引用格式：李广，付一川，喇培清，等. 光热发电用不锈钢的熔盐腐蚀评价及机理[J]. 材料工程，2026，54(4)：122-137.
LI Guang，FU Yichuan，LA Peiqing，et al. Corrosion assessment and mechanisms of stainless steel in molten salt for solar thermal power generation[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：122-137.

光热发电用不锈钢的熔盐腐蚀评价及机理

李　广，付一川，喇培清，石　玗*
（兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，兰州 730050）

摘要：光热发电系统中热熔盐储罐、传热管道、换交换器、阀门和泵等构件主要采用不锈钢。熔盐具有优异的热物理性质，然而作为光热发电中的热能传储介质，其对金属材料具有强烈腐蚀作用。本文综述了熔盐环境中不锈钢的腐蚀评价及机理。首先介绍了不锈钢在光热发电系统中的应用以及在熔盐中的腐蚀评价，并总结归纳了不锈钢的主要熔盐腐蚀类型及其在硝酸盐、碳酸盐和氯盐等熔盐中的腐蚀机理。奥氏体不锈钢在太阳盐中满足光热电站结构材料腐蚀速率要求，含铝不锈钢在碳酸盐中具有更优异的耐蚀性，310不锈钢可适用于惰性气氛保护的纯化氯盐中。熔盐驱动腐蚀的机制很复杂，不锈钢的熔盐腐蚀主要取决于盐阴离子种类，在含氧阴离子盐和卤化物盐中归纳为熔盐酸碱理论，其中氯盐腐蚀还包括活化氧化理论。最后讨论了气氛、杂质和温度等影响熔盐腐蚀性的电化学腐蚀行为，指出氯盐纯化可以大幅度降低对金属材料的腐蚀。含铝不锈钢在含氧阴离子盐中可以形成更稳定的Al_2O_3钝化膜，能有效地防止铬、铁的溶解以及腐蚀性杂质的渗透，是耐熔盐腐蚀不锈钢的主要研究方向。

关键词：光热发电；熔盐储能；熔盐腐蚀；熔盐酸碱理论；活化氧化理论；氯盐纯化；含铝不锈钢
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000094　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000094
中图分类号：TG171　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0122-16

Corrosion assessment and mechanisms of stainless steel in molten salt for solar thermal power generation

LI Guang，FU Yichuan，LA Peiqing，SHI Yu*
（State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metal，Lanzhou University of Technology，Lanzhou 730050，China）

Abstract：Stainless steel is mainly used for components such as thermal molten salt tanks，heat transfer pipes，heat exchangers，valves，and pumps in solar thermal power generation systems. Molten salt，with its excellent thermophysical properties，serves as the heat transfer and storage medium in solar thermal power generation. However，molten salt exhibits strong corrosive properties towards metal materials. This paper provides an overview of the corrosion assessment and mechanisms of stainless steel in molten salt environments. Firstly，the application of stainless steel in solar thermal power generation systems and its corrosion evaluation in molten salt are introduced. Subsequently，the main corrosion types of stainless steel in molten salt，as well as the corrosion mechanisms in nitrate，carbonate，and chloride salts，are summarized. Austenitic stainless steel meets the corrosion rate requirements for structural materials in solar salt，aluminum-containing stainless steel exhibits superior corrosion resistance in carbonate salts，and 310 stainless steel is suitable for use in purified chloride salts under inert atmosphere protection. The corrosion of stainless steel in molten salt mainly depends on the types of salt anions. Corrosion in salts containing oxygen anions and halide salts is categorized under the molten salt acid-base theory，while chloride salt corrosion also involves the activation-oxidation theory. Finally，the electrochemical corrosion behaviors of atmosphere，impurities and temperature that affect the corrosiveness of molten salt are discussed，and it is pointed out that chloride salt purification can greatly reduce the corrosion of metal materials. Aluminum-

containing stainless steel can form a more stable $A1_2O_3$ passivation film in the oxygenated anionic salt, which can effectively prevent the dissolution of chromium and iron and the penetration of corrosive impurities, which is the main research direction of molten salt corrosion-resistant stainless steel.

Key words: solar thermal power generation; molten salt energy storage; molten salt corrosion; molten salt acid-base theory; activation-oxidation theory; chloride salt purification; aluminum-containing stainless steel

光热发电具有电力输出稳定、可靠和灵活可调等特性，不仅可快速高效地参与电网调峰，还能与风电、光伏等清洁能源互补运行，是极具发展前景的可再生能源发电技术。“十四五”可再生能源发展规划指出，要有序推进长时储热型太阳能热发电发展，在青海、甘肃、新疆、内蒙古、吉林等资源优质区域发挥太阳能热发电储能调节能力和系统支撑能力。建设长时储热型太阳能热发电项目，推动太阳能热发电与风电、光伏发电基地一体化建设运行，提升新能源发电的稳定可靠性[1-2]。

在光热发电系统中，不锈钢是最常用的金属材料，具有优异的高温力学性能、抗氧化性和耐腐蚀性，而且相比于镍基合金更加便宜。熔盐具有优异的热物理性质，常作为光热发电系统的热能存储和传热流体材料，目前也正在不断研究开发适用于不同领域的熔盐混合物。但熔盐在高温下会对金属造成严重腐蚀，特别是光热发电系统中大量使用的不锈钢材料。因此，在设计基于熔盐的能源生产和能源存储的光热发电系统时，研究不锈钢材料的熔盐腐蚀行为对光热发电系统安全可靠运行具有重要的科学和工程意义。

本文综述了熔盐对不锈钢的腐蚀评价及机理。首先介绍了不锈钢在光热发电系统中的应用及其在熔盐中的腐蚀评价，随后总结归纳了不锈钢在硝酸盐、碳酸盐和氯盐等熔盐中的腐蚀机理。不锈钢的熔盐腐蚀主要取决于盐阴离子种类，在含氧阴离子盐和卤化物盐中可归纳为熔盐酸碱理论，其中氯盐腐蚀还包括活化氧化理论。最后讨论了不同类型熔盐中影响腐蚀的气氛、杂质和温度等关键因素的电化学腐蚀行为，展望了氯盐纯化和含铝不锈钢的开发研究等对熔盐光热发电系统的安全设计、制造和运维的重要性。

1　光热发电用不锈钢

光热发电技术已经广泛应用，但高昂的开发成本（如储罐结构材料）构成了巨大挑战。因此，亟须高效、集成和更具经济效益的热能存储材料来提升电站的竞争力。目前，碳钢、不锈钢和镍基合金在光热发电站被广泛采用，碳钢主要用于低温（<300 ℃），不锈钢大多用于中高温（300～550 ℃），而镍基合金主要用于高温环境（>550 ℃）。不锈钢和镍基合金是传热管道、热交换器和热储罐的常用金属材料，但熔盐在高温下对金属材料具有严重腐蚀性。为了延长系统设施的服役寿命以及降低运维成本，探索高温熔盐与材料的相容性就显得尤为重要[3-4]。不锈钢材料具有优异的高温力学性能、抗氧化性和耐腐蚀性，且比镍基合金的价格更低，适合在传储热系统中大量使用。

1.1　不锈钢在熔盐储能中的应用

目前，光热发电站中热储罐、管道、换交换器、阀门和泵等热能传储部件主要采用耐腐蚀、耐高温和价格低廉的不锈钢制造。其中熔盐储罐是光热发电热能存储系统中最重要的设备，耗损材料最多，其旨在储存设施中的全部熔盐，并最大限度地减少系统的能量损失。图 1 中 Avanza-2 是封闭式熔盐储能系统试验台装置，展示了塔式光热发电系统的各个组件，以及集成测试回路的主要元件：熔盐储罐和地基、接收器、泵送系统、热交换器或冷却系统、加热系统（包括分布在整个系统中的电伴热和加热器）以及管道、阀门和仪表等[5]。根据文献和在项目范围内开展的腐蚀研究，光热发电站中不同容器元件采用了不同的金属材料：碳钢 A516Gr70 和低合金钢 P91 等用于冷盐储罐，不锈钢 304、316、347H 和 A321H 等用于热盐储罐，不锈钢 310H 或 Haynes 214 等用于泵和管道，Haynes 230 和 Kanthal 等用于接收器。Bradshaw 等[6]对 Solar Two 项目进行了案例研究，电站热盐储罐和传热管道采用 304 和 316 不锈钢，冷盐管道和冷盐储罐采用碳钢材料。为了研究下一代光热发电用氯盐热存储介质的储罐材料，Gong 等[7-8]对 304、310 不锈钢在熔融氯盐中进行了腐蚀实验，310 在 700 ℃的纯化氯盐中的腐蚀速率远低于 15 $\mu m \cdot a^{-1}$，认为不锈钢作为热盐储罐材料是一个很好的选择，并能显著降低热能储存系统的成本。

塔式光热发电站运行条件恶劣，其关键结构部件如储罐、管道和泵置于高温熔盐腐蚀环境下会发生损坏。因此，研究开发新型不锈钢材料有利于增加光热电站的服役寿命和降低运维成本。橡树岭国家实验室[9]开发的含铝不锈钢是一种很有前景的替代品，其具有良好的抗氧化、抗蠕变、抗拉强度、焊接性能以及低成本等特点。同时，含铝不锈钢表面能够产生比 Cr_2O_3 更加耐腐蚀的 Al_2O_3 保护层。Al_2O_3 可在 650～900 ℃的干燥空气和含有 10%（质量分数，下同）水蒸

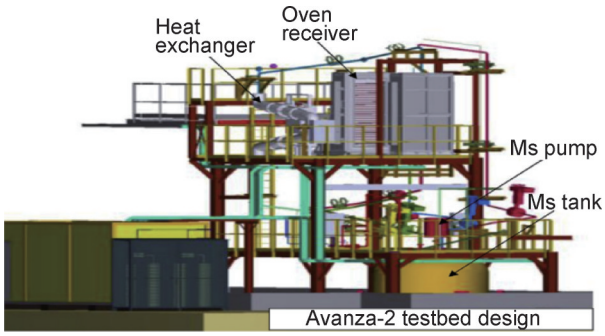


图1 Avanza-2实验装置详细设计[5]

Fig.1 Avanza-2 experimental plant detailed design[5]

气的空气中具有良好高温抗氧化性能，为基体金属提供保护[10-11]。本课题组[12-13]研究了含铝不锈钢的焊接和高温抗氧化性能，结果表明含铝不锈钢焊接性良好，铝元素能抑制焊缝热影响区晶粒的异常长大，并显著提高310S不锈钢的高温抗氧化性能以及改变氧化膜层的物相组成和致密度，促使不锈钢表面形成致密黏附的Al_2O_3钝化层。

1.2 不锈钢在熔盐中的腐蚀评价

基于熔盐在光热发电领域的发展，本文主要阐述了不锈钢在硝酸盐、碳酸盐等含氧阴离子盐和氯盐、氟盐等卤化物盐中的腐蚀评价。浸没腐蚀实验依据ASTM G1-03(2011)标准[14]，采用质量损失计算金属材料的腐蚀速率(CR，$\mu m\cdot a^{-1}$)见式(1)：

$$CR=\frac{365\times 24\times 10\times \Delta W}{S_0\cdot \rho\cdot t} \tag{1}$$

式中：ΔW为试样质量损失，mg；S_0为试样初始表面积，cm^2；ρ为试样的密度，$g\cdot cm^{-3}$；t为腐蚀浸泡时间，h。通过分析总结大量研究数据，得到如表1[5,8,10,15-36]中常用不锈钢在熔盐中的腐蚀速率。统计表明：硝酸盐中，304、316、321和347不锈钢在熔盐温度小于600 ℃的空气气氛中具有较低的腐蚀速率[15-23]。其中，321和347不锈钢的耐腐蚀性最好，满足材料的腐蚀速率要求(<15 $\mu m\cdot a^{-1}$)[19-21]。惰性气氛对不锈钢在硝酸盐中的腐蚀没有起到降低作用[23]。在碳酸盐中，不锈钢在600～800 ℃的熔盐温度下的腐蚀速率远大于硝酸盐，而含铝奥氏体不锈钢HR224和OC4的腐蚀速率明显低于普通不锈钢[10,28]。在没有经过处理的氯盐中，304、310和316不锈钢在不大于700 ℃的空气气氛中的腐蚀速率远远超过在硝酸盐和碳酸盐中，而在惰性气氛的纯化氯盐环境中，310不锈钢的腐蚀速率远小于15 $\mu m\cdot a^{-1}$[8,34]。氯盐是下一代光热电站中的候选传储热介质，氯盐的纯化将更加有利于不锈钢在热能存储系统中的应用。在氟盐中，316不锈钢由于含有少量的Mo而显示出比304不锈钢更高的耐腐蚀，可开发含有更具耐腐蚀合金成分的不锈钢应用于氟盐热能存储系统。

综上所述，熔盐对不锈钢的腐蚀已进行了大量研究，但大都是静态熔盐腐蚀实验，不能客观全面地反映光热发电系统在复杂工况下的实际腐蚀问题，有待进一步研究熔盐在实际运行环境条件下对不锈钢材料的腐蚀行为。

2 不锈钢在熔盐中的腐蚀机理

熔盐分别在接收器、热交换管和储罐中收集、传输和存储热量，对暴露于熔盐中的金属部件构成严重的腐蚀威胁。熔盐驱动腐蚀的机制很复杂，并且受气氛、杂质、温度和合金成分等因素的影响很大，本文归纳不锈钢材料的腐蚀主要取决于盐阴离子种类，盐阴离子可分为含氧阴离子盐和卤化物盐。本节主要从熔盐腐蚀类型和腐蚀机理方面综述了不锈钢在熔融硝酸盐、碳酸盐、氟盐和氯盐中的腐蚀行为，最后分析讨论了气氛、杂质和温度等影响熔盐腐蚀性的电化学腐蚀行为。

2.1 熔盐腐蚀类型

(1) 热腐蚀

熔盐热腐蚀是当盐或盐混合物沉积或凝结在金属材料表面时发生的一种降解过程。当盐沉积物熔化时形成稳定的离子电解质，腐蚀加速。离子电解质发挥助溶作用将氧化物质和金属离子输送到熔盐中，然后在金属表面形成保护性较低的金属氧化物或抑制金属氧化物保护层的形成，导致金属材料的腐蚀加剧。由于温度、几何形状和流体动力学因素，热腐蚀通常发生在相对较高的氧分压和系统的特定区域。其中，氧气在盐/金属界面处含量少，降低了金属与氧气的接触并减小腐蚀。金属表面的不均匀性，也会使盐/金属界面接触氧气的机会减少而降低腐蚀速率和局部腐蚀。

在高温下熔盐转变成导电液体，可以加速腐蚀和电化学过程。Patel等[37]研究了高温合金在硝酸盐、碳酸盐、硫酸盐、氯盐和氟盐中的热腐蚀行为。在极端高温熔盐环境条件下，高温合金经历初始和传播两个阶段的高温腐蚀退化。在初始阶段，金属的降解速率与在没有沉积物的情况相同；在传播阶段，具有沉积物的金属显著影响氧化层的保护性能，显示出较大的腐蚀速率。Hu等[38]综述了硫酸熔盐环境下影响合金热腐蚀的几个关键因素，如气氛、温度、熔盐成分、合金元素和外部应力，并提出防腐涂层是缓解热腐蚀的最有效且商业化的方法。

表 1　不锈钢在熔盐中的腐蚀速率

Table 1　Corrosion rates of stainless steel in molten salt

Alloy	Molten salt	T/℃	Atmosphere	CR/($\mu m \cdot a^{-1}$)	Reference
SS 304	Solar salt	550-ISO	Air	4.1	[15]
	$NaNO_3/KNO_3$	565-ISO	Air	16.5	[16]
	(60%/40%)	570-ISO	Air	6-15	[17]
SS 316		600-ISO	Air	＜25.4	[18]
		565-ISO	Air	13.7	[16]
		565-TC	Air	4.0	[19]
		570-ISO	Air	6-15	[17]
SS 316L		600-ISO	Air	＜25.4	[18]
		630-ISO	Air	101.6	[18]
SS 316		565-TC	Air	2.6	[19]
SS 321		550-ISO	Air	8.6	[20]
		565-TC	Air	2.9	[19]
		600-ISO	Air	8.4	[21]
		400-ISO	Air	1.0	[22]
		500-ISO	Air	7.1	[22]
		600-ISO	Air	15.9	[22]
SS 321H		600-ISO	Argon	434	[23]
SS 347		680-ISO	Air	460	[22]
		290,600-TC	Argon	114	[23]
		550-ISO	Air	9.0	[20]
		400-ISO	Air	0.7	[22]
		500-ISO	Air	4.6	[22]
		600-ISO	Air	10.4	[22]
SS 347H		600-ISO	Argon	317	[23]
SS 430		550-ISO	Air	45.4	[15]
OC4		680-ISO	Air	447	[22]
SS 304	Hitec XL	390-ISO	Air	0.1	[24]
SS 430	$KNO_3/NaNO_3/Ca(NO_3)_2$	390-ISO	Air	0.6	[24]
	(45%/7%/48%)				
OCT	LiNaK-NO_3	550-ISO	Air	5.95	[25]
SS 304	$LiNO_3/NaNO_3/KNO_3$	550-ISO	Air	3.93	[25]
	(30%/13%/57%)				
SS 310S	$KNO_3/NaNO_2/NaNO_3/KCl$(50.35%/38%/6.65%/5%)	500-ISO	Air	0.499	[26-27]
SS 316		500-ISO	Air	1.460	[26-27]
SS 321		500-ISO	Air	1.895	[26]
SS 310	LiNaK-CO_3	600-ISO	N_2	632±20	[28]
	$LI_2CO_3/Na_2CO_3/K_2CO_3$	600-ISO	Air	433±3	[29]
	(32.1%/33.4%/34.5%)	650-ISO	CO_2	589±29	[28]
		700-ISO	CO_2	2456	[28]
SS 316		700-ISO	Air	N/A	[30]
		700-ISO	Argon	94	[31]
SS 321		750-ISO		4640	[10]
SS 347		710-ISO	Air	180-210	[5]
		750-ISO		2360	[10]
HR3C		700-ISO	Air	N/A	[32]
		710-ISO	Air	N/A	[5]
		800-ISO	Air	N/A	[32]
OC4		650-ISO	Air	35.56	[10]
HR224		650-ISO	Air	5.08	[10]
OC6		750-ISO	N_2	1750±490	[28]

续表1

Alloy	Molten salt	T/℃	Atmosphere	CR/(μm·a^{-1})	Reference
SS 304	KCl/$ZnCl_2$/NaCl	250-ISO	Air	20±3	[33]
	(23.9%/68.6%/7.5%)	400-ISO	Vacuum	14	[33]
		500-ISO	Air	380±40	[33]
SS 316	KCl/$ZnCl_2$/NaCl	700-ISO	Air	1700	[30]
	(31.3%/60.6%/8.1%)	700-ISO	Argon	892	[31]
SS 310	KCl/$MgCl_2$/NaCl	700-ISO	Argon	1581	[34]
	(17.8%/68.2%/14.0%)				
SS 310	KCl/$MgCl_2$/NaCl	700-ISO-P	Argon	4.9±2.2	[8]
	(21.3%/56.5%/22.2%)				
SS 304	KF/LiF/NaF	700-ISO	Air	137.08±5	[35]
SS 316H	(59%/29%/12%)	700-ISO	Air	68.6±3	[35]
SS 316L		700-ISO	Air	49.4±3	[36]

Note: T-temperature; SS-stainless steel; ISO-isothermal; TC-thermal cycling; P-purification; N/A-not applicable

晶间腐蚀是一种局部热腐蚀的主要特征,它从表面开始沿晶界向内发展,降低内聚应力导致材料强度损失。同时,它与杂质的偏析或合金元素沿晶界的消耗有关,这也被称为“敏化”,通常在425~815 ℃温度范围内的不锈钢和镍基合金中出现。不锈钢及其焊缝在熔盐环境下容易发生晶间腐蚀,尤其是在暴露于氧化气氛的熔融氯化物中,氯化物会优先侵蚀不锈钢中的碳化物并抑制保护性氧化层的生长,而导致晶间腐蚀和开裂[3]。晶界可能比晶粒中存在的化学物质更容易被溶解和氧化,导致晶界与熔盐接触的界面受到严重破坏。同时,熔盐成分、温度和环境条件也是决定晶间腐蚀发生的关键因素[39]。

Kondo等[40]研究了304和316L不锈钢在高纯度FLiBe氟盐中的腐蚀行为。发现晶间腐蚀是由氟化作用引起,Fe和Cr通过氟化过程溶解到盐中,Ni和Mo在表面富集。同时发现氟盐优先攻击不锈钢的晶界,这是由于晶界形成了$M_{23}C_6$碳化物,使晶界Cr含量高于其他区域,且CrF_2在热力学上比FeF_2更稳定,Cr的氟化作用比Fe强。因此,富铬晶界受到更强烈的腐蚀。Wang等[41]采用浸没实验和电化学方法研究了316不锈钢在NaCl-KCl-$ZnCl_2$氯盐中的腐蚀行为,发现不锈钢发生了晶间腐蚀,主要原因是Cr在氯盐中优先溶解,导致晶界贫铬。Liu等[42]研究了不同温度下321和347不锈钢在太阳盐中的晶间腐蚀行为,图2展示了不锈钢/镍基合金在空气和熔盐中的表面敏化机制,在熔盐环境下氧化是对合金的主要攻击方式,而Cr和Fe氧化物的形成可以保护材料免受腐蚀破坏。然而,Cr氧化物易溶解于高温熔盐中,在熔盐中的溶解通过消耗临近晶界的Cr,导致熔盐中的敏化程度高于空气环境。同时,Cr氧化物层的破坏会促进熔盐与基体合金的相互作用。随着温度的升高,Cr的扩散系数越高,晶界处聚集的Cr碳化物越多,从而增加了Cr贫化区的宽度和晶间腐蚀的趋势。相比于304和316不锈钢,加入Ti和Nb的321和347不锈钢可以形成更稳定的碳化物(如TiC和NbC)以防止沿晶界发生敏化,从而减缓晶间腐蚀[43-44]。

(2)应力腐蚀

在腐蚀介质中应力会影响材料钝化膜的形成,化学成分、厚度以及致密性,从而改变腐蚀行为。热能存储系统中有许多可能的压力源,如大型储热器与储热管道中存储介质的质量、冷热循环和存储介质冷热膨胀引起的应力以及焊接等制造技术产生的残余应力都是应力的潜在来源。

Bradshaw等[6]为确定熔盐的长期化学行为及其对管道组件的腐蚀影响,进行了多种材料的应力腐蚀开裂敏感性测试。发现由316H不锈钢制成的接收管发生了应力腐蚀开裂,这种开裂不是由硝酸盐引起的,而是由盐中的氯化物杂质和熔盐冲刷引起的。Kelly等[45]指出焊接和轧制造成的残余拉伸应力和熔融硝酸盐中氯化物、水杂质的存在以及金属铬的损耗会造成304和316不锈钢发生应力腐蚀开裂,而321和347不锈钢、铁铬镍合金和高铬含量的合金不受应力腐蚀开裂的影响,建议在未来的设计中使用321或347不锈钢作为热盐管道。Liu等[46]将盐/氧化物/金属界面的整体腐蚀特性与应力分布相关联,并解释了界面氧化层的剥落倾向与金属/氧化物界面上不同应力水平之间的关系。界面压应力有助于保持内部氧化层黏附在基体金属上,而拉伸应力导致外部氧化层剥落,高强度、高硬度的氧化层具有更高的抗开裂、击穿能力和高的弹性。对于不锈钢,外层氧化层(如$NaFeO_2$)的硬度低于内层氧化层(如Cr_2O_3),与内部富铬氧化物层的黏附性差,因此会发生剥落和开裂,而致密和有

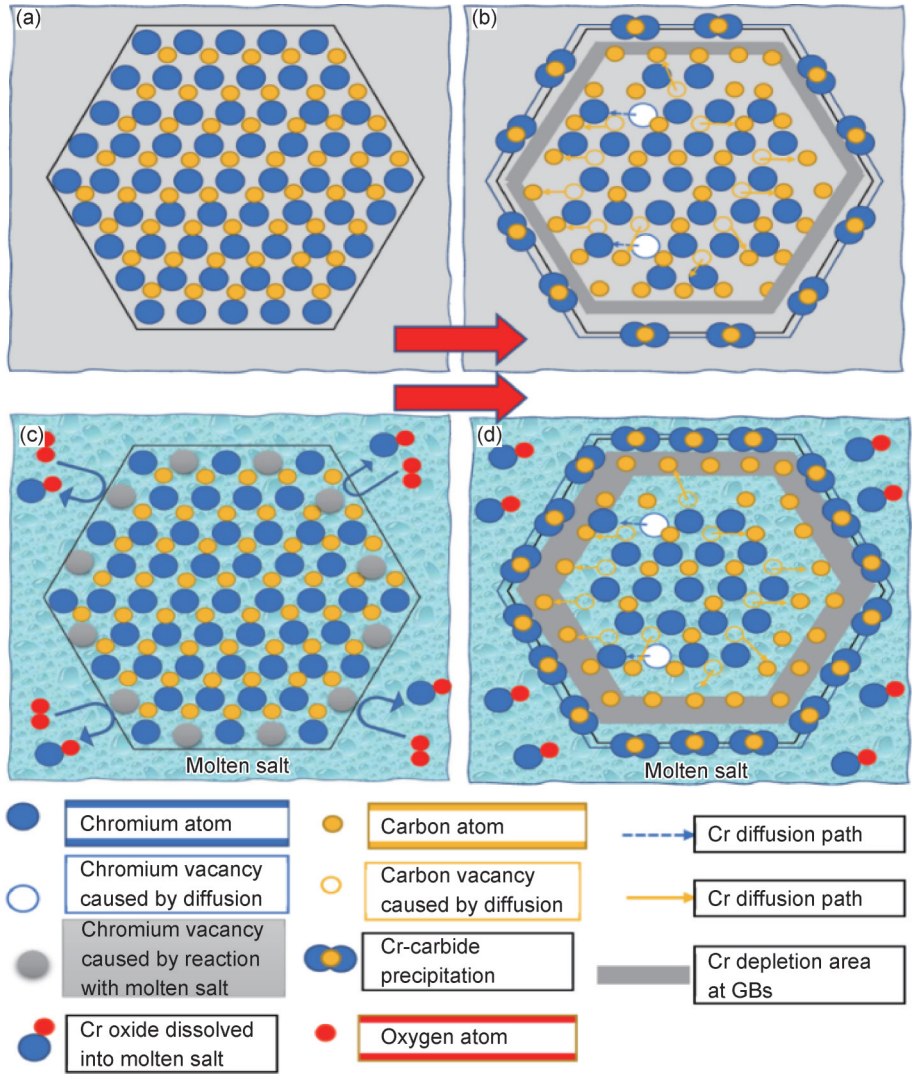


图2　在不同气氛条件下奥氏体不锈钢/镍基合金表面敏化机制示意图[42]

(a),(b)在空气中;(c),(d)在熔盐中

Fig.2　Schematic diagrams of sensitization mechanism on surface of austenitic stainless steels/Ni-based alloys under different atmospheres[42]

(a),(b)in air;(c),(d)in molten salt

弹性的内部氧化层则不太可能因热机械应力效应而剥落,但这并不能完全防止侵蚀性熔盐物质对内部氧化层的化学侵蚀,尤其是在外部氧化物层剥落之后。

2.2　熔盐腐蚀机理

基于熔盐种类和影响熔盐腐蚀的关键因素对不锈钢在熔盐中的腐蚀机理进行分类总结。在含氧阴离子盐和卤化物盐中的腐蚀归纳为熔盐酸碱理论,其中氯盐还包括活化氧化理论。不同类型高温熔盐中影响不锈钢腐蚀的关键因素,如气氛、杂质和温度归为电化学腐蚀反应。

2.2.1　熔盐酸碱模型

硝酸盐、碳酸盐、氟盐和氯盐等含氧阴离子盐和卤化物盐的腐蚀归纳为熔盐酸碱模型,本节依次对其腐蚀机理进行详细研究分析。

碱度(O^{2-}离子浓度)和氧含量是导致金属(如Fe、Cr)氧化的原因,从而影响熔盐腐蚀过程。含氧阴离子物质(R_xAO_y)和卤化物(RA_y)会根据环境因素进一步解离成离子物质,类似于水溶液中发生的酸碱关系,在熔盐中这种关系被称为Lux-Flood模型,即熔盐酸碱理论。这种酸碱的定义由解离反应形成,见式(2)~(4):

$$R_xAO_y \rightarrow xR^{+z} + AO_y^{-z} \tag{2}$$

$$RA_y \rightarrow R^{+y} + yA^{-} \tag{3}$$

$$AO_y^{-z} \leftrightarrow AO_{y-1}^{+2-z} + O^{-2} \tag{4}$$

式中:R是碱金属/碱土金属;AO_{y-1}^{+2-z}和A^-离子定义为酸;O^{-2}和R^{+y}离子定义为碱。

硝酸盐主要特点是其具有较低的熔点、较高的热稳定性和能量密度,其中$NaNO_3$-KNO_3(60%/40%)二

元硝酸盐(太阳盐)应用最多。硝酸盐是一种含氧阴离子物质,腐蚀取决于熔盐碱度,其化学分解严重依赖于温度,在高于硝酸盐分解温度时,硝酸根离子主要分解为亚硝酸盐和氧化物离子[39,47-49],而且硝酸盐中NO_3^-、NO_2^-和O_2等氧化物质会对不锈钢等金属材料造成类似于水环境中的腐蚀破坏。同时,随着温度的进一步升高,亚硝酸盐会进一步分解生成氮氧化物。

$NaNO_3$和KNO_3通常在温度低于600 ℃下形成弱碱性熔盐,但随着温度的升高,碱度增加,反应形成的氧化物可把不锈钢中自由能较高的Fe、Cr金属元素氧化(阳离子的向外扩散和氧化物的向内扩散形成),在表面形成钝化层。然而,Cr_2O_3氧化物不稳定,易在O^{2-}和Cl^-浓度高的熔盐中溶解形成铬酸盐离子($Cr_2O_4^{2-}$)而加重不锈钢腐蚀。其中,Fe在Cr_2O_3中的高向外扩散性和对氧的高亲和性,易形成Fe和Cr的混合氧化物(如Fe_3O_4、Fe_2O_3和$FeCr_2O_4$)。因此,不锈钢表面氧化层主要由磁铁矿(Fe_3O_4)和赤铁矿(Fe_2O_3)外层组成,来保护内层铁铬尖晶石($FeCr_2O_4$),并抑制Cr的消耗[50-52]。此外,FeO仅在570 ℃以上稳定,在较低温度下(<570 ℃)会被氧化为稳定的Fe_3O_4和Fe_2O_3保护层[15]。与Fe_2O_3相比,Fe_3O_4是更具有保护作用的尖晶石结构,可以防止不锈钢进一步腐蚀[39,53-54]。反应机制见式(5)~(8):

$$2Cr+3O^{2-}\leftrightarrow Cr_2O_3+6e^- \tag{5}$$

$$Fe+Cr_2O_3+O^{2-}\leftrightarrow FeCr_2O_4+2e^- \tag{6}$$

$$3FeO+O^{2-}\leftrightarrow Fe_3O_4+2e^- \tag{7}$$

$$2Fe_3O_4+O^{2-}\leftrightarrow 3Fe_2O_3+2e^- \tag{8}$$

当温度高于600 ℃时,硝酸盐向亚硝酸盐分解反应变得更有利,保护性Fe_2O_3外层转化为非保护性铁酸钠($NaFeO_2$),造成腐蚀速率迅速增加[51]。Fernández等[15]在不锈钢和低铬合金的腐蚀实验中发现铁酸钠的起源是熔盐提供的钠离子与氧化铁之间反应的结果。

碳酸盐具有高熔化潜热和高热导率等热物理性质,在热能存储和相变存储材料中占有重要地位。同时,碳酸盐也是燃料电池中使用的电解质,许多对熔融碳酸盐的研究使用电化学方法来研究对金属材料的腐蚀[55]。尽管热能存储系统处于与熔融碳酸盐燃料电池不同的条件,但燃料电池中使用的相似温度范围和金属材料,意味着这些研究有助于理解热能存储应用中碳酸盐对不锈钢的腐蚀机制。过去30~40年对碳酸盐燃料电池的研究使其成为讨论含氧阴离子盐介质中对金属材料腐蚀机理的理想熔盐[39]。Kruizenga[55]确定了熔融碳酸盐的腐蚀分为氧化剂溶解到熔盐中、氧化剂在熔盐中传输、盐/金属表面的腐蚀反应、氧化层溶解到熔盐中和可溶性产物的优先溶解5个步骤。在熔融碳酸盐中,氧化物离子(O^{2-})和碳酸根离子(CO_3^{2-})对合金材料组成元素中的氧化起着至关重要的作用。在平衡状态下,氧化物离子在高温下通过自解离反应出现,见式(9):

$$CO_3^{2-}\leftrightarrow CO_2+O^{2-} \tag{9}$$

当合金浸入熔融碳酸盐中时,合金会形成相应的金属氧化物,见式(10):

$$2M+nCO_3^{2-}\leftrightarrow M_2O_{n/2}+nCO_2+2ne^- \tag{10}$$

金属氧化物的溶解可以通过酸性或碱性途径发生。当熔盐中O^{2-}活性较低时,会发生酸性溶解,金属氧化物会分解,产生氧化物离子和潜在的可溶性金属离子,见式(11):

$$M_xO_y\leftrightarrow xM^{z+}+yO^{2-} \tag{11}$$

富含O^{2-}的熔盐被称为碱性熔盐,过量的氧化物离子与金属氧化物通过如下反应产生也可溶于盐中的金属氧化物阴离子,见式(2):

$$M_xO_y+zO^{2-}\leftrightarrow M_xO_{y+z}^{2-} \tag{12}$$

与金属离子(M^{z+})相比,金属氧阴离子($M_xO_{y+z}^{2-}$)更容易从熔盐中重新附着到碱性金属上,从而促进金属的腐蚀。

目前几乎所有的商业光热发电站都使用硝酸盐作为热能存储和传热介质,其最高操作温度限制在600 ℃左右。因为在高温下硝酸盐易于分解并产生NO_X等有毒物质。而具有较高热稳定性和热容量的氯化物熔盐则受到了广泛关注,美国能源部SunShot计划下一代光热发电项目采用氯盐作为传储热介质,以实现更高的热电转换效率和更低的平准化度电力成本[56]。理论上,纯氯化物熔盐混合物(如NaCl-kCl-$MgCl_2$)在热力学上不能腐蚀不锈钢,因为$MgCl_2$、NaCl和KCl盐在热力学上比$FeCl_2$、$CrCl_2$和$NiCl_2$更稳定,即具有更负的标准吉布斯自由能。同理,对于碱金属氟盐(如FLiNaK)也不可对过渡金属(如Fe、Cr和Ni)进行氟化[57]。根据标准吉布斯自由能大小可以得出Fe、Cr和Ni金属元素在氯化物和氟化物熔盐中的稳定性顺序为:Cr<Fe<Ni,因此Fe和Cr会优先被氯化物和氟化物熔盐攻击而发生氯化、氟化,这就是镍基合金耐蚀性高的主要原因[58-60]。对于卤化物熔盐,金属的氯化和氟化作用以及卤化物离子与盐中的碱金属或碱土金属再结合而降低熔盐碱度和卤化物离子的活性,这是控制卤化物熔盐腐蚀不锈钢等金属材料的关键。

除了上述熔盐酸碱理论外,Grabke等[61]提出了氯和氯化物加速腐蚀的机理。氯盐中如果存在水和氧

气等杂质时会产生氯，不锈钢等金属材料在熔融氯化物中的腐蚀攻击完全归因于氯的反应活性，氯最初在腐蚀层表面形成，由于高氯分压和低氧分压，生成的氯会通过氧化层向基材扩散，并与合金反应形成金属氯化物。由于新形成的氯化物具有高蒸气压，使得金属氯化物形成并持续蒸发，当金属氯化物向外氧化层表面扩散时，它被氧化形成非保护性氧化物，氯再次形成并部分返回到氧化物/金属界面。氯充当催化剂，因此增加氧化速率。这种自催化过程由金属表面氯化合物的形成、挥发和随后在外表面氧化组成，被称为活性氧化或氯化氧化[62-64]。

2.2.2　电化学反应

熔盐是离子导体，熔盐腐蚀通常通过电化学反应发生。气氛、杂质、温度、熔盐成分、氧化层成分结构和合金成分等都会影响熔盐对不锈钢的腐蚀，其中气氛、杂质和温度的影响最为突出。光热发电热能存储系统中的气氛将由空气、二氧化碳以及惰性气体组成，由于氧化层成分和溶解机制在很大程度上取决于氧化物离子浓度，合理的气氛（如CO_2和O_2分压）可以显著减少熔融碳酸盐系统中的金属腐蚀[34,65-67]。氯化物和水杂质是影响硝酸盐腐蚀的重要因素，水蒸气和氧气等杂质则是影响氯化物熔盐腐蚀性的关键因素，严格控制促进熔盐腐蚀的杂质对于降低熔盐腐蚀性至关重要[68-70]。温度则会显著影响熔盐的热稳定性[48,71]。

（1）气氛影响

熔盐中的气体气氛显著影响硝酸盐、碳酸盐和氯盐对不锈钢等金属材料的腐蚀。Villada 等[65]研究了太阳盐、Hitec 和 LiNaK-NO_3 盐在不同氮氧气氛下的热稳定性。在N_2存在的情况下，NO_2^-浓度在3种熔盐中的含量均较高，腐蚀性较高，而在含氧气氛中较低的NO_2^-含量可能是由于亚硝酸盐和氧气的逆反应形成硝酸盐造成。硝酸盐的热性质与NO_2^-和NO_3^-的比值变化有关，NO_2^-和NO_3^-的比值在很大程度上取决于大气中氧气的分压，即亚硝酸盐含量随着氧分压的升高而降低。碳酸盐中如果存在氧气，它们会和碳酸盐离子发生反应，产生过氧化物离子（O_2^{2-}）或超氧化物离子（O_2^-）[72-73]。该过程包括金属电极的阳极溶解氧化反应和氧化剂的阴极还原反应，反应生成的超氧化物和过氧化物离子还会通过阳极反应提供的电子进一步被还原为氧化物离子。

在高温（≥700 ℃）氧化气氛中，不锈钢表面通常会形成Cr_2O_3层，从而防止金属被进一步氧化。然而，Cr_2O_3在碳酸盐中不稳定，与熔盐直接接触时，会被在熔盐/气体界面形成的过氧化物离子氧化成形成铬酸盐离子而降低不锈钢的耐蚀性[74]。

人们普遍认为氧化和腐蚀过程应该在惰性保护气氛中减少，实则不然。Liu 等[66]研究了在空气和氩气环境下 321 和 347 不锈钢在太阳盐中的腐蚀行为，发现腐蚀速率将由高温下熔盐中的离子强度、氧化物和Na^+含量以及Cr_2O_3氧化物形成和剥落速率决定。金属溶解和延迟钝化控制了熔盐/金属界面的钝化速率，导致在氩气环境下不锈钢腐蚀速率更高。对于空气中的热循环实验，过量的氧气供应促进了Cr快速形成Cr_2O_3钝化层以保护腐蚀界面。

图3显示了气氛对卤化物熔盐腐蚀影响的电化学反应机理。除上述气氛对含氧阴离子盐的影响外，Ding 等[34,75]总结了各种气体在熔融卤化物盐中的溶解度以及气体与纯熔融氯盐的相互作用，尽管气体在氯盐中的溶解度很低，但溶解的氧化气体（如O_2和H_2O）会导致严重腐蚀。即使金属与气体没有直接接触，O_2和H_2O也可以与熔融氯盐反应，形成Cl_2和HCl等腐蚀性气体。由于Cl_2相比于O_2的分压更高，生成的Cl_2会优先通过氧化层向基材扩散，与合金反应形成金属氯化物。同时，与O_2和H_2O直接接触的容器材料也会被直接氧化[76-79]。而对于氟盐，熔盐封闭系统中存在H_2O会导致HF气体的生成，最终导致金属的氧化和氟化，从而加速腐蚀过程。因此，根据使用盐混合物选择合适的气氛，是提高光热发电稳定运行的关键因素之一。

（2）杂质影响

影响熔盐腐蚀的另一个关键因素是熔盐中存在的杂质，其会影响熔盐储能系统中的传热、储热性能和熔盐分解温度。在光热发电熔盐体系中，杂质对不锈钢与熔盐的相容性具有较大的影响。熔盐中常见的杂质有金属（如Ca、Mg）、氯离子、氧化物离子（如ClO_4^-、SO_4^{2-}）和水分等。硝酸盐中的杂质金属会在高温环境下与空气中的CO_2发生反应，形成不溶性碳酸盐化合物，杂质Mg在硝酸盐环境下以稳定化合物MgO的形式存在。硝酸盐中的SO_4^{2-}会和存在于这些碱硝酸盐中的常见杂质金属相互作用形成不溶性化合物，并堵塞光热发电系统中的泵和管道。杂质金属对硫酸盐和碳酸盐的腐蚀影响与硝酸盐一致。

受混合熔盐中的单组分盐的制备工艺影响，商业混合太阳盐一般含有氯离子杂质，而氯离子的存在不仅会对熔盐的热物理性质产生影响，还会增加对不锈钢的腐蚀。欧阳鑫等[80]在太阳能光热发电用347H不锈钢的研制中也考虑了氯离子的腐蚀。根据Solar Two项目中硝酸盐混合物腐蚀的结果和文献数据，氯化物和水等杂质对腐蚀有显著影响[81]。一般来说，不可避免的氯化物（如NaCl和$KClO_4$）存在于商业太阳盐中，其浓度可达1%。对于不锈钢，当硝酸熔盐中氯

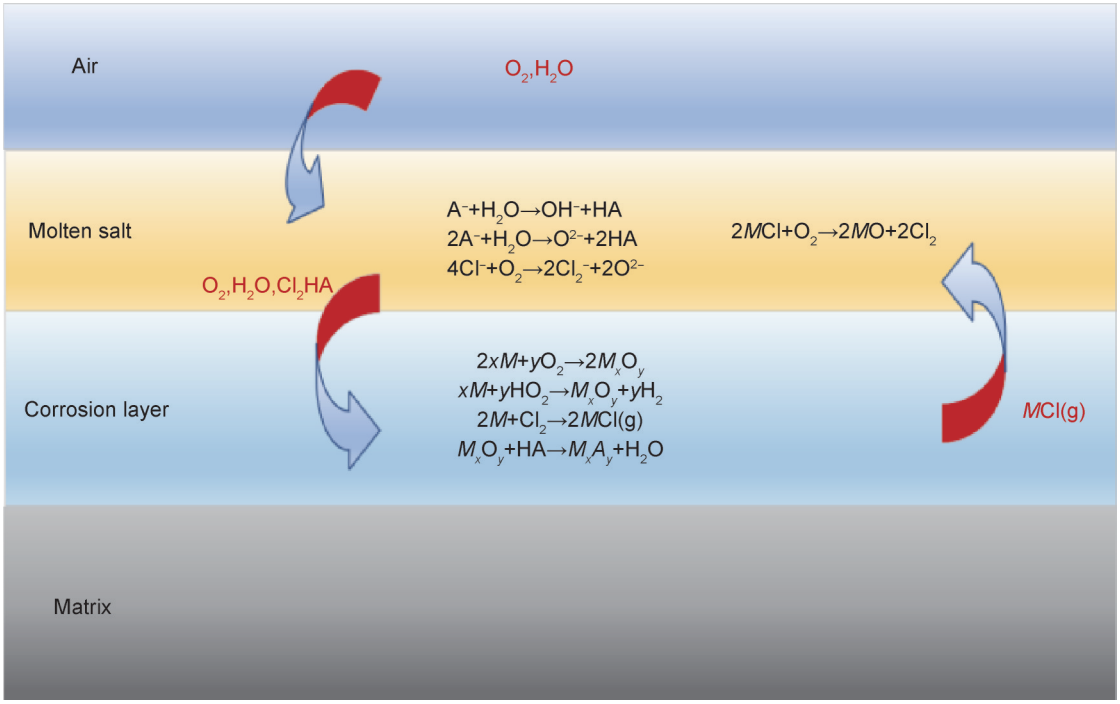


图3 气体气氛对卤化物熔盐腐蚀的影响示意图

Fig.3 Schematic diagram of effect of gas atmosphere on halide molten salt corrosion

化物浓度低于0.5%时，腐蚀速率与时间的平方根成正比，而氯化物浓度高于0.5%时，腐蚀速率与时间呈线性关系[50]。氯化物浓度高达0.82%时，316、316L和304不锈钢的腐蚀速率分别增加了25%～50%、25%和50%，这种增加可能是由于金属与氧化层之间的热膨胀系数不匹配产生的应力削弱了金属表面氧化物的附着力，导致保护性氧化物层发生开裂剥落[82]。对于硝酸熔盐中氯离子杂质对不锈钢的腐蚀性影响，国内外已有大量研究。杜宝强等[83]研究了氯离子杂质对太阳盐的热物性和腐蚀性的影响。结果发现，氯离子含量小于0.75%时，熔盐的熔点、相变潜热和分解温度变化较小；含量大于0.25%时，熔盐的热稳定性变差；含量小于0.75%时，熔盐对304不锈钢的腐蚀性较小。尹绪中等[84]研究了不同氯离子含量的太阳盐对304和316L不锈钢的腐蚀行为。结果表明，氯离子杂质通过活性氧化腐蚀作用加速了不锈钢腐蚀，与316L相比，304对氯离子杂质的腐蚀更敏感。不锈钢的腐蚀动力学曲线均呈抛物线型，随着氯离子含量增加，不锈钢的腐蚀速率均显著提升，腐蚀层与基体结合处的裂纹增多。Gao等[85-86]选择低熔点的季硝酸盐和太阳盐作为基盐研究了不同氯离子含量的熔盐对316L不锈钢的腐蚀影响。研究表明，同时加入少量Cl^-和Ca^{2+}可以降低太阳盐对不锈钢的腐蚀速率，原因在于不锈钢腐蚀层中形成含$CaFeO_4$的富钙氧化层抑制了不锈钢在熔盐中的进一步腐蚀。这一发现对于抑制含Cl^-的熔盐对不锈钢的腐蚀具有深远的意义。在熔盐中添加少量Ca^{2+}的情况下，可以选择成本较低的含Cl^-的熔盐进行储热。Li等[87]研究发现304和316L不锈钢随着太阳盐中氯化物含量的增加，腐蚀动力学曲线均呈抛物线，但速率常数增加。随后，Li等[88]又在熔融太阳盐中发现氯化物杂质削弱了不锈钢表面氧化层的附着力，即熔盐中的氯离子与不锈钢表面生成的Fe_2O_3和Cr_2O_3反应形成较为疏松的腐蚀产物层，导致了氧化层的剥落。另外，氯化物杂质还可生成非保护性铁酸钠氧化物，降低对基体金属的保护作用，化学反应式见式(13)，(14)：

$$8Cl^- + 2Cr_2O_3 + 5O_2 \rightarrow 4CrO_4^{2-} + 4Cl_2 \quad (13)$$

$$4Cl^- + 2Fe_2O_3 + O_2 \leftrightarrow 4FeO_2^- + 2Cl_2 \quad (14)$$

图4[88]为含氯化物杂质的太阳盐中氯化物对不锈钢的腐蚀示意图，该过程也是活化氧化的具体展示。反应生成的氯气扩散到腐蚀产物层和金属基体的氧气分压低的界面处，在高氯分压和低氧分压作用下，生成的氯气会通过氧化层向基体扩散，与合金反应生成金属氯化物，金属氯化物与氧反应生成氧化物并释放氯，但生成的金属氯化物在扩散到氧化层时会被进一步氧化，在金属与氧化层界面处形成的富铬氧化层，从而提升了合金的耐蚀性[89]。但金属氯化物形态的转变导致腐蚀产物层上产生裂纹和孔洞，破坏了不锈钢腐蚀产物层的完整性。通过裂纹扩散回腐蚀产物层，与金属基体界面处的氯气再次与基体金属发生

反应，如此循环往复，降低了腐蚀产物层和金属基体间的黏附性，导致腐蚀产物层剥落，使得不锈钢更易受到腐蚀[84]。同时，由于晶界存在“贫铬区”，氯离子也会引起晶界腐蚀而导致晶界开裂。因此，氯离子除了影响熔盐的腐蚀速率外，还可能会导致不锈钢的腐蚀开裂行为发生[6]。熔盐中如果存在高氯酸根离子(ClO_4^-)时，其会在高温下分解成氧气和氯化物，会成倍地增加与该熔盐相接触的不锈钢的腐蚀。

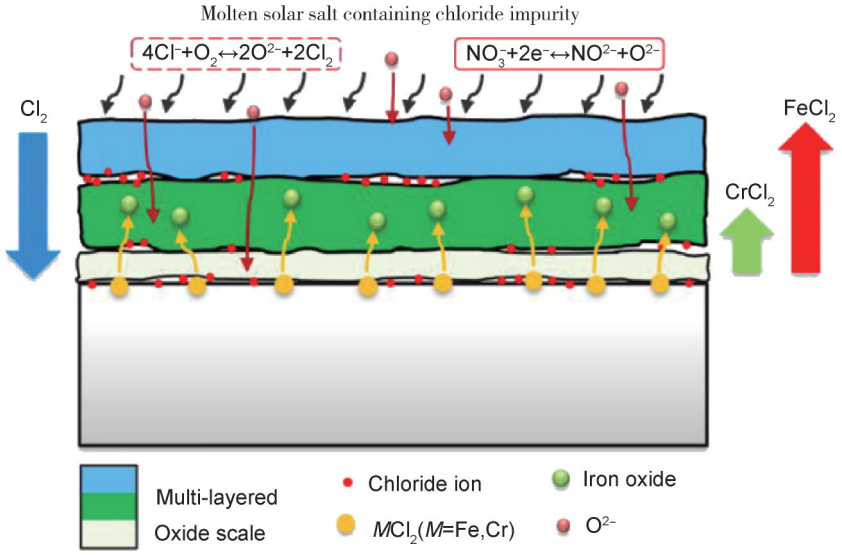


图 4　含氯化物杂质的太阳盐中氯化物对不锈钢腐蚀的影响示意图[88]

Fig.4　Schematic diagram of influence of chloride on corrosion of stainless steel in molten solar salt with presence of chloride impurity[88]

硝酸盐和氯盐中杂质水的存在对不锈钢的腐蚀行为有较大的影响。Fernández 等[90-91]通过热处理降低盐中的水分含量缓解了对不锈钢的腐蚀，并总结了大量水分对熔融硝酸盐影响的工作。熔融硝酸盐中存在氧化物(O^{2-})、过氧化物(O_2^{2-})和超氧化物(O_2^-)离子，它们是由硝酸盐熔盐中不稳定的 O^{2-} 引起[71]。如果环境中存在过量的水则会阻碍熔融硝酸盐中过氧化物和超氧化物离子的形成，增加了阴极反应速率和熔盐腐蚀性。

不锈钢在高温熔融氯盐中的腐蚀是一个复杂的过程，包括大气气体与熔融氯化物之间的相互作用，熔融氯化物中物质的相互作用以及熔融氯化物与合金之间的相互作用[55]。由于纯氯化物和氟化物熔盐在热力学上不能腐蚀传统的金属材料，腐蚀主要由熔盐中的腐蚀性杂质驱动，这些杂质来自大气或熔盐中吸附的水分和氧气[34,92-93]。$AlCl_3$、$CaCl_2$、$MgCl_2$ 和 $ZnCl_2$ 等氯化物具有很强的吸湿性，水的存在可导致多种水解反应，在反应过程中会产生对金属有害的 MgOHCl 和 HCl 腐蚀性杂质[75,94]。MgOHCl 在熔盐中以 $MgOH^+$ 和 Cl^- 存在，在温度高于 550 ℃时，MgOHCl 可分解为 MgO 和强腐蚀性 HCl 气体[58-59,95]。因此，这些氯化物熔盐需要纯化，即去除水合水。

(3)温度影响

光热发电熔盐腐蚀的研究还需要考虑瞬时温度变化、过热等工况的影响，如国家重点研发计划“太阳能热发电用高温熔盐储罐力学研究及寿命预测”针对高温熔盐储罐的腐蚀和热疲劳等寿命损失问题开展储罐的力学研究和寿命预测，以保障光热发电站安全可靠运行。

温度会对熔盐的热稳定性产生较大影响，热稳定性随着温度的升高而降低，并促使熔盐在高温下分解产生腐蚀性物质使不锈钢发生严重腐蚀。如硝酸盐分解为亚硝酸盐和氧气，亚硝酸盐能进一步分解产生 N_2、O_2、NO 和 NO_2 等气体，其中 NO 和 NO_2 气体遇到水蒸气会形成硝酸。此外，熔盐的热循环会导致金属表面氧化层出现内应力，引起氧化层脱落或附着性降低，加剧材料腐蚀[71]。由于高温段的扩散速率和溶解度，会发生从高温区到低温区的传质现象，而温度的变化也会直接影响熔盐的热稳定性、反应速率和过程，从而增强腐蚀及影响腐蚀反应。

Li 等[48]使用电化学方法研究了 304 和 316L 不锈钢在 500、565 ℃和 600 ℃太阳盐中的腐蚀行为，在较高温度下腐蚀速率较高。从 500 ℃到 600 ℃，不锈钢氧化膜厚度增大，保护性氧化铬转变为非保护性铁铬尖晶石和氧化铁，如图 5 所示。同时，304 不锈钢在 565 ℃和 600 ℃温度下的氧化物和基体之间还发现了富铬氮化物，而 316L 则没有发现，表明富铬氮化物的形成取决于熔盐的温度和基体的化学成分。Kruizenga 等[22]

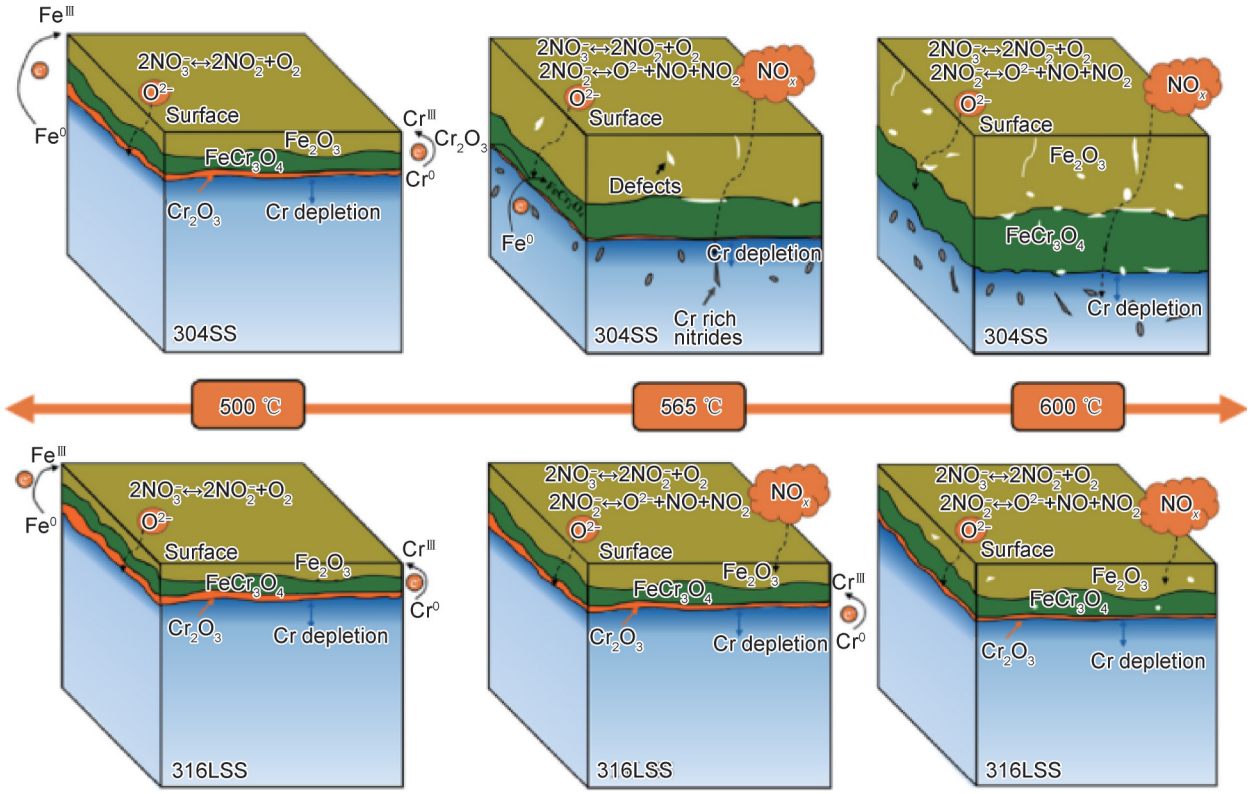


图 5 不同温度下 304 和 316L 不锈钢在太阳盐中的腐蚀机理[48]

Fig.5 Corrosion mechanisms of 304 and 316L stainless steel in solar salt at different temperatures[48]

研究了 321 和 347 不锈钢在 400、500 ℃和 680 ℃下太阳盐的腐蚀行为，在 400 ℃时观察到相对较薄的氧化层，在 500 ℃时表现为贫铬和氧化铁的形成。在 680 ℃下暴露 1025 h 后发生严重的表面腐蚀，形成复杂的铁、钠和铬氧化物，腐蚀速率超过 450 μm·a^{-1}。

Zhu 等[96]研究了 316 不锈钢在 450、600 ℃和 680 ℃的 Hitec 熔盐中的腐蚀行为，发现不锈钢在 450 ℃表现出耐腐蚀性，在 680 ℃时遭受严重腐蚀，腐蚀速率从 600 ℃到 680 ℃不连续增加。在 450 ℃和 600 ℃熔盐中的腐蚀过程受金属离子和氧空位向外扩散控制，而腐蚀机制在 680 ℃时则转变为氧离子向内扩散。Wang 等[41]研究了 316 不锈钢在 700 ℃和 900 ℃的三元共晶氯化物熔盐中的腐蚀行为，腐蚀速率随着测试温度升高而增加。

3 结束语

不锈钢是光热发电系统中最常用的金属材料，在热盐储罐、传热管道、换交换器、阀门和泵等构件中大量应用，但熔盐对不锈钢具有强烈的腐蚀性。因此，研究不锈钢在熔盐中的腐蚀行为对光热发电系统的设计、制造、运维和发展至关重要。开发能够承受高温熔盐腐蚀的不锈钢是一个不小的挑战，也是未来研究的一个重要方向。本文综述了熔盐中不锈钢的腐蚀评价及机理，首先介绍了不锈钢在光热发电系统中的应用及其在熔盐中的腐蚀评价，接着总结归纳了不锈钢的熔盐腐蚀类型和腐蚀机理。主要结论和展望如下：

(1)不锈钢主要用于光热发电中高温系统。硝酸盐中，常用奥氏体不锈钢具有较低的腐蚀速率，能够满足光热电站结构材料的腐蚀要求，其中 321 和 347 等稳定化奥氏体不锈钢具有更优异的抗晶间腐蚀和应力腐蚀开裂的能力，因此是目前光热发电站中热端部件最常用的金属材料。碳酸盐中常规不锈钢的腐蚀速率远大于硝酸盐，但含铝不锈钢 HR224 和 OC4 的腐蚀速率较低。未纯化氯盐的大气环境中不锈钢的腐蚀速率远远超过硝酸盐和碳酸盐，但在纯化氯盐的惰性气体中的 310 不锈钢的腐蚀速率远小于 15 μm·a^{-1}。氟盐中含有 Mo 的 316 不锈钢比 304 等常规不锈钢更耐腐蚀。氯盐是下一代光热电站候选储热介质之一，氯盐纯化将更有利于不锈钢的应用。未来还可通过添加不同铝含量或元素调控开发更耐腐蚀的不锈钢材料。

(2)热腐蚀和应力腐蚀是不锈钢在高温熔盐中的主要腐蚀类型。当盐沉积物熔化时形成稳定的离子电解质，降低了金属氧化物保护层的形成，同时将氧

化物质和金属离子输送到熔盐中，导致不锈钢发生热腐蚀。应力与高温腐蚀性熔盐相结合，会快速破坏不锈钢表面钝化层而加剧腐蚀。因此，未来应大力提升不锈钢表面钝化层的耐蚀性，如通过对含铝不锈钢进行预氧化和熔盐纯化，以形成更耐腐蚀的$A1_2O_3$钝化膜和减轻熔盐的侵蚀性。

(3)熔盐对不锈钢的腐蚀主要取决于盐阴离子种类，含氧阴离子盐和卤化物盐的腐蚀归纳为熔盐酸碱理论，其中氯盐腐蚀还包括活化氧化理论。含氧阴离子物质和卤化物会离解成酸碱离子物质对不锈钢的氧化、氯化和氟化起重要作用，类似于水溶液中发生的酸碱关系。含氧阴离子盐碱度增加，会溶解金属氧化物加剧不锈钢材料的腐蚀。对于卤化物盐，碱度增加会促进金属氯化和氟化作用而造成不锈钢的腐蚀。因此，降低熔盐碱度是控制不锈钢等金属材料熔盐腐蚀的关键。

(4)熔盐中存在氧气、水分和氯化物杂质会显著影响不锈钢的腐蚀。氧气含量能抑制硝酸盐中硝酸根离子的进一步分解并促进Cr_2O_3氧化物的形成，减缓不锈钢的腐蚀，但不能对碳酸盐和卤化物盐进行保护。水会阻碍硝酸盐中过氧化物和超氧化物离子的形成，增加了阴极反应速度和熔盐碱度，并促使氯盐和氟盐生成HCl和HF等腐蚀性物质。氯离子和温度均可削弱不锈钢表面氧化层的附着力，引起氧化层脱落，从而加速不锈钢的腐蚀。因此，未来应该尽可能地通过控制气体气氛和杂质含量来提升熔盐高温稳定性，降低熔盐碱度，达到进一步减轻不锈钢腐蚀的目标。

(5)氯盐或碳酸盐在下一代光热发电热能存储系统中的应用需要采取有效措施来降低腐蚀性以及开发更耐腐蚀且低成本的合金或涂层材料。氯盐纯化是有效降低其腐蚀性的方法，纯化后可继续采用不锈钢材料，如在纯化氯盐惰性气体环境中310不锈钢的腐蚀速率满足光热电站材料腐蚀要求。含铝不锈钢在碱金属硝酸盐和碳酸盐中易形成更耐腐蚀的$A1_2O_3$钝化膜，能有效地防止铬、铁的溶解以及腐蚀性杂质的渗透，对不锈钢等金属结构材料具有更好的保护作用。未来应通过熔盐改性和材料自身防护等方面来大力提升不锈钢在光热发电系统中的应用价值地位。

参考文献

[1] 李曦.国家发改委等九部门:印发《“十四五”可再生能源发展规划》[J].中国设备工程,2022(13):1.
LI X.Nine departments,including the national development and reform commission,issued the renewable energy development plan in the 14th Five-Year Plan[J].China Plant Engineering,2022(13):1.

[2] 张楠.太阳能热互补联合循环发电系统动态性能及运行策略研究[D].北京:华北电力大学,2021.
ZHANG N. Dynamic performance and operation strategy of solar thermal complementary combined cycle power generation system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[3] WALCZAK M,PINEDA F,FERNÁNDEZ Á G,et al.Materials corrosion for thermal energy storage systems in concentrated solar power plants [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,86:22-44.

[4] WAN Z J,WEI J J,QAISRANI M A,et al.Evaluation on thermal and mechanical performance of the hot tank in the two-tank molten salt heat storage system[J].Applied Thermal Engineering,2020,167:114775.

[5] PRIETO C,FERERES S,RUIZ-CABAÑAS F J,et al.Carbonate molten salt solar thermal pilot facility:plant design,commissioning and operation up to 700 ℃[J]. Renewable Energy, 2020, 151: 528-541.

[6] BRADSHAW R W,DAWSON D B,DE LA ROSA W,et al.Final test and evaluation results from the solar two project[R]. [S. l.:s. n.], 2001: 55-62.

[7] GONG Q,HANKE A,KESSEL F,et al.Molten chloride salt technology for next-generation CSP plants:selection of cold tank structural material utilizing corrosion control at 500 ℃[J].Solar Energy Materials and Solar Cells,2023,253:112233.

[8] GONG Q,SHI H,CHAI Y,et al.Molten chloride salt technology for next-generation CSP plants: compatibility of Fe-based alloys with purified molten $MgCl_2$-KCl-NaCl salt at 700 ℃[J].Applied Energy,2022,324:119708.

[9] YAMAMOTO Y, BRADY M P, MURALIDHARAN G, et al. Current status of the development of creep-resistant, alumina-forming austenitic stainless steel alloys [R]. [S. 1.: s. n.], 2014: 433-436.

[10] FERNÁNDEZ A G,PINEDA F,WALCZAK M,et al.Corrosion evaluation of alumina-forming alloys in carbonate molten salt for CSP plants[J].Renewable Energy,2019,140:227-233.

[11] YAN Y F,XU X Q,ZHOU D Q,et al.Hot corrosion behaviour and its mechanism of a new alumina-forming austenitic stainless steel in molten sodium sulphate[J].Corrosion Science,2013,77:202-209.

[12] 喇培清，撒兴瑞，刘辉，等.高铝310S耐热钢板材的焊接性能[J].钢铁研究学报，2014，26(2)：34-40.
LA P Q, SA X R, LIU H, et al. Welding performance of high-aluminum 310S heat-resistant steel plate material [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(2): 34-40.

[13] 喇培清，姚亮，孟倩，等.含铝304和316L奥氏体不锈钢热轧板材焊接性能[J].钢铁，2013，48(11)：60-66.
LA P Q, YAO L, MENG Q, et al. Welding performance of aluminum-containing 304 and 316L austenitic stainless steel hot-rolled plates [J]. Steel and Iron, 2013, 48(11): 60-66.

[14] GI A. Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating

corrosion test specimens [J]. ASTM international, 2011, 3(2): 1-8

[15] FERNÁNDEZ Á G, LASANTA M I, PÉREZ F J. Molten salt corrosion of stainless steels and low-Cr steel in CSP plants [J]. Oxidation of Metals, 2012, 78(5): 329-348.

[16] 张学文,李洪川,李生云,等.304、316不锈钢和Inconel 617镍基合金在硝酸熔盐中的腐蚀行为[J].机械工程材料,2019,43(5):24-29.
ZHANG X W, LI H C, LI S Y, et al. Corrosion behavior of 304, 316 stainless steels and Inconel 617 Ni-based alloy in molten nitrate salt [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(5): 24-29.

[17] GOODS S H, BRADSHAW R W. Corrosion of stainless steels and carbon steel by molten mixtures of commercial nitrate salts [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 13(1): 78-87.

[18] SLUSSER J W, TITCOMB J B, HEFFELFINGER M T, et al. Corrosion in molten nitrate-nitrite salts [J]. JOM, 1985, 37(7): 24-27.

[19] BRADSHAW R W, GOODS S H. Corrosion resistance of stainless steels during thermal cycling in alkali nitrate molten salts [R]. [S. 1.: s. n.], 2001: 3-39.

[20] GOMES A, NAVAS M, URANGA N, et al. High-temperature corrosion performance of austenitic stainless steels type AISI 316L and AISI 321H, in molten solar salt [J]. Solar Energy, 2019, 177: 408-419.

[21] TRENT M C, GOODS S H, BRADSHAW R W. Comparison of corrosion performance of grade 316 and grade 347H stainless steels in molten nitrate salt [J]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1734: 160017.

[22] KRUIZENGA A M, GILL D D, LAFORD M E. Corrosion of high temperature alloys in solar salt at 400, 500, and 680 ℃ [R]. [S. 1.: s. n.], 2013: 9-37.

[23] LIU Q Y, BARKER R, WANG C, et al. The corrosion behaviour of stainless steels and Ni-based alloys in nitrate salts under thermal cycling conditions in concentrated solar power plants [J]. Solar Energy, 2022, 232: 169-185.

[24] FERNÁNDEZ Á G, GALLEGUILLOS H, FUENTEALBA E, et al. Corrosion of stainless steels and low-Cr steel in molten Ca$(NO_3)_2$-$NaNO_3$-KNO_3 eutectic salt for direct energy storage in CSP plants [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 141: 7-13.

[25] FERNÁNDEZ Á G, CABEZA L F. Corrosion monitoring and mitigation techniques on advanced thermal energy storage materials for CSP plants [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 192: 179-187.

[26] WANG W L, GUAN B, LI X L, et al. Corrosion behavior and mechanism of austenitic stainless steels in a new quaternary molten salt for concentrating solar power [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 194: 36-46.

[27] LI X L, WEI X L, LU J F, et al. Corrosion resistance of 310S and 316L austenitic stainless steel in a quaternary molten salt for concentrating solar power [J]. Energy Procedia, 2017, 142: 3590-3596.

[28] GOMEZ-VIDAL J C, NOEL J, WEBER J. Corrosion evaluation of alloys and *M*CrAl*X* coatings in molten carbonates for thermal solar applications [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 157: 517-525.

[29] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ L, INTXAURTIETA-CARCEDO M, BONDARCHUK O, et al. Effect of dynamic conditions on high-temperature corrosion of ternary carbonate salt for thermal energy storage applications [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 240: 111666.

[30] LIU T L, XU X H, LIU W R, et al. Corrosion of alloys in high temperature molten-salt heat transfer fluids with air as the cover gas [J]. Solar Energy, 2019, 191: 435-448.

[31] ZHUANG X R, LIU W R, XU X H. Hot corrosion of different alloys in chloride and carbonate molten-salt mixtures under argon atmosphere [J]. Solar Energy, 2019, 189: 254-267.

[32] DE MIGUEL M T, ENCINAS-SÁNCHEZ V, LASANTA M I, et al. Corrosion resistance of HR3C to a carbonate molten salt for energy storage applications in CSP plants [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 157: 966-972.

[33] VIGNAROOBAN K, XU X H, WANG K, et al. Vapor pressure and corrosivity of ternary metal-chloride molten-salt based heat transfer fluids for use in concentrating solar power systems [J]. Applied Energy, 2015, 159: 206-213.

[34] DING W J, SHI H, XIU Y L, et al. Hot corrosion behavior of commercial alloys in thermal energy storage material of molten $MgCl_2$/KCl/NaCl under inert atmosphere [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 184: 22-30.

[35] 刘辉, 邱玮, 冷滨, 等. 304和316H不锈钢在LiF-NaF-KF熔盐中的腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(1): 51-58.
LIU H, QIU W, LENG B, et al. Research on the corrosion behavior of 304 and 316H stainless steels in LiF-NaF-KF molten salt [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(1): 51-58.

[36] 丁祥彬, 孙华, 俞国军, 等. HastelloyN合金和316L不锈钢在LiF-NaF-KF熔盐中的腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(6): 543-548.
DING X B, SUN, H, YU G J, et al. Study on the corrosion behavior of Hastelloy N alloy and 316L stainless steel in LiF-NaF-KF molten salt environment [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2015, 35(6): 543-548.

[37] PATEL N S, PAVLÍK V, BOČA M. High-temperature corrosion behavior of superalloys in molten salts-a review [J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2017, 42(1): 83-97.

[38] HU S S, FINKLEA H, LIU X B. A review on molten sulfate salts induced hot corrosion [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 90: 243-254.

[39] BELL S, STEINBERG T, WILL G. Corrosion mechanisms in molten salt thermal energy storage for concentrating solar power

[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 114: 109328.

[40] KONDO M, NAGASAKA T, SAGARA A, et al. Metallurgical study on corrosion of austenitic steels in molten salt LiF - BeF_2 (Flibe)[J].Journal of Nuclear Materials, 2009, 386: 685-688.

[41] WANG M J, ZENG S, ZHANG H H, et al. Corrosion behaviors of 316 stainless steel and Inconel 625 alloy in chloride molten salts for solar energy storage[J].High Temperature Materials and Processes, 2020, 39(1): 340-350.

[42] LIU Q Y, QIAN J, BARKER R, et al. Application of double loop electrochemical potentio-kinetic reactivation for characterizing the intergranular corrosion susceptibility of stainless steels and Ni-based alloys in solar nitrate salts used in CSP systems[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105717.

[43] PHUNG-ON I. An investigation of reheat cracking in the weld heat affected zone of type 347 stainless steel [D]. Columbus: The Ohio State University, 2007.

[44] LIMA A S, NASCIMENTO A M, ABREU H F G, et al. Sensitization evaluation of the austenitic stainless steel AISI 304L, 316L, 321 and 347[J].Journal of Materials Science, 2005, 40(1): 139-144.

[45] KELLY B. Lessons learned, project history and operating experience of the Solar Two Project [M]. United States, Sandia National Laboratories, 2000..

[46] LIU Q Y, WANG C, QIAN J, et al. Investigation of the early stage corrosion characteristics of molten (nitrate) salt-oxide-metal interfaces, and the links to interfacial thermo-mechanical stress[J].Corrosion Science, 2023, 220: 111282.

[47] BRADSHAW R W, MEEKER D E. High-temperature stability of ternary nitrate molten salts for solar thermal energy systems[J]. Solar Energy Materials, 1990, 21(1): 51-60.

[48] LI H, FENG X C, WANG X W, et al. Impact of temperature on corrosion behavior of austenitic stainless steels in solar salt for CSP application: an electrochemical study[J].Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 239: 111661.

[49] 张雪薇, 李洪川, 李生云, 等. 不锈钢在高温熔盐中的腐蚀和损伤研究现状 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(3): 349-354.
ZHANG X W, LI H C, LI S Y, et al. Research status on corrosion and damage of stainless steel in high temperature molten salt [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31 (3): 349-354.

[50] GOODS S, BRADSHAW R, PRAIRIE M, et al. Corrosion of stainless and carbon steels in molten mixtures of industrial nitrates [R]. [S. 1.: s. n.], 1994: 7-35.

[51] BRADSHAW R W, GOODS S H. Corrosion of alloys and metals by molten nitrates [R]. [S. 1.: s. n.], 2001: 3-31.

[52] 郭贵芬. Fe、Cr、Ni及其氧化物在NaCl、KCl熔盐中的腐蚀及机理 [D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
GUO G F. Corrosion behavior and mechanisms of Fe, Cr, Ni and their oxides in NaCl and KCl melts [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.

[53] BARAKA A, ABDEL-ROHMAN A I, EL HOSARY A A. Corrosion of mild steel in molten sodium nitrate-potassium nitrate eutectic[J].British Corrosion Journal, 1976, 11(1): 44-46.

[54] ZHANG X M, ZHANG C C, WU Y T, et al. Experimental research of high temperature dynamic corrosion characteristic of stainless steels in nitrate eutectic molten salt [J]. Solar Energy, 2020, 209: 618-627.

[55] KRUIZENGA A M. Corrosion mechanisms in chloride and carbonate salts[R].[S. 1.: s. n.], 2012: 8-33.

[56] MEHOS M S, TURCHI C S, VIDAL J, et al. Concentrating solar power Gen3 demonstration roadmap [R]. [S. 1.: s. n.], 2017: 5-115.

[57] RIDHARAN K, ALLEN T R. Corrosion in molten salts [M]// Molten Salts Chemistry. Amsterdam: Elsevier, 2013: 241-267.

[58] DING W J, BAUER T. Progress in research and development of molten chloride salt technology for next generation concentrated solar power plants[J].Engineering, 2021, 7(3): 334-347.

[59] VILLADA C, DING W J, BONK A, et al. Engineering molten $MgCl_2$-KCl-NaCl salt for high-temperature thermal energy storage: review on salt properties and corrosion control strategies[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 232: 111344.

[60] SUN H, WANG J Q, TANG Z F, et al. Assessment of effects of Mg treatment on corrosivity of molten NaCl-KCl-$MgCl_2$ salt with Raman and Infrared spectra [J]. Corrosion Science, 2020, 164: 108350.

[61] GRABKE H J, REESE E, SPIEGEL M. The effects of chlorides, hydrogen chloride, and sulfur dioxide in the oxidation of steels below deposits[J].Corrosion Science, 1995, 37(7): 1023-1043.

[62] ZAHS A, SPIEGEL M, GRABKE H J. Chloridation and oxidation of iron, chromium, nickel and their alloys in chloridizing and oxidizing atmospheres at 400-700 ℃[J].Corrosion Science, 2000, 42(6): 1093-1122.

[63] 马海涛. 高温氯盐环境中金属材料的腐蚀 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
MA H T. Corrosion of metal materials in high-temperature chloride saline environments [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.

[64] GRÉGOIRE B, OSKAY C, MEIßNER T M, et al. Corrosion mechanisms of ferritic-martensitic P91 steel and Inconel 600 nickel-based alloy in molten chlorides. part Ⅱ: NaCl-KCl-$MgCl_2$ ternary system[J].Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 216: 110675.

[65] VILLADA C, BONK A, BAUER T, et al. High-temperature stability of nitrate/nitrite molten salt mixtures under different atmospheres[J].Applied Energy, 2018, 226: 107-115.

[66] LIU Q Y, QIAN J, BARKER R, et al. Effect of thermal cycling on the corrosion behaviour of stainless steels and Ni-based alloys in molten salts under air and argon[J].Solar Energy, 2022, 238: 248-257.

[67] SÖTZ V A, BONK A, STEINBRECHER J, et al. Defined purge gas composition stabilizes molten nitrate salt-experimental prove and thermodynamic calculations [J]. Solar Energy, 2020, 211: 453-462.

[68] 孙华，苏兴治，张鹏，等. 聚焦太阳能热发电用熔盐腐蚀研究现状与展望[J]. 腐蚀科学与防护技术，2017，29(3)：282-290.
SUN H，SU X Z，ZHANG P，et al. Focus on the research status and prospects of molten salt corrosion for solar thermal power generation [J]. Corrosion Science and Protection Technology，2017，29(3)：282-290.

[69] 张恩耀，崔珊，周鹏，等. 太阳能热发电高温熔盐腐蚀机理及其影响因素[J]. 化工科技，2021，29(1)：71-76.
ZHANG E. Y，CUI S，ZHOU P，et al. Corrosion mechanism and influencing factors of high temperature molten salt in solar thermal power generation[J]. Chemical Engineering and Technology，2021，29(1)：71-76.

[70] 张金平，周强，王定美，等. 太阳能光热发电技术及其发展综述[J]. 综合智慧能源，2023，45(2)：44-52.
ZHANG J P，ZHOU Q，WANG D M，et al. Overview of solar thermal power generation technology and its development. Journal of Comprehensive Intelligent Energy，2023，45(2)：44-52.

[71] 孙华，张鹏，王建强. 传热储热用熔融硝酸盐及其腐蚀问题[J]. 腐蚀科学与防护技术，2017，29(5)：567-574.
SUN H，ZHANG P，WANG J Q. Molten nitrate salts for heat transfer and energy storage and their corrosion issues[J]. Corrosion Science and Protection Technology，2017，29(5)：567-574.

[72] LUO J，TARIQ N U H，LIU H H，et al. Robust corrosion performance of cold sprayed aluminide coating in ternary molten carbonate salt for concentrated solar power plants[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，2022，237：111573.

[73] NI C S，LU L Y. Electrochemical impedance and modelling studies of the corrosion of three commercial stainless steels in molten carbonate [J]. International Journal of Corrosion，2014，2014：721208.

[74] BIEDENKOPF P，SPIEGEL M，GRABKE H J. High temperature corrosion of low and high alloy steels under molten carbonate fuel cell conditions[J]. Materials and Corrosion，1997，48(8)：477-488.

[75] DING W J，BONK A，BAUER T. Corrosion behavior of metallic alloys in molten chloride salts for thermal energy storage in concentrated solar power plants：a review[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering，2018，12(3)：564-576.

[76] DING W J，GOMEZ-VIDAL J，BONK A，et al. Molten chloride salts for next generation CSP plants：electrolytical salt purification for reducing corrosive impurity level[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，2019，199：8-15.

[77] KURLEY J M，HALSTENBERG P W，MCALISTER A，et al. Enabling chloride salts for thermal energy storage：implications of salt purity[J]. RSC Advances，2019，9(44)：25602-25608.

[78] DING W J，BONK A，GUSSONE J，et al. Cyclic voltammetry for monitoring corrosive impurities in molten chlorides for thermal energy storage[J]. Energy Procedia，2017，135：82-91.

[79] ONG T C，SARVGHAD M，LIPPIATT K，et al. Review of the solubility，monitoring，and purification of impurities in molten salts for energy storage in concentrated solar power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2020，131：110006.

[80] 欧阳鑫，胡昕明，孙殿东，等. 太阳能光热发电用347H耐热不锈钢板材的研制[J]. 热加工工艺，2022，51(16)：67-71.
OUYANG X，HU X M，SUN D D，et al. Development of 347H heat-resistant stainless steel plate for solar thermal power generation [J]. Heat Treatment Process，2022，51(16)：67-71.

[81] MOORE R C，SIEGEL N P，KOLB G J，et al. Design considerations for concentrating solar power tower systems employing molten salt [R]. [S. l.：s. n.]，2010：12-39.

[82] RAMOS P，COELHO R S，SOLDERA F，et al. Residual stress analysis in thermally grown oxide scales developed on Nb-alloyed refractory austenitic stainless steels[J]. Corrosion Science，2021，178：109066.

[83] 杜宝强，王怀有，李锦丽，等. 氯离子对Solar Salt熔盐热物性及腐蚀性的影响[J]. 太阳能学报，2018，39(10)：2767-2771.
DU B Q，WANG H Y，LI J Y，et al. Effects of chloride ion on thermal properties and corrosivity of solar salt molten salt [J]. Journal of Solar Energy，2018，39(10)：2767-2771.

[84] 尹绪中，李恒，唐建群，等. 氯离子杂质对304和316L奥氏体不锈钢在熔融硝酸盐中腐蚀行为的影响[J]. 机械工程材料，2022，46(3)：25-30.
YIN X Z，LI H，TANG J Q，et al. Influence of chloride impurities on the corrosion behavior of 304 and 316L austenitic stainless steels in molten nitrate salt [J]. Materials for Mechanical Engineering，2022，46(3)：25-30.

[85] GAO Q，LU Y W，YANG Y C，et al. Are unexpected chloride ions in molten salt really harmful to stainless steel?[J]. Journal of Energy Storage，2022，54：105317.

[86] 高祺，鹿院卫，于强，等. 杂质氯离子对新型四元硝酸盐腐蚀性的影响[J]. 太阳能学报，2022，43(12)：119-123.
GAO Q，LU Y W，YU Q，et al. Influence of impurity chloride ions on corrosiveness of novel quaternary nitrate salts[J]. Journal of Solar Energy，2022，43(12)：119-123.

[87] LI H，YANG X Y，YIN X Z，et al. Effect of chloride impurity on corrosion kinetics of stainless steels in molten solar salt for CSP application：experiments and modeling[J]. Oxidation of Metals，2021，95(3)：311-332.

[88] LI H，WANG X W，YIN X Z，et al. Corrosion and electrochemical investigations for stainless steels in molten solar salt：the influence of chloride impurity[J]. Journal of Energy Storage，2021，39：102675.

[89] ZHU M，MA H F，WANG M J，et al. Effects of cations on corrosion of Inconel 625 in molten chloride salts[J]. High Temperature Materials and Processes，2016，35(4)：337-345.

[90] FERNÁNDEZ A G，GALLEGUILLOS H，PÉREZ F J. Thermal influence in corrosion properties of Chilean solar nitrates[J]. Solar Energy，2014，109：125-134.

[91] FERNÁNDEZ Á G，CABEZA L F. Molten salt corrosion mechanisms of nitrate based thermal energy storage materials for concentrated solar power plants：a review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，2019，194：160-165.

[92] LAI G Y. High-temperature corrosion and materials applications [M]. Materials Park，OH：ASM International，2007.

[93] DING W J, BONK A, BAUER T. Molten chloride salts for next generation CSP plants: selection of promising chloride salts & study on corrosion of alloys in molten chloride salts[C]//SolarPACES 2018: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. Melville, USA: AIP Publishing, 2019.

[94] DING W J, SHI H, JIANU A, et al. Molten chloride salts for next generation concentrated solar power plants: mitigation strategies against corrosion of structural materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 193: 298-313.

[95] MOHAN G, VENKATARAMAN M, GOMEZ-VIDAL J, et al. Assessment of a novel ternary eutectic chloride salt for next generation high-temperature sensible heat storage[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 167: 156-164.

[96] ZHU M, ZENG S, ZHANG H H, et al. Electrochemical study on the corrosion behaviors of 316 SS in HITEC molten salt at different temperatures[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 186: 200-207.

基金项目：甘肃省科技重大专项(22ZD6GA008)；甘肃省重点研发计划(25YFGA037)；国家自然科学基金(51961022)；甘肃省高等学校产业支撑计划(GCJ2022-38)

收稿日期：2024-01-29；录用日期：2024-03-27

通讯作者：石玗(1973—)，男，教授，博士，主要从事焊接技术及材料服役可靠性研究，联系地址：甘肃省兰州市七里河区兰工坪287号兰州理工大学兰工坪校区材料科学与工程学院(730050)，E-mail：shiyu@lut.edu.cn

(本文责编：齐书涵)