

3种镍基合金晶间腐蚀敏感性对比

姬茹一, 贾雅妮

机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司 上海 201620

摘要: 镍基合金具有较高的强度和良好的氧化性、抗腐蚀能力,但在特定环境下,易发生晶间腐蚀。由于晶间腐蚀是一种危害性很大的局部腐蚀现象,会导致设备的突然破坏,因此选择Inconel625、Inconel825、Inconel690共3种镍基合金,在硫酸铁-硫酸溶液中试验120h,计算腐蚀速率,并对3种耐蚀合金腐蚀速率进行对比。试验结果表明:镍基合金具有良好的耐晶间腐蚀性能,3种材料的抗硫酸铁-硫酸晶间腐蚀性能由高到低依次为Inconel690、Inconel825、Inconel625。

关键词: 镍基合金;晶间腐蚀;腐蚀速率;化学成分;硫酸铁-硫酸

Comparative study on intergranular corrosion sensitivity of three nickel-based alloys

Ji Ruyi, Jia Yani

Machine Industry Shanghai Lanya Petrochemical Equipment Inspection Institute Co., Ltd., Shanghai 201620, China

Abstract: Nickel-based alloys, as one of the representatives of special Nickel-based alloys, as one of the representatives of special stainless steels, have high strength and excellent oxidation resistance and corrosion resistance. However, under specific environments, intergranular corrosion can occur easily. Intergranular corrosion is a localized corrosion phenomenon with great hazards, which can lead to sudden equipment failure. Therefore, this paper selects Inconel625, Inconel825, and Inconel690 as three kinds of nickel-based alloys for testing in ferric sulfate-sulfuric acid solution for 120 hours. The corrosion rate is calculated, and the corrosion rates of the three corrosion-resistant alloys are compared. The test results show that nickel-based alloys have good intergranular corrosion resistance. The anti-ferric sulfate-sulfuric acid intergranular corrosion performance of the three materials is ranked as follows: Inconel690, Inconel825, and Inconel625.

Keywords: nickel-based alloy; intergranular corrosion; corrosion rate; chemical composition; ferric sulfate-sulfuric acid

1 序言

随着科技的飞速发展,不锈钢在各个领域的应用越来越广泛。然而,在某些特殊领域,不锈钢已经无法满足需求,必须使用镍基合金。目前,镍基

合金已经成为制造先进航空发动机和燃气轮机叶片的主要材料,同时也在核电设备上得到广泛应用^[1]。世界各国都十分重视对镍基合金的研制与开发应用。近年来,随着经济的不断发展,工业领域的层

通信作者:贾雅妮,工程师,主要负责压力容器、压力管道检验检测、失效分析、腐蚀以及型式试验相关工作,

E-mail: jiayani@shlanya.com.cn。

次不断提高，镍基合金的需求量稳步增长。世界各国都十分重视对镍基合金的研制与开发应用。镍基合金的研究发展具有重要的指导意义，它不仅有助于提高航空航天、核电等领域的技术水平，还能推动相关产业的发展。

镍基合金具有较高的强度和良好的氧化性、抗腐蚀能力。镍基耐蚀合金是重要的耐蚀材料^[2]，与一般的不锈钢、其他耐蚀金属、非金属材料相比，在各种腐蚀环境（包括电化学腐蚀和化学腐蚀）中，具有耐各种形式腐蚀破坏（包括全面腐蚀、局部腐蚀和应力腐蚀）的能力，并且兼有很好的力学性能及加工性能，其综合耐蚀性远比不上不锈钢和其他耐蚀金属材料优良，尤其适用于现代工业技术下苛刻的介质环境。

镍基合金作为一种高性能耐蚀材料，在许多领域被广泛应用。但由于镍基合金等材料经过焊接、热处理或者高温环境中使用后，会发生敏化现象，造成C元素与Cr元素在晶界处形成碳化物，引起晶界附近出现严重贫铬现象，从而使晶界耐蚀性下降，因容易发生晶间腐蚀而导致失效。而晶间腐蚀是一种危害性很大的局部腐蚀现象，使晶粒间丧失结合力，大大降低金属的机械强度。而腐蚀发生后金属表面仍然保持一定的金属光泽，不易检查发现，往往造成设备的突然破坏，危害极大^[3]。因此，在使用镍基合金材料时需要进行晶间腐蚀试

验，以确定材料的化学成分、热处理或者其他热加工工艺是否会引起晶间腐蚀敏感性^[4]。

本文通过对Inconel625、Inconel825、Inconel690共3种不同镍基合金进行化学成分分析及硫酸铁-硫酸晶间腐蚀试验，对3种不同镍基合金的腐蚀速率进行对比，并对结果进行分析。

2 试样准备

试验样品由某钢管厂提供，牌号为Inconel625、Inconel825、Inconel690镍基合金无缝钢管，对其进行编号，分别为121、127、132，样品规格见表1。

表1 样品规格

材料牌号	编号	规格/mm
Inconel625	121	$\phi 19 \times 2$
Inconel825	127	$\phi 19 \times 2$
Inconel690	132	$\phi 25 \times 2$

3 晶间腐蚀性能分析

3.1 化学成分分析

使用直读光谱仪对3个牌号的钢管依据GB/T 38939—2020《镍基合金多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱分析法（常规法）》进行化学成分分析，分析结果见表2。从表2可看出，Inconel625、Inconel825、Inconel690镍基合金的化学成分均符合ASME II Part B（2021）中的要求。

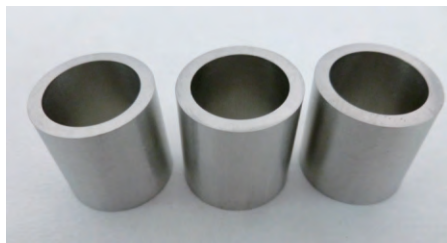
表2 样品化学成分分析（质量分数）（%）

元素	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Al	Fe	Nb+Ta
Inconel625	0.061	0.0009	0.002	0.04	0.04	22.39	62.42	9.03	—	0.15	0.15	1.90	3.53
Inconel825	0.028	0.0001	0.002	0.35	0.74	20.80	38.15	2.68	1.7	0.67	0.15	余量	—
Inconel690	0.026	0.0005	0.002	0.10	0.34	28.35	59.20	—	—	0.18	0.14	10.29	—

3.2 晶间腐蚀试验分析

晶间腐蚀试验按GB/T 15260—2016《金属和合金的腐蚀 镍合金晶间腐蚀试验方法》^[5]A法进行，将236mL硫酸缓慢加入到400mL蒸馏水配置成硫酸溶液。在硫酸溶液中加入25g硫酸铁配制成试验溶液。在1L带冷凝器的磨口烧瓶底部放置玻璃支架，缓慢倒入试验溶液，加入Al₂O₃防止暴沸，安装冷凝器并通入冷却水并加热，把试样放到沸腾试验溶液中的玻璃支架上，在沸腾的情况下持续120h。

（1）材料处理 将3种材料的试样表面进行加工，将试样用砂纸逐级打磨，试样表面粗糙度为0.70 μm。对试样表面进行清理、酸洗、冲洗、干燥等，以去除表面含碳的润滑剂、油脂等，之后对试样进行敏化处理（试样必须在敏化设备到温后装入），然后将试样清洗、干燥后称重并测量尺寸。试验结束后将试样表面用蒸馏水冲洗，再在丙酮中清洗并去除腐蚀产物，干燥称重。试验前后表面形貌如图1～图3所示。

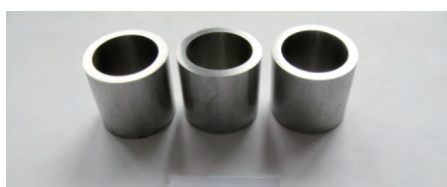


a) 试验前



b) 试验后

图1 Inconel625样品表面形貌

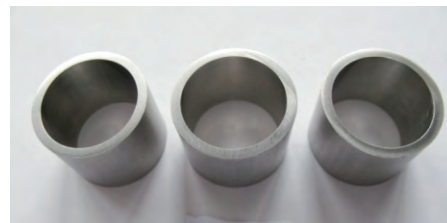


a) 试验前

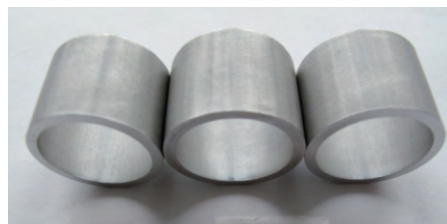


b) 试验后

图2 Inconel825样品表面形貌



a) 试验前



b) 试验后

图3 Inconel690样品表面形貌

(2) 腐蚀速率的计算 腐蚀速率的计算公式为

$$v = \frac{K \Delta m}{A t \rho}$$

式中 v ——腐蚀速率 (mm/a) ;

K ——常数, 8.76×10^4 ;

t ——暴露时间 (h) ;

A ——暴露面积 (cm^2) ;

Δm ——失重 (g) ;

ρ ——密度 (g/cm^3) , 取 $\rho = 8.44 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

通过测量钢管的外径、内径及长度计算表面积, 以及试验前和试验后的重量来计算腐蚀速率, 3种不同牌号镍基合金的腐蚀速率结果见表3~表5。

从表3~表5可知, 在相同条件下, Inconel625的平均腐蚀速率为1.04mm/a, Inconel825的平均腐

表3 Inconel625晶间腐蚀速率

编号	外径/mm	内径/mm	长度/mm	表面积 / cm^2	试验前重 /g	试验后重/g	失重/g	腐蚀速率/ (mm/a)	
								单个值	平均值
121-1	18.94	14.75	15.83	18.96	14.8983	14.6954	0.2029	0.92	1.04
121-2	18.94	14.69	16.89	20.07	16.0230	15.8428	0.1802	0.78	
121-3	19.21	14.63	16.59	20.06	17.1103	16.7787	0.3316	1.43	

表4 Inconel825晶间腐蚀速率

编号	外径/mm	内径/mm	长度/mm	表面积 / cm^2	试验前重 /g	试验后重/g	失重/g	腐蚀速率/ (mm/a)	
								单个值	平均值
127-1	19.00	14.61	16.81	20.06	15.9335	15.7083	0.2252	0.97	0.92
127-2	18.98	14.65	16.87	20.10	15.6865	15.5075	0.1790	0.77	
127-3	19.02	14.57	17.46	20.76	16.3052	16.0625	0.2427	1.01	

表5 Inconel690晶间腐蚀速率

编号	外径/mm	内径/mm	长度/mm	表面积 / cm^2	试验前重 /g	试验后重/g	失重/g	腐蚀速率/ (mm/a)	
								单个值	平均值
132-1	25.03	20.90	18.41	29.53	22.5492	22.3956	0.1536	0.45	0.44
132-2	25.07	20.58	18.21	29.32	22.5121	22.3637	0.1484	0.44	
132-3	25.08	20.76	18.21	29.89	22.4628	22.3073	0.1555	0.45	

蚀速率为0.92mm/a, Inconel690的平均腐蚀速率为0.44mm/a。

4 结果分析

随着镍基合金中C含量的增加, C与Cr在晶界处形成碳化物析出, 降低了晶界及附近的固溶Cr含量, 在晶界及附近形成“贫铬区”的机会增大, 导致产生晶间腐蚀的倾向增加, 因此C是抗晶间腐蚀最有害的元素^[6, 7]。贫铬的晶界为小面积的阳极, 非贫Cr的晶内为大面积的阴极, 形成了小阳极-大阴极的腐蚀微电池, 导致晶界快速腐蚀。因此, 减少C含量, 可以减少和避免形成铬的碳化物, 从而降低形成晶间腐蚀的倾向。由化学成分分析可知, Inconel625的C含量较高, 而Inconel825和Inconel690的C含量较低且比较接近, 根据C含量分析, Inconel625的腐蚀速率应大于其他两种材料。

当Cr、Mo含量较高时, 晶界 σ 相析出并溶解, 在晶界形成FeCr或MoFe金属间化合物组成的 σ 相^[8, 9]。因此降低Cr、Mo含量, 可以降低形成晶间腐蚀的倾向。由化学成分分析可知, Inconel625的Cr、Mo含量最高, Inconel690介于中间, Inconel825的Cr、Mo含量最低, 若只考虑Cr、Mo含量, 则Inconel625的腐蚀速率应最大, Inconel690次之, Inconel825的腐蚀速率应最小。Si可以降低C的溶解度, 促进C的扩散和碳化物的析出, 有利于产生晶间腐蚀, Inconel690的Si含量与Inconel625的含量接近, 低于Inconel825, 故Inconel825的腐蚀速率应最大。

当Ti、Nb含量较高时, 会在晶界形成TiC、NbC等, 在强氧化性介质条件下, σ 相发生严重的选择性溶解。降低Ti、Nb含量, 可以降低形成晶间腐蚀的倾向。由化学成分分析可知, Inconel625的Ti、Nb含量最高, Inconel690介于中间, Inconel825的Ti、Nb含量最低, 只根据Ti、Nb含量分析, Inconel625的腐蚀速率应最大, Inconel825次之, Inconel690的腐蚀速率应最小。

由以上分析可以看出, Inconel625的腐蚀速率应该最大, 而Inconel690和Inconel825的腐蚀速率应该综合考虑。而根据腐蚀速率计算, 得出的结果也是Inconel625的腐蚀速率最大, Inconel825次之, Inconel690的腐蚀速率最小。

5 结束语

结合试验数据及理论分析, Inconel625、Inconel690、Inconel825镍基合金材料硫酸铁-硫酸晶间腐蚀速率都不太高, 具有良好的耐晶间腐蚀性能。影响晶间腐蚀的因素比较多, C含量增加, 会使晶界及附近形成贫铬区, 造成腐蚀速率增大, 而Cr、Mo、Ti、Nb含量增大会使晶界 σ 相析出, 造成腐蚀速率增大。对比3种材料, 其抗硫酸铁-硫酸晶间腐蚀性能由高到低依次为Inconel690、Inconel825、Inconel625。

参考文献:

- [1] 宋亚婵, 邵继东. 工程设计中NS3102镍基合金的技术要点[J]. 河南化工, 2021, 38 (1): 55-57.
- [2] 谢建昌. 不同加热温度对625镍基合金晶间腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53 (6): 47-49.
- [3] 王兆东, 韩玉改, 李二兴. CO₂气体保护药芯焊丝电弧焊堆焊Ni625晶腐试验失效分析[J]. 化工管理, 2023 (33): 148-151.
- [4] 刘晓强, 孟凡江, 徐雪莲, 等. 690合金晶间腐蚀化学浸泡试验方法的适用性[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37 (3): 236-240.
- [5] 全国钢标准化技术委员会. 金属和合金的腐蚀 镍合金晶间腐蚀试验方法: GB/T 15260—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 李艳美, 王明家, 张斌, 等. 碳含量对C-276合金组织及晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11 (4): 56-63.
- [7] 李艳美, 王明家, 江山昱, 等. 超低碳C-276合金敏化处理对显微组织及晶间腐蚀敏感性的影响[J]. 大型铸锻件, 2020 (4): 20-23.
- [8] 林毅, 张春霞, 单爱党, 等. 敏化处理对Incoloy028合金析出相和耐晶间腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (12): 166-169, 176.
- [9] 张岚, 王朝平, 张莹莹, 等. 镍基合金625换热管抗晶间腐蚀试验研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43 (22): 128-131.

MW 20240205