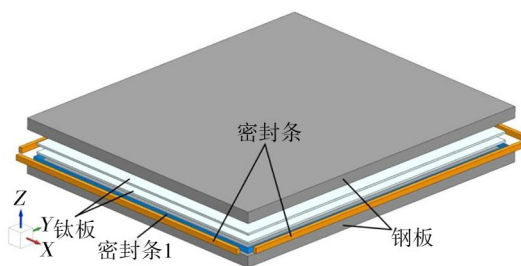
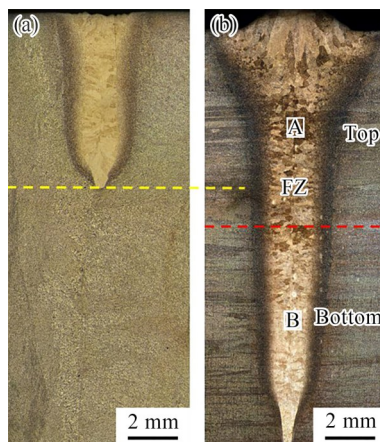


图14 电子束焊接组坯示意^[12]

Fig. 14 Schematic diagram of the electron-beam-welded billet assembly

Plume)的产生,避免大气环境下因等离子体羽辉而引起的激光束屏蔽问题,进而提高熔深。1985年,大阪大学Arata^[60]等人首次设计了真空激光焊接试验装置,发现在 10^{-1} Pa环境压力下,采用11 kW激光功率、100 mm/min焊接速度可实现40 mm深熔焊缝。后续研究表明,在相同线能量密度下,真空激光焊接和真空电子束所获得熔深尺寸类似^[61]。在使用40 kW最大功率进行高强钢对接焊接时,真空激光束焊接甚至可形成熔深达115 mm的无缺陷单层焊缝^[62],展现出与电子束焊接相比甚至更优的穿透能力。然而真空激光焊接所需真空度仅为10 Pa,而电子束焊接至少需达到 10^{-1} Pa,较低的真空度要求意味着设备成本和抽真空时间上更具优势。



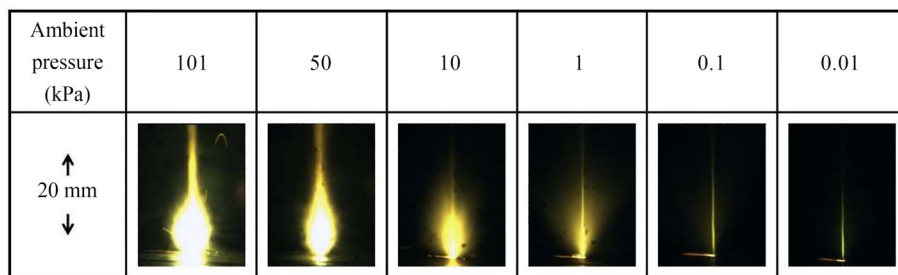
(a)大气环境;(b)真空环境

图15 TC4激光焊接的焊缝横截面^[63]

Fig. 15 Typical cross-sectional macrographs of LBW joints of TC4 alloy

2.4.2 真空度对焊接质量的影响

自早期工艺试验以来,研究者采用模拟实验、数值模拟及X射线检测等多种手段,对真空激光焊接过程中熔池、匙孔和羽辉等关键现象进行了系统性探究。如图16所示,激光深熔焊接中,匙孔内喷

图16 激光焊接不同真空度下的羽辉形貌^[64]Fig. 16 Observations of plasma plume in laser welding under different pressures^[64]

发的大量金属蒸汽经高能激光电离形成致密的等离子体羽辉,羽辉对激光产生吸收、散射与折射作用,既造成能量损耗又导致光斑聚焦偏移与离焦量失控;同时羽辉的波动引发激光能量波动,进而加剧金属蒸汽波动。在大气环境下,匙孔对这种蒸汽波动的抵御能力较弱,易导致匙孔后壁大幅波动而形成大量气孔。而在真空环境下,羽辉仅在匙孔附近呈小簇状分布,对激光的能量损耗及吸收稳定性的干扰显著降低,有利于提升匙孔深度与稳定性;同时真空环境会降低材料沸点,促进熔深增加。

自2010年前后大功率光纤激光器与碟片激光器广泛应用于科研领域以来,真空激光焊逐渐受到关注。当环境压力低于10 Pa时,熔深基本不再发生变化^[65];8 mm厚Ti6Al4V合金在5 Pa低压环境中,焊接深度随激光功率提升近乎线性上升^[66-67];5A06铝合金厚板在 $2.5 \times 10^4 \sim 10$ Pa真空度范围内,焊缝成形随真空度增加逐渐优化^[68]。上述结果一致表明,真空度的临界阈值约为10 Pa,低于此值后工艺收益趋于饱和。

2.4.3 组坯应用

2018年,日本JFE钢铁公司率先将真空激光焊接技术应用于复合板组坯领域,利用额定输出功率30 kW的高功率激光真空焊接技术显著提升了复合板的生产效率,该技术现已在西日本制铁所福山工厂的复合钢板生产线上得到应用,如图17所示。目前,国内应用电子束焊接进行组坯的技术较为普遍,但尚未见采用真空激光焊接进行组坯制造的相关报道。

2.5 组坯焊接技术的综合对比

如表2所示,在金属复合板组坯焊接工艺体系中,爆炸焊接、电弧焊接、电子束焊接及真空激光焊

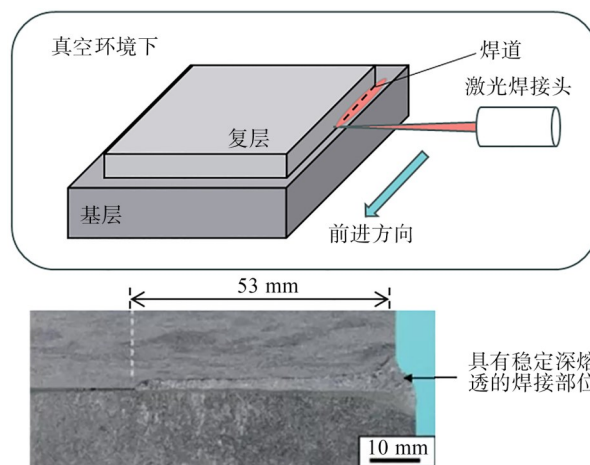


图17 真空激光焊接组坯及熔深示意

Fig. 17 Schematic illustration of the vacuum-laser-welded billet assembly and penetration profile

接因技术原理与工艺特性不同,形成了差异化的优劣势,直接决定其适用场景与工业化应用潜力。

(1) 材料种类。

爆炸焊接凭借固相复合特性,可有效规避熔焊过程脆性金属间化合物的生成弊端,能实现性能差异较大的异种金属间的高强度复合。电弧焊接更适用于冶金相容性优良的材料组合;针对钛/钢异种体系,电弧焊仅可承担封装密封功能,界面可靠结合仍需依托后续轧制工艺实现,工程中常引入Cu-Ni系中间焊丝以抑制脆性相析出。电子束焊接在组坯结构中同样以封装密封为主要功能,与电弧焊接的复合机理并无本质差异,核心区别体现在密封质量;但电子束焊接凭借中间层与束流偏移调控,可将界面反应层控制在 $3 \mu\text{m}$ 以内^[55],为轧制界面提供了更洁净的初始状态。真空激光焊接对高反射率材料(铜、铝)的能量利用率显著偏低,但对钛合金、钢等中低反射率材料,其熔深已达到与电子束焊接相当的水平^[61]。

表 2 组坯焊接技术综合评价矩阵

Table 2 Comprehensive evaluation matrix for assembly bonding and welding technology

项目	爆炸焊接	电弧焊接	真空电子束焊接	真空激光焊接
设备成本	资质、安保成本高	成本低,设备普及,灵活	成本极高	成本较高
工艺复杂度	工艺参数多,经验依赖性强	技术成熟	装配间隙要求高	装配间隙要求高
生产条件	受天气及场地影响	受焊工水平影响	对舱体要求高	对设备要求较高
对环境影响	高,产生大量烟尘气体污染	中,会产生烟尘、弧光辐射	中,需屏蔽 X 射线辐射	低,金属蒸汽等离子体在真空环境中被收集
产品种类	极广,特别适合异种金属	较广,碳钢/不锈钢;低合金钢/不锈钢	较广,对称组坯的钛钢复合板	较广,对称组坯的钛钢复合板
生产效率	周期长,生产不连续	效率低,需多层多道焊接	效率较高,但抽真空时间长	效率高,抽真空时间短,焊接速度快
结合界面质量	结合强度高	界面质量较低,热影响区大	界面质量较高,热影响区小,变形小	界面质量较高,热影响区小,变形小

(2)质量控制。

爆炸焊通过引爆炸药使板材高速碰撞实现高温高压冶金结合,在合适的工艺参数下可生成波状界面显著提升界面机械咬合强度,但爆轰速度超过 3.5 km/s 即导致界面过热熔化,间隙增大则同时带来强度提升与腐蚀速率上升的矛盾。电弧焊接是中小型企业复合板组坯的主流技术,坡口形式、热输入控制及组坯对称性是保障焊接质量的关键,但焊工操作水平直接决定密封质量,厚板焊接需开大坡口进行多层多道焊接,且易出现焊接变形、气孔及加热鼓包等问题。电子束焊接的焊缝质量的一致性和可重复性最好,是高质量轧制坯料制备的关键技术,采用对称组坯的方式可制备钛钢复合板坯料,焊接效率较电弧焊提升约 50%;但对焊前装配间隙的要求最为严格。同时,电子束焊接受自身特性限制,对带有磁性的材料焊接时易出现焊偏现象,且需采取射线防护措施。真空激光焊接在焊接质量和熔深方面具有对电子束焊接构成挑战的潜力,展现出广阔的应用前景。

(3)经济性。

设备投资方面,电弧焊接成本最低;爆炸焊接设备投资虽低,但资质审批与爆场建设的隐性成本不可忽视;电子束焊接设备投资最高;真空激光焊接介于二者之间,且较低的真空度要求可降低真空舱建造成本。生产效率方面,爆炸焊接受天气制约,效率最低且不连续;电弧焊接封焊与抽真空叠加后制备效率偏低,厚板需多层多道焊;电子束焊接效率较高,但抽真空时间长;真空激光焊接抽真空时间最短、焊接速度最快,理论生产效率最高。环境成本方面,爆炸焊接的粉尘、噪音污染和安全

管控成本最为突出,且随环保法规趋严呈上升趋势;电弧焊接产生烟尘和弧光辐射,属中等水平;电子束焊接需屏蔽 X 射线辐射;真空激光焊接的环境影响最低,金属蒸汽和等离子体在真空环境中被收集,符合绿色制造趋势。

(4)工业成熟度。

爆炸焊接和电弧焊接已在复合板生产中规模化应用数十年,工艺成熟度最高,是目前国内复合板组坯的主流技术。电子束焊接在国外大型复合板生产线中已得到较广泛应用,国内亦已开展系统性研究。真空激光焊接的工业化成熟度最低。

3 总结与展望

(1)复合板的制备通常采用爆炸法或轧制法,以获得可靠的冶金结合界面以及优异的板形、力学性能和物理化学性能。爆炸焊接可实现异种金属的高强度复合,特别是钛钢、铝铜等有色金属组合,但该工艺存在噪声大、粉尘污染严重、安全性差等局限。相比之下,真空轧制复合技术更具环保性和可控性,但往往需要复杂的预处理和较高的设备投入。

(2)在真空轧制复合技术中,组坯焊接对确保坯料密封性起着关键作用。目前的组坯焊接工艺包括电弧焊接、电子束焊接、真空激光焊接。电弧焊接具有设备成本低、适应性强、焊缝质量优异及操作灵活等优势;电子束焊接在一次扫描中即可完成焊缝成形,与传统电弧焊方法相比,可显著提高生产效率,可节省约 50%的时间,但初步投资占比较大;真空激光焊接在低真空环境下可获得与电子

束焊接相媲美的焊接质量及熔深,同时减少了设备投入和维护成本,具有较好的工业应用前景。

(3)采用合适的组坯方式及焊接技术,对金属复合板轧制过程顺利进行、板型控制及表面质量影响较大。非对称组坯过程中复层与基层的厚度比越大,对轧制工艺、设备及材料要求越高,因此要根据实际情况选用爆炸制坯工艺或非对称制坯工艺。对称组坯具有结构上的对称性,此设计能够简化刚度耦合模型,并降低轧制工艺复杂性,从而提升生产效率。

参考文献:

- [1] 田雅琴,秦建平,李小红.金属复合板的工艺研究现状与发展[J].材料开发与应用,2006(01):40-43.
TIAN Y Q, QIN J P, LI X H, et al. Research status and development of manufacturing processes for metal composite plates[J]. Development and Application of Materials, 2006(01):40-43.
- [2] Spasenović J, Blagojević I. Composite materials in automotive industry—a review[J]. Industrija, 2021, 49(2): 57-68.
- [3] 曾周燊,李斌,李伟,等. AH36+316L 不锈钢复合板在化学品船建造中的应用[J]. 江苏船舶, 2024, 41(02): 34-36.
ZENG Z Y, LI B, LI W, et al. Application of AH36+316L stainless steel composite plate in chemical tanker construction [J]. Jiangsu Ship, 2024, 41(02): 34-36.
- [4] Giudice F, Messori S, Sclaro C, et al. A Review on Metallurgical Issues in the Production and Welding Processes of Clad Steels[J]. Materials, 2024, 17, 4420.
- [5] 周杰,史和生,杨文芬,等.金属复合板加工技术的研究现状及发展趋势[J].金属世界,2022(05):24-30.
ZHOU J, SHI H S, YANG W F, et al. Present Situation and Development of Composition Technics for Metal Clad Plates[J]. Metal World, 2022(05):24-30.
- [6] 张婷,许浩,李仲杰,等.层状金属复合材料的发展历程及现状[J].工程科学学报,2021,43(01):67-75.
ZHANG T, XU H, LI Z J, et al. Development and present situation of laminated metal composites[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2021, 43(01):67-75.
- [7] 单多,李宏雷,张征.我国不锈钢复合板卷的发展研究现状[J].云南冶金,2021,50(05):79-87.
SHAN D, LI H L, ZHANG Z. Development and Research Status of Stainless Composite Plate Roll in China [J]. Yunnan Metallurgy, 2021, 50(05):79-87.
- [8] Trykov Y P, Stepanishchev I B, Trudov A F, et al. Structure and properties of explosion-welded composites from steels of different kinds [J]. Metal science and heat treatment, 2004, 46:167-169.
- [9] Bay N. Cold welding [M]. Welding Fundamentals and Processes, ASM International, 2011:711-716.
- [10] 谢广明,骆宗安,王光磊,等.真空轧制不锈钢复合板的组织和性能[J].东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10):1398-1401.
XIE G M, LUO Z A, WANG G L, et al. Microstructure and Properties of Stainless Steel Clad Plate by Vacuum Rolling Cladding [J]. Journal of Northeastern University, 2011, 32(10):1398-1401.
- [11] 查春和,戴燕红,杨梅梅.我国不锈钢复合板材的制造技术及应用[J].轧钢,2018,35(06):55-61.
ZHA C H, DAI Y H, YANG M M. Manufacturing technology and application of stainless steel clad plate in China[J]. Steel Rolling, 2018, 35(06):55-61.
- [12] 聂远超.大功率真空电子束技术制备复合板坯工艺及组织性能研究[D].镇江:江苏科技大学,2024.
NIE Y C. Study on Technology and Microstructure Properties of Composite Slab Prepared by High Power Vacuum Electron Beam Technology [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2024.
- [13] 廖东波,查五生,李伟.碳钢-不锈钢爆炸焊接复合板界面的显微结构[J].焊接学报,2012,33(05):99-102.
LIAO D B, ZHA W S, LI W. Microstructure of stainless steel-carbon steel composite plates produced by explosive welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(05):99-102.
- [14] Sherpa B B, Rani R. Explosive welding process to clad materials with dissimilar metallurgical properties [M]. Material Flow Analysis, IntechOpen, 2021.
- [15] Bahrani A S, Black T J, Crossland B. The mechanics of wave formation in explosive welding [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1967, 296(1445):123-136.
- [16] Cowan G R, Holtzman A H. Flow configurations in colliding plates: explosive bonding [J]. Journal of applied physics, 1963, 34(4):928-939.
- [17] Cowan G R, Bergmann O R, Holtzman A H. Mechanism of bond zone wave formation in explosion-clad metals [J]. Metallurgical Transactions, 1971, 2(11):3145-3155.
- [18] Mendes R, Ribeiro J B, Loureiro A. Effect of explosive

- characteristics on the explosive welding of stainless steel to carbon steel in cylindrical configuration [J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 182–192.
- [19] Jandaghi M R, Saboori A, Khalaj G, et al. Microstructural evolutions and its impact on the corrosion behaviour of explosively welded Al/Cu bimetal [J]. *Metals*, 2020, 10(5): 634.
- [20] Zhang L J, Pei Q, Zhang J X, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of explosive welded 2205/X65 bimetallic sheet [J]. *Materials & Design*, 2014, 64: 462–476.
- [21] 韩小敏, 王少刚, 黄燕. 金属爆炸焊的研究现状及发展趋势 [J]. *电焊机*, 2016, 46(04): 112–117.
HAN X M, WANG S G, HUANG Y. Research progress and development trend of metal explosive welding [J]. *Electric Welding Machine*, 2016, 46(04): 112–117.
- [22] Durgutlu A, Okuyucu H, Gulenc B. Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel [J]. *Materials & Design*, 2008, 29(7): 1480–1484.
- [23] Yazdani M, Toroghinejad M R, Hashemi S M. Effects of heat treatment on interface microstructure and mechanical properties of explosively welded Ck60/St37 plates [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25: 5330–5342.
- [24] HSFL Carvalho G, Galvão I, Mendes R, et al. Aluminum to steel cladding by explosive welding [J]. *Metals*, 2020, 10(8): 1062.
- [25] 杨云傲. 爆炸焊接 317L 不锈钢-FH40 船用钢复合板界面结构与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
YANG Y A. Studies on interface structure and properties of explosive welded 317L stainless steel-FH40 marine steel composite plate [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [26] 吴琼, 杨素媛. AZ31/1060 爆炸复合板界面区组织与性能研究 [J]. *稀有金属*, 2016, 40(10): 996–1001.
WU Q, YANG S Y. Microstructure and Properties of Bonding Interface in Explosive Welded AZ31/1060 Composite Plate [J]. *Rare Metals*, 2016, 40(10): 996–1001.
- [27] 薛治国, 黄杏利, 高宝利. 大面积铜钢复合板爆炸焊接工艺研究 [J]. *材料开发与应用*, 2016, 31(01): 41–44.
XUE Z G, HUANG X L, GAO B L. Technology Research on the Large Area Cu/Steel Clad Plate with Explosive Welding [J]. *Development and Application of Materials*, 2016, 31(01): 41–44.
- [28] 王小伟, 杨东青, 李晓鹏, 等. AZ31Mg/2A12Al 爆炸复合板界面组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(05): 14–17.
WANG X W, YANG D Q, LI X P, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ31Mg/2A12Al laminated composites interface fabricated by explosive welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(05): 14–17.
- [29] 房中行, 史长根, 冯柯, 等. TA2-1060-TA2 复合板爆炸焊接试验及性能测试 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(09): 87–92.
FANG Z X, SHI C G, FENG K, et al. Explosive welding experiment and property test of TA2-1060-TA2 cladding plate [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(09): 87–92.
- [30] 韩小敏, 王少刚, 黄燕, 等. TA10-Q345R 爆炸复合板的界面微观结构及力学性能 [J]. *压力容器*, 2015, 32(06): 24–29.
HAN X M, WANG S G, HUANG Y, et al. Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of TA10-Q345R Composite Plate with Explosive Welding [J]. *Pressure Vessels*, 2015, 32(06): 24–29.
- [31] 赵峰, 张鹏辉, 车宇锋. 爆炸金属复合板常见缺陷概述 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46(21): 9–12.
ZHAO F, ZHANG P H, CHE Y F. Overview of Familiar Defects of Explosive Metal Clad Plates [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(21): 9–12.
- [32] 刘利香, 张学岭. 不同制坯工艺对不锈钢复合板坯料轧制的影响研究 [J]. *宽厚板*, 2019, 25(06): 5–9.
LIU L X, ZHANG X L. Effects of Different Composite Slab Bonding Processes on Stainless Steel Clad Plate Rolling [J]. *Wide and Heavy Plate*, 2019, 25(06): 5–9.
- [33] Shi C, Yang X, Shi H, et al. Manufacturing process and interface properties of vacuum rolling large-area titanium-steel cladding plate [J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2019, 60(2): 152–161.
- [34] 蔡建鹏, 邓德安, 蒋小华, 等. V 形坡口和 K 形坡口 Q345/SUS304 异种钢对接接头残余应力和变形 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(04): 69–72.
CAI J P, DENG D A, JIANG X H, et al. Study on welding residual stress and distortion in Q345/SUS304 dissimilar steel butt weld of V and K groove type [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(04): 69–72.
- [35] 黄本生, 杨江, 卢东华, 等. Q345/316L 异种钢焊接接头显微组织结构与力学性能 [J]. *材料热处理学报*,

- 2016,37(05):45-51.
- HUANG B S, YANG J, LU D H, et al. Microstructure and mechanical properties of the Q345 /316L dissimilar steel welded joints [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(05):45-51.
- [36] 陈建平,姚屏,黄昌文.坡口对异种钢中厚板对接焊成形质量的影响研究[J].广东技术师范大学学报, 2020,41(06):26-31.
- CHEN J P, YAO P, HUANG C W. A Study on the Influence of Groove on Butt Welding Quality of Dissimilar Steel Plate [J]. Journal of Guangdong Polytechnic Normal University, 2020, 41(06):26-31.
- [37] 陈靖,佟建国,任学平.25Cr5MoA/Q235 钢复合板的结合性能[J].北京科技大学学报,2007,(10):985-988.
- CHEN J, TONG J G, REN X P. Bonding behavior of 25Cr5MoA/Q235 hot rolled clad plates [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, (10):985-988.
- [38] Bjelajac E, Skumavc A, Smaili F, et al. Experimental study of crack propagation through clad 316L/S355 steel produced by the hot-roll bonding process [J]. Metals, 2023, 13(7):1273.
- [39] 刘锦华,刘鹏,栾欠欠,等.波纹界面钛/钢复合板热轧制备与界面组织性能研究[J].精密成形工程,2025, 17(7):31-40.
- LIU J H, LIU P, LUAN Q Q, et al. Hot Roll Bonding Fabrication and Interfacial Microstructure and Properties of Titanium/Steel Clad Plates with Corrugated Interface [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(7):31-40.
- [40] Yan M, Sun J, Huang H, et al. Effect of hot rolling and cooling process on microstructure and properties of 2205/Q235 clad plate [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(11):1113-1122.
- [41] 郭松涛,吕林,聂远超,等.真空电子束焊接钛钢复合板组织及性能研究[J].冶金与材料,2023,43(05):1-3.
- GUO S T, LYU L, NIE Y C, et al. Study on microstructure and properties of titanium-steel composite plates welded by vacuum electron beam [J]. Metallurgy and Materials, 2023, 43(05):1-3.
- [42] 陈今良.0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢与 Q235 碳钢异种金属焊接接头的组织与性能[J].塑性工程学报,2019, 26(03):179-184.
- CHEN J L. Microstructure and properties of 0Cr18Ni9 austenitic stainless steel and Q235 carbon steel dissimilar metal welded joint [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(03):179-184.
- [43] 黄庆学,杨小容,周存龙,等.制坯工艺对热轧不锈钢/碳钢复合板复合效果的影响[J].材料热处理学报, 2014,35(S1):62-66.
- HUANG Q X, YANG X R, ZHOU C L, et al. Influence of performing process on bond effects of hot-rolled stainless steel and carbon steel clad billets [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S1):62-66.
- [44] 张秉刚,王一帆,王厚勤.先进材料与异种材料电子束焊接研究进展[J].焊接学报,2022,43(08):95-101.
- ZHANG B G, WANG Y F, WANG H Q. Research status and development trend of electron beam welding for advanced materials and dissimilar materials [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(08):95-101.
- [45] 陈国庆,树西,柳峻鹏,等.真空电子束焊接技术应用研究现状[J].精密成形工程,2018,10(01):31-39.
- CHEN G Q, SHU X, LIU J P, et al. Development Status of Applications of Vacuum Electron Beam Welding Technology [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(01):31-39.
- [46] Liu B X, Wang S, Chen C X, et al. Interface characteristics and fracture behavior of hot rolled stainless steel clad plates with different vacuum degrees [J]. Applied Surface Science, 2019, 463:121-131.
- [47] Baufeld B, Dutilleul T. Electron beam welding of large components for the nuclear industry [C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019, 269:02009.
- [48] 刘瑶,王磊,汤莹莹,等.电子束非穿透焊接匙孔行为数值模拟及气孔抑制方法[J].电焊机,2023,53(6):1-7.
- LIU Y, WANG L, TANG Y Y, et al. Numerical Simulation of Keyhole Behavior and Porosity Suppression Methods of Electron Beam Partial Penetration Welding [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(6):1-7.
- [49] 高福洋,高奇,蒋鹏,等.钛合金电子束深熔焊根部缺陷机理分析[J].焊接学报,2018,39(10):30-34.
- GAO F Y, GAO Q, JIANG P, et al. Analysis on mechanism of root defect in titanium alloy electron beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10):30-34.
- [50] 张潜,骆宗安,成小龙,等.焊接工艺对 Q345 厚板电子束封装淬硬裂纹的影响[J].钢铁研究学报,2023,35(10):1260-1270.
- ZHANG Q, LUO Z A, CHENG X L, et al. Effect of

- welding process on hardened cracks in electron beam package of Q345 ultra-thick plate [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2023, 35(10): 1260–1270.
- [51] Mao L, Luo Z, Feng Y, et al. Effect of electron beam welding parameters on temperature and stress field of AISI P20 tool steel in vacuum roll-cladding process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(3): 737–750.
- [52] Luo Y, Wu W, Wu G, et al. Influence of gravity state upon bubble flow in the deep penetration molten pool of vacuum electron beam welding [J]. *Vacuum*, 2013, 89: 26–34.
- [53] Tomashchuk I, Sallamand P, Andrzejewski H, et al. The formation of intermetallics in dissimilar Ti6Al4V/copper/AISI 316 L electron beam and Nd: YAG laser joints [J]. *Intermetallics*, 2011, 19(10): 1466–1473.
- [54] Wang T, Zhang B, Feng J, et al. Effect of a copper filler metal on the microstructure and mechanical properties of electron beam welded titanium–stainless steel joint [J]. *Materials Characterization*, 2012, 73: 104–113.
- [55] Šimeková B, Hodúlová E, Kovačový P, et al. Influence of electron beam welding parameters on the microstructure formation and mechanical behaviors of the Ti and Ni dissimilar metals welded joints [J]. *Metals*, 2022, 12(6): 894.
- [56] Xie G, Luo Z, Wang G, et al. Interface characteristic and properties of stainless steel/HSLA steel clad plate by vacuum rolling cladding [J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(8): 1709–1712.
- [57] Chen Z Y, Qi J J, Liu H Q, et al. Research on production technology of asymmetrically hot rolled stainless steel clad plate [C]//*Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2020, 996: 185–190.
- [58] Wang F R, Wang Y K, Zhu S B, et al. Effect of Nb interlayer thickness on interfacial products and mechanical properties of Ti–6Al–4V/EH690 steel clad plate by vacuum hot rolling [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 3948–3959.
- [59] 王明坤, 骆宗安, 周宏宇, 等. 组坯方式及轧制工艺对钛/钢复合板组织和性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(12): 4004–4015.
- WANG M K, LUO Z A, ZHOU H Y, et al. Effect of billet assembly methods and rolling processes on microstructure and properties of titanium/steel clad plate [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(12): 4004–4015.
- [60] Arata Y, Abe N, Oda T. Fundamental phenomena in high power CO₂ laser (report II): Vacuum laser welding (welding physics, process & instrument) [J]. *Transactions of JWRI*, 1985, 14(2): 217–222.
- [61] Reisgen U, Olschok S, Jakobs S, et al. Laser beam welding under vacuum of high grade materials [J]. *Welding in the World*, 2016, 60(3): 403–413.
- [62] Krichel T, Olschok S, Reisgen U. Extension of the process limits for laser beam welding in vacuum of thick-walled steel sheets [J]. *Procedia CIRP*, 2022, 111: 453–456.
- [63] Li F S, Wu L H, Zhao H B, et al. Realizing deep penetration and superior mechanical properties in a titanium alloy thick plate joint via vacuum laser beam welding [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 2254–2264.
- [64] Jiang M, Tao W, Wang S, et al. Effect of ambient pressure on interaction between laser radiation and plasma plume in fiber laser welding [J]. *Vacuum*, 2017, 138: 70–79.
- [65] Cai C, Peng G C, Li L Q, et al. Comparative study on laser welding characteristics of aluminium alloy under atmospheric and subatmospheric pressures [J]. *Science and Technology of welding and joining*, 2014, 19(7): 547–553.
- [66] 黄瑞生, 李想, 邹吉鹏, 等. Ti6Al4V 合金低真空激光焊接接头形貌特征分析 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(09): 24–29.
- HUANG R S, LI X, ZOU J P, et al. Analysis of morphological characteristics of low vacuum laser welded joint of Ti6Al4V alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(09): 24–29.
- [67] 邹吉鹏, 黄瑞生, 武鹏博, 等. TC4 钛合金低真空 20 kW 激光焊接特性研究 [J]. *电焊机*, 2023, 53(08): 28–35.
- ZOU J P, HUANG R S, WU P B, et al. Study on Low Vacuum 20 kW Laser Welding Characteristics of TC4 Titanium Alloy [J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(08): 28–35.
- [68] 王继明. 5A06 铝合金厚板超高功率真空激光焊接特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG J M. Research on characteristics of ultra high laser power welding of thick 5A06 plates under subatmospheric pressure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.