



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.05

ERNiCrMo-3焊丝送丝稳定性测试分析

马越¹, 王晓军¹, 苗承鹏², 董生茂², 翁莫涵¹

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

2. 金川集团镍合金有限公司, 甘肃 金昌 737100

摘要: ERNiCrMo-3焊丝因其在高温力学性能和耐腐蚀性能上的优势, 广泛应用于航空航天、能源化工等领域。在实际生产过程中, 焊丝的送丝稳定性已经成为影响焊接质量和生产效率的重要因素。本文选取常用的5种不同厂商生产的ERNiCrMo-3镍合金焊丝, 通过送丝稳定性测试, 量化了焊丝的送丝速度、送丝阻力, 分析了影响送丝稳定性的因素。测试结果显示, 送丝阻力和速度在不同品牌焊丝间存在较大差异, 其中3#焊丝表现出最不稳定的送丝阻力和送丝速度。通过对比焊丝表面粗糙度, 发现焊丝表面缺陷与送丝稳定性存在显著相关性。综合分析表明, 焊丝的表面质量会对送丝稳定性产生影响。

关键词: 镍合金焊丝; 送丝稳定性; 表面形貌; 拉伸性能

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0045-07

Analysis of Wire Feeding Stability Test for ERNiCrMo-3 Welding Wire

MA Yue¹, WANG Xiaojun¹, MIAO Chengpeng², DONG Shengmao², WENG Mohan¹

1. Lanzhou University of Technology, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou 730050, China

2. Jinchuan Group Nickel Alloy Co., Ltd., Jinchang 737100, China

Abstract: ERNiCrMo-3 welding wire is widely used in aerospace, energy, chemical engineering, and other fields due to its advantages in high-temperature mechanical properties and corrosion resistance. In actual production, the wire feeding stability has become an important factor influencing welding quality and production efficiency. This paper selects five commonly used ERNiCrMo-3 nickel alloy welding wires produced by different manufacturers. Through wire feeding stability tests, the feeding speed and feeding resistance of the wires are quantified, and the factors affecting feeding stability are analyzed. The test results show significant differences in feeding resistance and speed among different brands of welding wires, with Wire No. 3 exhibiting the most unstable feeding resistance and speed. By comparing the surface roughness of the welding wire, it is found that surface defects of the wire are significantly correlated with feeding stability. The comprehensive analysis indicates that the surface quality of the welding wire can affect the wire feeding stability.

Keywords: nickel alloy welding wire; feeding stability; surface morphology; tensile properties

引用格式: 马越, 王晓军, 苗承鹏, 等. ERNiCrMo-3焊丝送丝稳定性测试分析[J]. 电焊机, 2026, 56(6): 45-51.

Citation: MA Yue, WANG Xiaojun, MIAO Chengpeng, et al. Analysis of Wire Feeding Stability Test for ERNiCrMo-3 Welding Wire[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 45-51.

收稿日期: 2025-03-06 修回日期: 2025-06-17

基金项目: 甘肃省2024年度国有资本经营预算支持省属企业科研项目计划(2024GZ001)

作者简介: 马越(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事镍基高温合金的研究。E-mail: 1018404388@qq.com。

通讯作者: 王晓军(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要从事镍基合金关键生产技术和金属材料焊接等研究。E-mail: 2890768649@qq.com。

0 引言

随着工业化水平的提高,高端装备制造业对镍基合金材料需求量迅猛增长^[1-3]。由于 Inconel625 合金具有优异的高温力学性能、良好的耐腐蚀与耐高温特性以及卓越的冷热加工性能,与之配套的 ERNiCrMo-3 焊丝也被广泛应用于电力、海洋开发、能源化工、航空航天等诸多领域。ERNiCrMo-3 焊丝既可以焊接镍基合金本身,又可以用于同种或异种合金焊接,如低合金高强钢或不锈钢等金属,能使焊件的高温力学性能和耐腐蚀性得到显著提高^[4]。ERNiCrMo-3 焊丝以 Mo、Nb 为主要的强化元素,从低温到 980 ℃均具有良好的拉伸性能和疲劳性能^[5]。在使用 ERNiCrMo-3 焊丝的焊接过程中,焊丝的加工工艺、送丝性能和化学成分成为了决定焊接质量的重要指标;因此,相关从业人员的研究重点主要集中在镍基合金焊丝的制备过程、送丝稳定性以及化学成分等方面。

近年来,研究人员对 ERNiCrMo-3 焊丝进行了大量研究。袁珊珊^[5]等人对国内外 ERNiCrMo-3 焊丝的标准样品进行了比对,提出了成分优化设计原则,研制出了高性能焊丝。程伟^[6]等人通过创新熔炼方式、工艺路线和元素加入方式,成功去除了有害元素,研发了高品质焊丝。赵雅萱^[7]等人通过真空感应熔炼法和合金成分优化,制备了高 Cr 含量的镍基合金铸锭,适用于高温和核电设备焊接。

对 ERNiCrMo-3 焊丝工艺性能的要求随着应用领域的不断延伸而逐步提高。尽管在 ERNiCrMo-3 镍合金焊丝的制备过程和化学成分优化上,许多学者都有过深入的研究,但对焊丝的送丝稳定性研究仍然是有限的。目前,不同厂家生产的 ERNi-

CrMo-3 焊丝在自动化和半自动化焊接过程中,由于焊丝的不稳定性,常发生堵塞、断裂等问题,导致送丝稳定性差异较大。这不仅会影响焊缝成形质量,还会降低生产效率,导致焊缝质量下降,最终影响工件的合格率。本文选取国内外 5 种常用的镍合金焊丝,对其送丝稳定性进行测试分析并进行量化评估,探讨了送丝稳定性的影响因素,为今后镍基合金焊丝的送丝稳定性评估提供参考。

1 试验材料及方法

本文选取 5 种国内外 ERNiCrMo-3 镍基合金焊丝作为试验材料,分别为 1#、2#、3#、4#、5#,直径均为 $\varnothing 1.2\text{ mm}$ 。表 1 为 ERNiCrMo-3 实际合金化学成分与国家标准 GB/T 15620—2008《镍及镍合金焊丝》^[8]以及美国标准 AWS 5.14—2018《Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods》^[9]规定的化学成分。

ERNiCrMo-3 镍合金焊丝的送丝速度和送丝阻力通过中达科技生产的焊丝送丝稳定性测试系统进行测试(见图 1)。系统包括:控制主机、送丝路径以及焊接主机。测试过程中焊丝在送丝系统的驱动力作用下,通过送丝路径的引导,最终到达焊枪端部完成测试。采用激光共聚焦显微镜观察各品牌焊丝表面形貌,使用电子万能试验机进行焊丝力学拉伸试验,并用扫描电子显微镜观察拉伸断口。

2 试验结果及分析

2.1 ERNiCrMo-3 焊丝宏观质量检测

表 2 为 5 种焊丝的松弛直径和翘距数据。从表

表 1 ERNiCrMo-3 焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of ERNiCrMo-3 welding wire (wt. %)

编号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Al	Nb+Ta	Fe
GB/T15620—2008	≤0.1	≤0.5	≤0.5	≤0.02	≤0.015	20~30	≥58	8~10	≤0.5	≤0.4	≤0.4	3.0~4.2	≤0.5
AWS 5.14—2018	≤0.1	≤0.5	≤0.5	≤0.02	≤0.015	20~30	≥58	8~10	≤0.5	≤0.4	≤0.4	3.15~4.15	≤0.5
1#	0.005	0.08	0.03	0.001	0.005	22.15	64.58	9.11	0.001	0.17	0.03	3.69	0.09
2#	0.016	0.18	0.11	0.002	0.005	22.02	64.56	9.06	0.014	0.2	0.092	3.53	0.095
3#	0.0028	0.04	0.03	0.001	0.001	22.1	64.3	9.33	0.005	0.26	0.14	3.69	0.03
4#	0.0050	0.03	<0.03	<0.001	0.001	22.7	64.0	8.78	<0.005	0.26	0.16	3.58	0.05
5#	0.033	0.20	0.15	<0.001	0.001	22.75	63.3	8.87	0.024	0.28	0.29	3.41	0.41

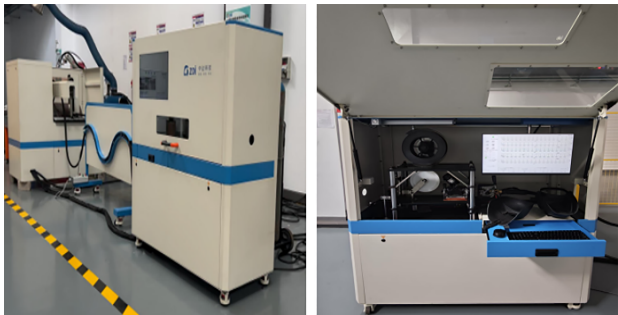


图1 焊丝稳定性测试装置

Fig. 1 Welding wire stability testing device diagram

2可以看出,5种焊丝的松弛直径和翘距均符合GB/T 15620—2008《镍及镍合金焊丝》^[8]的标准要求。3#焊丝的松弛直径是五种焊丝中最小的,仅为509 mm,但其翘距却明显大于其他四种焊丝。焊丝在半成品状态下若应力消除不完全,或在焊丝缠绕时排线不规范,都会导致翘距和松弛直径异常^[10]。此外,焊丝翘距较大或松弛直径较小时,会增加焊丝与导电嘴之间的摩擦力,从而导致送丝阻力增大,进而影响电弧的稳定性,容易出现焊接不连续的情况,最终影响焊接接头的质量。

表2 5种ERNiCrMo-3焊丝松弛直径和翘距

Table 2 5 ERNiCrMo-3 wires relaxation diameters and warping distances

焊丝	松弛直径/mm		翘距/mm	
	单值		单值	
	平均值		平均值	
1#	645/662/649	652	3.6/3.5/3.7	3.6
2#	642/633/654	643	2.1/2.4/2.2	2.3
3#	520/505/502	509	5.9/5.7/6.2	5.9
4#	693/717/705	705	3.1/2.9/2.6	2.9
5#	649/636/643	643	2.3/2.1/2.5	2.3

2.2 送丝稳定性

分别测试5种ERNiCrMo-3镍合金焊丝的送丝稳定性,监测送丝过程,获得送丝阻力Fn以及送丝速度V。

2.2.1 送丝阻力

从试验结果中选取1 min中内的送丝阻力数据,绘制成如图2所示的波形图,将实验数据进行统计并进行对比分析。图2、表3分别为送丝阻力波形图以及送丝阻力试验数据。由图2可知,在焊接过程中,不同品牌的镍合金焊丝送丝阻力的波动幅度有较大区别。表3的数据显示,焊丝的送丝阻力值在不同品牌之间存在巨大差异。对比5组试验数

据,3#试样送丝阻力波动最大,变化幅度明显大于其他样本,最大值为170.43 N,呈现出剧烈的振荡波动,其余四种焊丝送丝阻力曲线变化较平稳,波动范围小,数值普遍低于40 N。对于5种焊丝的送丝阻力进行排序:3#>2#>4#>5#>1#。

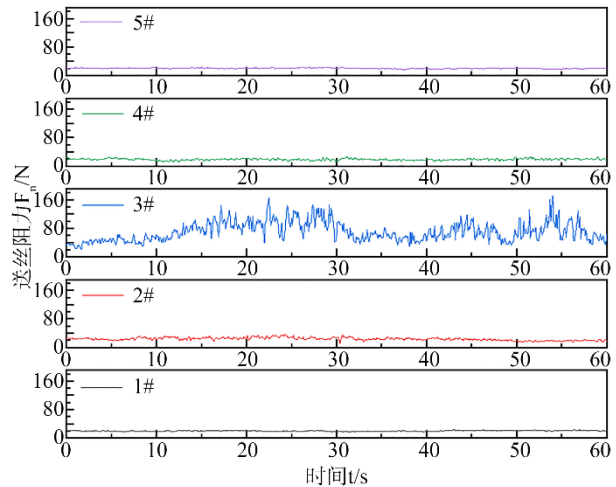


图2 不同焊丝送丝阻力随时间的变化

Fig. 2 Variation of feeding resistance of different welding wires with time

表3 送丝阻力试验测试数据

Table 3 Wire feeding resistance test data

编号	送丝阻力 F_n /N			极差	标准差
	最大值	最小值	平均值		
1#	22.66	16.58	19.43	6.08	1.18
2#	37.41	10.70	23.49	26.71	4.17
3#	170.43	19.52	69.87	150.91	27.38
4#	27.15	11.81	18.61	15.34	2.50
5#	23.60	14.27	19.90	9.33	1.17

2.2.2 送丝速度

在试验过程记录的数据中,选取1 min中内的送丝速度数据并绘制成波形图,同时对数据进行对比分析并统计结果。图3、表4分别为送丝速度波形图和送丝速度实验数据。从图3、表4可知,在送丝过程中,不同品牌的镍合金焊丝的送丝速度的波动幅度不同且数值有明显差异。对比5组焊丝,3#焊丝的送丝速度波动幅度最大,明显偏离其他曲线,最低速度接近8.38 m/min,最高速度达10.44 m/min,整体不稳定。在1 min时间段内有多次剧烈下降,在送丝过程出现了卡顿或不均匀的现象,其余四种焊丝曲线分布集中,波动幅度较小,平均送丝速度接近9.5 m/min,表现出较高的稳定性,在整个时间

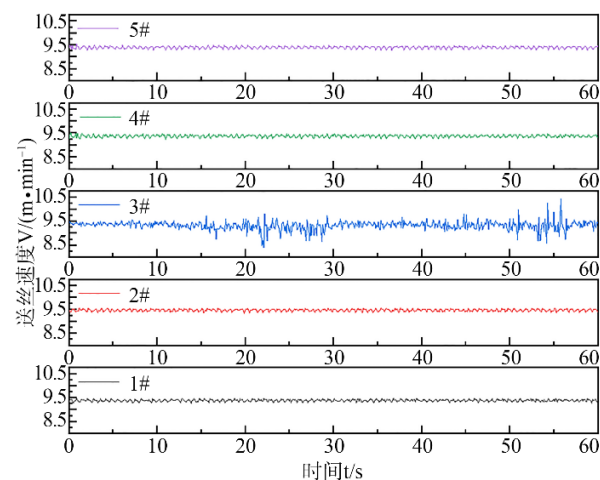


图3 不同焊丝送丝速度随时间的变化

Fig. 3 Variation of feeding speed of different welding wires with time

图段内没有明显的异常波动。对于5种焊丝的送丝速度的稳定性进行排序:1#>2#>4#>5#>3#。

目前,对于送丝阻力以及送丝速度没有统一的强制性国家标准,不同的焊接材料、焊接机型及工艺要求,可能会有不同的技术要求。一般来说,焊接行业的相关标准和技术规范会根据特定的应用需求来制定推荐的参数范围,但并未明确规定具体

表4 送丝速度试验测试数据

Table 4 Wire feeding speed test data

编号	送丝速度/(m·min ⁻¹)			极差	标准差
	最大值	最小值	平均值		
1#	9.47	9.25	9.37	0.22	0.045
2#	9.56	9.33	9.46	0.23	0.048
3#	10.44	8.38	9.32	2.06	0.190
4#	9.50	9.20	9.36	0.30	0.053
5#	9.60	9.26	9.38	0.34	0.052

的量化指标。

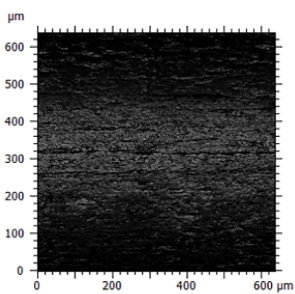
2.3 焊丝表面形貌

为了对送丝稳定性与焊丝的表面状态之间的关系进行深入了解,分别对5种焊丝进行取样,并对其表面状态进行观察。表5为5种焊丝二维表面粗糙度和三维表面粗糙度数值,图4~图8为不同品牌焊丝的表面形貌图。通过对比表5中数据发现,1#焊丝二维和三维表面粗糙度数值最小,分别为2.16

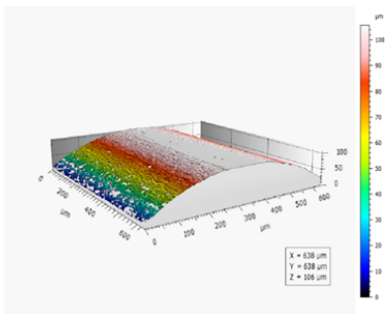
表5 不同焊丝表面粗糙度

Table 5 Different welding wire surface roughness

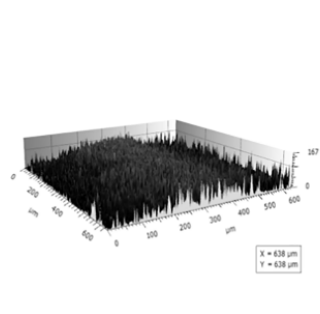
	1#	2#	3#	4#	5#
二维表面粗糙度(Ra)	2.16	2.23	2.99	2.48	2.58
三维表面粗糙度(Sa)	20.58	21.66	25.53	21.82	23.49



(a)二维表面图



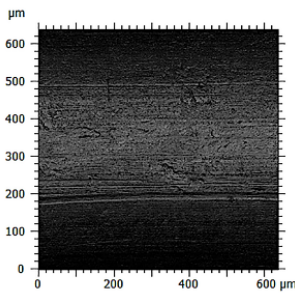
(b)三维表面图



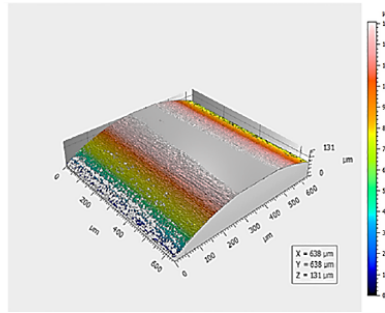
(c)三维表面成像图

图4 1#焊丝表面形貌

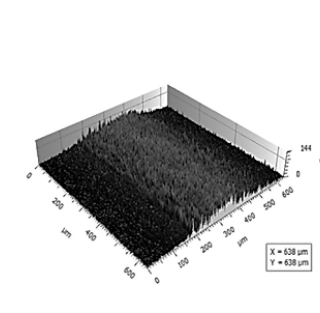
Fig. 4 No. 1 welding wire surface appearance image



(a)二维表面图



(b)三维表面图



(c)三维表面成像图

图5 2#焊丝表面形貌

Fig. 5 No. 2 welding wire surface appearance image

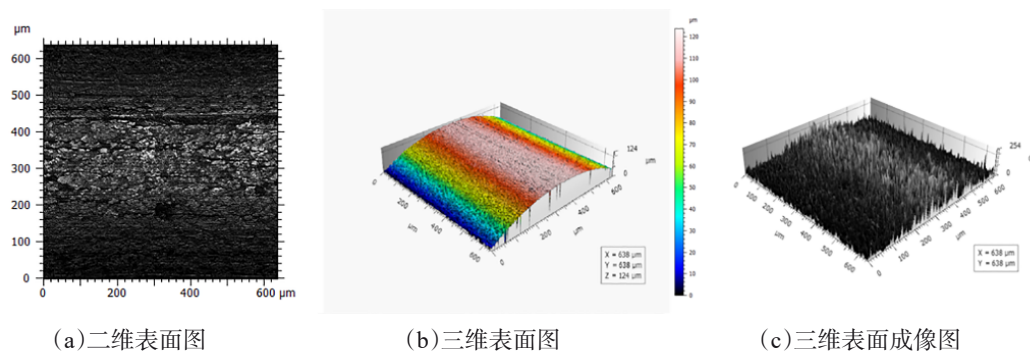


图6 3#焊丝表面形貌

Fig. 6 No. 3 welding wire surface appearance image

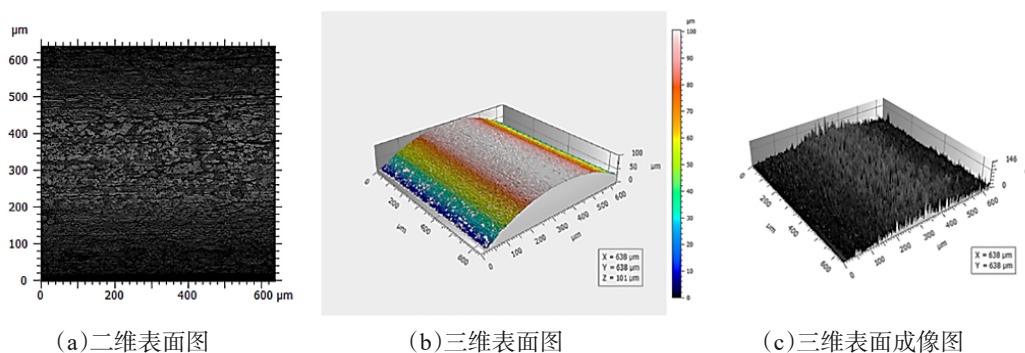


图7 4#焊丝表面形貌

Fig. 7 No. 4 welding wire surface appearance image

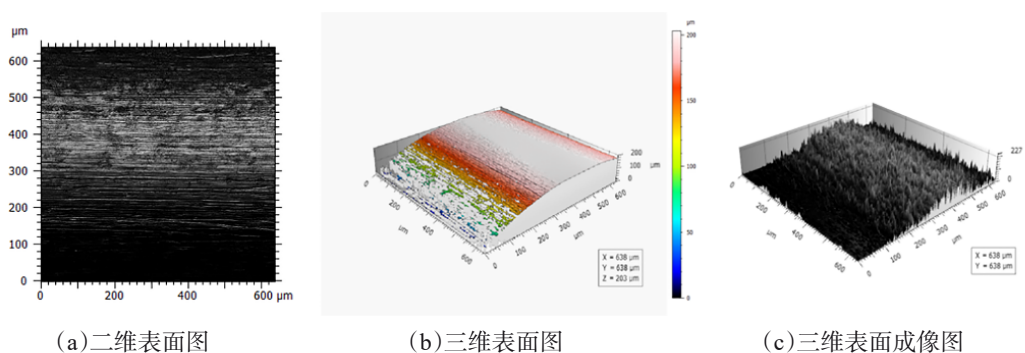


图8 5#焊丝表面形貌

Fig. 8 No. 5 welding wire surface appearance image

和20.58,3#焊丝二维和三维表面粗糙度数值最大,分别为2.99和25.53。将5种焊丝粗糙度数值进行排序:3#>5#>4#>2#>1#。根据送丝稳定性测试结果,可以发现焊丝的表面粗糙度与送丝稳定性呈现一致性。因此,可以得出结论:焊丝的表面状态与送丝稳定性之间存在较为密切的关系。为此,在镍合金焊丝的生产过程中,应严格控制焊丝的加工工艺,以提高其送丝稳定性。

2.4 焊丝拉伸性能

为分析拉伸性能与送丝稳定性的相关性,根据

GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》^[11]对选取的5组焊丝进行拉伸性能测试,同时通过扫描电镜对焊丝断口进行观察分析,抗拉强度测试结果如表5所示,拉伸断口SEM图如图9~图13所示。通过表5数据可知:3#焊丝的抗拉强度最低为1 325 MPa,5#焊丝的抗拉强度高于其他四种焊丝,为1 473 MPa。将5种焊丝的抗拉强度进行排序:5#>1#>4#>2#>3#。根据送丝稳定性测试结果,可以发现焊丝的抗拉强度与送丝稳定性并未呈现一致性。因此送丝稳定性和抗拉强度之间可

表6 不同样品的抗拉强度

Table 6 Tensile strength of different samples

编号	抗拉强度/MPa
1#	1 413
2#	1 374
3#	1 325
4#	1 384
5#	1 473

能存在一定的关系,但这种关系并不直接。

通过观察5种镍合金焊丝拉伸断口形貌发现,经拉伸断裂后,断口形貌整体呈酒杯状或锥状,各试样断口的微观形貌呈现明显的等轴韧窝,因此可以判定断裂方式为韧性断裂。结合抗拉强度测试结果分析:2#和3#焊丝断口形貌较为简单且缺乏明显的变形区域。这种简单的断口形貌意味着焊丝可能较容易在送丝过程中发生断裂或应力集中,从而导致送丝不稳定。尤其在高频率的送丝过程中,较低的抗拉强度可能导致焊丝断裂,从而影响焊接质量和生产效率。1#、4#和5#焊丝断口形貌表现为复杂的韧窝和更多的变形区域。这表明这些焊丝能够承受较大的外力。在送丝过程中,抗拉强度较高的焊丝能够有效抵抗外界应力,减少断裂的风险,从而提供更稳定的送丝性能。它们的复杂断口形貌说明焊丝在送丝过程中更加耐用,能保持较长的使用寿命和较高的送丝稳定性。综合来看,焊丝的拉伸断口形貌反映了其抗拉强度和塑性,而这些特性可能会影响焊丝在送丝过程中的稳定性。

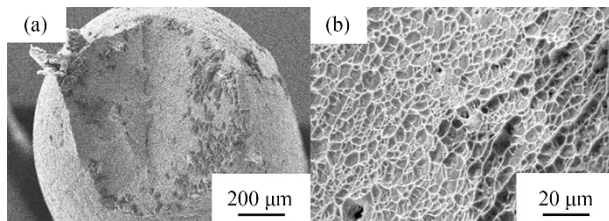


图9 1#焊丝拉伸断口SEM形貌

Fig. 9 Tensile fracture SEM morphology of welding wire No. 1

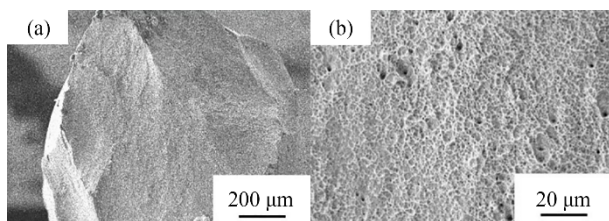


图10 2#焊丝拉伸断口SEM形貌

Fig. 10 Tensile fracture SEM morphology of welding wire No. 2

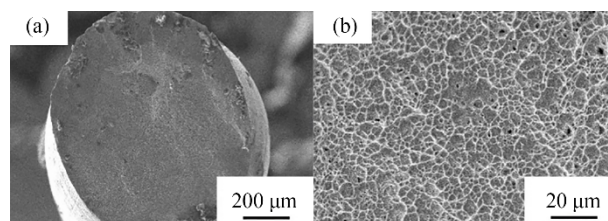


图11 3#焊丝拉伸断口SEM形貌

Fig. 11 Tensile fracture SEM morphology of welding wire No. 3

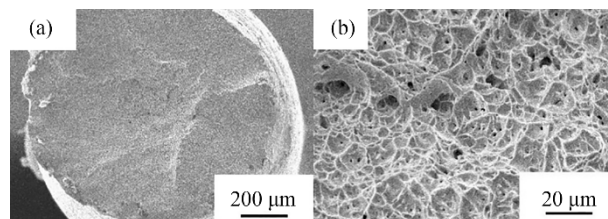


图12 4#焊丝拉伸断口SEM形貌

Fig. 12 Tensile fracture SEM morphology of welding wire No. 4

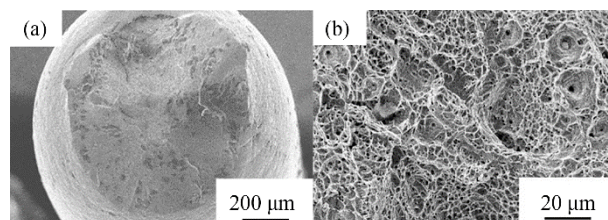


图13 5#焊丝拉伸断口SEM形貌

Fig. 13 Tensile fracture SEM morphology of welding wire No. 5

因此,要提高镍合金焊丝的送丝稳定性,必须要在生产过程中精确控制冶炼工艺、合金配比、铸造和拉丝工艺、热处理和表面处理等环节。通过优化原材料选择、冶炼温度、拉丝速度及冷却速率,可以确保焊丝具有均匀的成分、优良的力学性能和光滑的表面,从而提高焊丝的韧性和抗拉强度,减少送丝过程中的断裂和不稳定性。此外,严格的质量控制和检测确保焊丝性能的一致性,进一步提升送丝稳定性。

3 结论

通过对5种ERNiCrMo-3镍基合金焊丝的送丝稳定性、表面质量和拉伸性能的综合分析,得出以下结论:

(1)不同厂家的ERNiCrMo-3焊丝在送丝过程中表现出明显的差异,尤其在送丝阻力和速度波动方面,3#焊丝的送丝性能最差。

(2)焊丝的送丝稳定性与其表面质量密切相关。

关,表面粗糙度数值低的焊丝表现出更好的送丝稳定性。

(3)为提高ERNiCrMo-3焊丝的应用效果,建议在生产过程中严格控制焊丝的表面处理和抗拉强度优化,以提高其送丝稳定性和焊接质量。

这些研究成果为后续焊丝的生产和应用提供了理论依据,并为提高焊接质量和生产效率提供了重要参考。

参考文献:

- [1] Rahul, Abhishek K, Datta S, et al. Machining performance optimization for electro-discharge machining of Inconel 601, 625, 718 and 825: an integrated optimization route combining satisfaction function, fuzzy inference system and Taguchi approach [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(9): 3499-3527.
- [2] 张红梅, 顾冬冬. 激光增材制造镍基高温合金构件形性调控及在航空航天中的应用[J]. 电加工与模具, 2020(6): 1-10.
ZHANG H M, GU D D. Shape control of nickel-based superalloy components in laser additive manufacturing and its application in aerospace [J]. Electromechanical Processing and Molding, 2020(6): 1-10.
- [3] 赵雅萱. 高Cr含量镍基合金焊丝的制备及其抗高温氧化与腐蚀性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHAO Y X. Preparation of high-Cr content nickel-based alloy welding wire and its high-temperature oxidation and corrosion resistance [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [4] Cortial F, Corrieu J M, Vernot-Loier C. Influence of heat treatments on microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of weld alloy 625 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995, 26(5): 1273-1286.
- [5] 袁珊珊, 刘海定, 王小岩, 等. 国产ERNiCrMo-3镍基合金焊丝热加工成型技术研究[J]. 电焊机, 2021, 51(12): 111-115.
YUAN S S, LIU H D, WANG X Y, et al. Research on hot processing and forming technology of domestic ER-NiCrMo-3 nickel-based alloy welding wire [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(12): 111-115.
- [6] 程伟, 杨哲, 杨晗, 等. 高品质Inconel625焊丝生产工艺探究[J]. 金属世界, 2020(4): 68-71.
CHENG W, YANG Z, YANG H, et al. Study on the production process of high-quality Inconel 625 welding wire [J]. Metal World, 2020(4): 68-71.
- [7] 赵雅萱, 王少刚, 庄国祥, 等. 高Cr镍基合金焊丝的制备工艺及其组织与性能[J]. 有色金属加工, 2017, 46(5): 22-28.
ZHAO Y X, WANG S G, ZHUANG G X, et al. Preparation process of high-Cr nickel-based alloy welding wire and its microstructure and properties [J]. Nonferrous Metals Processing, 2017, 46(5): 22-28.
- [8] GB/T 15620-2008, 镍及镍合金焊丝[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] AWS 5.14-2018. Specification for Nickel and Nickel Alloy Bare Welding Electrodes and Rods [S]. American National Standards Institute, 2018: 5.
- [10] 刘毓斌. 影响焊丝翘距和松弛直径的因素及解决方法[J]. 金属制品, 2003(4): 32-33.
LIU Y B. Factors affecting the wire deflection and relaxation diameter and their solutions [J]. Metal Products, 2003(4): 32-33.
- [11] GB/T 228.1-2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国质检出版社, 2021.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>