材料科学

DOI:10.3969/j.issn.1002-1639.2026.08.013

溶液温度及氯离子质量分数对夹送辊堆焊合金耐蚀性能的影响

王银军[1],滕宏胤[2],吴索团[2]
(1. 宝钢中央研究院 上海梅山钢铁股份有限公司 技术中心,江苏 南京 210039;
2. 上海梅山钢铁股份有限公司 热轧厂,江苏 南京 210039)

摘要:卷取机夹送辊对带钢热轧机组稳定生产、带钢表面质量的影响很大,采用表面堆焊方法能够提高夹送辊的使用寿命,但需要选择合适的堆焊合金材料。采用动电位极化曲线、电化学阻抗谱、浸泡腐蚀试验,研究了溶液温度和氯离子质量分数对442、224两种夹送辊堆焊合金耐蚀性能的影响。结果表明:溶液温度及氯离子质量分数对442、224堆焊合金的耐蚀性能均存在明显影响;随着温度及氯离子质量分数的提升,两种堆焊合金的耐腐蚀性能均下降;在同等条件下对比,224堆焊合金的点蚀萌生、腐蚀倾向、腐蚀速率明显低于442堆焊合金,浸泡腐蚀试验结果与电化学测试结果基本吻合;选择224堆焊合金更有利于提升夹送辊辊面的耐蚀性、耐磨性。

关键词:夹送辊;堆焊合金;溶液温度;氯离子;极化曲线;阻抗谱;耐蚀性
中图分类号:TG113.23 **文献标志码**:A **文章编号**:1002-1639(2026)08-0070-09

Effects of Solution Temperature and Chloride Ion Mass Fraction on the Corrosion Resistance of Different Surfacing Alloys of Pinch Roller

WANG Yinjun[1], TENG Hongyin[2], WU Suotuan[2]
(1. Technology Center, Shanghai Meishan Iron & Steel Ltd., Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Ltd., Nanjing 210039, China;
2. Hot Rolling Plant, Shanghai Meishan Iron & Steel Ltd., Nanjing 210039, China)

Abstract: The coiler pinch roller has a great influence on the stable production of the hot rolling mill and the surface quality of the hot rolled strip. The surfacing method can improve the service life of the pinch rollers, but it is necessary to choose the appropriate overlay alloy. The work aims to study effects of solution temperature and chloride ion mass fraction on the corrosion resistance of 442 and 224 surfacing alloys of pinch roller by using potentiodynamic polarization curves, electrochemical impedance spectroscopy(EIS) and immersion corrosion test. The results show that the solution temperature and chloride ion mass fraction have obvious effects on the corrosion resistance of 442 and 224 surfacing alloys. With the increase of temperature and chloride ion mass fraction, the corrosion resistance of the two different surfacing alloys decreases. Under the same conditions, the pitting corrosion initiation, corrosion tendency and corrosion rate of 224 surfacing alloy are significantly lower than those of 442 surfacing alloy, and the immersion corrosion test results are basically consistent with the electrochemical test results. The selection of 224 surfacing alloy is more conducive to improving the corrosion resistance and wear resistance of the pinch roller surface.

Key Words: pinch roller; surfacing alloys; solution temperature; chloride ion; polarization curves; impedance spectroscopy; corrosion resistance

夹送辊是带钢热连轧机组卷取机入口前的重要部件,其主要作用是将层流冷却后的高速带钢咬入、建立张力、卷取,夹送辊表面状态、使用寿命对带钢表面质量、热轧机组稳定生产的影响很大[1]。卷取机夹送辊装置主要由一个直径较大的空心上夹送辊和一个直径较小的实心下夹送辊组成,上夹送辊相对于下夹送辊在带钢前进方向偏移一定距离,轧制、层流冷却后的高速带钢经辊道传送至偏心布置的上、下夹送辊后转向,经导向板后进入卷取机组,钢卷稳定卷取时,带钢和夹送辊之间需要较高摩擦系数,保持带钢内部较高张力,通过卷取机助卷辊的配合实现稳定卷取,卷取过程中,带钢周期性对夹送辊的工作辊面产生冲击、磨损[2]。带钢热连轧后的卷取温度一般约为400~780 ℃不等,夹送辊咬入高温带钢时,局部辊面温度迅速上升,随后喷水冷却至约60 ℃,反复承受高温、水冷的交替热循环,夹送辊失效形式主要包括氧化、磨损、粘钢、剥落、腐蚀等[3-9]。由图1可见,使用后的夹送辊表面有明显的氧化、锈蚀、磨损、局部剥落的痕迹。多因素的叠加耦合作用会加快机械零部件表面的腐蚀,缩短其使用寿命[10-12]。堆焊方法、焊后热处理工艺对堆焊合金的成分偏析、显微组织产生重要影响,而堆焊合金的耐蚀性与其成分及显微组织有关。王兆东等[13]通过对比

收稿日期:2025-11-16

作者简介:王银军(1972—),男,博士,高级工程师,研究方向为先进钢铁材料应用.

不同稀释率及热处理制度的合金堆焊层的晶间腐蚀试验,研究了合金堆焊层耐晶间腐蚀的影响因素。徐连勇等[14]采用双环电化学动电位再活化方法研究了合金堆焊层的耐腐蚀性能,对比了不同取样位置的元素分布及相的组成与耐腐蚀性能的关系。苏允海等[15]研究认为 Nb 的含量增加有助于提高 $FeAlCuCrNiNb_x$ 系高熵合金耐腐蚀性能。现有针对夹送辊表面堆焊合金性能的大多数研究主要是耐磨性、抗冲击性[16-20],然而高温、接触应力、磨损、冷却介质等多因素的交互作用对夹送辊表面堆焊合金耐腐蚀性能的影响较大,这方面的研究并未得到关注,因此,研究堆焊合金耐腐蚀性对提高夹送辊的使用寿命很有应用价值。



图 1 夹送辊辊面腐蚀形貌

某带钢热连轧机组卷取机夹送辊原来使用的耐磨堆焊合金是针对控轧空冷工艺(TMCP)生产的较低强度级别带钢,为了适应高强钢、精冲钢、工具钢等钢种的生产工艺,需要选择耐磨、抗冲击、耐腐蚀性能更好的堆焊合金。为研究夹送辊表面堆焊合金的耐蚀性,本文选择某公司生产的 108 打底过渡层焊丝及 442、224 耐磨工作层焊丝,采用步进式圆周埋弧摆动堆焊工艺,焊后对堆焊合金回火热处理,模拟夹送辊表面强化方法分别制备 442、224 堆焊合金,对比不同堆焊合金的硬度、显微组织,应用电化学、浸泡腐蚀的方法研究了堆焊合金的耐腐蚀性能,为夹送辊辊面强化工艺的工业应用提供了依据。

1 试样制备与试验方法

模拟热轧卷取机夹送辊辊面堆焊、热处理加工流程,将外径约 300 mm、壁厚约 20 mm 的 20g 牌号的钢管外壁表面氧化层车削去除,并达到规定形状精度,采用步进式圆周埋弧摆动堆焊专用设备,焊材分别为某公司生产的 108、442、224 焊丝及专用烧结焊剂,堆焊前将 20 g 钢管预热至 200 ~ 300 ℃,步进式圆周堆焊摆动幅度 30 ~ 35 mm,焊接极性采用直流反极,焊接电流、电弧电压分别约为 350 A、35 V,钢管外表面转动线速度约 200 ~ 300 mm/min,先堆焊 1 层厚度约为 2 mm 的 108 过渡层,形成高硬度合金层与较低硬度基体的梯度过渡结构[23],再堆焊 4 ~ 5 层总厚度约 10 mm 的 442 或 224 合金层(分别简称 442、224),所制备堆焊合金样品外观、截面结构如图 2(a)所示。将外壁堆焊后的试验钢管与正常堆焊的夹送辊一起放入 300 kW 专用加热炉,以加热速率约为 1 ℃/min 升温至 530 ± 15 ℃保温 6 ~ 10 h 后,随炉冷却至约 200 ℃,完成试验用的堆焊合金样品的制备。

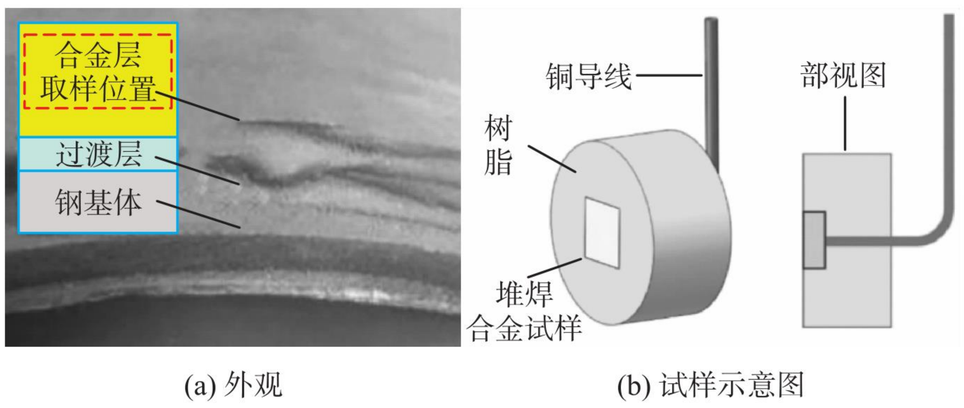
用 ARL4460 火花直读光谱、ICAP7400 等离子发射光谱测试 442、224 堆焊合金的元素含量见表 1。用 EQUOTIP3 便携式硬度计分别测量试验钢管外壁堆焊合金热处理前、后的表面洛氏硬度。

参照图 2(a),采用线切割加工方法,将试验钢管外壁堆焊的 442、224 合金制备多个 10 mm × 10 mm × 5 mm 的测试试样。金相试样采用镶嵌制样,经过打磨、抛光,用体积浓度为 3% ~ 4% 的硝酸酒精对抛光表面腐蚀,用 HIROX KH - 7700 数字式三维视频显微镜观察 442、224 堆焊合金的金相显微组织。

参照图 2(b),电化学测试试样背面钎焊铜导线,其余部分用复合环氧树脂密封,测试前将待测表面用 180# - 1200#碳化硅金相湿式砂纸逐级打磨、抛光。电化学测试体系如图 3 所示,使用德国 Zahner Zennium IM6 电化学工作站,采用三电极体系,堆焊合金试样为工作电极(WE),甘汞电极为参比电极(RE),铂电极为对电极(CE)。动电位极化曲线设置扫描范围相对开路电位为 -1.0 ~ 1.0 V,扫描速率设定为 1 mV/s。电化学阻抗谱(EIS)测试的扫描频率为 10^{-1} ~ 10^5 Hz,交流扰动电压设为 10 mV。溶液温度分别为 25、60 ℃,溶液的 NaCl 质量分数分别为 0.0%(纯水)、2.5%、3.5%和 5.0%,根据公式 $w(Cl^-) = w(NaCl) \times w(Cl^-)/m(NaCl)$,其中 $w(Cl^-)$、$w(NaCl)$ 分别为 Cl^-、NaCl 的质量分数,$m(Cl^-)$、$m(NaCl)$ 分别为 Cl^-、NaCl 的摩尔质量,经计算上述溶液对应的 Cl^- 质量分数分别为 0.0%、1.5%、2.1%和 3.0%(为便于描述,下文用 NaCl 的质量分数替代 Cl^- 质量分数),除溶液温度、Cl^- 浓度差别外,其余电化学测试条件、方法相同,采用电化学工作站的附带软件,用 Tafel 外推法拟合曲线,交流阻抗数据选择 R(C(R(CR)))型等效电路进行拟合。

采用浸泡腐蚀试验方法,将 442、224 两种堆焊合金的电化学测试样品浸泡在 25 ℃的不同 NaCl 质量分数分别为 0.0、2.5、3.5、5.0%的水溶液中,记录浸泡 0、6、12、24、48 h 时的试样表面形貌的变化,采用 HI-

ROX KH－7700 数字式三维视频显微镜观察、分析试样浸泡腐蚀后的表面三维形貌、腐蚀深度。



(a) 外观　　(b) 试样示意图

图 2　堆焊合金外观及电化学试样示意图

表 1　堆焊合金的化学成分　　%

堆焊合金	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(Cr)	w(Ni)	Mo、W、V 等元素总量	w(Fe)
442	0.31	0.72	1.42	4.53	3.25	≤5	Bal
224	0.51	0.865	1.67	7.85	0.05	≤5	Bal

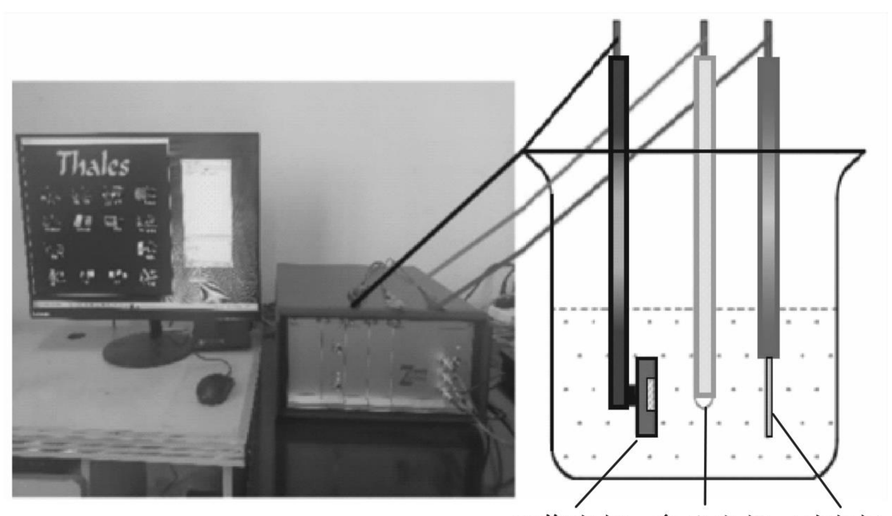


图 3　电化学工作站三电极体系示意图

2　试验结果与分析

2.1　硬度

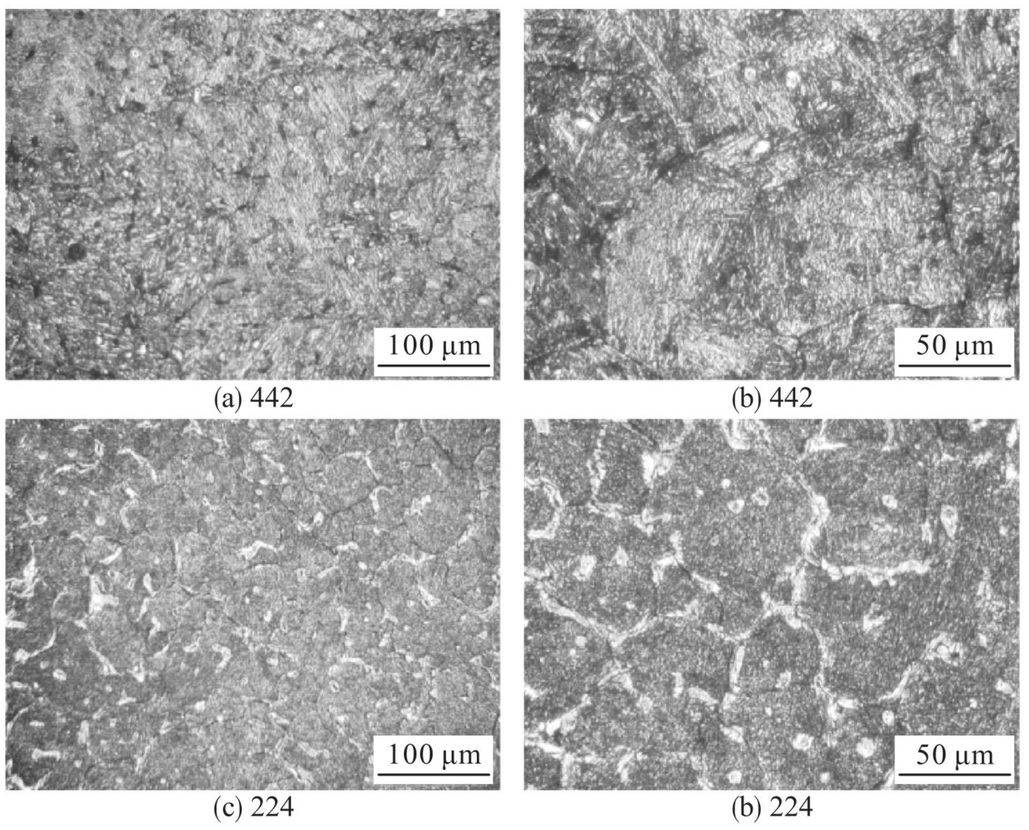
由表 2 可见，经过 530 ±15 ℃保温 6 ~ 10 h 回火热处理，442、224 堆焊合金表面的硬度明显提高，这是由于两种堆焊合金含不同含量的 Cr、Mo、W、V 等强碳化物形成元素，过饱和合金马氏体基体热处理后析出合金碳化物。堆焊合金的硬度取决于显微组织、合金碳化物大小、数量、种类，相比 442 堆焊合金，224 堆焊合金层无论是焊态还是焊后热处理状态，其都具有更高的硬度、更好的耐磨性。

表 2　堆焊合金的表面硬度

堆焊合金	表面硬度平均值 HRC	
	焊态未热处理	530 ±15 ℃热处理
442	47.5	53.0
224	56.5	60.5

2.2　显微组织

由图 4 可见，堆焊合金回火热处理后，因非均匀加热、较快冷却等堆焊产生的残余奥氏体大部分转化为马氏体，442、224 两种堆焊合金的显微组织为马氏体、MC/M_2C 型弥散合金碳化物、少量残余奥氏体，采用相同热处理工艺，由于堆焊合金成分的差异，442 堆焊合金中的残余奥氏体较少，而 224 堆焊合金中的残余奥氏体相对较多，呈网状分布。堆焊合金马氏体基体弥散析出合金碳化物，并且 224 堆焊合金中的合金碳化物更加细小、均匀。回火热处理提高了堆焊合金显微组织均匀性、稳定性，进一步印证了其二次硬化、硬度升高的原因。



(a) 442　(b) 442

(c) 224　(b) 224

图 4　堆焊合金的显微组织

2.3　电化学性能

2.3.1 动电位极化曲线

图 5 为 442、224 堆焊合金在 25、60 ℃纯水中的极化曲线，表 3 为对应的极化曲线参数。

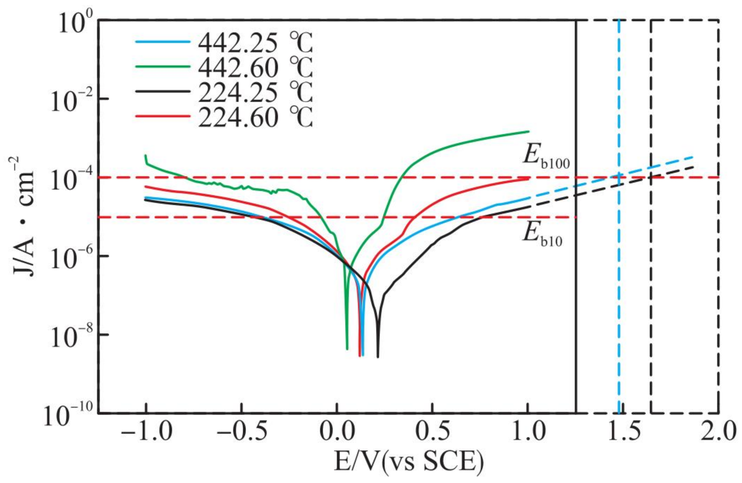


图 5　两种堆焊合金在纯水中的极化曲线

表 3　两种堆焊合金在纯水中的极化曲线拟合结果

堆焊合金	T/℃	E_{corr}/V	E_{b100} 注/V	E_{b10}/V	J_{corr}/μA · cm⁻²
442	25	0.132 7	1.483	0.630	0.123
442	60	0.051 6	0.325	0.256	0.610
224	25	0.213 6	1.655	0.792	0.065
224	60	0.125 3	1.110	0.406	0.119

注：E_{b100}、E_{b10}分别表示电流密度达到 100、10 μA · cm⁻²时的电极电位.

纯水温度 25 ℃时,442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr}分别为 0.132 7、0.213 6 V,点蚀电位 E_{b100}分别为 1.483、1.655V,纯水温度 60 ℃时,442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr}分别为 0.051 6、0.125 3 V,点蚀电位 E_{b100}分别为 0.325、1.110 V,纯水温度从 25 ℃升高到 60 ℃时,442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr}分别降低约 61%、42%,点蚀电位 E_{b100}分别降低约 78%、33%,点蚀电位 E_{b10}分别降低约 59%、49%,自腐蚀电流密度 J_{corr}分别升高约 396%、125%,说明溶液温度的升高导致堆焊合金的自腐蚀倾向、点蚀倾向、腐蚀速率增加,442 堆焊合金耐蚀性下降更加显著。相同温度的纯水介质条件下,相比 442 堆焊合金,224 堆焊合金的 E_{corr}、E_{b100}、E_{b10}较高,J_{corr}较小,其耐腐蚀性能优于 442 堆焊合金。

图 6 为 442、224 堆焊合金在不同温度、不同氯离子浓度的 NaCl 溶液中的 Tafel 极化曲线,表 4 为对应的极化曲线参数。溶液温度 25 ℃时,NaCl 质量分数分别为 2.5%、3.5%、5.0%时,与 25 ℃纯水介质环境相比,随着溶液 Cl^-浓度增加,442 堆焊合金的点蚀电位 E_{b100}分别降低约 98%、100%、102%,自腐蚀电位 E_{corr}分别依次降低约 236%、247%、261%,对应的自腐蚀电流密度 J_{corr}升高至约 5.3 ~ 5.6 μA · cm^{-2},224 堆焊合金的点蚀电位 E_{b100}分别降低约 93%、98%、99%,自腐蚀电位 E_{corr}分别依次降低约 156%、162%、168%,对应的自腐蚀电流密度 J_{corr}升高至约 5.2 ~ 5.4 μA · cm^{-2},这说明,溶液 Cl^-浓度的增加导致两种堆焊合金腐蚀倾向、腐蚀速率显著提高,442 堆焊合金耐腐蚀性能降低更加明显。液温度 60 ℃时,NaCl 质量分数分别为 2.5%、3.5%、5.0%时,与 60 ℃纯水介质环境相比,随着溶液 Cl^-浓度增加,442 堆焊合金的点蚀电位 E_{b100}分别降低约 187%、192%、196%,自腐蚀电位 E_{corr}分别依次降低约 1 014%、1 051%、1 116%,J_{corr}升高至约 5.89 ~ 6.00 μA · cm^{-2},224 堆焊合金的点蚀电位 E_{b100}分别降低约 104%、104%、105%,自腐蚀电位 E_{corr}分别依次降低约 240%、249%、261%,J_{corr}升高至约 5.78 ~ 5.98 μA · cm^{-2},这表明,在溶液温度升高、Cl^-浓度增加的叠加交互作用下,两种堆焊合金的腐蚀倾向、腐蚀速率进一步提高,耐点蚀、耐腐蚀性能进一步下降,在 60 ℃、NaCl 质量分数 5.0%时,两种堆焊合金自腐蚀电流密度差别不大,都表现为较高的腐蚀速率,综合上述不同试验条件的极化曲线参数对比,224 堆焊合金的耐腐蚀性能优于 442 堆焊合金。

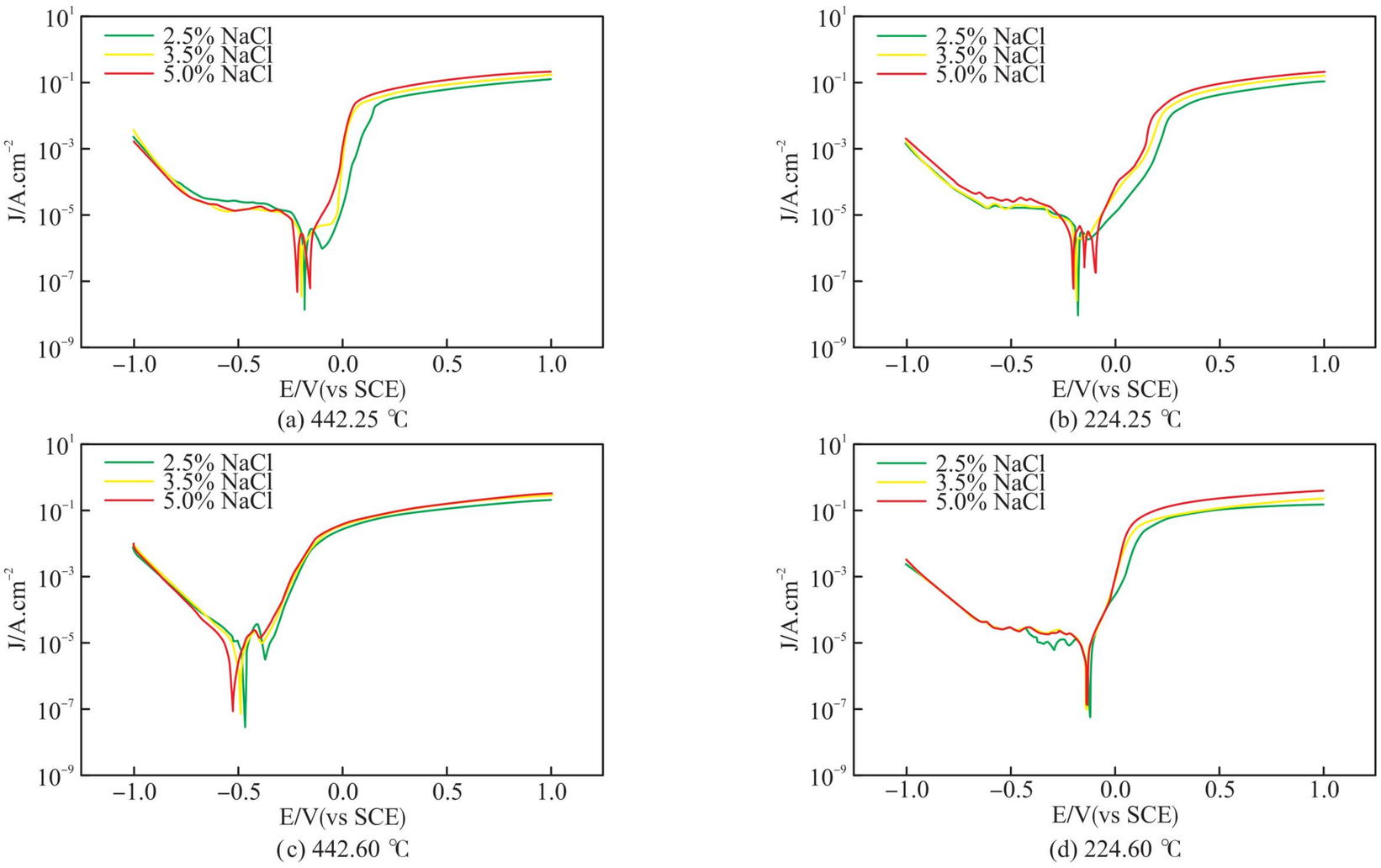


图 6 两种堆焊合金在 NaCl 溶液中的极化曲线

2.3.2 交流阻抗谱

电化学阻抗谱测量、等效电路模型解析是通过电路结构和组件特性研究分析腐蚀系统的腐蚀行为和机理的重要方法[21-23]。图 7 为选择用于拟合堆焊合金的阻抗谱的等效电路,其中 R_S表示溶液的电阻,其与溶液浓度、电导率、温度等因素有关。R_1表示堆焊合金表面电荷转移电阻,反映电化学反应动力学、电极/溶液界面处电荷从溶液向电极转移的阻力,主要受溶液浓

度、温度和电极表面活性等多种因素的影响。R_2表示表堆焊合金表面膜电阻,反映了电荷或离子通过膜层的阻力大小,是膜层致密性和均匀性的重要指标。CPE_1表示堆焊合金表面溶液界面的微电容元件,反映了金属表面与腐蚀介质的接触情况,与界面的活性表面积、离子浓度、离子种类、溶液温度以及界面表面的结构特性相关。CPE_2表示电极表面非理想电容行为的常相位角元件,可以等效为电容器,它的值和钝化膜缺陷数量呈正相关,反映钝化膜的均匀性。

表 4　两种堆焊合金极化曲线的拟合结果

堆焊合金	T/℃	w(NaCl)/%	E_{corr}/V	E_{b100}/V	E_{b10}/V	J_{corr}/μA·cm^{-2}
442	25	0.0	0.132 7	1.483	0.630	0.123
442	25	2.5	−0.181 0	0.030	−0.019	5.325
442	25	3.5	−0.195 0	−0.007	−0.055	5.530
442	25	5.0	−0.213 3	−0.026	−0.102	5.624
442	60	0.0	0.051 6	0.325	0.256	0.610
442	60	2.5	−0.471 4	−0.283	−0.351	5.885
442	60	3.5	−0.490 6	−0.298	−0.398	5.903
442	60	5.0	−0.524 4	−0.311	−0.466	6.001
224	25	0.0	0.213 6	1.655	0.792	0.065
224	25	2.5	−0.119 6	0.120	−0.012	5.180
224	25	3.5	−0.131 6	0.041	−0.036	5.281
224	25	5.0	−0.145 7	0.018	−0.061	5.430
224	60	0.0	0.125 3	1.110	0.406	0.119
224	60	2.5	−0.175 7	−0.041	−0.108	5.778
224	60	3.5	−0.187 2	−0.045	−0.115	5.869
224	60	5.0	−0.201 7	−0.059	−0.125	5.978

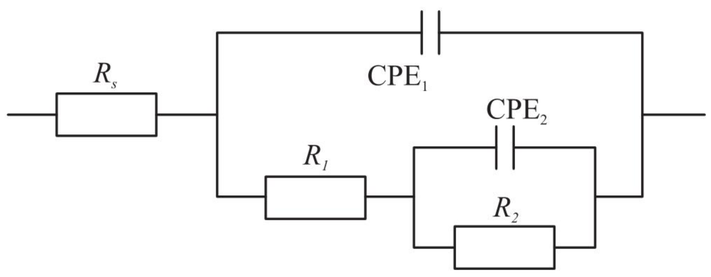


图 7　等效电路图

由图 8、表 5 可知,当纯水温度由 25 ℃升高至 60 ℃时,442、224 堆焊合金的表面电阻 R_1、R_2均减小,CPE_1、CPE_2电容均增大、容抗弧半径减小,容抗弧半径的大小反映了腐蚀过程的阻力大小,半径越大说明其容抗值越高、耐蚀性越强,温度升高导致电化学反应速率提高,堆焊合金的耐蚀性能下降,25、60 ℃的纯水中,224 堆焊合金的阻抗弧半径均大于 442 堆焊合金,耐腐蚀性能更好,原因是 224 堆焊合金的钝化膜稳定性更好,结果与极化曲线腐蚀电位、电流密度的变化趋势一致。

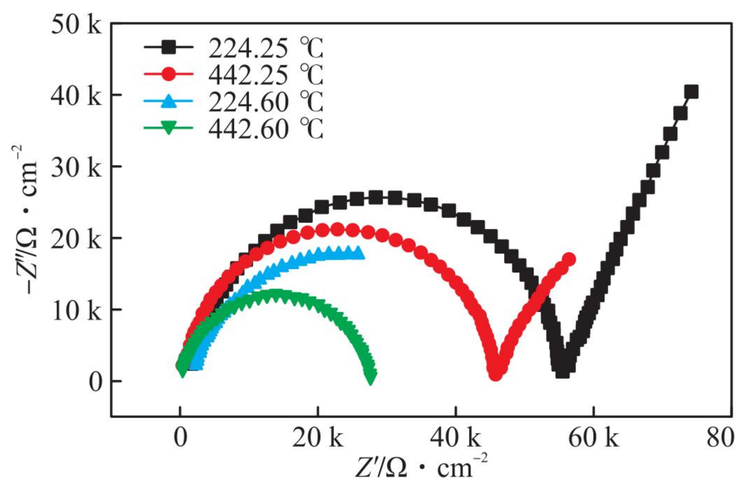


图 8　两种堆焊合金在纯水中的阻抗谱 Nyquist 图

表 5　两种堆焊合金在纯水中的阻抗谱的拟合结果

堆焊合金	T/℃	R_s/Ω·cm^{-2}	R_1/Ω·cm^{-2}	R_2/Ω·cm^{-2}	CPE_1/μF·cm^{-2}	CPE_2/μF·cm^{-2}
442	25	508	4.23×10^{4}	9.86×10^{4}	0.948×10^{-3}	31.8
	60	183	1.92×10^{4}	5.51×10^{4}	1.43×10^{-3}	32.2
224	25	519	4.66×10^{4}	2.88×10^{5}	0.925×10^{-3}	22.9
	60	189	2.88×10^{4}	6.51×10^{4}	1.50×10^{-3}	30.9

由图 9、表 6 可见,在不同温度、不同氯离子质量分数的 NaCl 溶液中,442、224 堆焊合金的容抗弧的半径均随着 Cl^- 质量分数的增大、溶液温度升高而变小,25 ℃的 NaCl 溶液中,随着溶液 Cl^- 质量分数的增大,R_2的变化趋势一致,442 堆焊合金的 R_2由 1.48 kΩ 下降至 1.05 kΩ,224 堆焊合金的 R_2从 4.63 kΩ 降低到 3.28 kΩ,CPE_1、CPE_2电容均增大、容抗减小,说明随着 25 ℃溶液 Cl^- 质量分数的增大,溶液的导电性提高,Cl^- 更容易到达金属表面,基体与腐蚀产物膜的界面处的双电层结构容易优先吸附 Cl^-,由于 Cl^- 的催化机制,当电极局部 Cl^- 浓度超过一定的临界值之后,该区域阳极金属将处在活化状态,导致 224、442 堆焊合金的钝化膜保护能力、耐蚀性能均下降,在 25 ℃、不同氯离子质量分数的 NaCl 溶液中,442 堆焊合金表面钝化膜保护能力、耐蚀性能均低于 224 堆焊合金。60 ℃、不同氯离子质量分数的 NaCl 溶液中,442、224 堆焊合金的容抗弧的半径均随着 Cl^- 浓度的增大而变小,溶液温度由 25 ℃提升至 60 ℃时,随着溶液温度、Cl^- 浓度的交互作用增强,两种堆焊合金的耐腐蚀性能均明显下降,这是由于溶液温度提高,溶液扩散系数增大,Cl^- 对钝化膜破坏能力增强,加剧了 Cl^- 对钝化膜的不均匀性吸附,堆焊合金的耐蚀性能下降,阻抗谱结果进一步验证了极化曲线的腐蚀电位、点蚀电位、电流密度的变化规律相同。

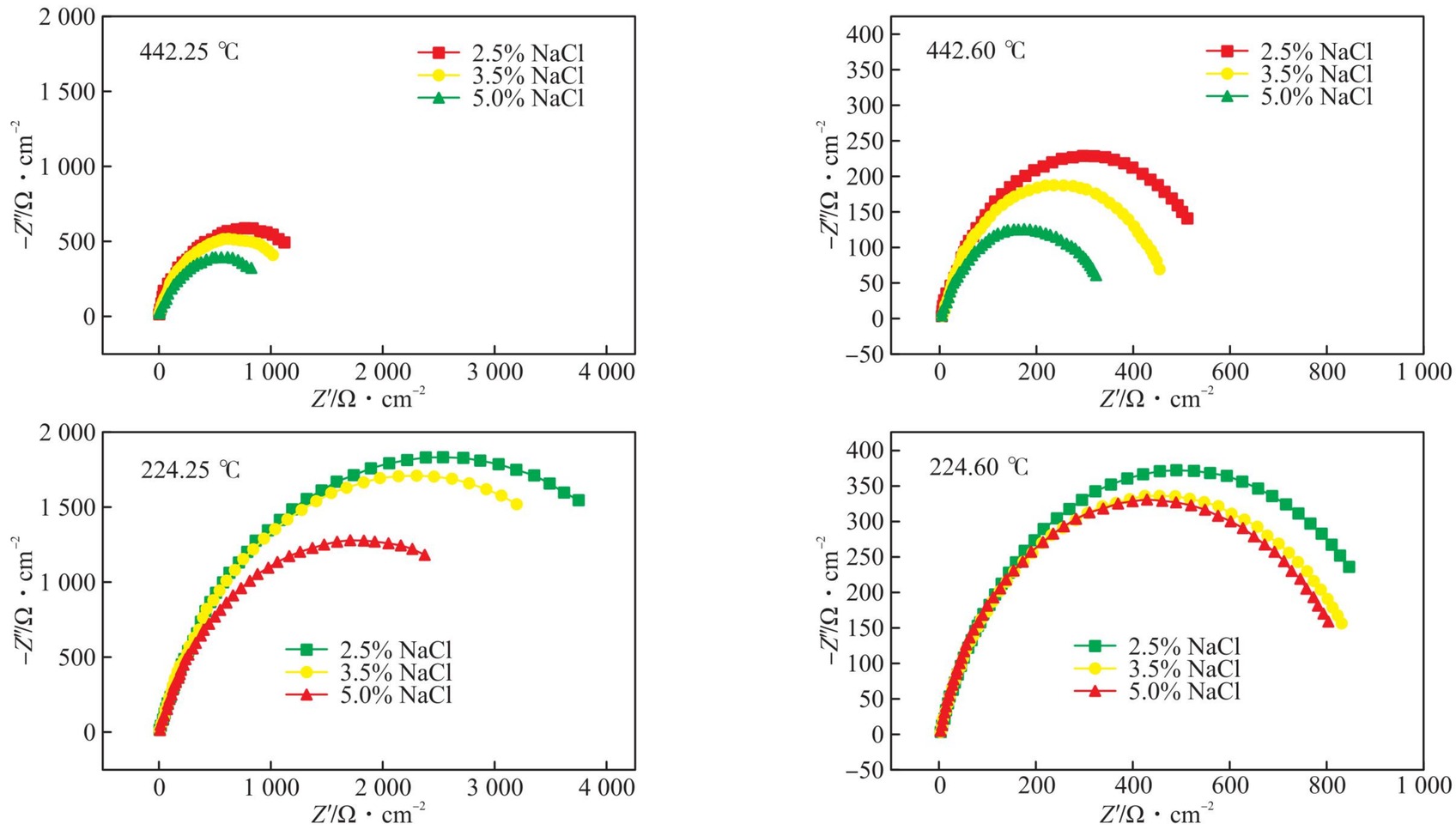


图 9 两种堆焊合金在 NaCl 溶液中的阻抗谱 Nyquist 图

表 6 两种堆焊合金在 NaCl 溶液中的阻抗谱的拟合结果

堆焊合金	T/℃	w(NaCl)/%	R_s/Ω · cm²	R_1/Ω · cm²	R_2/Ω · cm²	CPE_1/μF · cm²	CPE_2/μF · cm²
442	25	2.5	7.37	20.6	1.48×10^3	309	198
		3.5	5.89	7.76	1.31×10^3	343	252
		5.0	4.82	35.7	1.05×10^3	429	289
	60	2.5	5.28	6.41	0.58×10^3	506	270
		3.5	4.29	12.6	0.47×10^3	513	303
		5.0	4.07	18.3	0.33×10^3	519	372
224	25	2.5	7.85	520	4.63×10^3	100	58.3
		3.5	5.89	340	4.19×10^3	146	76.8
		5.0	4.22	294	3.28×10^3	185	89.2
	60	2.5	5.17	4.86	0.98×10^3	273	236
		3.5	4.04	4.75	0.91×10^3	338	295
		5.0	2.51	3.70	0.89×10^3	396	317

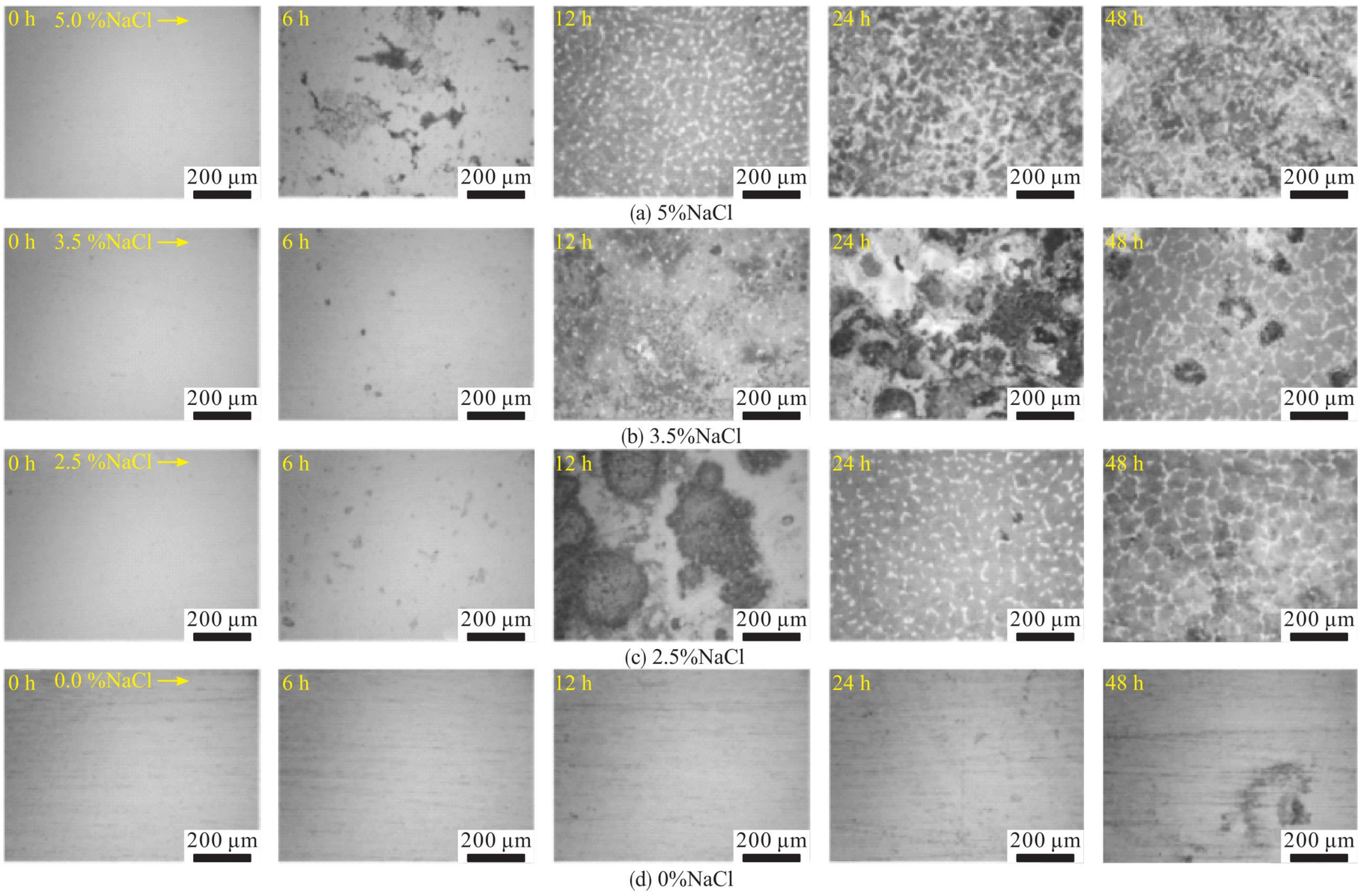
2.4 浸泡腐蚀试验

如图 10 所示,442 堆焊合金在 25 ℃纯水中浸泡 24 h 的表面才会出现局部腐蚀特征,继续浸泡 48 h 后表面会出现点蚀坑,25 ℃ NaCl 溶液中,442 堆焊合金浸泡 6 h 后,随着 NaCl 质量分数从 2.5% 增加至 3.5%、5.0%时,氯离子浓度增加,点蚀坑面积增大,进一步浸泡 12、24、38 h 后,腐蚀表面区域明显扩大,腐蚀程度更加严重。

如图 11 所示,与 442 堆焊合金同比,224 堆焊合金在 25 ℃纯水中浸泡 24 h 的表面会出现较轻微的点蚀坑,浸泡 48 h 后点蚀坑增多、增大,表面腐蚀程度较轻微,溶液中的 NaCl 质量分数为 2.5%时,浸泡 6 h 后表面呈现出腐蚀痕迹,但明显的点蚀坑在浸泡 12 h 后才会出现,而且腐蚀坑尺寸较小,表面整体呈均匀腐蚀形态,当腐蚀时间达到 24 h 时表面出现了较密集的点蚀坑,在 48 h 后腐蚀变得较为严重,随着溶液 NaCl 质量分数增加至 3.5、5.0%,氯离子浓度进一步提升,浸泡 6 h 后就会出现明显的腐蚀痕迹,要浸泡 12 h 才会出现明显的点蚀坑,在同等条件下,相比 442 堆焊合金,224 堆焊合金表面钝化膜抑制点蚀萌生、扩展效果更好。

由图 12 可见,对比 442、224 堆焊合金在 25 ℃、不同 NaCl 质量分数的溶液浸泡 48 h 后的腐蚀表面的三维形貌,在 25 ℃纯水中,442、224 堆焊合金表面最大腐蚀深度分别为 7.599、3.513 μm。溶液 NaCl 质量分数增大到 2.5%、3.5%、5.0%时,442 堆焊合金表面最大腐蚀深度均随之增加,分别约为 43、40、31 μm,而 224 堆焊合金表面最大腐蚀深度分别约为 15、22、56 μm。腐蚀表面三维形貌及腐蚀深度数据表明,随着溶液 Cl^- 质量分数的增加,两种堆焊合金表面的腐蚀倾向均

明显增大,224 堆焊合金的耐点蚀、局部腐蚀性能明显优于 442 堆焊合金,这与电化学测试结果基本吻合。



(a) 5%NaCl

(b) 3.5%NaCl

(c) 2.5%NaCl

(d) 0%NaCl

图 11 浸泡腐蚀后的 224 堆焊合金表面形貌

2.5 讨论

从硬度、金相显微组织看,经过 530 ± 15 ℃ 保温 6 ~ 10 h 回火热处理的 442、224 两种堆焊合金析出碳化物,残余奥氏体减少,组织均匀性得到改善,不仅提高了材料硬度、耐磨性,也减少了使用过程中由于组织应力形成裂纹的几率,均匀的组织有利于形成均匀、致

密的钝化膜能够提高材料的耐蚀性。224 堆焊合金具有更高的硬度、更好的耐磨性。

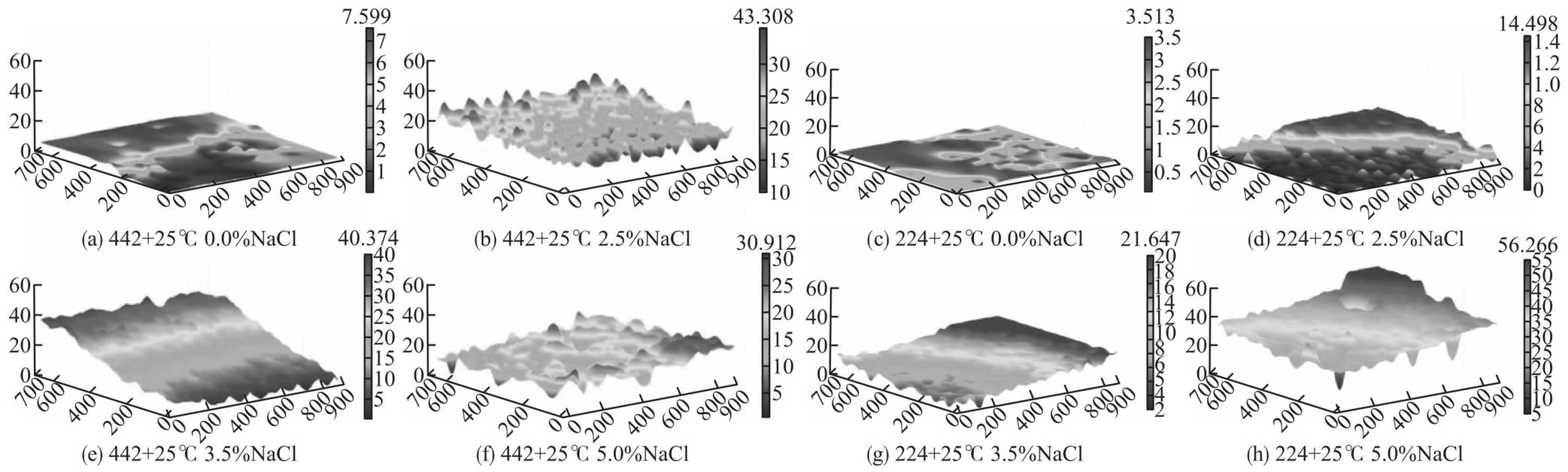


图 12 浸泡腐蚀 48 h 后的堆焊合金三维表面形貌

从电化学试验结果看，溶液温度及氯离子质量分数对 442、224 堆焊合金的耐蚀性能均有明显影响。随着温度及氯离子质量分数的提升，两种堆焊合金的耐腐蚀性能均下降。工业化带钢热连轧生产中，夹送辊表面冷却水介质的温度接近 60 ℃，冷却水 Cl^- 质量分数的日常取样检测波动峰值有时比控制目标峰值偏高一个数量级，而冷却水与高温钢板接触界面有强烈汽化产生，局部 Cl^- 质量分数实际会比控制目标峰值偏更高数量级。60 ℃纯水中的 442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr} 分别为 0.051 6、0.125 3 V，点蚀电位 E_{b100} 分别为 0.325、1.110 V，60 ℃ 的 2.5% NaCl 溶液（1.5%Cl^-）中，442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr} 分别为 −0.471 4、−0.175 7 V（与 60 ℃纯水介质环境对比，分别降低 1 014%、240%），点蚀电位 E_{b100} 分别为 −0.283、−0.041 V（与 60 ℃纯水介质环境对比，分别降低 187%、104%），这表明，在模拟夹送辊冷却水介质温度、Cl^- 质量分数的环境中，224 堆焊合金的耐蚀性优于 442 堆焊合金，进一步通过浸泡腐蚀试验也得到证实。

从夹送辊的工况条件看，冷却水 Cl^- 质量分数存在波动，咬钢时实际辊面温度远高于 60 ℃，夹送辊表面主要承受快节奏的磨损、氧化、腐蚀等多因素交互作用，并且因此磨损、腐蚀产生的辊面合金损失量应远高于实验室浸泡腐蚀试验结果。要控制夹送辊辊面的合金损失量，延长夹送辊使用寿命，需要有效控制、降低机组循环冷却水中氯离子的含量和提升辊面合金的耐腐蚀性，从耐磨、耐蚀性看，224 堆焊合金优于 442 堆焊合金。224 堆焊合金含有更多的 C 及形成碳化物的 Cr、Mo、W、V 等微合金元素，有利于通过热处理产生二次硬化，其中 Cr 含量是 442 合金中 Cr 含量的约 1.5 倍，有利于致密钝化膜的形成，但现有工艺路径所制备的 224 堆焊合金马氏体组织呈现网状残余奥氏体。这表明，通过堆焊、热处理工艺调整进一步改善堆焊合金显微组织，实现堆焊合金的耐磨、抗冲击、耐蚀性能提高，亟需进一步开展相关研究。

3 结 论

（1）溶液温度及氯离子质量分数对 442、224 堆焊合金的耐蚀性能均存在明显影响，随着温度及氯离子质量分数的提升，两种堆焊合金的耐腐蚀性能均下降，在同等条件下对比，224 堆焊合金的点蚀萌生、腐蚀倾向、腐蚀速率明显低于 442 堆焊合金，浸泡腐蚀与电化学测试的结果基本吻合。

（2）60 ℃纯水中的 442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr} 分别为 0.051 6、0.125 3 V，点蚀电位 E_{b100} 分别为 0.325、1.110 V，60 ℃ 的 2.5% NaCl（$w(Cl^-)$ 为 1.5%）溶液中，442、224 堆焊合金的自腐蚀电位 E_{corr} 分别为 −0.471 4、−0.175 7 V，点蚀电位 E_{b100} 分别为 −0.283、−0.041 V，这说明模拟夹送辊冷却水介质环境的 224 堆焊合金的耐蚀性优于 442 堆焊合金。

（3）选择 224 堆焊合金更有利于提升夹送辊辊面的耐蚀性、耐磨性，现有工艺制备的 224 堆焊合金马氏体组织出现网状残余奥氏体，为进一步提高堆焊合金的综合性能，延长使用周期，堆焊、回火热处理的工艺参数还需进一步优化。

参考文献

[1] 王银军，吴索团，滕宏胤. 热轧卷取机夹送辊表面强化的应用研究综述[J]. 工业加热，2024，53(12)：1 −5.
[2] 李文，赵磊，刘宁，等. 夹送辊在热轧带钢卷取中的应用及改进[J]. 四川冶金，2014，36(5)：19 −22.
[3] 李瑞，张亮亮，魏建波，等. 卷取温度和随后的冷却方式对 65Mn 钢板表面质量的影响[J]. 上海金属，2023(45)：45 −49.
[4] 李宁，杨涛. 马银涛. 热轧带钢精轧辊缝冷却水的应用分析

及其改造[J]. 轧钢,2023, 40(5): 80 – 85.
[5] 魏兵, 杨奕, 韩斌, 等. 层流冷却水 Cl^- 浓度和 pH 值对热轧带钢表面质量的影响[J]. 轧钢,2016, 33(2): 20 – 23.
[6] 李子正, 刘芦轩, 尹宝良,等. 热连轧机组轧辊温度场及热辊型[J]. 钢铁,2024, 59(2): 111 – 118.
[7] 付文鹏. 辊面氧化膜局部保留及其对粗轧板形的影响探讨[J]. 轧钢,2022, 39(5): 99 – 102.
[8] Zhao J, Wang X, Yang Q, et al. Mechanism of lateral metal flow on residual stress distribution during hot strip rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021 (288): 116 838.
[9] Lee Y, Yi K. Alleviation of high – temperature oxidation and cracking of water – cooled roll for hot – rolling steel[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(12): 5 787 – 5 796.
[10] 李蕾. 强韧类石墨碳基薄膜材料的设计制备与磨蚀行为研究[D]. 宁波: 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 2018.
[11] 曾群锋,许雅婷,林乃明. 304 不锈钢在人工海水环境中的腐蚀磨损行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 194 – 202.
[12] 巫业栋, 杨英, 张世宏,等. Ni 含量对 NiCrN 涂层腐蚀磨损机理的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 63 – 72.
[13] 王兆东, 韩玉改. 李二兴. CO_2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.
[14] 徐连勇, 王成, 杨连河, 等. P110 套管内壁 CMT/P 堆焊 Inconel 625 合金的组织及性能研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(14): 159 – 168.
[15] 苏允海, 梁学伟, 邓越, 等. FeAlCuCrNiNbx 系高熵合金堆焊层的组织及性能分析[J]. 焊接学报,2020, 41(4): 38 – 43,50,99.
[16] 滕宏胤,王银军,吴索团. 不同材料夹送辊堆焊层退火处理后的组织及性能对比[J]. 金属热处理, 2025, 50(1): 155 – 162.
[17] 韩丽梅,李丽,田猛. Cr – Mo – Ni 系和 Cr – Mo – W – V 系药芯焊丝堆焊层的组织和耐磨性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(10): 62 – 66.
[18] 东升. 卷取机夹送辊表面堆焊层组织性能研究[J]. 冶金设备, 2020, 257(1): 21 – 25.
[19] 刘士彬,杜江伟,陈亚通,等. 热轧带钢卷取机夹送辊修复材料与再制造工艺研究[J]. 焊管, 2020, 43(8): 65 – 68.
[20] 吕艳春. 热轧卷取机夹送辊表面堆焊修复技术[J]. 中国设备工程, 2016(4): 53 – 64.
[21] 张莹莹,刘政军,张琨. 药芯焊丝 CO2 气体保护焊接 2205 不锈钢焊缝的组织与耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(2): 60 – 64.
[22] 李禅, 王庆田, 杨承刚, 等. 904L 超级奥氏体不锈钢在模拟核电一回路环境中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(3): 716 – 724.
[23] 滕鹏,钟锦岩,匡效禹,等. 超高强度不锈钢 10Cr13Co13Mo5Ni3W1VE 微观组织对局部腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2024, 52(5): 103 – 116.

(上接第 69 页)

参考文献

[1] 吴奕滨,龚俊杰,沈星,等. 航空制件燃气热处理炉的炉内温度均匀性[J]. 材料与冶金学报,2025,24(1):62 – 69.
[2] GB/T 9452—2023 热处理炉有效加热区测定方法[S].
[3] 赵振兴. 关于热处理炉应用与有效加热区检测的探讨[J]. 冶金与材料,2023,43(1):29 – 31.
[4] 王翔,国新春,朱明,等. 提高热处理加热炉炉温均匀化的途径[J]. 山西冶金,2021,44(5):185 – 186.
[5] 何飞飞,黄金燕,刘魏魏,等. 超大型热处理炉满载方式有效加热区的温度验证[J]. 计量与测试技术,2021,48(1): 69 – 70,74.
[6] 张鹏,吉玖男,范志山,等. 热处理炉控制参数调节方法的技术探讨[J]. 工业加热,2020,49(3):45 – 48.
[7] 张国栋. 热处理炉有效加热区保温精度测量结果的不确定度评定[J]. 铝加工,2018(4):53 – 55.
[8] 杨新圆,吕国义,陈炜,等. 现行热处理炉测试技术标准的比较分析[J]. 计测技术,2017,37(5):34 – 39,43.
[9] 冯维华. 浅谈热处理炉有效加热区测定中的几个时间点[J]. 计测技术,2017,37(4):61 – 63.
[10] 王军,柴俊彬. 关于新版 HB5425《航空制件热处理炉有效加热区测定方法》标准使用建议[J]. 金属加工(热加工), 2014(增刊 2):199 – 202.
[11] 马伟,刘晓晗,丁东,等. 改善航空制件专用热处理炉温场[J]. 金属加工(热加工),2013(3):28 – 30.