DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.02

高强钢金属粉芯焊丝研究现状

刘大双[1]，朱永豪[1]，陈明辉[1]，方乃文[2]，魏　萍[3]，李　森[4]，信国松[5]

1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院，安徽 合肥 230009
2. 中焊科技发展(哈尔滨)有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028
3. 合肥职业技术学院 机电工程学院，安徽 合肥 230009
4. 国营芜湖机械厂 航空装备综合诊断与维护安徽省联合共建学科重点实验室，安徽 芜湖 241000
5. 聚力新材料科技(日照)有限公司，山东 日照 276800

摘　要：与焊条和实心焊丝相比，金属粉芯焊兼具熔敷效率高、低烟尘飞溅和焊缝成分可灵活设计等优势，在高强钢焊接领域是极具发展潜力的焊接材料。但是，该类焊丝在实际应用中仍面临焊接参数匹配复杂、焊缝质量稳定性不足等问题。本文综述了高强钢金属粉芯焊丝的研究进展，重点阐述了金属粉芯焊丝电弧物理特性(熔滴过渡行为、电弧稳定性、飞溅特征)的研究现状，分析了粉芯中合金元素(Mn、Ni、Mo、Cr、W、Ti、Cu等)对熔敷金属微观组织、力学性能、耐磨性和耐蚀性的影响规律，并归纳了金属粉芯焊丝在管道焊接、结构钢焊接及增材制造等典型工程场景中的应用效果。最后，指出了当前研究中存在的不足，并对未来发展方向进行了展望。

关键词：金属粉芯焊丝；高强钢；电弧物理特性；粉芯成分；焊接应用

中图分类号：TG422.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303(2026)08-0019-13

Research Status of High-Strength Steel Metal-Cored Wires

LIU Dashuang[1], ZHU Yonghao[1], CHEN Minghui[1], FANG Naiwen[2], WEI Ping[3], LI Sen[4], XIN Guosong[5]

1. School of Materials Science and Engineering,Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
2. China Welding Technology Development (Harbin) Co., Ltd., Harbin 150028, China
3. School of Mechanical and Electrical Engineering,Hefei Technology College, Hefei 230009, China
4. Comprehensive Diagnosis and Maintenance of Aviation Equipment Anhui Provincial Joint Key Laboratory,Wuhu State-owned Factory of Machining, Wuhu 241000, China
5. Juli New Material Technology (Rizhao) Co., Ltd., Rizhao 276800, China

Abstract: Compared with covered electrodes and solid wires, metal-cored wires (MCWs) combine high deposition efficiency, low fume and spatter generation, and flexible weld metal composition design, making them particularly attractive for welding of high-strength steels. Nevertheless, their practical application is still constrained by difficulties in welding parameter optimization and insufficient consistency of weld quality. This paper reviews recent research progress on MCWs for high-strength steels. The arc physical characteristics, including droplet transfer behavior, arc stability, and spatter characteristics, are systematically summarized. The effects of core alloying elements (Mn, Ni, Mo, Cr, W, Ti, Cu, etc.) on the microstructure, mechanical properties, wear resistance, and corrosion resistance of deposited metals are analyzed. Typical engineering applications in pipeline welding, structural steel welding, and additive manufacturing are also reviewed. Finally, existing research gaps are identified and future development directions are discussed.

Keywords: metal-cored wires; high-strength steel; arc physical characteristics; core powder composition; welding applications

收稿日期：2026-07-01　　**修回日期：**2026-08-05

基金项目：国防基础科研计划(61420052023WD009)；国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20191)；国家自然科学基金面上项目(52575373)；“科创甬江2035”重点研发计划(2025Z002)；泰山产业领军人才工程(2024001)

作者简介：刘大双(1984—)，博士，副教授，博导，主要从事焊接材料及冶金方面的研究。E-mail：dsliu@hfut.edu.cn。

引用格式：刘大双，朱永豪，陈明辉，等. 高强钢金属粉芯焊丝研究现状[J]. 电焊机，2026，56(8)：19-31.
Citation: LIU Dashuang, ZHU Yonghao, CHEN Minghui, et al. Research Status of High-Strength Steel Metal-Cored Wires[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 19-31.

0 引言

粉芯焊丝是一种先进的复合焊接材料，其独特的结构设计显著提升了焊接工艺的灵活性与焊缝性能的精确调控能力。与传统的实心焊丝不同，粉芯焊丝通过在金属管内填充预先配比的金属粉末、合金元素、造渣剂、脱氧剂以及电弧稳定剂等混合物来实现优良的焊接性能[1]。粉芯焊丝的概念于20世纪50年代后期提出，最初旨于解决在大电流下实心焊丝飞溅严重及焊缝恶化等问题[2]。

粉芯焊丝具有成本较低、熔覆效率高、成分调控灵活及接头性能好等优点，现已广泛应用于造船、桥梁、压力容器等等领域。粉芯焊丝的药粉主要成分有造渣剂、合金元素、电弧稳定剂等，其中，造渣剂熔融后形成低熔点、高流动性的熔渣，这层熔渣不仅能有效隔绝空气，防止熔池污染，还能吸附硫、磷等有害杂质，改善焊缝成形[3]；脱氧剂则与熔池中的氧化物反应，有效抑制气孔和夹杂物的形成，提升焊缝的致密性；合金元素以细小颗粒形式直接熔入熔池，实现了高收得率和低烧损的精确合金化，显著增强了焊缝的强度、韧性、耐蚀性或低温冲击性能[4]；电弧稳定剂通过降低电弧电压波动、促进阴极斑点扩散，有效提高电弧挺度与再引弧能力，从而大幅减少焊接飞溅并改善焊缝波纹的均匀性[5]。

金属粉芯焊丝是粉芯焊丝的一种重要类型，其核心特点在于焊丝内部填充的主要是金属粉末而非传统粉芯焊丝中占比较大的造渣剂等非金属成分，这使其在焊接过程中展现更高的熔敷效率、优异的焊缝成形以及可控的合金化能力[6]。随着工业化进程的加速，船舶、桥梁和重型机械等领域对高熔敷率焊缝、良好焊接性能焊丝以及综合性能优良的接头性能需求日益增长，针对金属粉芯焊丝的研究主要集中于：通过添加脱氧剂（Al、Si、Mn等）、造渣剂（CaF_2、TiO_2、Al_2O_3等）以及多种合金元素（Ni、Cr、Mo等），开发出适用于低合金高强度钢等特殊材料的专用焊丝。

本文围绕金属粉芯焊丝的发展历程、电弧物理特性、粉芯成分对焊缝性能的影响及工程应用等方面进行综述，旨在为解决金属粉芯焊丝现存问题、进一步提升其技术及应用水平提供参考。全文研究框架如图1所示。

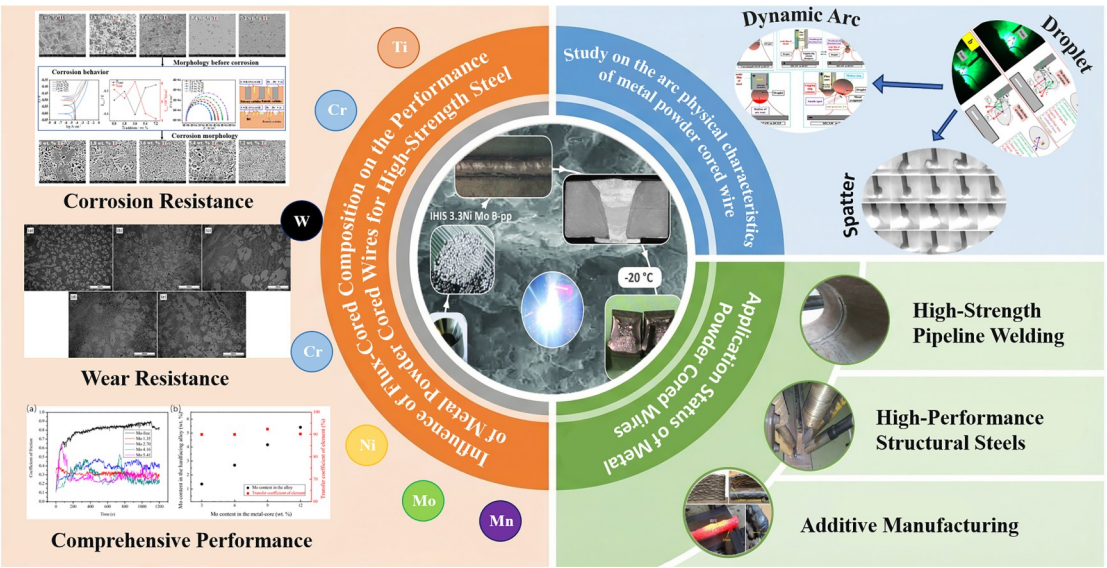

图1 高强钢金属粉芯焊丝成分调控、性能评价及工程应用研究框架

Fig. 1 Research framework of composition regulation, performance evaluation and engineering application of high-strength steel metal-cored wires

1　金属粉芯焊丝发展历程

1.1　实心焊丝

20世纪初期，电弧技术的兴起带动了实心焊丝的发展热潮。最初，实心焊丝主要由低碳钢制成，随后应用范围扩展至铝合金、镍基合金及铜合金等多种体系，以满足不同母材匹配和服役环境的需求[7]。实心焊丝不含药粉或造渣剂，其结构致密、成分均匀且导电性良好，主要用于制造涂覆焊条、气体保护焊和埋弧焊机械化焊接、电渣焊，以及钨极惰性气体保护的填充丝。其制备工艺为浇筑形成钢锭后经轧制、拉拔而成，合金成分需在熔炼阶段进行调控，以提高焊接工艺、冶金特性及接头性能[8]。由于其纯金属结构，实心焊丝在焊接时飞溅较小，焊缝成形美观，熔敷效率较高，但须配合外部保护气体（CO_2，Ar或Ar+CO_2混合气）使用，以防止熔池氧化[9]。

实心焊丝因其纯净性、稳定的电弧特性和高沉积速率，在传统焊接和新兴的线弧增材制造领域持续发挥着关键作用。然而，其合金成分调节困难，需要焊接时添加脱氧剂、脱硫剂、微合金化元素等额外材料，因此难以实现熔池成分的精准控制和组织细化；此外，实心焊丝对坡口清洁度、保护气体流量及焊接参数变化较为敏感，这也增加了工艺设计难度[10]。

1.2　粉芯焊丝

为了克服实心焊丝在合金成分调控和保护气体依赖性方面的局限性，粉芯焊丝因其成分调整灵活，焊接性能优良而受到广泛关注[11]。粉芯焊丝电弧焊（FCAW）最早发明于1926年，受限于当时的生产条件和物资供应，直至1950年前后才成功研发出第一代碳钢用气保护粉芯焊丝，并于1957年首次作为商品推向市场，但那时也存在焊丝直径较大（∅2.0~4.0 mm）的问题[2]。1972年，粉芯焊丝关键制造技术取得突破，适用于全位置的小直径粉芯焊丝（∅1.0 mm、∅1.2 mm、∅1.6 mm）相继问世，FCAW应用范围显著扩大[12]。1984年，粉芯焊丝发展进入成熟阶段，低氢型、超低氢碱性粉芯焊丝相继研发成功，焊缝金属低温冲击韧度达到高标准要求[13]。此后，国内外研究人员持续致力于研发新型粉芯焊丝的开发，但是传统的粉芯焊丝普遍存在焊后需要敲渣、焊接烟尘大及焊后强度偏低等技术难题[14]。

在粉芯焊丝的研究过程中，自保护粉芯焊丝逐渐成为重要方向。该类型焊丝无需外部气体保护即可完成焊接作业，这使其在传统气体保护焊难以施行的环境中具有独特优势。其自保护机制主要依赖于焊丝粉芯中特殊的造气剂、脱氧剂、脱氮剂和造渣剂，在电弧高温作用下，这些物质分解产生气体，形成致密的气体保护层；同时，粉芯中的造渣成分熔化形成液态熔渣，覆盖于熔池表面，提供物理隔离和额外的冶金保护，防止大气污染并有助于焊缝成形和净化熔池[15]。

1.3　金属粉芯焊丝

1997年，新型金属粉芯焊丝进入市场[16]，其结合了实心焊丝的高电流承载能力与粉芯焊丝在冶金调控方面的灵活性。自问世以来，金属粉芯焊丝已在各个工业领域中得到了广泛应用，成为埋弧焊和气体保护焊的有效替代品，且金属粉芯焊丝易与自动化和机器人焊接系统集成。与传统粉芯焊丝相比，金属粉芯焊丝在高强钢焊接中表现出更高的焊接效率、更少的烟尘飞溅、更简便的操作工艺及更优的焊缝性能[17-18]。

高强钢金属粉芯焊丝的主要特点在于突破了粉芯焊丝的传统设计，仅依靠保护气体-合金元素的协同作用便能实现对焊缝的有效保护[19-20]。这种不添加矿物造渣剂的设计使焊丝可填充更多的金属粉末，为焊丝成分的设计及调控提供了更大空间，从多个方面提升了焊接性能，如：熔敷速率显著提高，大幅提升了焊接效率；焊后无需清渣，简化了工序；在合理设计焊接参数后，可实现与实心焊丝相当的稳定电弧特征，有效减少飞溅[21]。与其他传统焊接方式相比，使用无渣自保护粉芯焊丝的发尘量和综合成本均较低，属于“环境友好”型的优质高效焊接材料[22]。因此，金属粉芯焊丝一直是国内外焊接材料领域的研究热点。

2　金属粉芯焊丝研究进展

2.1　金属粉芯焊丝物理特性的研究

金属粉芯焊丝由表面薄钢带包裹金属药粉后

进行卷绕、轧制、拉拔等多道工艺加工而成，由于粉芯中金属药粉占比高，一般为80%~90%，因此对焊接过程中电弧物理特性影响较大。相关研究主要集中在熔滴过渡形态特征、电弧稳定性及焊接飞溅等方面[23-24]。

金属粉芯焊丝的熔滴过渡类型包括大颗粒短路过渡、大颗粒排斥过渡、细颗粒过渡、射滴过渡[25-26]；飞溅类型主要包括短路爆炸飞溅、熔池飞溅、电弧力飞溅、熔滴爆炸飞溅、气泡放出型飞溅等[27]。熔滴过渡直接影响电弧稳定性、飞溅程度和焊缝成形质量等，其形态、过渡时间及熔滴温度等对金属与熔渣、气相间的冶金反应也有较大影响。研究认表明，通过改变熔滴的过渡特性可调控焊缝金属的结晶过程，影响热影响区的性能和尺寸，进而提高焊接效率[28-30]。

在工艺参数对熔滴过渡的影响方面，已有较多研究报道。张富巨等[31]研究了不同电流电压下高强钢金属粉芯焊丝的熔滴过渡行为和电弧形态，结果表明，150 A/20 V为短路过渡、195 A/25 V为大颗粒排斥过渡、235 A/27 V为细颗粒过渡、335 A/33 V时未出现喷射过渡，原因在于惰性保护气氛下喷射过渡难以发生。王皇等[32]采用高强钢金属粉芯焊丝Metalloy80Ni1分别在纯CO_2和高氩气（5%CO_2+95%Ar）两种保护气氛下进行试验，发现纯CO_2下以排斥过渡为主，伴有少量爆炸过渡和颗粒过渡，烟尘和飞溅较严重；而在高氩气保护环境下，熔滴过渡形态转变为单一的射滴过渡，电弧电压更为稳定。赵慧慧等[33]以30CrMnSiA高强钢金属粉芯焊丝为试验对象，结合高速摄影与电信号同步采集系统，研究了脉冲熔化极气体保护焊工艺方法下的熔滴过渡表现为非轴向小滴短路过渡的特征。

在飞溅行为方面，朱厚国等[34]研究了造渣剂含量对507Mo型粉芯焊丝飞溅性能的影响，结果表明适量添加金红石、硅灰石等成分可有效改善焊丝的飞溅性能。Ma等[35]研究了不同焊接热输入下新型金属粉芯焊丝焊接Q235钢时的熔滴过渡形态。如图2所示，随着热输入增加，低于24 V的焊接电压比例下降，电压和电流的标准差减小，焊接过程趋于稳定。

电弧形状受焊接热输入和保护气体等多种因素影响，通常呈现不规则的“钟罩状”或“锥状”结构[36]。通过对比焊接过程中的焊接电压、电流波形信号，可判断焊接效果并调控焊丝成分[33,35]。杨祥海[37]在管道焊接中采用高强钢金属粉芯焊丝Metalloy71作为焊接材料，选用85%Ar+15%CO_2保护气时获得了柔软且稳定的电弧。郭俊杰等[38]利用焊接烟尘收集装置、荧光分析仪等对自主研制的金属粉芯焊丝的烟尘成分和金属粉粒径对焊接烟尘量以及电弧稳定性的影响进行研究，发现金属粉粒径在120~150 μm时，焊接烟尘量最小，电流电压标准偏差最小，电弧稳定性最好。Ma等[35]的对比研究表明，在相同热输入（19.5 kJ/cm）条件下，金属粉芯焊丝较ER50-6实心焊丝电弧更集中、飞溅更少、焊接过程更稳定。

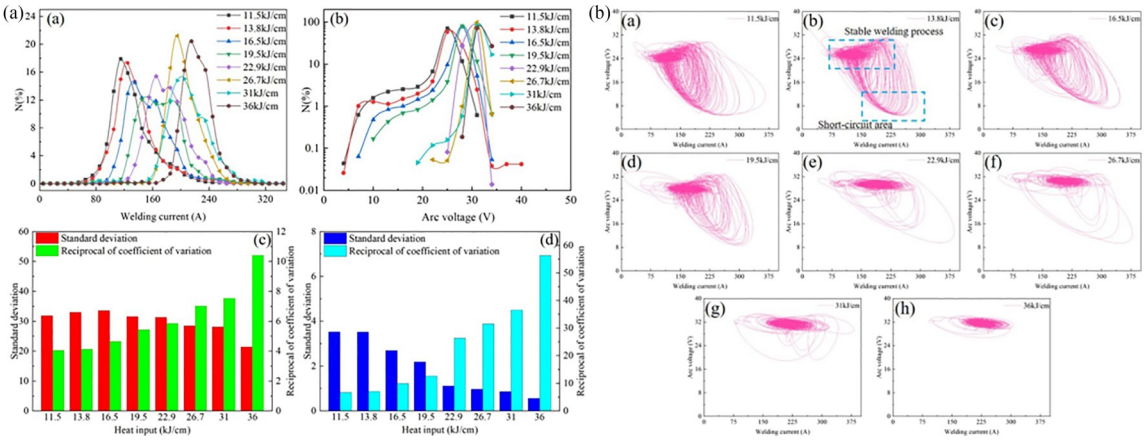

图2 不同热输入下的电压和电流：(a)电流和电压的概率分布以及标准差；(b)电流电压的环形图[35]

Fig. 2 Voltage and current under different thermal inputs: (a) probability distribution and standard deviation of current and voltage; (b) circular diagram of current and voltage[35]

2.2　粉芯成分对高强钢金属粉芯焊丝性能的影响

高强钢金属粉芯焊丝合金成分过渡系数高，通过在粉芯中添加多种合金元素（Mn、Ni、Mo、Cr等），可实现对焊缝金属成分的精确调控，从而改善焊缝的综合性能[39]。

2.2.1　综合性能

刘政军等[40-41]以Mn-Mo-Cr-Ni为高强钢金属粉芯焊丝主要合金体系，以Ti、B、Nb和Al为微合金元素，研究了熔化极气体保护焊下熔敷金属的综合性能。结果表明，Ni含量在0.81%~1.22%，Mo加入量为1.52%时，熔敷金属抗拉强度约为952.24 MPa，-20 ℃低温冲击吸收功约为70 J。Liu等[4]研究了Mo元素对金属粉芯焊丝堆焊合金磨损性能的影响，如图3所示，Mo的添加可显著降低摩擦系数，提升堆焊合金耐磨性，且通过调整Mo含量可调控其过渡系数。

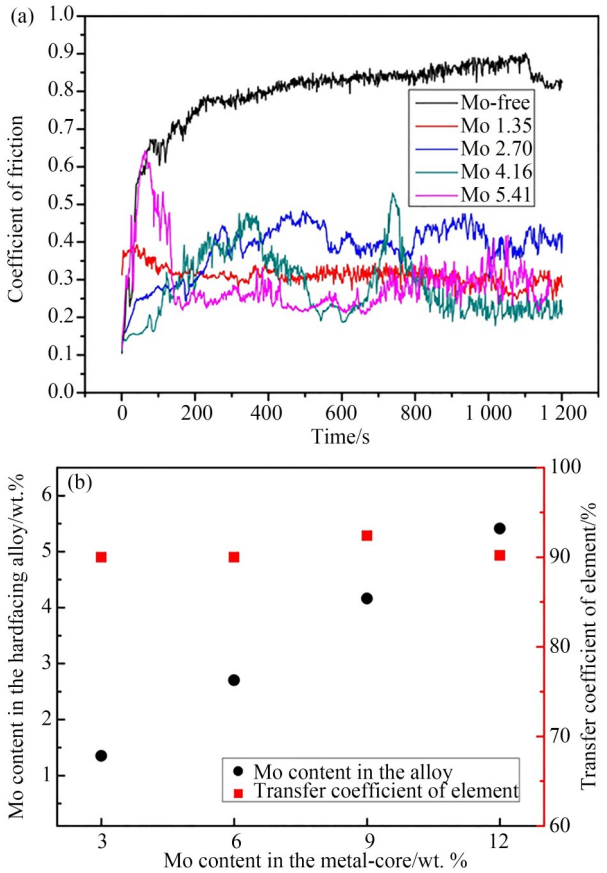

图3　不同Mo含量的金属粉芯焊丝组织性能：(a)熔敷金属摩擦系数；(b)Mo传递系数[4]

Fig. 3　Microstructure and properties of metal-cored wires with different Mo contents: (a) coefficient of friction of the deposited metal; (b) Mo transfer coefficient[4]

Ni、Cr元素对熔敷金属性能的影响规律也得了系统研究。薛飞飞等[42]通过向高强钢金属粉芯焊丝中添加不同含量的Ni、Cr，发现Ni对提升熔敷金属抗拉强度的贡献有限，而Cr能够显著提高强度，但是过量Cr会导致韧性下降。在焊丝中Ni约为2.90%、Cr约为0.45%时，熔敷金属以条状贝氏体为主，强度高、塑韧性好，综合力学性能最佳。孟庆润等[43]研制了一种以Mn-Si-Mo-Ni为合金体系的高强钢金属粉芯焊丝E76C-K3，通过调控Mn/Si质量比及Ni，Cr含量，获得了适量针状铁素体组织与熔敷金属力学性能最佳配比的元素配比。Florian Pixner等[44]在铬马氏体热作钢的电弧增材制造中发现，在焊丝中添加微量Ni可减少熔敷金属中多边形δ铁素体的相分数并细化微观组织。

在Cu元素的作用方面，Wang等[45]研究了不同Cu含量的金属粉芯焊丝对熔敷金属微观组织和力学性能的影响。如图4所示，熔敷金属的显微组织呈现具有各向异性的板条结构（见图4a~4d），当Cu含量为1.79%时，高角度晶界面积分数最大，板条结构细化程度最高，有利于减少裂纹形核位置并改善裂纹扩展路径，从而提高韧性。

夹杂物对组织细化的作用同样受到关注。Zhu等[46]采用熔化极惰性气体保护焊对自主研发的Q960高强度钢实心焊丝进行不同热输入条件下的焊接试验，发现粉芯焊丝中所含Mn、Si、Ti元素形成的氧化物以及Mn元素形成的硫化物可促进针状铁素体形核，有效改善材料韧性，如图5所示。

2.2.2　耐磨及耐腐蚀性

（1）耐磨性能。W元素作为一种类似于Cr的强碳化物形成元素，具有优异的耐高温摩擦磨损性能。Liu等[47]采用不同W含量的金属粉芯焊丝制备铁基堆焊合金，发现W的加入可增大初生六方$M_7(C,B)_3$碳化物尺寸、促进马氏体形成并改变共晶碳化物形貌，其中W含量为9 wt.%时硬度最高、磨损损失最小。马朝等[48]研制了适用于碳钢表面高铬耐磨层的药芯焊丝，结果表明当C含量为3.7~4.3 wt.%，Cr含量为20~25 wt.%时，碳化物含量不低于42.2%，堆焊表层耐磨性良好。Xu等[49]研究了Ti含量对Fe-Cr-C焊丝沉积耐磨性的影响，Ti主要以

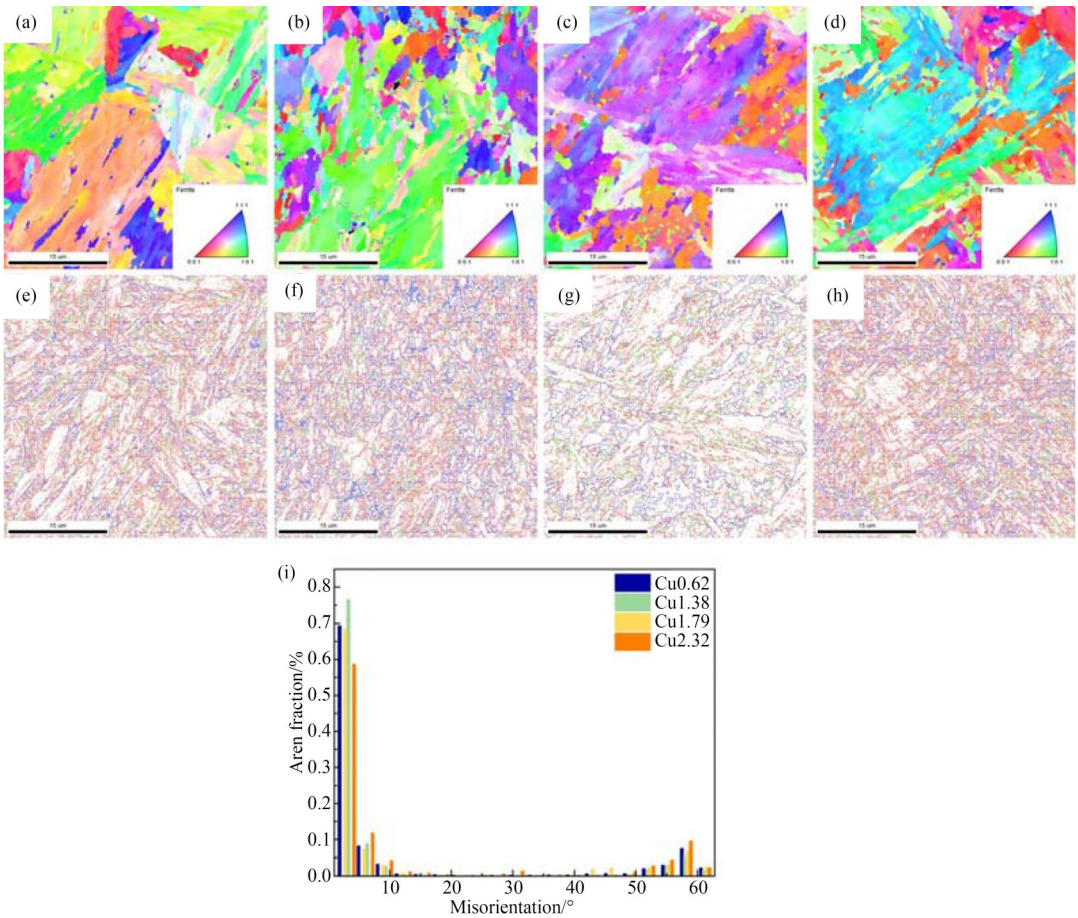

图4　EBSD反极图：(a-d)取向差角分布图；(e-h)熔敷金属的取向差角度数及面积分数；(i)各图对应铜含量；(a,e)Cu 0.62；(b,f)Cu 1.38；(c,g)Cu 1.79；(d,h)Cu 2.32[45]

Fig. 4　EBSD IPF maps：(a-d)misorientation angle maps；(e-h)and area fraction of misorientation degree；(i)of deposited metals；(a,e)Cu 0.62；(b,f)Cu 1.38；(c,g)Cu 1.79；(d,h)Cu 2.32[45]

TiN形式分散于沉积合金的基体中，当Ti加入量为4 wt.%时，合金硬度和耐磨度达到峰值。

（2）耐腐蚀及耐高温性能。堆焊构件常服役于高温、酸碱性等恶劣环境，高强钢金属粉芯焊丝熔敷层的耐高温性能及耐腐蚀性能因此受到广泛关注。王康等[50]选用E308LT1-1不锈钢药芯焊丝焊接A204 304L不锈钢板，研究表明通过改善工艺措施可获得耐腐蚀性良好的焊接接头。王立志等[51]研制的新型耐高温不锈钢JW309HN药芯焊丝，经750 ℃×1.5 h热处理后仍保持良好的力学性能，高温下塑韧性损失较小。

在Ti元素对耐蚀性的影响方面，Liu等[52]采用不同Ti含量的高强钢金属粉芯焊丝在低碳钢板上进行多层堆焊，在3.5 wt.% NaCl溶液中探究了Ti对堆焊层耐蚀性的影响规律。如图6所示，当Ti添加量为3.6 wt.%时，近共晶结构增加了电化学腐蚀反应界面，腐蚀速率提高，耐蚀性降低；当Ti增加至7.2 wt.%时，基体中碳化物含量和Cr含量增加，堆焊组织中碳化物保持完整，堆焊层耐蚀性显著增强。

3　金属粉芯焊丝应用情况

随着工程应用焊接构件的服役环境愈发苛刻复杂，普通焊材难以满足现代制造业发展对焊缝性能和生产效率的综合要求。高强钢金属粉芯焊丝凭借熔敷效率高、焊缝成形美观、工艺性能好等优势，可根据实际工况需求调整粉芯添加物的种类和比例，生产出适合平焊、平角焊、立焊、仰焊或全位置焊等适应不同结构和不同位置，在国防和民用制造业中得到了广泛应用[53-56]。

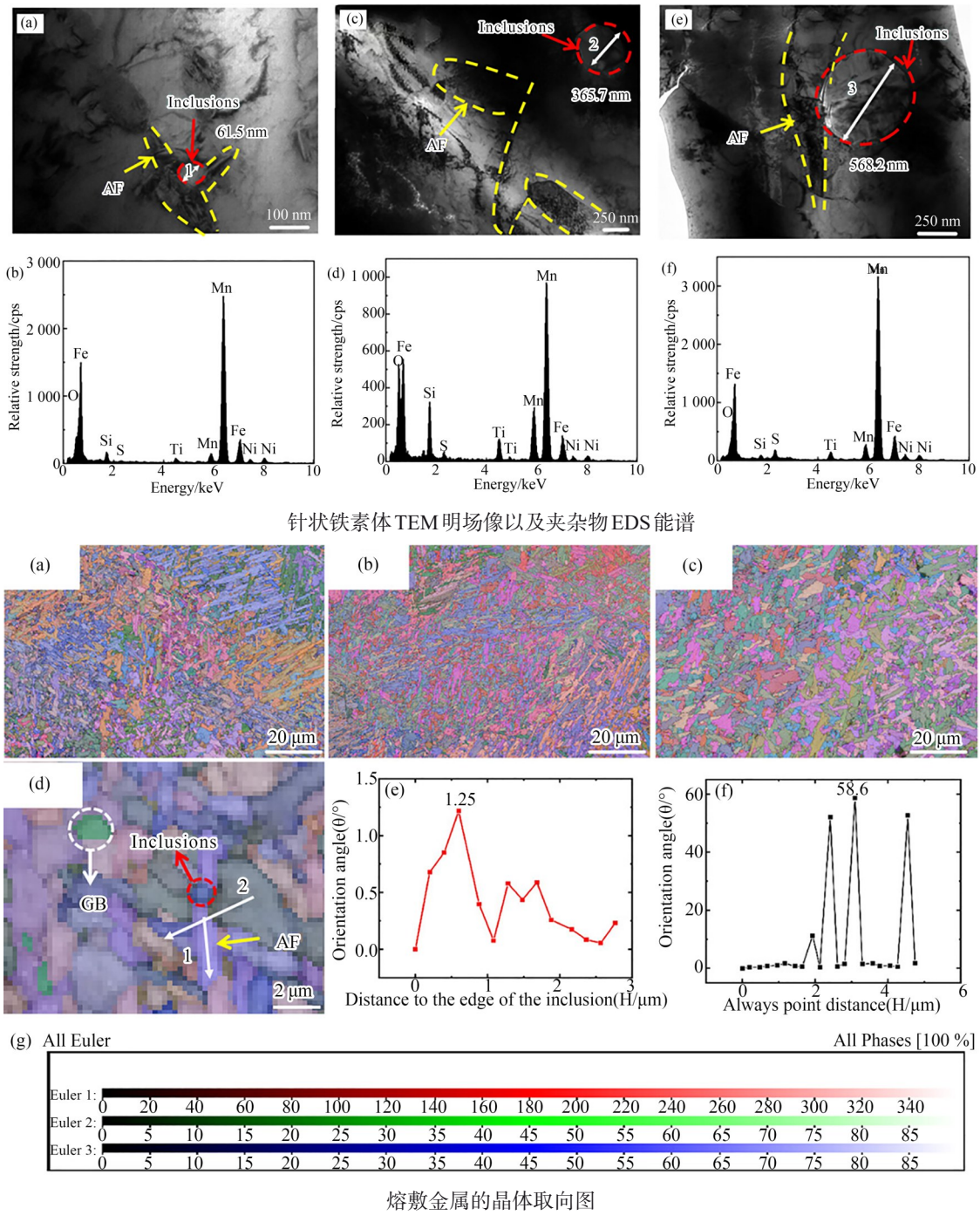

图5　不同焊接热输入条件下熔敷金属的相图以及晶体取向图[46]

Fig. 5　Phase diagrams and crystal orientation maps of deposited metal under different welding heat input conditions[46]

3.1　高强度管道焊接

高强钢金属粉芯焊丝可通过选择不同的合金元素和焊丝规格，满足石油、化工、天然气、给排水等领域不同管道材料和工况的要求。

在管道全位置根焊方面，多项研究验证了金属粉芯焊丝的适用性。黄军平等[57]采用郝伯特公司高强钢金属粉芯焊丝Metalloy71（E70C-6MH4）配合RMD（精确短路控制）技术进行长输管道全位置根焊，焊接过程熔池稳定，根部形成高质量熔深，两侧熔合良好，成功实现了管道全位置根部半自动焊接。朱洪亮等[58]采用郝伯特公司高强钢金属粉芯焊丝Metalloy80N1配合RMD搭配全自动打底+Pro

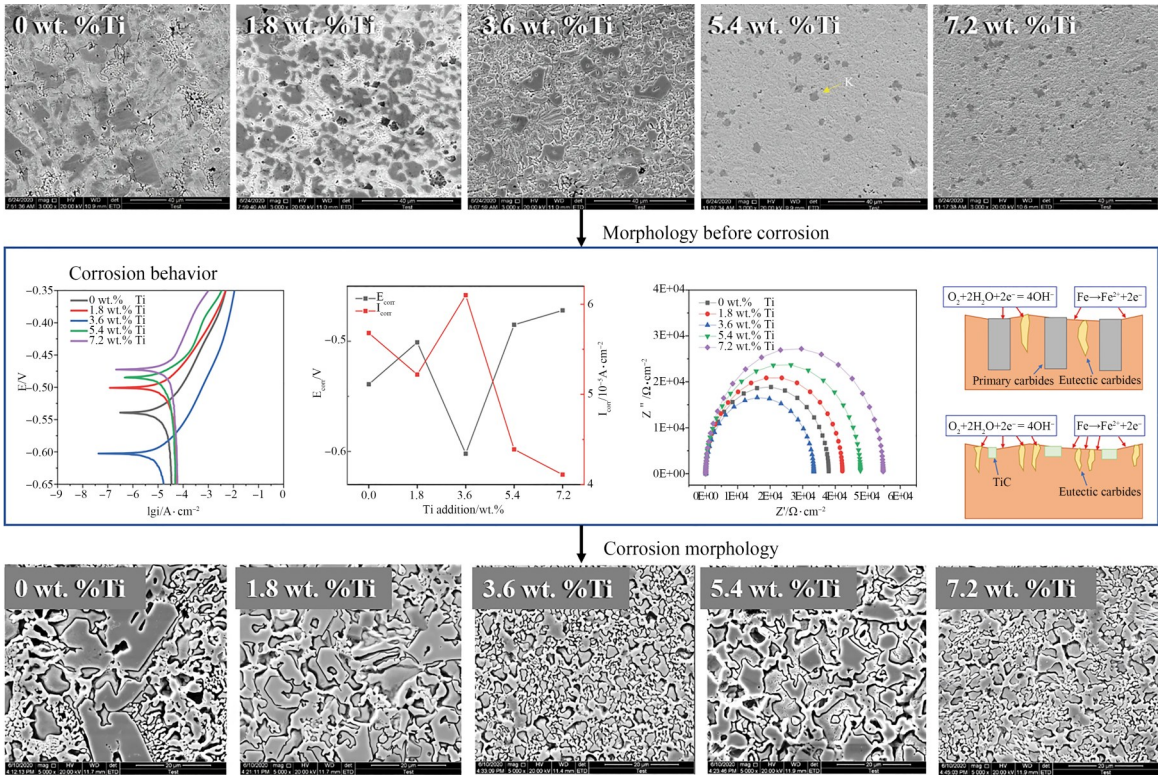

图6 Ti添加量对金属粉芯焊丝熔敷金属耐蚀性影响[52]

Fig. 6 Effect of Ti content on the corrosion resistance of deposited metal from metal-cored wire[52]

Pulse全自动填盖技术对西二线管道进行焊接，RT检测（射线检验）一次合格率达92.33%。罗晓军等[59]采用大西洋不锈钢金属粉芯焊丝E70C-6M-H4进行工业压力管道RMD气保护根焊，焊后获得较大熔深并保证了焊缝背面成形，力学性能满足标准要求。苏衍福等[60]采用不锈钢金属粉芯焊丝GCL-70M进行API5LX65MOS高频直缝电阻焊钢管封底焊，焊缝成形美观，硬度、抗裂性、低温冲击韧度等各项性能良好，可替换神钢LB-52U手工封底焊条，实现了API5LX65MOS钢管封底焊材国产化。

在大口径管道焊接方向，Qi等[61]针对X80管线钢的高强度、高韧性焊接需求，采用直径1.2 mm的高强钢金属粉芯焊丝E81T8Ni2进行全位置根焊，直径2.0 mm的金属粉芯焊丝E81T8进行填充和盖面，焊接构件性能符合APIRP5L标准要求。杨祥海等[37]采用高强钢金属粉芯焊丝METALLOY80N1对西气东输X80管线钢进行了焊接工艺试验，接头力学性能达到实际应用标准。

3.2 高性能结构钢焊接

高强度钢在船舶制造、建筑结构、汽车制造、高压容器制造、桥梁和大型机械设备中应用广泛。金属粉芯焊丝因成分可灵活调整[62]，适用于高强度钢焊接中对焊缝强度和韧性要求较高的场景。

刘秋亮[63]采用金属粉型埋弧焊粉芯焊丝进行某造船企业T排流水线的高速双面填角焊接，解决了海上风塔产品海工用钢焊丝匹配的技术难题，满足了-60 ℃低温冲击韧性的特殊要求。在民用建筑领域，张迪等[64]针对建筑高性能结构钢Q460GJC的焊接要求，研究了适合机器人焊接的金属粉芯焊丝T554T15-1M21AN2UH5，该焊丝送丝稳定、焊后无需清理，熔敷金属抗拉强度为650 MPa，屈服强度535 MPa，延伸率25%，在-60~20 ℃温度范围内冲击功大于150 J。Yu等[53]通过调控金属粉芯焊丝C、Si和Mn含量，最大限度地减少了热浸镀锌钢搭接结构冷态转移焊接中的焊缝气孔和凹点，提高了汽车底盘部件的耐蚀性。马自强等[65]选用LINCOLN公司金属粉芯焊丝E71T-1，在富氩气体保护焊下钻头组装焊接的应用，在焊接电流340~370 A、电弧电压28~32 V、气流量18 L/min，Ar配比70%的条件下，焊缝成形良好，表面无气孔，飞溅和烟雾较小。

3.3　增材制造

金属粉芯焊丝在增材制造修复和整体成形中均有应用。与金属粉末增材制造相比，金属粉芯焊丝增材制造兼具粉末增材成分可调的优点和丝材增材效率高的优势，同时克服了粉末增材成本较高、丝材增材成形质量欠佳的不足[68-69]。

在增材修复方面，曹成铭等[70]设计了C-Cr-Mo系金属粉芯型耐磨堆焊粉芯焊丝，用于煤矿刮板输送机中部槽磨损件的堆焊修复，通过调整Si、Mn、Cr等合金元素含量与配比，使其在NM400高强度耐磨钢上堆焊时具有良好的焊接性，堆焊多层无裂纹，平均硬度达56.8 HRC，为原耐磨钢板硬度的1.3倍。许立宝等[71]针对钢厂冷轧工作辊表面易剥落、磨损，堆焊修复性能不佳等难题，研发了一种高硬高韧的多元合金元素强化的堆焊粉芯焊丝，可实现多位置堆焊，满足冷轧辊现场修复工况。Ivanov等[72]使用含碳化硼/金属粉末反应混合物的金属粉芯焊丝，通过FCAW原位合成含有难熔硼化物和碳化物及其固溶体的微观结构，提高了耐磨性，应用于固体燃料压块生产设备中螺旋钻头修复。

在整体增材制造方面，Zhai等[55]使用Böhler焊接集团开发的金属粉芯焊丝T894ZMn2NiCrMoMM 211H5进行了低合金高强度钢大型部件的电弧增材制造，通过调节道次温度控制晶粒尺寸，获得了力学性能优异的多层多道堆焊层，如图7所示。Lin等[73]针对重载航空航天部件的严苛服役环境，研发

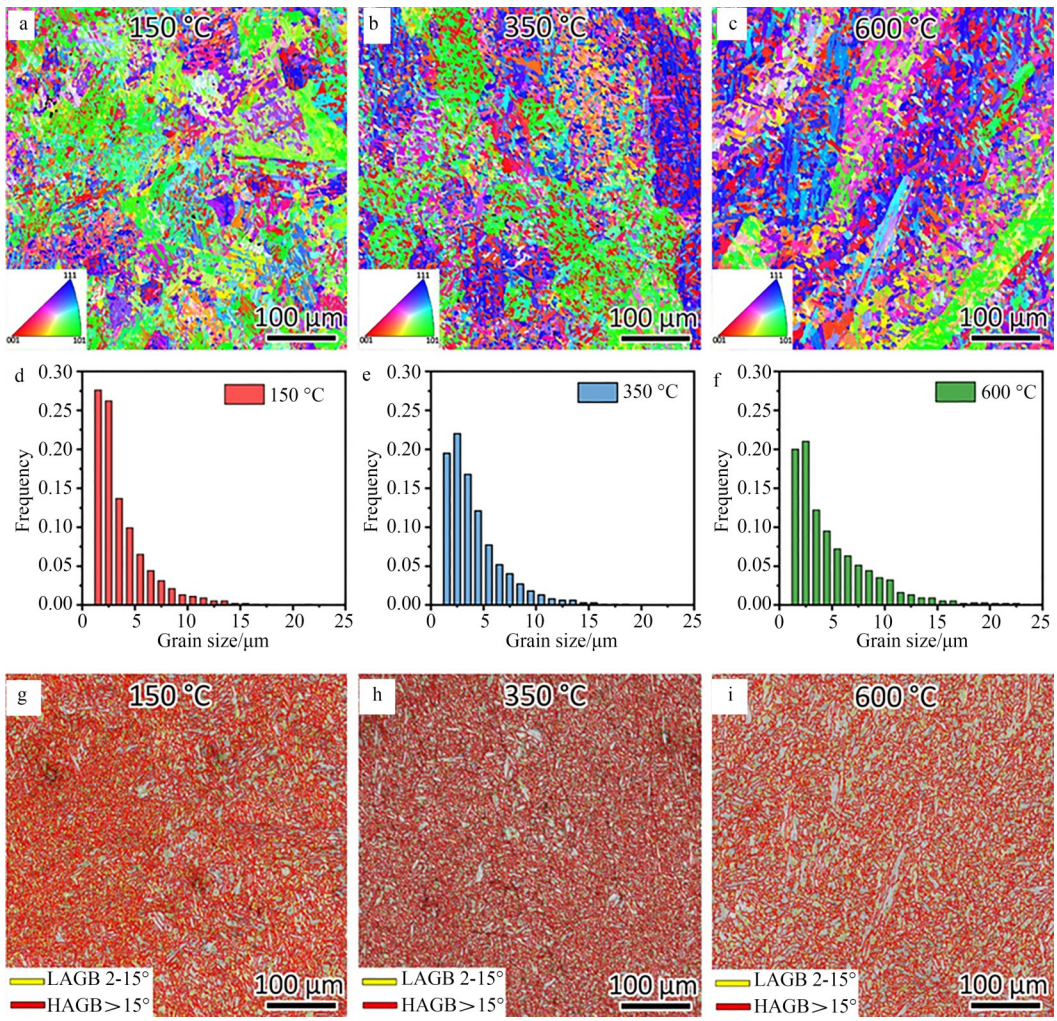

图7　不同层间温度下WAAM沉积材料的EBSD结果：(a,d,g)150 ℃；(b,e,h)350 ℃；(c,f,i)600 ℃；(a-c)取向图；(d-f)粒度分布；(g-i)晶界图[55]

Fig. 7　EBSD results of WAAM-deposited materials at different interlayer temperatures：(a,d,g)150 ℃；(b,e,h)350 ℃；(c,f,i)600 ℃；(a-c)IPF maps；(d-f)grain size distribution；(g-i)grain boundary maps[55]

了一种用于线弧增材制造(WAAM)的金属粉芯焊丝,其堆焊沉积壁具有良好的结构完整性和沉积力学性能。

4 结论

(1)金属粉芯焊丝的电弧物理特性受保护气体种类和焊接工艺参数的共同影响。高氩比例保护气(如95%Ar+5%CO_2)有利于实现稳定的射滴过渡,而纯CO_2气氛下以排斥过渡为主且飞溅较大。焊接热输入的增加可改善电弧稳定性,降低电压和电流波动。金属粉粒径在120~150 μm范围内时电弧稳定性最优。

(2)高强钢金属粉芯焊丝可通过对其内部金属粉末填充物的成分配比及焊接工艺参数进行可控调整,能够显著改善电弧稳定性、热输入分布及熔滴过渡行为。这种对电弧物理特性的优化,使得焊接熔池的形态、流动与凝固过程更易于控制,大幅降低气孔、裂纹、未熔合等缺陷的产生倾向,全面提升焊缝的物理性能。

(3)作为一种先进的焊接材料,其发展趋势紧密围绕提升焊接性能、拓展应用范围以及融入智能化制造体系展开。高强钢金属粉芯焊丝具有出色的工艺适应性,适用于多种结构和复杂工况下的焊接需求,展现出广阔的应用前景。随着智能制造和工业的快速发展,金属粉末选用、焊丝配方研制与质量控制技术将趋向精确化和智能化,焊接方法与工艺将趋于多维化和复合化,金属粉芯焊丝与机器人自动控制、计算机软件等技术的结合亦必将更加紧密,从而实现高效、精确和可靠焊接,推动高强钢金属粉芯焊丝整体技术持续向前发展。

参考文献:

[1] Liu Q, Mi H, Feng L, et al. A critical overview of welding and directed energy deposition with flux-cored wires[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 142:231-268.

[2] 丁春. 国内外粉芯焊丝电弧焊发展概况[J]. 现代制造工程,1993(11):1-3.
DING C. Development Overview of Flux-Cored Wire Arc Welding at Home and Abroad[J]. Modern Manufacturing Engineering,1993(11):1-3.

[3] Coetsee T, De Bruin F. Modification of flux oxygen behaviour via Co-Cr-Al unconstrained metal powder additions in submerged arc welding: gas phase thermodynamics and 3D slag SEM evidence[J]. Processes, 2022,10(11):2452.

[4] Liu D, Wang J, Zhang Y, et al. Effect of Mo on microstructure and wear resistance of slag-free self-shielded metal-cored welding overlay[J]. Journal of Materials Processing Technology,2019,270:82-91.

[5] 徐文彦,吴彪,王洪福,等. 粉芯焊丝组分及合金化调控研究现状及进展[J]. 焊接技术,2024,53(11):8-16.
XU W Y, WU B, WANG H F, et al. Research Status and Progress in Composition and Alloying Control of Flux-Cored Wires[J]. Welding Technology, 2024, 53(11):8-16.

[6] 刘奔,徐勤官,王先锋. 金属粉芯型药芯焊丝开发与应用现状[J]. 金属加工(热加工),2020(3):28-29.
LIU B, XU Q G, WANG X F. Development and application status of metal-cored flux-cored wire[J]. MW Metal Forming,2020(3):28-29.

[7] Yi H, Jia L, Ding J, et al. Achieving material diversity in wire arc additive manufacturing: leaping from alloys to composites via wire innovation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 194: 104103.

[8] Pokhodnya I K. Welding materials: Current state and development tendencies[J]. Welding international, 2003, 17(11):905-917.

[9] Harati E, Jose B, Igestrand M. Wire arc additive manufacturing using high-strength steel tubular and solid wires[J]. Welding international, 2024, 38(5):329-334.

[10] Bogdan-Dorel C, Virginia S A, George C V, et al. Analysis of electric flux arc welding parameters influence using visual X-ray inspection[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 78:214-220.

[11] ŚWIERCZYŃSKA A, VARBAI B, PANDEY C, et al. Exploring the trends in flux-cored arc welding: scientometric analysis approach[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130: 87-110.

[12] 陈裕川. 粉芯焊丝和金属粉芯焊丝电弧焊的新发展(一)[J]. 现代焊接,2015(9):7.
CHEN Y C. Recent Developments in Flux-Cored and Metal-Cored Wire Arc Welding (Part 1)[J]. Modern Welding, 2015(9):7.

[13] 杨建东，刘宝田. 我国粉芯焊丝技术的发展现状与趋势(下)[J]. 金属加工(热加工)，2010(6)：4–6.
YANG J D，LIU B T. Development Status and Trends of Flux–Cored Wire Technology in China (Part 2)[J]. MW Metal Forming，2010(6)：4–6.

[14] Yamane K. Low fume types of welding materials improve the welding environment[J]. Welding International，2007，21(5)：337–346.

[15] Akay A，Güven F. A comparative study on the effects of different fillers on mechanical properties in welding of S355NL via FCAW–S and GMAW processes[J]. Forschung im Ingenieurwesen，2025，89(1)：1–10.

[16] 宋平安. 伯乐金属粉芯粉芯焊丝—更高效、更经济的粉芯焊丝[J]. 金属加工(热加工)，2007(8)：45–47.
SONG P A. Bole Metal–Cored Flux–Cored Wire：A More Efficient and Cost–Effective Solution[J]. MW Metal Forming，2007(8)：45–47.

[17] Krishnan S，Kulkarni D V，De A. Pulsed current gas metal arc welding of P91 steels using metal cored wires [J]. Journal of Materials Processing Technology，2016，229：826–833.

[18] 何冠宇. 采用金属粉芯焊丝的GMAW电弧与熔滴行为检测与分析[J]. 山东工业技术，2018(18)：8.
HE G Y. Inspection and Analysis of Arc and Droplet Behavior in GMAW Using Metal–Cored Wires[J]. Shandong Industrial Technology，2018(18)：1.

[19] Liu D S，Wei P. Properties of silicon–added，iron–based，slag–free，self–shielded flux–cored wire[J]. Welding Journal，2015，94：351–357.

[20] 刘大双，刘仁培，魏艳红，等. 堆焊用无渣自保护药芯焊丝的耐磨性与环保性[J]. 焊接，2013(2)：33–36.
LIU D S，LIU R P，WEI Y H，et al. Wear resistance and environmental protection of slag–free self–shielded flux–cored wire for hardfacing[J]. Welding & Joining，2013(2)：33–36.

[21] Golyakevich A A，Orlov L N，Maksymov S. Mechanized welding with metal cored wire[J]. Advanced Materials Research，2020，1157：113–122.

[22] Metlitskii V A. Flux–cored wires for arc welding and surfacing of cast iron[J]. Welding International，2008，22(11)：796–800.

[23] 刘大双，魏艳红，刘仁培. 无渣自保护粉芯焊丝的“渣溅”行为[J]. 焊接学报，2015，36(5)：10–12.
LIU D S，WEI Y H，LIU R P. “Slag Spatter” Behavior of Slag–Free Self–Shielded Flux–Cored Wires[J]. Transactions of the China Welding Institution，2015，36(05)：10–12.

[24] 刘大双. 耐磨堆焊用无渣自保护粉芯焊丝及其冶金行为研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2013.
LIU D S. Slag–free Self–shielded Flux–cored Wire for Wear–resistant Hardfacing and Its Matellurgical Behaviour[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2013.

[25] 李辉. 金属粉芯型粉芯焊丝电弧物理特性试验研究[D]. 太原：太原理工大学，2015.
LI H. Study on Physical Characters of Arc of Metal Powder Flux–cored Wire[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2015.

[26] Zhang H，Shi Y，Gu Y，et al. Effects of electrode polarity on the droplet transfer mode in self–shielded flux–cored arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes，2020，58：478–488.

[27] Liu H Y，Li Z X，Li H，et al. Study on metal transfer modes and welding spatter characteristics of self–shielded flux cored wire[J]. Science and Technology of Welding and Joining，2008，13(8)：777–780.

[28] Liu D S，Wei Y H，Liu R P. Microstructure and wear mechanism change by Nb added in slag free self–shielded flux cored wire[J]. Science and Technology of Welding and Joining，2015，20(8)：693–701.

[29] Liu D S，Wei P，Long W M，et al. Narrow gap space contributes to chemical metallurgy of self–shielded arc welding[J]. China Welding，2022，30(3)：12–19.

[30] Liu D S，Long W M，Zhou W，et al. Slag–free mechanism，microstructure evolution，and wear resistance of self–shielded metal–cored wire a type of Fe–Cr–CB–Mn iron–based，slag–free，self–shielded metal–cored wire was established[J]. Welding Journal，2021，100(8)：259–268.

[31] 张富巨，王燕，张晓昱. 粉芯焊丝电弧焊电弧形态与熔滴过渡行为的研究[J]. 焊接技术，2004，33(4)：11–13.
ZHANG F J，WANG Y，ZHANG X Y. Study on Arc Morphology and Droplet Transfer Behavior in Flux–Cored Wire Arc Welding[J]. Welding Technology，2004，33(4)：11–13.

[32] 王皇，刘海云，王宝，等. 金属粉芯型粉芯焊丝熔滴过渡及飞溅观察分析[J]. 焊接学报，2012，33(10)：83–86.
WANG H，LIU H Y，WANG B，et al. Observation and Analysis of Droplet Transfer and Spatter in Metal–Cored Flux–Cored Wires[J]. Transactions of the China

Welding Institution,2012,33(10):83-86.

[33] 赵慧慧,高旭,王贯盈,等.30CrMnSiA金属粉芯型粉芯焊丝熔滴过渡分析与电弧增材研究[J].河北科技大学学报,2021,42(5):508-515.
ZHAO H H, GAO X, WANG G Y, et al. Research on droplet transfer and wire arc additive manufacturingof 30CrMnSiA metal powder-cored welding wire [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2021,42(5):508-515.

[34] 朱厚国,陈波,吉荣亮,等.造渣剂组分对507Mo型粉芯焊丝脱渣及飞溅性能的影响[J].电焊机,2023,53(11):119-123.
ZHU H G, CHEN B, JI R L, et al. Effect of Slagging Agent Components on Deslagging and Welding Spatter of 507Mo Flux Cored Wire[J]. Electric Welding Machine,2023,53(11):119-123.

[35] MA Q, SHI Y, PAN Z, et al. Development of a high-performance metal-cored welding wire: achieving process stability and enhanced joint reliability for low-carbon steel welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2026,35:15406-15420.

[36] 徐向方,苗玉刚,韩端锋,等.旁路分流双面电弧焊耦合电弧形态及电弧压力测量[J].焊接学报,2014,35(7):101-104.
XU X F, MIAO Y G, HAN D F, et al. Measurement of coupled arc morphology and arc pressure in bypass-shunting double-sided arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution,2014,35(7):101-104.

[37] 杨祥海.金属粉芯粉芯焊丝管道全自动焊接工艺研究[J].电焊机,2009,39(5):135-138.
YANG X H. Study on metal-cored wire in pipeline automatic welding process[J]. Electric Welding Machine, 2009,39(5):135-138.

[38] 郭俊杰,栗卓新,李国栋,等.金属芯粉芯焊丝中药粉粒径对发尘量和电弧稳定性的影响[J].机械工程材料,2010,34(10):23-24.
GUO J J, LI Z X, LI G D, et al. Effect of Powder Particle Size in Metal Cored Flux-Cored Wire on Quantity of Welding Fume and Arc Stability[J]. Materials for Mechanical Engineering,2010,34(10):23-24.

[39] 洪波,张明华,尹付成.高强韧轨道交通用钢药芯焊丝的力学性能及组织分析[J].焊接学报,2017,38(4):67-71.
HONG B, ZHANG M H, YIN F C. Mechanical properties and microstructure analysis of flux-cored wire for high-strength and high-toughness rail transit steel[J]. Transactions of the China Welding Institution,2017,38(4):67-71.

[40] 刘政军,裘荣鹏,武丹,等.微合金元素镍和铌对金属粉芯焊丝焊接接头性能的影响[J].焊接,2017(8):1-6.
LIU Z J, QIU R P, WU D, et al. Effect of micro-alloying nickel and niobium elements on mechanical properties of welded joints with metal-cored wires[J]. Welding & Joining,2017(8):1-6.

[41] 刘政军,裘荣鹏,武丹,等.合金元素Ni和Mo对高强钢金属粉芯型粉芯焊丝焊接接头力学性能的影响[J].热加工工艺,2017(19):59-62.
LIU Z J, QIU R P, WU D, et al. Effect of Alloying Elements Ni and Mo on Mechanical Properties of Metal Powder Flux Cored Wire Welding Joint of High Strength Steel [J]. Hot Working Technology, 2017(19):59-62.

[42] 薛飞飞,张英乔,孟庆润,等.镍、铬对高强钢金属粉型药芯焊丝熔敷金属组织与性能的影响[J].电焊机,2014,44(5):89-93.
XUE F F, ZHANG Y Q, MENG Q R, et al. Effect of Ni and Cr on the microstructure and properties of deposited metal with metal-cored wire of high-strength steel [J]. Electric Welding Machine,2014,44(5):89-93.

[43] 孟庆润,吕奎清,包润新.高强钢用金属粉芯粉芯焊丝E70C-K3的研制[J].焊接技术,2016,45(1):72-73.
MENG Q R, LV K G, BAO R X. Development of E70C-K3 Metal-Cored Flux-Cored Wire for High-Strength Steel[J]. Welding Technology,2016,45(1):72-73.

[44] Pixner F, Buzolin R, Zelić A, et al. Tailoring the alloy composition for wire arc additive manufacturing utilizing metal-cored wires in the cold metal transfer process [J]. Materials & Design,2022,215:110453.

[45] Wang J, Li C, Di X, et al. Effect of Cu content on microstructure and mechanical properties for high-strength deposited metals strengthened by nano-precipitation[J]. Metals,2022,12(8):1360.

[46] ZHU Z Y, MIN L, XIAO B Z, et al. Effect of heat input on the metal microstructure and mechanical properties of Q960 high-strength steel solid core welding wire [J]. Steel Research International, 2024, 95 (8): 2400060.

[46] Liu D S, Liu R P, Wei Y H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfac-

ing alloy[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(3):316-322.

[48] 马朝,李蕾蕾,史可,等. 堆焊制备碳钢-高铬耐磨双金属板用药芯焊丝的研制[J]. 当代化工研究,2025(02):182-184.
MA C, LI L L, Shi K, et al. Preparation of Cored Wire for Carbon Steel-high Chromium Wear Resistant Bimetallic Plate by Surfacing [J]. Modern Chemical Research, 2025(02):182-184.

[49] XU C, SONG X M, FAN X Z, et al. The effect of Ti content on the wear resistance of Fe-Cr-C flux-cored welding wire[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026, 35:2783-2792.

[50] 王康,刘宝双,陈立虎,等. 不锈钢药芯焊丝气保焊接头晶间腐蚀性能的研究[J]. 焊接技术,2025,54(3):31-34.
WANG K, LIU B S, CHEN L H, et al. Study on Intergranular Corrosion Performance of Gas Shielded Welded Joints with Stainless Steel Flux-Cored Wire [J]. Welding Technology, 2025, 54(3):31-34.

[51] 王立志,曲维春,王磊,等. 新型耐高温不锈钢药芯焊丝 JW309HN 性能研究[J]. 电焊机,2022,52(10):31-36.
WANG L Z, QU W C, WANG L, et al. Study on the Properties of New High Temperature Resistant Stainless Steel Flux-Cored Welding Wire JW309HN [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10):31-36.

[52] Liu D S, Wu Y C, Long W M, et al. Effect of titanium addition on the neutral corrosion resistance of welding overlay[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(7):5212-5220.

[53] Yu J, Cho S M. Metal-cored welding wire for minimizing weld porosity of zinc-coated steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249:350-357.

[54] Coetsee T, De Bruin F. Aluminium-assisted alloying of carbon steel in submerged arc welding with Al-Cr-Ni unconstrained metal powders: thermodynamic interpretation of gas reactions[J]. Processes, 2022, 10(11):2265.

[55] Zhai W, Wu N, Zhou W. Effect of interpass temperature on wire arc additive manufacturing using high-strength metal-cored wire[J]. Metals, 2022, 12(2):212.

[56] 李建海,陈邦固. 新型金属芯粉芯焊丝的开发和应用[J]. 焊接技术,2001,30(3):4.
LI J H, CHEN B G. Development and Application of a Novel Metal-Cored Flux-Cored Wire [J]. Welding Technology, 2001, 30(3):4.

[57] 黄军平,曾君. 金属粉芯焊丝+RMD技术在管道全位置根焊中的研究及应用[J]. 电焊机,2009,39(3):86-88.
HUANG J P, ZENG J. Study and application of metal powder-cored wire and RMD technology in all-position root welding of pipeline[J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(3):86-88.

[58] 朱洪亮,王喜春. 金属粉芯焊丝自动焊在管线建设中的应用[J]. 电焊机,2009,39(5):139-141.
ZHU H L, WANG X C. Application of automatic welding with metal powder cored welding wire in pipeline construction [J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(5):139-141.

[59] 罗晓军,吕仲光,何世军,等. 金属粉芯焊丝在工业压力管道焊接中的应用[J]. 石油工程建设,2021,47(2):33-35.
LUO X J, LV Z G, HE S J, et al. Application of metal powder-cored wire in industrial pressure pipeline welding[J]. Petroleum Engineering Construction, 2021, 47(2):33-35.

[60] 苏衍福,任胜汉,刘斌,等. 一种国产金属粉芯焊丝封底焊焊接工艺开发[J]. 金属加工(热加工),2020(7):56-59.
SU Y F, REN S H, LIU B, et al. Development of a Backing Weld Process Using a Domestic Metal-Cored Flux-Cored Wire[J]. MW Metal Forming, 2020(7):56-59.

[61] Qi L H, Jin Z L, Zhang J M, et al. Influence factors of X80 pipeline steel girth welding with self-shielded flux-cored wire[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(5):592-601.

[62] Harati E, Jose B, Igestrand M. Wire arc additive manufacturing using high-strength steel tubular and solid wires[J]. Welding international, 2024, 38(5):329-334.

[63] 刘秋亮. 金属粉型粉芯焊丝及其在海上风电试验中的应用[J]. 金属加工(热加工),2017(8):5-7.
LIU Q L. Metal-Cored Flux-Cored Wire and Its Application in Offshore Wind Power Testing[J]. MW Metal Forming, 2017(8):5-7.

[64] 张迪,马德志,宋晓峰,等. 建筑高性能结构钢Q460GJC机器人焊接用金属粉芯焊丝的研究[J]. 工业建筑,2020,50(8):38-42.
ZHANG D, MA D Z, SONG X F, et al. Research On The Metal Powder-Cored Wire For Robot Welding Of Building High-Performance Structural Steel Q460GJC

下转第 122 页