

优化焊接产业 支撑制造强国

王冰¹, 郝庆乐², 黄森², 程战¹, 丁天然², 秦建², 龙伟民^{1*}

1. 中机智能装备创新研究院(宁波)有限公司 浙江宁波 315700

2. 郑州机械研究所有限公司 河南郑州 450000

摘要: 焊接作为制造业的重要基础技术,在国民经济和国防建设中发挥了越来越重要的作用,支撑着航空航天、汽车、船舶、能源、化工、机械及电子等众多领域的产业发展。21世纪的中国正在成为全球制造中心,我国传统制造业面临全面的升级和技术创新,优化焊接产业迫在眉睫。焊接材料、工艺、装备的交叉融合发展是促进焊接技术快速进步的关键。焊接过程的安全、健康与环境越加重要,随着焊接材料向低能耗、高效率、优质化方向发展,焊接技术向柔性化、复合化、绿色化方向创新,焊接装备向数字化、智能化、网络化方向转型,我国已成为焊接技术应用和输出大国。加大焊接产业自主创新能力,打造出一批规模与效益并举,极具持续发展潜力,位居世界前列的“专、精、特、新”世界品牌企业,是从事焊接制造者的历史责任,也是实现制造强国战略目标的必由之路。

关键词: 制造强国;焊接材料;焊接技术;焊接装备

1 序言

制造业是立国之本,是国家实力的重要体现。制造业是国民经济的主体,打造具有全球竞争力的制造业,是提升国家综合国力与核心竞争力的必由之路。国内制造业发展迅猛,但部分高端装备制造与国外差距仍然较大。而焊接产业是制造业不可或缺的重要组成部分,在制造业的发展过程中,焊接起着举足轻重的作用^[1]。

“中国制造2025”重点发展的十大领域中,与焊接^[2]发展密切相关的有8项。焊接是高端装备制造基础技术,具有不可替代性。只有加强焊接产业的外延式发展,加速跨专业协同、多学科融合,提高焊接技术的成组成套能力,才能加快焊接技术与装备的数字化、智能化发展,提升我国高端装备制造的服务能力与水平^[3]。

焊接材料、焊接工艺、焊接装备^[4]是焊接产业的三大核心板块,三个板块的飞速发展促进了国内焊接技术的快速进步。由于焊接过程中产生的焊接

烟尘、废气、残渣等带来的环境污染问题难以避免,焊接安全、健康与环境越加重要,因此改善操作环境势在必行。

2 制造强国发展

纵观美洲、欧洲等发达国家的强国之路可以看出^[5],具备规模雄厚、结构优化、技术创新能力强、发展质量好,以及产业链国际主导地位突出的制造业是国民经济持续发展及国家安全的基础。

通过对有代表性国家的制造业进行梳理和研究,大致上可以将“制造强国”的内涵概括为以下三个方面:一是规模和效益并举。从美国、德国、法国及日本等世界公认的制造强国的发展历程来看,最基本的特征就是制造业规模日趋壮大,产业质量不断提高。二是具有较高国际分工地位。当今多数制造强国中,高技术产业和服务型制造占比较高,尤其是信息技术的应用使其拥有很强的核心竞争力。三是具有较好的发展潜力。不论是既有的制造强国,还是具有后发优势的“潜在”制造强国,

基金项目:宁波市“3315”人才计划2020年创新团队C类。

通信作者:龙伟民,研究员,主要从事新型钎焊材料及其生产技术、钎焊工艺与设备研发及应用, E-mail: longweimin@camsouth.com.cn。

都要求具有良好的发展潜力，以强大的自主创新能力实现制造业资源节约、环境友好、绿色发展，具备持续发展的能力。

制造强国主要表现出以下几方面的特征：①拥有雄厚的产业规模。反映了制造业发展的实力基础，表现为产业规模较大，具有成熟健全的现代产业体系，在全球制造业中占有相当比重。②优化的产业结构。反映了产业间的合理结构，各产业之间和产业链各环节之间的密切联系，产业组织结构优化，基础产业和装备制造业水平较高，拥有众多有较强竞争力的跨国企业。③良好的质量效益。体现了制造业发展质量和国际地位，表现为制造业生产技术水平世界领先、产品质量水平高、劳动生产率高、创造价值高以及占据价值链高端环节等。④持续的发展能力。体现高端化发展能力和长期发展潜力，表现为具有较强的自主创新能力，能实现绿色可持续发展，信息化发展水平较高^[6]。

2.1 中国制造业现状

2018年，我国制造业增加值占世界的份额超过28%，接近美国、日本、德国的总和，数百种工业品产量位居全球首位。我国已拥有31个工业大类、191个中类、525个小类，形成了独立完整的现代工业体系，是全世界唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类的国家。中国制造业面向全球市场，构建起庞大而精细的生产分工体系，极大地提高了生产效率，形成世界其他地方很难达到的交付能力。我们正在由“跟跑者”转变为“并跑者”，甚至在一些领域正在成为“领跑者”。2018年，中国R&D经费投入强度（R&D经费与GDP的比值）为2.19%，比上年提高0.04%，连续5年超过2%，并再创历史新高。中国R&D经费投入的三大主体：企业、研究机构和高等学校R&D经费分别比上年增长11.5%、10.5%和15.2%，对R&D经费增长的贡献分别为75.9%、12.4%和9.3%，企业依然是全社会R&D经费增长的主要拉动力量。根据数据显示，2018年我国工业制成品出口额为2.35万亿美元，同比增长9.61%；工业制成品进口额为1.43万亿美元，同比增长13.46%。

近年来，我国科技创新取得了显著成就，但自主创新能力不强，我国在国际分工中尚处于技术含量和附加值较低的“制造-加工-组装”环节，主要

体现在质量基础相对薄弱，国家监督抽查产品质量不合格率较高，制造业每年直接质量损失超过2000亿元，间接损失超过万亿元，缺乏世界知名品牌。产业结构不尽合理，资源密集型产业比重过大，技术密集型产业和生产型服务业比重偏低，具有较强国际竞争力的大企业偏少，在细分领域掌握核心技术的“专、精、特”企业不多。能源利用效率偏低，一些地方和企业单纯依靠大规模要素投入获取经济增长速度和经济效益，造成能源利用率偏低和环境污染严重。信息化水平不高，信息基础设施建设和应用水平仍然滞后于发达国家，利用信息技术改造传统生产方式和工艺流程的水平亟待提升，关系国家经济、社会安全的高端核心工业软件（设计、管理、控制、优化等）主要依赖进口。

2.2 中国制造业的机遇和挑战

中国制造业的发展速度令世界瞩目，未来较长一段时间内，农业的比重会下降，服务业的比重会提高，但制造业将一直占据重要的地位。虽然我国的制造业规模庞大，但仍有着很大的发展空间。从制造大国迈向制造强国，需要从提高效率入手，打造出规模与效益优化、极具发展潜力、位居世界前列的制造业。

新工业革命与我国加快建设制造强国形成历史性交汇，留下不少教训，但同时也是极大的机遇。发达国家以数字化、智能化制造技术应用为重点，力图依靠科技创新，抢占国际产业竞争制高点，谋求未来发展的主动权。而我国的现代化同西方发达国家的发展方式有很大不同，西方发达国家是一个“串联式”的发展过程。德国的制造水平、信息化发展水平世界领先，已经开始推进工业4.0战略。而按照德国的划分标准，我国工业企业整体处于2.0的水平，需要补上从工业2.0到3.0的差距，才能实现4.0的方向发展。因此，我国要加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，把智能制造作为两化深度融合的主攻方向，全面提升企业研发、生产、管理和服务的智能化水平。把握当下，迎接挑战。相信不久的将来，“中国制造”定会真正深化为“中国智造”与“中国创造”。

2.3 制造强国之路

“中国制造2025”是建设制造强国三步走的第一个10年行动纲领，提出了制造业国别比较的评价

指标体系,具体包括了规模发展、质量效益、结构优化和可持续发展4个一级指标,以及制造业增加值、制造业增加值率、全球“财富”500强中本国制造业企业营业收入占全部制造业企业营业收入比重、制造业研发投入强度等18个二级指标。在国际政经格局不发生重大变化的情况下,综合考虑工业发达国家工业化进程各阶段综合指数的增长率和我国GDP增长率,构建适合我国国情的综合指数预测模型,对未来我国制造业综合指数发展趋势进行预测。

第一阶段到2025年,综合指数接近德国、日本实现工业化时的制造强国水平,基本实现工业化,中国制造业迈入制造强国行列,进入世界制造业强国第二方阵。在创新能力、全员劳动生产率、两化融合、绿色发展等方面迈上新台阶,形成一批具有较强国际竞争力的跨国公司和产业集群,在全球产业分工和价值链中的地位明显提升,模型预测我国制造业综合指数要达到98.81。而2018年,我国制造业综合指数已经到达109.94。

第二阶段到2035年,综合指数达到世界制造业强国第二方阵前列国家的水平,成为名副其实的制造强国。在创新驱动方面取得明显进展,优势行业形成全球创新引领能力,制造业整体竞争力显著增强,我国制造业综合指数最高可达到115~120,与德国2012年水平基本相当,与其他国家工业化完成后10~15年水平基本相当。

第三阶段到2045年,综合指数率略高于第二方阵国家的水平,进入世界制造业强国第一方阵,成为具有全球引领影响力的制造强国。制造业主要领域具有创新引领能力和明显竞争优势,建成全球领先的技术体系和产业体系。我国制造业综合指数可达到125~130,略高于日本2012年水平,与其他国家工业化完成后20~25年水平基本相当。

3 焊接产业现状

3.1 焊接材料发展现状

20年来,我国焊接材料总产量从快速上升到稳中趋降,产品结构日趋合理。供需矛盾得到一定程度的缓解,但局部的不平衡依然存在,中低端产品产能过剩,高端产品国产化配套仍然不足。焊条比例已下降至38%以下,并将逐渐减少至30%以下,

接近工业发达国家水平;而气体保护实芯焊丝的生产比例逐年递增,目前已超过40%,反映出自动焊比例在逐渐提升,制造业在逐渐向自动化制造转变。药芯焊丝占比较为平稳,相比2010年度甚至有下降趋势,表明药芯焊丝电弧焊有待进一步推广。

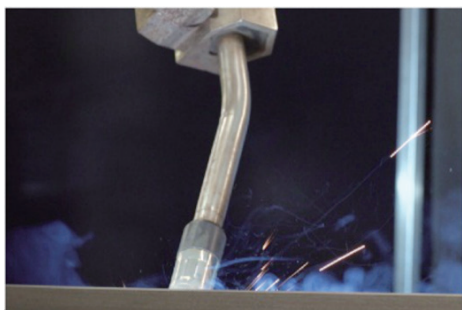
随着工程化对焊接效率需求的提高和焊接机器人的普及,我国适用于高效焊接的气体保护实芯焊丝、药芯焊丝、高效埋弧焊材产品发展明显加快。气体保护实芯焊丝已实现500~1000MPa强度级别系列化,盘状、桶装等供货形式多样化^[7];药芯焊丝从无到有,历经从非金属粉芯到金属粉芯、从有缝到无缝、从气体保护到自保护的发展过程^[8];埋弧焊从单丝发展到多丝,从常规发展到超大厚度窄间隙焊接等更加高效的工艺方法。近10年来,我国应用于国家重点工程和重大装备,诸如军工、核电、超超临界机组、大型加氢反应器、高技术船舶、海洋工程和深冷工程^[9, 10]等的高端优质焊接材料自主化率不断提升,由过去的不足10%提升至20%~30%,高端装备制造业和新能源产业所需的高端优质焊接材料逐年增加,而智能制造对焊接材料适应于高强高韧、高温高压、超低温、耐强腐蚀、耐强辐射和高纯净度等提出更高要求。焊条制造已发展由高速拉丝切丝联合、高精度自动配粉、天然气烘干等节能环保制备^[11]。为了满足国内电子封装行业的要求,钎料无害化制备和应用开展了一系列关键共性技术攻关,开发出系列无铅钎料、无镉钎料、无缝药芯钎料、自黏结药皮钎料等钎料/钎剂一体化的减排型复合钎料,减排有害物超过50%^[12]。

由于有色金属铝、镁、钛及镍等具有轻量、高强、记忆功能、耐高温、耐腐蚀等特点,所以近年来在航空航天、高铁、汽车、核电和化工等领域得到广泛应用。5000系列铝镁合金具有良好的焊接性和耐蚀性^[13],国内用于动车车体制造的A15183、A15356等铝镁焊丝正在研发推广,但焊丝的气体及杂质控制,以及表面处理工艺与国外相比仍有一定差距。另外,钛基带状钎料^[14]解决了不锈钢及钛合金板翅式散热器的真空钎焊难题。

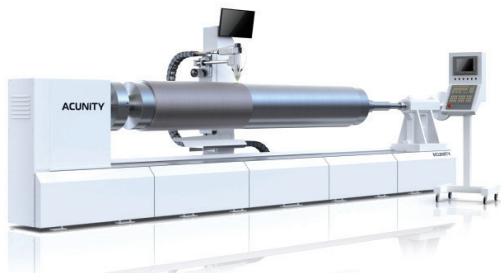
3.2 焊接制造技术发展现状

焊接技术围绕减排、节材、提效、降耗的绿色化方向发展^[15-17],如开发了低烟尘焊丝,以降低发尘量,减少对环境的污染和人体的伤害;开发的

无镀铜焊丝避免了镀铜过程中酸碱液体对环境的污染，也降低了能耗；开发的高速熔覆工艺替代高污染电镀工艺，改善了表面改性质量，提高了服役周期，降低了电镀工艺对环境的污染；轻量化材料的使用降低了不可再生能源的消耗，减少了对环境的污染。传统钎焊^[18]存在危害健康、污染环境、能耗高与效率低等问题，为了减少钎焊过程中产生的烟尘、废水等废弃物的排放量，开发了一系列无害化钎料、高效绿色钎焊^[19]技术等（见图1），绿色焊接制造技术已成为焊接行业发展的主流方向。



a) 低烟尘焊丝



b) 超高速激光熔覆工艺

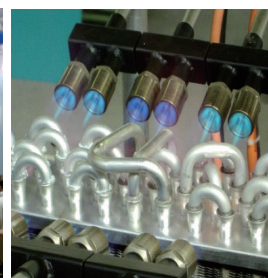
图1 低烟尘焊丝和超高速激光熔覆

长期以来，异质材料连接一直是高端装备制造业的难点和痛点，近年来国内外陆续开发出了先进的成形与连接技术，已逐渐成为异质材料连接的主要途径。由于异质材料连接能发挥材料各自的优良性能，因此在航空航天、新能源、轨道交通、制冷及超硬工具等领域具有广阔的应用前景。目前，在异质材料连接方面开发了许多新技术，如在线梯度复合技术，实现了石墨与铜的高可靠连接；表面构形与焊缝控形技术，实现了异质材料的有序润湿；热力耦合与应力缓释技术，实现了界面强化和应力缓冲。异质材料连接技术难点的解决，推动了异质材料连接结构在国家重大工程中的应用，助推了国内高端装备向高质量发展。

随着钎焊技术的发展及其应用行业的不断拓展，实现钎焊自动化的要求越来越迫切^[20]。自动化钎焊时，在装配过程中需将钎料预制成形并装于被钎焊组件上。自动化钎焊除了可提高生产效率并减少钎剂用量，还可减少钎剂污染夹具所造成的危险。图2为铝制多管路接头的自动火焰钎焊。由图2可知，将钎料与钎剂复合为一体的连续型药芯钎料与药皮钎料是实现自动钎焊的新途径，新型钎焊材料与技术国家重点实验室已经成功开发出此类产品。复合钎料可显著提高生产效率和产品质量稳定性，自动钎焊设备数控化、智能化是必然的发展趋势。



a) 铝制管路接头火焰钎焊



b) 钎焊生产线

图2 制冷行业自动化钎焊技术应用

3.3 焊接装备自动化发展现状

在工业发达国家的焊机制造厂商全部进入逆变焊机时代的今天，因需求不同，我国变压器式交流电源的退出虽然还没有结束，但相较交流电源而言，晶闸管等传统直流焊接电源的退出却在提速，尤其是2000年以后这一趋势来得更快也更为彻底。未来数字化产品、自动化设备与基于逆变及数字化技术的各类焊接设备的需求会越来越多，这也必然是国内焊接电源的发展方向。虽然相比国外，国内在电源方面相对落后，但随着近年来国内智能传感系统等技术的普遍应用，可以看出这方面的差距正在不断减小，不断推出的数字化及自动化焊接电源产品也证明了这一点。

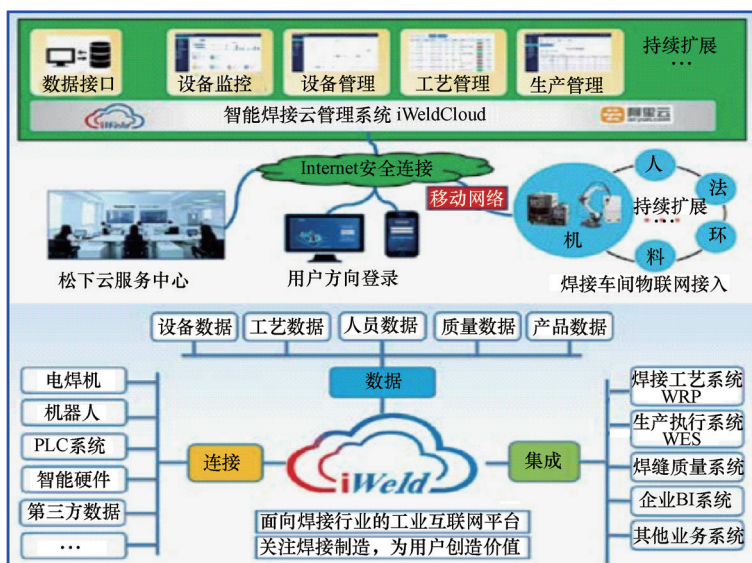
近年来，“数字化焊接车间”被引入焊接领域，自2005年开始，国内外设备制造商基于数字焊接设备硬件平台的焊接管理软件，相继推出了信息化焊接管理系统，如图3所示。多年来国内在这方面，类似的系统不断推陈出新。以国内某企业的群控管理、视觉识别与跟踪系统在集装箱焊接应用为例，设备将图像识别跟踪系统整合于拼板直缝自

动焊接专机上，用于薄板拼接无坡口直缝自动化焊接。该系统基于图像处理的焊缝跟踪系统，解决了机械探头及激光跟踪在0.5mm以下焊缝宽度时不能有效跟踪的问题，并实现无需进行扫描的实时跟踪。系统适用于MAG、MIG、TIG、SAW等焊接方式，易与各种自动化焊接装备配套使用，实现高质量自动化焊接。

随着以电阻焊、搅拌摩擦焊、爆炸焊等焊接方法为代表的压力焊技术被广泛应用在航空航天、能源、电子与轨道交通等领域。据统计，全世界每年由压力焊完成的焊接量占总焊接量的33.3%，并呈现出继续增加的态势，尤其是日趋成熟的搅拌摩

擦焊技术更是在铝合金加工领域大放异彩。目前国内电阻焊已能实现自主化生产，搅拌摩擦焊已实现40mm厚度铝合金的焊接，爆炸焊已广泛应用于石油石化、海洋工程、燃气运输等领域复合板的制造，部分技术已达到或接近国际先进水平。但目前压力焊设备的核心部件，如电阻焊的中频变压器和大功率整流管、搅拌摩擦焊的高强搅拌头等部件依然依赖进口，需要相关企业提高创新研发能力，提高制造能力，从而进一步推广绿色低碳焊接技术。

随着工业对高生产效率和优质焊接质量的迫切需求，以激光焊、激光复合焊、电子束焊、等离子弧焊及多电极复合焊等为代表的一批高效优质焊接



a) 信息化管理示意



b) 信息化管理原理

图3 信息化焊接管理系统

方法不断涌现。由我国自主开发的穿孔型变极性等离子弧焊设备已实现在我国“天宫一号”壳体上的焊接；在电子束焊方面，国内在电子光学优化、电子枪加工精度、电子束合轴系统方面取得了巨大成功。

随着我国制造业的快速发展，先进焊接技术的应用越来越广泛。一方面，由于焊接环境的恶劣，使新一代产业工人不愿从事焊接职业；另一方面，焊接产品的质量要求提升和产品升级速度加快，使培训一名成熟焊工的成本越来越高，因此全自动化柔性焊接装备和数字化定型焊接专机近年来成为国内的研究热潮。随着国内自主化机器人的技术突破和国内外机器人价格的降低，国产的柔性化全自动焊接装备的研发和设计已日益成熟且形成规模，大有取代国外进口高端产品之势。另外，辅助机具的大幅提升，促使国内在焊接专机方面呈现飞跃式发展，国产数字化定型焊接专机已在国内多个重大工程中应用，部分技术已达到国际先进水平。

3.4 焊接安全、健康与环境

焊接是现代制造业的重要工艺之一，其操作过程产生的烟尘、废气、残渣等带来的环境污染难以控制。焊接作业产生的高温、弧光、噪声、电磁辐射和有害气体等对人体健康和安全有较大危害^[21, 22]。我国在焊接环境和健康领域的相关法规标准有待完善，焊接机械化和自动化程度也有待进一步提高，因此焊接行业要通过开发无害化焊接产品与绿色焊接技术^[23]，从源头上有效避免有毒有害物质进入环境，减少焊接烟尘、有害气体等污染物的产生，从而降低能源消耗，改善操作环境。

目前，我国绿色焊接材料、焊接整体防护和局部防护产品发展不平衡，大多实现了从无到有的发展，形成了较全面系统化的产品，但整体产品水平参差不齐，自主研发少，缺乏有效创新。首先，对焊接职业危害和有效防护措施的研究不够，对焊工行为习惯研究不足；其次，部分企业对法律、法规与标准不了解，缺乏对人体参数标准的深入研究；第三，缺乏对防护装备的系统性研究，造成防护用品之间的兼容性差，影响实际防护效能。

因此，未来应加强和鼓励对低烟尘、低毒、无害、防潮及防锈等新一代焊接材料与技术的研发，开发环境污染小的新产品与新技术。加强自动化、

智能化技术在焊接制造中的应用，自主研发智能化高端焊接装备，制订并严格执行焊接生产环境标准，提高对有害物质的监测，应用和推广绿色焊接技术和装备。

3.5 焊接产业发展之路

虽然焊接产业“卡脖子”问题并不突出，但短板问题存在，有“卡脖子”的风险。想要改变焊接产业的被动局面，应重点关注以下几方面。

1) 在政府顶层设计方面应充分发挥制度优势，集中突破一批短板技术，强化政府与市场相结合，加大力度持续推进工业强基工程，形成长效的政策机制；采取市场机制，培育“专、精、特”世界领军企业。紧跟国家的政策方针，加强焊接行业的规划工作，筑牢发展根基。提出高端装备制造的配套需求，规划焊接创新的新方向，制订出绿色焊接材料及制备技术的实施技术路线。

2) 随着焊接行业绿色化、智能化的步伐加快，专业技能型人才是不可缺少的要素，因此政府方面需要出台扶持政策，行业要打造高技能人才培养基地，企业建立健全激励机制，加强培训力度，可以与高校、科研院所联合培养复合型技术人才，按需培养，量身打造，助力制造业转型升级。

3) 以“一带一路”倡议为契机，促进区域化协同发展和工业化与信息化深度融合，形成军民融合发展，多专业、多学科交叉融合、协同发展的良好趋势。焊接行业在关注跨专业、多学科协同的同时，要持续完善创新机制，增强调整品种结构的主动性和前瞻性，拓展合作伙伴，加大力度开展与原材料厂商，行业协会、学会，科研院所及龙头企业的合作，联合研发更加适应市场需求的焊接材料和装备，加速科技成果的产业化，推动企业从生产制造向服务制造型转变。

4 结束语

1) 制造业是强国之基，制造强国以强大的制造业为重要支撑，制造业强大的过程也是工业化逐步完成的过程。具有规模较大、结构优化、产业质量高的制造业是制造强国的核心。未来应推动传统制造业的转型升级和健康稳定发展，实现制造业高端化的跨越发展，从而提升产品质量和国际竞争力。

2) 我国制造强国综合指数已过百，基本实现

了工业化，正稳步向制造强国迈进。但与发达国家相比，我国制造业总体上处于全球价值链中低端，“大而不强”是中国制造亟待解决的内在问题，因此提升质量效益和智能制造转型升级迫在眉睫。

3) 制造强国十大重点领域中，多个领域与焊接紧密相关。焊接作为制造业的重要基础技术，支撑着航空航天、轨道交通、海洋工程、能源、化工、机械与电子等众多领域的产业发展。

4) 我国焊接领域已经取得许多重大突破，如异质材料连接技术和自动化钎焊技术，一些技术甚至处于世界领先地位。但我国焊接领域仍存在许多问题，焊接材料研发力量薄弱，焊接工艺稳定性差，高端焊接装备严重依赖进口，因此优化焊接产业迫在眉睫。

5) 未来焊接产业发展的重要方向是智能化，其最终落脚点始终是优质、高效焊接技术的发展，有赖于先进焊接工艺、焊接装备的不断突破和坚实支撑；紧跟国家政策方针，加快产业和企业的转型升级，发挥行业作用，实现创新发展；打造更多世界级品牌，为制造强国提供强有力的支撑。

参考文献:

- [1] 宋天虎.开创我国焊接行业的新局面[J].电焊机, 2020, 50 (9) : 1-10.
- [2] 张忠.焊接技术在轨道交通车体中的应用及其发展方向探讨[J].建筑技术开发, 2020, 47 (14) : 72-73.
- [3] 李连胜, 李爱民, 李波, 等.中国焊接协会在工业互联网上的探索与布局[J].金属加工 (热加工), 2020 (8) : 18-22.
- [4] 王评.现代焊接技术的发展现状及前景[J].内燃机与配件, 2020 (18) : 183-184.
- [5] 孔令翔.发达国家与发展中国家去工业化的比较研究[D].南昌: 江西财经大学, 2020.
- [6] 郭进.全球智能制造发展现状、趋势与启示[J].经济研究参考, 2020 (5) : 31-42.
- [7] 李春国, 王惜宝, 孙洪玲.CO₂气体保护焊实芯焊丝的应用现状和发展动态[J].焊接技术, 2007 (2) : 1-4.
- [8] 王元良, 陈辉.药芯焊丝焊接材料的发展[J].电焊机, 2008 (7) : 1-8.
- [9] 郭宁, 王美荣, 郭伟, 等.水下湿法自保护药芯焊丝[J].焊接学报, 2014, 35 (5) : 13-16, 113-114.
- [10] 王孝民.起重机拼板对接不清根高效焊接新工艺研究[D].沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [11] 马兆龙.水下湿法焊条电弧焊焊接工艺性研究[D].天津: 天津大学, 2012.
- [12] 龙伟民, 张青科, 朱坤, 等.绿色钎焊材料及无害化钎焊技术的发展[J].焊接, 2014 (1) : 3-7.
- [13] 周光河, 吕仲光, 罗晓军, 等.5A06铝镁合金的焊接[J].焊接技术, 2019, 48 (4) : 95-96.
- [14] Wang T, Zhang B, Chen A, et al.High strength electron beam welded titanium-stainless steel joint with V/Cu based composite filler metals[J].Vacuum, 2013, 94: 41-47.
- [15] 张群超.新型低银无铅电子钎料研究[D].北京: 北京有色金属研究总院, 2012.
- [16] Zhang L, Xue S B, Gao L L, et al.Properties of SnAgCu/SnAgCuCe soldered joints for electronic packaging[J].Journal of Materials: Materials in Electronics, 2010, 21 (6) : 635-642.
- [17] 孙福林, 张宇航, 蔡志红, 等.新型无卤素免清洗助焊剂的研制[J].材料研究与应用, 2011, 5 (1) : 49-52.
- [18] 张文毓.钎焊技术的研究现状与应用[J].现代焊接, 2010 (12) : 1-2, 6.
- [19] 北京·埃森焊接与切割展览会组委会.第23届北京·埃森焊接与切割展览会展会综合技术报告[R].北京: 中国机械工程学会, 2018.
- [20] 杨玻, 张开熙, 邹勇.车身焊接自动化技术的发展应用[J].汽车零部件, 2020 (3) : 99-101.
- [21] 吴洋.焊接烟尘对健康的影响及防护措施[J].技术与市场, 2017, 24 (11) : 167.
- [22] 胡光明.焊接生产的健康与环保[J].金属加工 (热加工), 2014 (6) : 32-33.
- [23] Zhang M J, Chen G Y, Zhang Y, et al.Research on microstructure and mechanical properties of laser keyhole welding-brazing of automotive galvanized steel to aluminum alloy[J].Materials & Design, 2013, 45: 24-30.

MW 20210106