

药芯组成及工艺参数对 ENiCrMo3T0-4 药芯焊丝气孔敏感性的影响

王 恒¹, 栗卓新¹, Wolfgang Tillmann², Kim Hee Jin³

(1. 北京工业大学, 北京 100124)

(2. 多特蒙德工业大学, 多特蒙德 44227, 德国)

(3. 韩国工业技术研究院, 天安 330-825, 韩国)

摘 要: 采用体式显微镜、优化设计软件研究了 ENiCrMo3T0-4 药芯焊丝中药芯组成及工艺参数对气孔敏感性的影响。结果表明: 随着焊丝药芯组成中 SiO₂/ZrO₂、TiO₂/ZrO₂、(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 的减小, 气孔敏感性降低; 气体流量的改变对焊缝表面针眼气孔数的影响不大, 但气体流量过小会产生条虫状气孔; 当焊接电压 25 V、焊接电流 160 A、干伸长量 20 mm 时, 焊缝金属针眼气孔数最少, 焊丝气孔敏感性最低; 增大固液相温度区间及氢在高温熔渣中的溶解度, 可以降低焊缝金属气孔敏感性。

关键词: 镍基药芯焊丝; 药芯组成; 工艺参数; 气孔敏感性

中图分类号: TG401

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)04-1205-05

国际镍业研究组织(INSRG)及世界金属统计局(WBMS)报告显示, 全球的镍产消比逐渐降低, 世界各国对镍的需求量逐年增大^[1]。镍基合金因其优异的高温力学性能、抗高温腐蚀能力, 广泛应用于航空航天工业、核电、海洋采油等行业中^[2]。Inconel 625(Ni-Cr-Mo-Nb)合金是一种具有优异耐腐蚀性的镍基高温合金, 可广泛用于制造航空发动机零部件、宇航结构部件和化工设备等, 且具有壁温在-196~450 °C 的压力容器的制造认证, 是当今世界使用最广的一种镍基合金。

Inconel 625 合金在焊接过程中存在焊缝金属高温流动性差的特点, 极易在焊缝表面产生针眼状气孔, 大大地限制了高效焊接 Inconel 625 合金。近年来, 不少研究者^[3]从外部清理、焊接材料选用等方面简单论述了镍基合金焊接针眼状气孔产生的原因及预防措施, 但鲜见对 ENiCrMo3T0-4 药芯焊丝中药芯组成及工艺参数对气孔敏感性影响的文献报道, 也未对针眼气孔产生的原因做深入的研究。鉴于此, 本实验研究了 ENiCrMo3T0-4 药芯焊丝 FA625T0-4 药芯组成及工艺参数对气孔敏感性的影响, 并从固液相温度区间及氢在高温熔渣中的溶解度两方面对 Inconel 625 合金焊接针眼气孔产生的原因进行了分析。

1 实 验

采用自动焊接方法, 焊接速度为 300 mm/min, 焊接试板为 Q235 (300 mm×200 mm×20 mm), 试板表面进行打磨、抛光处理。每道焊缝长度为 250 mm, 焊后试板温度控制在 100 °C 内再进行下次焊接, 每道焊缝之间距离大于 5 mm。

选用 6 种自制的 FA625T0-4 镍基药芯焊丝, 按平均针眼气孔数由少到多依次给焊丝编号为 F1~F6。焊接电流 180 A, 焊接电压 27 V, 干伸长 18 mm 保持不变。在气体流量分别为 10、15、20 L/mm 下, 研究药芯组成对气孔敏感性的影响。6 种焊丝药芯组成中 SiO₂/ZrO₂、TiO₂/ZrO₂、(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 的比值(质量分数比)见表 1。

表 1 F1~F6 焊丝药芯中 SiO₂/ZrO₂、TiO₂/ZrO₂、(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 的比例变化

Table 1 Proportion of SiO₂/ZrO₂, TiO₂/ZrO₂, and (TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO in F1~F6 cored wire

Wire number	F1	F2	F3	F4	F5	F6
SiO ₂ /ZrO ₂	25.2	25.47	36.38	29.12	33.17	38.62
TiO ₂ /ZrO ₂	12.4	12.73	13.94	16.18	12.67	10.77
(TiO ₂ +ZrO ₂ +SiO ₂)/MnO	1.23	1.33	3.67	1.55	1.22	1.57

收稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51574011); 北京市自然科学基金(2152008)

作者简介: 王 恒, 男, 1990 年生, 硕士, 北京工业大学材料学院, 北京 100124, 电话: 010-67396168, E-mail: wangheng1990@emails.bjut.edu.cn

选定 2 组焊丝 F1 和 F4，研究不同工艺参数对气孔敏感性的影响。在气体流量 20 L/mm、焊接电流 180 A 保持不变的情况下，研究焊接电压及干伸长量对 F1 焊丝气孔敏感性的影响，焊接工艺参数如表 2 所示。在气体流量 20 L/mm、焊接电压 27 V 保持不变的情况下，研究焊接电流及干伸长量对 F4 焊丝气孔敏感性的影响，焊接工艺参数如表 3 所示。

镍基合金焊接气孔缺陷仅存在于焊缝表面，呈“针眼”状。研究者^[4]多采用 X 射线探伤技术测试焊缝里面气孔缺陷的深度和位置，而对于焊缝表面针眼气孔并没有较为规范的统计方法。本试验对每道焊缝任选 50 mm 的长度，在 8X 体式显微镜下进行观察、标定针眼气孔大小，并统计直径大于 30 μm 针眼气孔个数，进而估计整道焊缝针眼气孔数。如图 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 药芯组成对气孔敏感性的影响及分析

药芯组成中 SiO₂、ZrO₂、TiO₂、MnO 的质量分数及之间的比值关系对焊缝熔敷金属高温熔渣粘度具有重要的影响。熔渣粘度过高，不利于高温下溶解的气体逸出，从而形成针眼气孔。

药芯组成中 SiO₂/ZrO₂ 对气孔敏感性的影响见图 2，药芯组成中 TiO₂/ZrO₂ 对气孔敏感性的影响见图 3，

表 2 F1 焊丝焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of F1 cored wire

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Voltage/V	25	25	25	27	27	27	29	29	29
Electrode stick-out/mm	10	15	20	10	15	20	10	15	20

表 3 F4 焊丝焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of F4 cored wire

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Current/A	160	160	160	180	180	180	200	200	200
Electrode stick-out/mm	10	15	20	10	15	20	10	15	20

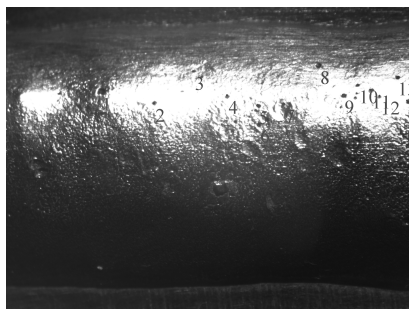


图 1 体式显微镜下针眼气孔

Fig.1 Needle hole under stereo microscope

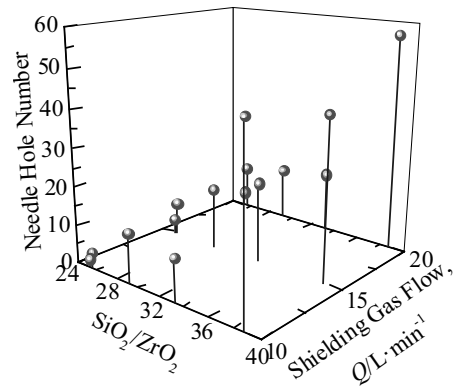


图 2 SiO₂/ZrO₂ 对针眼气孔数的影响

Fig.2 Effect of SiO₂/ZrO₂ on needle hole number

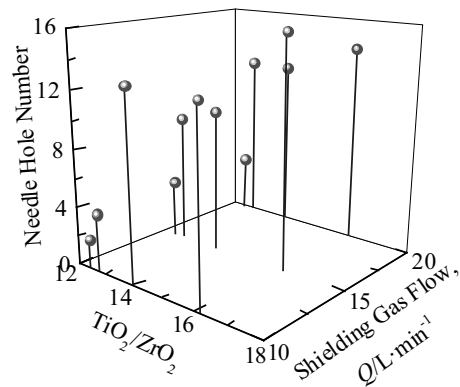


图 3 TiO₂/ZrO₂ 对针眼气孔数的影响

Fig.3 Effect of TiO₂/ZrO₂ on needle hole number

药芯组成中(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 对气孔敏感性的影响见图 4。

在不同气体流量下焊接后发现：对于单一气体流量，除 F3 (SiO₂/ZrO₂=36.38)外，随着药芯组成中 SiO₂/ZrO₂ 的增大，焊丝针眼气孔个数呈逐渐增大的趋势，如图 2 所示；除 F5、F6(TiO₂/ZrO₂ 分别为 12.67、10.77)外，随着药芯组成中 TiO₂/ZrO₂ 的增大，焊丝针眼气孔个数呈逐渐增大的趋势，如图 3 所示；除 F3、F5 ((TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 分别为 3.67、1.22)外，随着药芯组成中(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 的增大，焊丝针眼气孔个数也呈逐渐增大的趋势，如图 4 所示。

焊丝气孔敏感性受 SiO₂、ZrO₂、TiO₂、MnO 等不同药芯组成之间不同比值关系的多重因素影响，因此存在个别焊丝某药芯组成质量分数不符合以上规律(如图 2 中 F3 焊丝)。但从以上结果可以得出，焊丝药芯组成中 SiO₂/ZrO₂、TiO₂/ZrO₂、(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 对焊丝气孔敏感性有重要的影响，一般焊丝气孔敏感性随着上述比值的减少而降低。SiO₂、TiO₂ 为酸

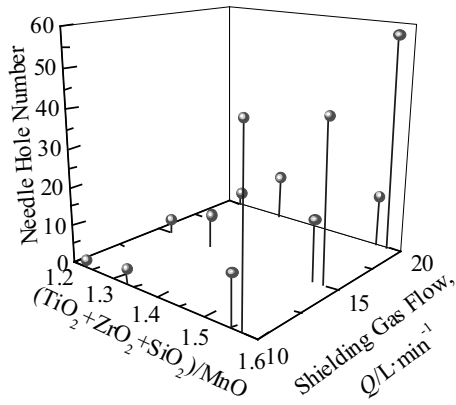


图 4 (TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 对针眼气孔数的影响

Fig.4 Effect of (TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO on needle hole number

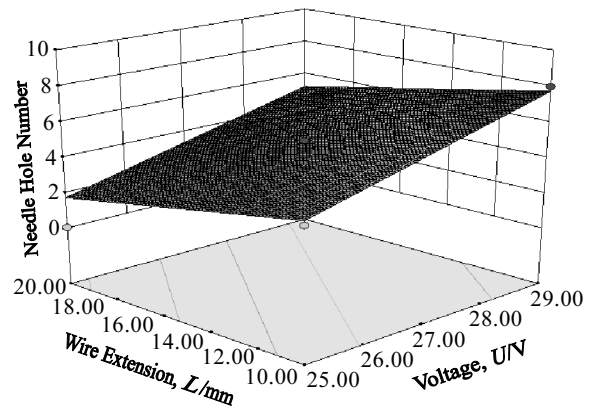


图 5 电压及干伸长量对 F1 焊丝针眼气孔数的影响

Fig.5 Effect of voltage and electrode stick-out on needle hole number of F1 cored wire

性氧化物, ZrO₂ 为弱酸性氧化物、MnO 为碱性氧化物。3 种 SiO₂/ZrO₂、TiO₂/ZrO₂、(TiO₂+ZrO₂+SiO₂)/MnO 质量分数越小, 氧化物碱性越大, 熔渣碱度就越大。熔渣粘度和熔渣的碱度有密切关系。碱性氧化物能提供氧离子而酸性氧化物吸收氧离子。熔渣中增加 CaO、MnO 等碱性氧化物, 氧离子浓度增加, 从而提高 O/Si 比值, 导致复杂结构开始裂解使结构变简单, 熔渣粘度降低; 反之, 熔渣中增加 SiO₂、TiO₂、ZrO₂ 等酸性氧化物, 熔渣粘度增大。因此, 药芯焊丝中药粉碱度越大, 熔渣粘度越低, 焊丝气孔敏感性越低。

从图 2~图 4 可以看出, 在相同焊接工艺参数下, 随着气体流量的增加, 每种焊丝针眼气孔数变化规律并不明显。因此, 在其他工艺参数不变的情况下, 气体流量的改变对每一种焊丝焊缝针眼气孔数的影响不大。然而, 实验结果表明, 当气体流量较小(如 Q=10 L/min)时, 焊缝易产生大气孔或较长的气沟。

2.2 工艺参数对气孔敏感性的影响及分析

根据表 2、表 3 设定的工艺参数进行焊接试验, 在体式显微镜下统计该工艺下的针眼气孔个数后, 利用优化软件进行数据处理、分析。电压及干伸长量对 F1 焊丝气孔敏感性影响的曲面图如图 5 所示, 电流及干伸长量对 F4 焊丝气孔敏感性影响的曲面图如图 6 所示。

从图 5 可以看出: 当焊接电流 180 A、气体流量 20 L/min 保持不变时, 在同一干伸长量下, 焊缝金属针眼气孔数随着焊接电压的增加而增加; 在同一焊接电压下, 焊缝金属针眼气孔数随着干伸长量的增大而减少。因此, 在适当范围内, 焊接电压越小、干伸长量越大, 焊缝金属针眼气孔数越少, 焊丝抗气孔性越好, 其曲面图呈平面状, 如图 5 所示。

从图 6 可以看出, 当焊接电压 27 V、气体流量 20

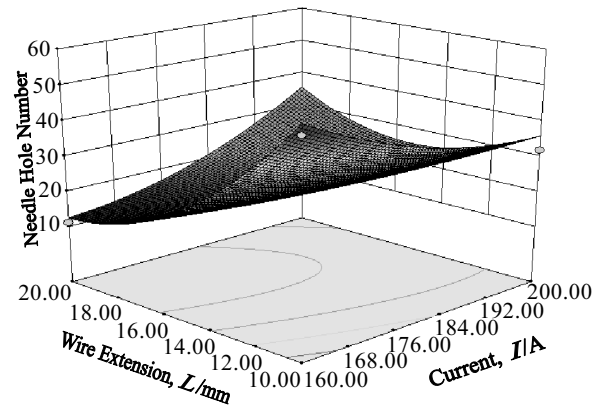


图 6 电流及干伸长量对 F4 焊丝针眼气孔数的影响

Fig.6 Effect of current and electrode stick-out on needle hole number of F4 cored wire

L/min 保持不变时, 在同一焊接电流下, 焊缝金属针眼气孔数随着干伸长量的增加也逐渐减少。然而, 当干伸长量为 10 mm 时, 焊缝金属针眼气孔数随着焊接电流的增加逐渐减少; 当干伸长量为 15 mm 时, 焊缝金属针眼气孔数随着焊接电流的增加先减少再增加; 当干伸长量为 20 mm 时, 焊缝金属针眼气孔数随着焊接电流的增加而增加。因此, 在适当范围内, 在较小干伸长量下, 焊接电流越大, 焊缝金属针眼气孔数越少, 焊丝抗气孔性越好; 在较大干伸长量下, 焊接电流越小, 焊缝金属针眼气孔数越少, 焊丝抗气孔性越好, 其曲面图呈“凹型”曲面状, 如图 6 所示。

进一步分析, 当焊接电流 160 A, 干伸长量 20 mm 时, 焊缝金属针眼气孔数最少; 当焊接电流为 200 A, 干伸长量 20 mm 时, 焊缝金属熔高很高, 焊缝成型较差, 焊缝表面有明显的“坑洼”状。

镍基合金具有热裂纹敏感性高、液态焊缝金属高温流动性差的特点,适用于在较小的焊接规范下焊接,以获得较小的焊接热输入。干伸长量较大,可以保证焊缝金属在较好的保护气体氛围下,避免空气中的气体溶解在焊缝来不及逸出而形成针眼气孔。

2.3 焊接针眼气孔产生的机理

在焊接过程中,由于熔池的结晶速度很大,焊缝金属所吸收的大量氢来不及逸出,而被留在固态焊缝中,在焊缝表面形成针眼气孔。因此,氢在高温熔渣中的溶解度变化对气孔敏感性具有重要影响。图 7 为氢在高温中的溶解度曲线。

在低碱度 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 系熔渣中,当 ω(Al₂O₃)=25% 保持不变, ω(MgO) 分别为 5%、10%、15% 时,熔渣中氢溶解度均随 CaO/SiO₂ 的增大先减小再增大,最低值分别为 0.044、0.054、0.060 mL/100 mg^[5]。在 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系熔渣中,熔渣碱度从 0.1 增大到 1.5 时,氢溶解度将增大 2.6 倍^[6]。

熔渣中 CaO、MgO 为碱性氧化物, Al₂O₃ 为中性氧化物, SiO₂ 为酸性氧化物。熔渣中 CaO、MgO 质量分数越大, SiO₂、Al₂O₃ 质量分数越小,碱度越大。因此,增大熔渣碱度可以增大氢的溶解度,从而降低焊丝气孔敏感性。

此外,熔渣粘度较高也不易于焊缝针眼气孔的逸出,熔渣长短与熔渣粘度有很大的关系。SiO₂ 为典型的“长渣”,熔渣粘度随温度的降低逐渐增大,即熔渣凝固温度范围较宽。CaO、MgO 为典型的“短渣”,熔渣在高温时粘度很小,并且随着温度降低,粘度变化很小,而当温度降到某一区间时,粘度随温度降低急剧增大,即熔渣凝固温度范围较窄。因此, CaO、MgO 等“短渣”更容易使焊缝针眼气孔逸出。

为了获得具有良好脱氢能力的渣系,选择设计氢溶解度大的渣系,并在设计中尽可能地减少那些会使氢溶解度降低的因素。

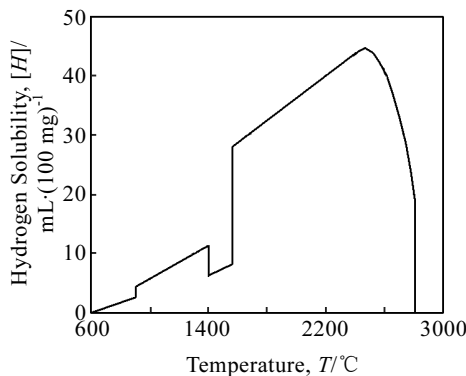


图 7 氢在高温下的溶解度曲线

Fig.7 Solubility curve of the hydrogen at high temperature

基于与 Inconel 625 合金母材成分相匹配原则, ENiCrMo3T0-4 药芯焊丝焊缝金属中 Ni 质量分数取值范围为 58%~68%。在此范围内, Ni-Cr 二元相图中固液相温度在 1360~1390 °C 之间变化,最大固液相温度间距约为 20 °C,如图 8 所示; Ni-Mo 二元相图中固液相温度在 1310~1390 °C 之间变化,最大固液相温度间距约为 40 °C,如图 9 所示。

Inconel 625 合金中主要元素固液相温度间距较小,导致焊缝金属高温下溶解的气体在温度急速降低后来不及逸出,从而在焊缝金属表面形成了针眼气孔。

根据 AWS A5.34/A5.34M 标准, ENiCrMo3T0-4 药芯焊丝焊缝金属中, Cr 质量分数取值范围为 20%~23%, Ni-Cr 二元相图中,此范围下固液相温度在 1390~1420 °C 之间变化,且随着 Cr 质量分数的增加,固液相温度间距逐渐增大,固液相温度逐渐减小,如图 8 虚线所示;在 1390~1420 °C 范围内,随着温度的减小,

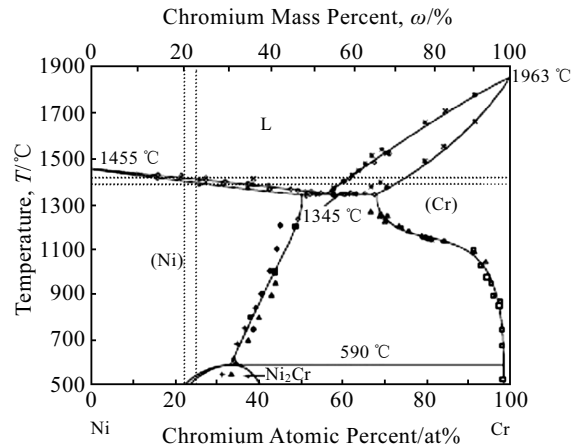


图 8 Ni-Cr 二元相图

Fig.8 Ni-Cr binary phase diagram^[7]

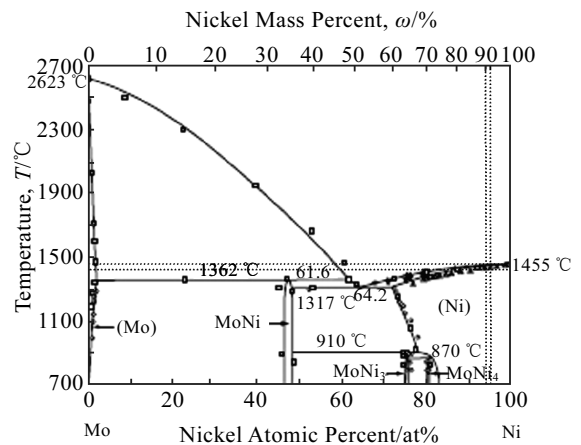


图 9 Ni-Mo 二元相图

Fig.9 Ni-Mo binary phase diagram^[7]

氢的溶解度先减小后急速增大再逐渐减小, 如图 7 所示。Mo 质量分数取值范围为 8%~10%, Ni-Mo 二元相图中, 此范围内固液相温度在 1430~1450 °C 之间变化, 且随着 Mo 质量分数的增加, 固液相温度间距逐渐增大, 固液相温度逐渐减小, 如图 9 虚线所示; 在 1430~1450 °C 范围内, 随着温度的降低, 氢的溶解度逐渐减小, 如图 7 所示。

从以上可以得出, 增加焊丝药芯组成中 Cr 质量分数, Ni-Cr 二元相图固液相温度间距逐渐增大, 氢的溶解度先减小后急速增大再逐渐减小, 在 1400 °C 有一最大值, 控制此温度下 Cr 质量分数可以最大程度地降低焊丝气孔敏感性。增加焊丝药芯组成中 Mo 质量分数, Ni-Mo 二元相图固液相温度间距逐渐增大, 但氢的溶解度逐渐减小, 因此焊丝药芯组成中 Mo 质量分数大小对焊丝气孔敏感性的影响尚不明确, 有待进一步研究。

3 结 论

1) 焊丝药芯组成中 $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$ 、 $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 、 $(\text{TiO}_2+\text{ZrO}_2+\text{SiO}_2)/\text{MnO}$ 对气孔敏感性有重要的影响, 一般气孔敏感性随着其减小而降低; 在相同工艺参数下, 气体流量的改变对每一种焊丝焊缝针眼气孔数的影响不大, 但气体流量较小, 焊缝易产生大气孔或较长的气沟。

2) 焊接电压越小、干伸长量越大, 焊缝金属针眼气孔数越少, 焊丝气孔敏感性越低。在较小干伸长量 ($L=10\text{ mm}$) 下, 焊接电流越大, 焊丝气孔敏感性越低;

在较大干伸长量 ($L=20\text{ mm}$) 下, 焊接电流越小, 焊丝气孔敏感性越低。当焊接电压 25 V、焊接电流 160 A、干伸长量 20 mm 时, 焊缝表面针眼气孔数最少, 焊丝气孔敏感性最低。

3) 镍基合金固液相温度间距小是造成镍基药芯焊丝焊缝表面针眼气孔产生的主要原因; 氢在高温渣系中的溶解度变化对气孔敏感性也具有重要影响。

参考文献 References

- [1] Li Zhuoxin(栗卓新), Wang Heng(王 恒), Tillmann W *et al.* *Journal of Beijing University of Technology*(北京工业大学学报)[J], 2015, 41(8): 1267
- [2] Dupont J N, Lippold J C, Kiser S D. *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-base Alloys*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009: 15
- [3] Niu Weijie(牛卫杰), Wang Guoping(王国平), Liu Jinwei(刘进伟). *Modern Welding*(现代焊接)[J], 2013, 32(9): 8
- [4] Dong Bin(董 斌), Yang Jianfeng(杨剑峰). *Welded Pipe and Tube*(焊管)[J], 2012, 36(12): 53
- [5] Liu Peihuan(刘沛环), Xu Shizheng(徐世铮), Xing Yulu(邢玉录) *et al.* *Journal of Northeast Institute of Technology*(东北工学院学报)[J], 1983, 4(3): 47
- [6] Lv Li(吕 丽), Pan Xiaowei(潘小伟). *Heavy Castings and Forgings*(大型铸锻件)[J], 1987(4): 1
- [7] Nash P. *Phase Diagrams of Binary Nickel Alloys*[M]. Ohio: ASM International, Materials Park, 1991: 75

Effect of Flux-Cored Ingredients and Welding Parameters on Porosity Sensitivity of ENiCrMo3T0-4 Flux-Cored Wire

Wang Heng¹, Li Zhuoxin¹, Wolfgang Tillmann², Kim Hee Jin³

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Dortmund University of Technology, Dortmund 44227, Germany)

(3. Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan-si 330-825, Korea)

Abstract: The effect of flux-cored ingredients and welding parameters on porosity sensitivity of ENiCrMo3T0-4 flux-cored wires was investigated by stereomicroscope and optimum design software. Results show that porosity sensitivity is reduced with the ratio of $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$, $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$, and $(\text{TiO}_2+\text{ZrO}_2+\text{SiO}_2)/\text{MnO}$ decreasing in flux-cored ingredients. The shielding gas flow rate has little influence on number of needle holes on weld surface. Wormhole in weld surface is formed when the flow rate is too low. The number of needle holes and porosity sensitivity of weld metal are the lowest when welding voltage is 25 V, welding current 160 A and electrode stick-out 20 mm. Porosity sensitivity of weld metal can be reduced by enlarging solid-liquid phase temperature interval and hydrogen solubility in high temperature slag.

Key words: Nickel-based flux-cored wire; flux-cored ingredients; welding parameters; porosity sensitivity

Corresponding author: Li Zhuoxin, Ph. D., Professor, School of Material Science & Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China, Tel: 0086-10-67396168, E-mail: zhxlee@bjut.edu.cn