中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第2期(总第226期)
Vol. 47 No. 2 2026(Sum No. 226)

文章编号：1673-3193(2026)02-0136-09 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(2): 136-144.

成分和微观组织结构对430不锈钢耐点蚀性能的影响

张利涛，杨永超，郝文慧，柳 阳，王志斌

（太原钢铁（集团）有限公司 先进不锈钢全国重点实验室，山西 太原 030003）

摘 要：针对商用430不锈钢耐点蚀性能存在显著差异而其根本原因尚未系统揭示的问题，本文选取了4家不同钢厂(A、B、C、D)生产的430不锈钢冷轧板，通过点蚀浸泡实验、临界点蚀温度(Critical Pitting Temperature，CPT)和点蚀电位测试，结合化学成分与微观组织分析，系统对比了其耐点蚀性能。研究不仅评估了点蚀当量(Pitting Resistance Equivalent Number，PREN)的理论预测效果，更着重揭示了实际微观组织结构对性能的决定性作用。结果表明：A-430SS的耐点蚀性能最优，其在3.5%NaCl溶液中的平均点蚀电位最高(40.7 mV)，在Cl^-质量分数为50×10^{-6}的溶液中的CPT最高(57.3 ℃)；B-430SS次之；C-430SS与D-430SS最差。B-430SS虽因Cr(16.78%)和N(0.052%)的质量分数较高而具有最高的PREN值(17.61)，但其实际性能并非最佳。微观组织分析揭示了关键原因：A-430SS凭借最优的纯净度(D类夹杂物仅5个，远低于C-430SS的23个和D-430SS的20个)和完全再结晶的均匀无条带组织，最大限度抑制了点蚀形核。相反，B-430SS中大量的夹杂物和不完全再结晶导致的条带组织，使其高PREN的成分优势无法充分发挥。本研究明晰了微观组织缺陷可主导商用430不锈钢的耐点蚀性能，使基于成分的PREN预测失效，为高性能铁素体不锈钢的工艺优化与选材提供了重要依据。

关键词：430不锈钢；点蚀；微观结构；临界点蚀温度；点蚀当量；点蚀电位

中图分类号：TG142.71 **文献标识码：**A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.10.0026

引用格式：张利涛，杨永超，郝文慧，等. 成分和微观组织结构对430不锈钢耐点蚀性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(2)：136-144.

ZHANG Litao，YANG Yongchao，HAO Wenhui，et al. Effect of composition and microstructure on the pitting resistance of 430 stainless steel[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition)，2026，47(2)：136-144.

Effect of Composition and Microstructure on the Pitting Resistance of 430 Stainless Steel

ZHANG Litao，YANG Yongchao，HAO Wenhui，LIU Yang，WANG Zhibin

（State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel of Taiyuan Iron & Steel (Group) Co.，Ltd.，Taiyuan 030003，China）

Abstract: To address the issue that the pitting corrosion resistance of commercial 430 stainless steel varies significantly without systematic clarification on the root cause，cold-rolled 430 stainless steel sheets from four different steel mills (A，B，C，D) were selected in this study. Their pitting corrosion resistance was systematically compared using immersion tests，critical pitting temperature (CPT) measurements，and pitting potential tests，combined with chemical composition and microstructural characterization. This investigation

收稿日期：2025-10-30

基金项目：山西省科技重大专项项目(202401050202001)；山西省科技成果转化引导专项(202204021301057)

作者简介：张利涛(1988—)，男，博士，工程师，主要从事不锈钢的腐蚀与防护方面的研究。E-mail：zhanglt05@outlook.com。

not only evaluated the theoretical predictability of the pitting resistance equivalent number (PREN), but also emphasized the decisive role of the actual microstructure on corrosion performance. Results show that A-430SS exhibits the best pitting corrosion resistance, with the highest average pitting potential (40.7 mV) in 3.5% NaCl solution and the highest CPT (57.3 ℃) in Cl^- solution of mass fraction 50×10^{-6}, followed by B-430SS, while C-430SS and D-430SS show the poorest performance. Although B-430SS possesses the highest PREN value (17.61) due to its relatively high mass fraction of Cr (16.78%) and N (0.052%), its actual corrosion resistance is not optimal. Microstructural analysis reveals that A-430SS has excellent cleanliness with only 5 type-D inclusions, much lower than 23 in C-430SS and 20 in D-430SS, and a fully recrystallized, uniform and band-free microstructure, which effectively inhibits pitting nucleation. In contrast, the large number of inclusions and banded structure caused by incomplete recrystallization in B-430SS greatly weakens its compositional advantage of high PREN. This study clarifies that microstructural defects can dominate the pitting corrosion resistance of commercial 430 stainless steel, invalidating the composition-based PREN prediction, and provides an important basis for the processing optimization and material selection of high-performance ferritic stainless steels.

Key Words: 430 stainless steel; pitting; microstructure; critical pitting temperature; pitting resistance equivalent number; pitting potential

0　引　言

铁素体不锈钢因其不含镍的成本优势以及独特的性能组合，已成为奥氏体不锈钢的重要替代材料[1]，其全球消费量正随着应用领域的拓展而持续增长[2]。针对镍资源短缺和镍价上涨的现状，国内大型钢铁企业已成功开发出高性能的节镍型铁素体不锈钢[3]。其中，AISI 430不锈钢是产量和用量最大的钢种，它不仅成本较低，还具备与奥氏体不锈钢相媲美的耐点蚀性、加工性和抗氧化性[4]，同时拥有更优的导热性、导磁性及耐应力腐蚀性能[5]。这些特点使其广泛应用于汽车装饰条、洗衣机内筒及微波炉外壳等领域[6]。

然而，430不锈钢在实际应用中出现的腐蚀问题，严重影响了产品的外观与耐久性，成为制约其进一步推广的关键因素。其腐蚀行为受到材料自身因素[7]与环境因素[8]的共同影响。材料因素包括合金成分、微观组织以及夹杂物的含量与分布[9]；环境因素则包括侵蚀性离子（如Cl^-）、湿度与温度等[10]。不锈钢的耐点蚀性依赖于表面钝化膜的保护作用[11]。但是，430不锈钢中碳、氮等间隙原子溶解度低[12]，易析出碳氮化物，导致周围区域形成贫铬区，从而恶化其耐点蚀性能[13]。通过添加Nb、Ti等稳定化元素，可以固定C、N原子，有效减少贫铬区，提升耐蚀性[14]。研究还表明[15]，在850～1 150 ℃的敏化温度范围内，晶粒会长大，导致耐点蚀性能明显下降。此外，改善表面状态、降低表面粗糙度也能显著增强其抗点蚀能力[16]。在环境方面，Cl^-浓度升高会加速钝化膜溶解，降低膜电阻，从而使其耐腐蚀性下降[5]。

尽管上述单一因素对430不锈钢耐蚀性的影响已被广泛研究，但对于不同厂商生产的商用430不锈钢，其成分、微观组织结构与耐点蚀性能之间的系统性对比与关联研究尚不充分。这种由实际工业流程带来的复杂交互作用，恰恰是决定产品最终性能的关键，却常被简化模型所忽略。为此，本研究选取4家不同厂商的430不锈钢，通过点蚀浸泡、临界点蚀温度（CPT）与点蚀电位测试，系统对比其耐点蚀性能。研究不仅关注PREN的理论预测，更着重揭示微观组织（如夹杂物、条带结构）对性能的实际决定性作用，从而明晰高PREN值材料性能未达预期的根源。相关工作旨在为430不锈钢的选材与工艺优化提供直接依据。

1　实　验

1.1　实验材料与样品制备

本实验选用4家知名钢厂（分别标记为A-430SS、B-430SS、C-430SS和D-430SS）生产的商用430不锈钢冷轧板作为研究对象。采用电感耦合等离子体原子发射光谱（ICP-AES）分析了材料的主要化学成分，包括Cr、C、N、Si、Mn、P和S。

使用线切割制备不同规格的试样：金相分析试样和电化学试样的尺寸为10 mm×10 mm×3 mm，点蚀浸泡试样的尺寸为20 mm×30 mm×3 mm。金

相样品经水磨砂纸逐级打磨后，使用1 μm金刚石抛光膏进行机械抛光。随后，利用Axio Observer Z1m金相显微镜观察样品中的夹杂物形貌与分布。为清晰显示其显微组织，采用氯化铁-盐酸溶液对抛光后的样品进行10 s的化学刻蚀。

对于电化学测试，将铜导线焊接于试样的非工作表面，并用环氧树脂进行冷镶嵌固化。所有电化学试样的工作表面均经2000#砂纸打磨处理，以保持一致的表面状态。

1.2 电化学测试方法

所有电化学测试均在经典三电极体系中进行：以不锈钢试样为工作电极，铂片为对电极，饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。文中所有电位均相对于SCE。电化学测试设备均使用CHI660E电化学工作站(上海辰华)。

动电位极化测试在质量浓度为3.5%的NaCl溶液(由分析纯NaCl和去离子水配制)中进行，溶液温度通过恒温水浴锅维持在35 ℃。测试前，工作电极先在开路电位(OCP)下稳定30 min。随后，从−10 mV(相对于OCP)开始，以20 mV·min^{-1}的扫描速率进行阳极极化，直至阳极电流密度达到10 A·m^{-2}为止。

临界点蚀温度(CPT)测试在Cl^-的质量分数分别为50×10^{-6}，100×10^{-6}和500×10^{-6}的溶液中进行。测试溶液温度通过LAUDA ECO SILVER恒温槽精确控制。测试时，先将体系在5 ℃下于开路电位稳定5 min，随后以1 ℃·min^{-1}的速率匀速升温，同时对工作电极施加+300 mV(相对于SCE)的恒定阳极电位，并持续监测电流随温度的变化。

2 结 果

2.1 材料成分和金相分析

四种不锈钢的化学成分如表1所示，从中可以看出，A-430SS、C-430SS和D-430SS的Si、N、Cr、Mn质量分数相似，而B-430SS的Si、N、Cr和Mn质量分数相对较高。依照《GB/T10561—2005钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验方法》，将不锈钢中的硫化物类、氧化铝类、硅酸盐类和球状氧化物类夹杂物分别定义为A、B、C和D类夹杂物，并将按此标准进行的不同厂家430SS夹杂物分析结果列于表2和图1中。所有厂家的430SS中都没有出现A类夹杂物，仅包含B、C和D类夹杂物。

表1 不同厂家430SS的主要化学成分(质量分数)

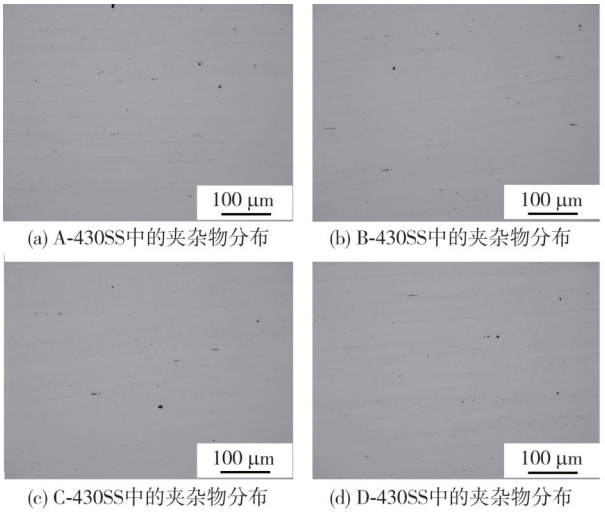
Tab. 1 Main chemical composition (mass fraction) of 430SS from different manufacturers %

样品	ω_C	ω_{Si}	ω_N	ω_{Cr}	ω_S	ω_P	ω_{Mn}
A-430SS	0.044	0.35	0.036	16.16	0.002	0.022	0.34
B-430SS	0.046	0.47	0.052	16.78	0.001	0.029	0.55
C-430SS	0.042	0.35	0.035	16.16	0.004	0.038	0.34
D-430SS	0.044	0.31	0.044	16.18	0.002	0.029	0.33

表2 不同厂家430SS的内部夹杂物分析结果

Tab. 2 Analysis of inclusions in 430SS from different manufacturers

样品	A	B				C		D	
		0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
		细	粗	细	粗	细	粗	细	粗
A-430SS	0	2	0	0	0	1	1	4	1
B-430SS	0	0	2	5	0	4	1	18	3
C-430SS	0	3	0	0	0	0	0	23	0
D-430SS	0	5	1	0	0	0	1	19	1



(a) A-430SS中的夹杂物分布 (b) B-430SS中的夹杂物分布

(c) C-430SS中的夹杂物分布 (d) D-430SS中的夹杂物分布

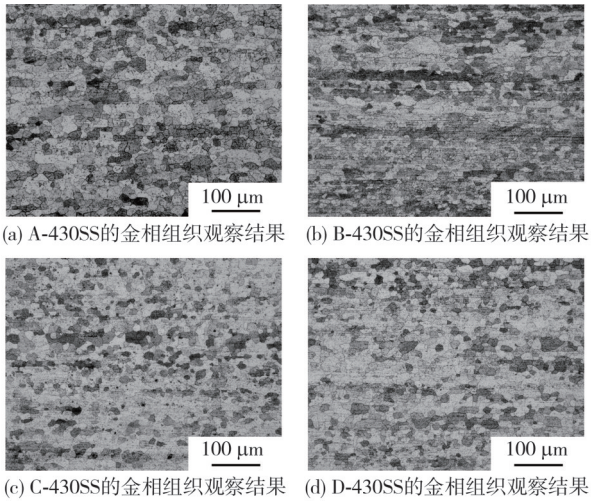
图1 不同厂家430SS的夹杂物分布

Fig. 1 Distribution of inclusions in 430SS from different manufacturers

A-430SS整个检验面出现2个B类夹杂物和2个C类夹杂物，级别均为0.5级，但D类夹杂物很少，仅出现5次；B-430SS中的B类夹杂物数量较多，整个检验面出现7次，级别最高为1级，C类和D类夹杂物数量要明显多于A-430SS；C-430SS中的夹杂物以B类和D类夹杂物为主，B类夹杂物为0.5级，整个检验面出现3次，D类夹杂物数量为23个；D-430SS中的夹杂物以B类和D类夹杂物为主，B类夹杂物为0.5级，整个检验面出现6次；D类夹杂物为0.5级，整个检验面的D类夹杂物有20次。就不锈钢的纯净度而言，A-430SS的夹杂物控制最优，B-430SS次之，C-430SS和D-430SS的夹杂物数量明显偏多，特别是D类夹杂物数量更多。

不同厂家430SS的典型金相显微组织如图2所示。通过对每个样品至少5个不同视场的重复观察，确认A-430SS的晶粒均匀性最优，晶粒度

为8级，无条带状组织；B-430SS中的晶粒均匀性较差，晶粒度为7～9级，并且在超过80%的观察视场中存在明显的条带状组织；C-430SS和D-430SS中的晶粒相对均匀，晶粒度为8.5级，存在有条带状组织，但没有B-430SS中的严重。从金相组织的结果可以看出，A-430SS中的显微组织控制最好，C-430SS次之，D-430SS再次之，B-430SS的组织控制最差。



(a) A-430SS的金相组织观察结果　(b) B-430SS的金相组织观察结果

(c) C-430SS的金相组织观察结果　(d) D-430SS的金相组织观察结果

图 2　不同厂家430SS的金相组织观察结果

Fig. 2　Metallographic observation results of 430SS from different manufacturers

2.2　不同厂家430SS的耐点蚀性能测试

2.2.1　430SS的阳极极化曲线测量

430SS在3.5%NaCl溶液中典型的阳极极化曲线如图3所示，以阳极极化曲线上电流突变时的电位中最正的电位值（E_p）来表示点蚀电位。其在3.5%NaCl溶液中的点蚀电位分布如图4所示。

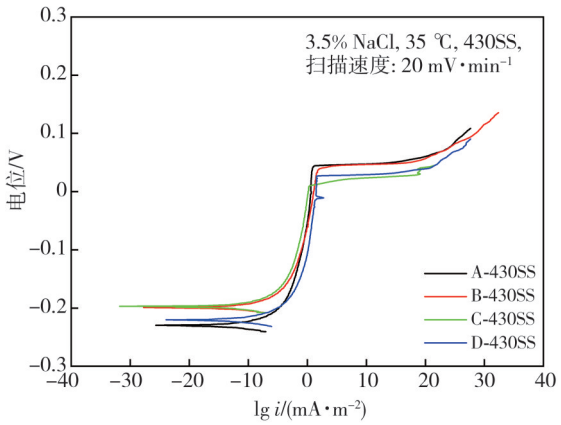


图 3　不同厂家430SS在3.5%NaCl溶液中典型的阳极极化曲线

Fig. 3　Typical anodic polarization curves of 430SS from different manufacturers in 3.5% NaCl solution

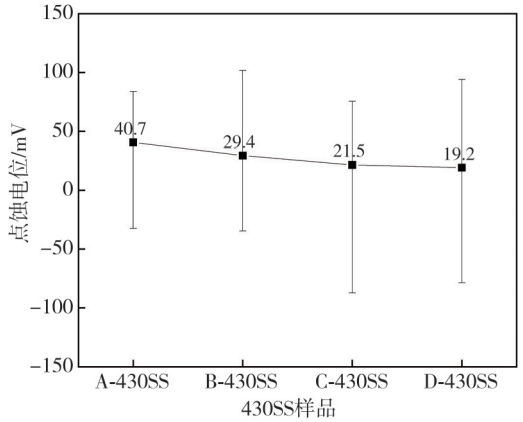


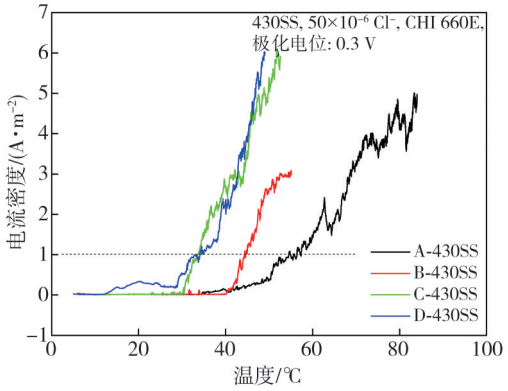
图 4　不同厂家430SS在3.5%NaCl溶液中的点蚀电位

Fig. 4　Pitting potentials of 430SS from different manufacturers in 3.5% NaCl solution

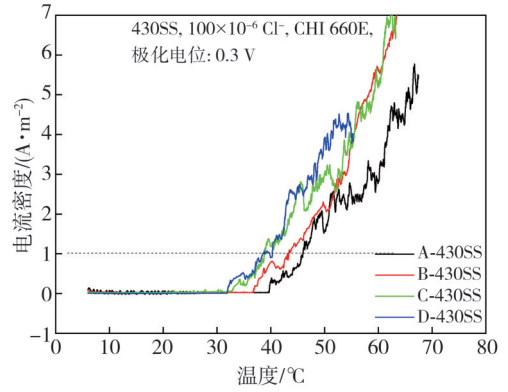
A-430SS、B-430SS、C-430SS和D-430SS在3.5%NaCl溶液中的点蚀电位7次测量的平均值分别为40.7，29.4，21.5和19.2 mV。

2.2.2　430SS在不同Cl^-质量分数下的临界点蚀温度（CPT）

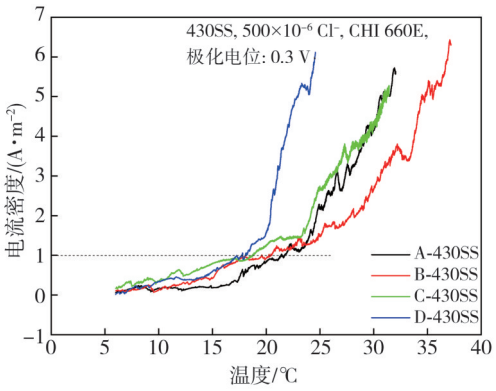
不同厂家430SS在含不同质量分数的Cl^-溶液中的CPT测量曲线如图5所示。



(a) 430SS在Cl^-质量分数为50×10^{-6}溶液中的CPT测量曲线



(b) 430SS在Cl^-质量分数100×10^{-6}溶液中的CPT测量曲线



(c) 430SS在Cl⁻质量分数500×10⁻⁶溶液中的CPT测量曲线

图5 不同厂家430SS在不同质量分数Cl⁻溶液中的CPT测量曲线

Fig. 5 CPT measurement curves of 430SS from different manufacturers in solutions containing different mass fraction of Cl⁻

由图5可以看出，电流曲线在低温时都处在非常低的腐蚀电流水平，当温度升高到某一特定值后，电流迅速增加，认为此时材料表面出现了点蚀，此时的温度即为临界点蚀温度。参照《ASTM G150-18(2024)不锈钢和相关合金的电化学临界点蚀温度标准测试方法》，本文以电流-时间曲线上对应电流密度1 A·m^{-2}时的温度值来表示临界点蚀温度。

4组样品的临界点蚀温度见图6，以A-430SS为例，其在Cl⁻质量分数分别为50×10^{-6}，100×10^{-6}和500×10^{-6}溶液中的临界点蚀温度分别为57.3，45.9和21.6 ℃。随着Cl⁻质量分数的升高，材料的临界点蚀温度明显下降。其他3组430SS均表现出相似的实验规律。

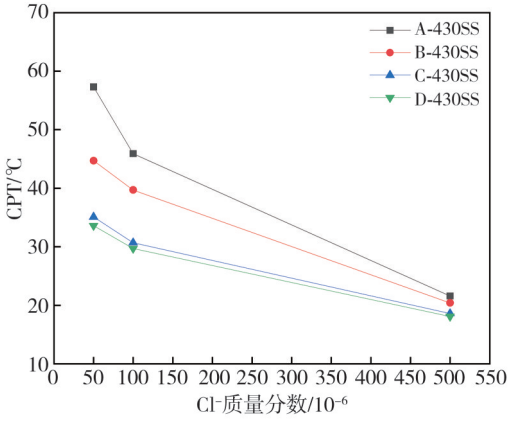


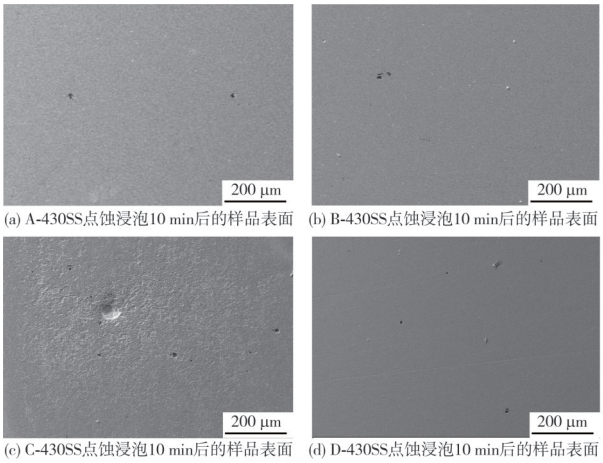
图6 不同厂家430SS在不同质量分数Cl⁻溶液中的CPT测量结果

Fig. 6 CPT measurement results of 430SS from different manufacturers in Cl⁻ solutions of different mass fraction

4组样品在相同的Cl⁻溶液浓度下，A-430SS的临界点蚀温度最高，B-430SS次之，而C-430SS和D-430SS的临界点蚀温度基本一致，都明显低于A-430SS和B-430SS的临界点蚀温度。这种规律在Cl⁻质量分数分别为50×10^{-6}，100×10^{-6}和500×10^{-6}的溶液中均得到了体现。

2.2.3 430SS的点蚀浸泡测试

4组430不锈钢点蚀浸泡10 min后的扫描电镜观察结果如图7所示。可以看出，经过10 min短期浸泡，4组样品均出现了明显的点蚀坑。A-430SS仅有少量的微小点蚀坑；B-430SS和D-430SS出现了与A-430SS相似大小的点蚀坑，但其数量明显较多；C-430SS表面出现了明显大尺寸的点蚀坑，并且数量也很多。



(a) A-430SS点蚀浸泡10 min后的样品表面 (b) B-430SS点蚀浸泡10 min后的样品表面

(c) C-430SS点蚀浸泡10 min后的样品表面 (d) D-430SS点蚀浸泡10 min后的样品表面

图7 不同厂家430SS样品点蚀浸泡10 min后的样品表面

Fig. 7 Surface morphology of 430SS from different manufacturers after 10-minute pitting immersion test

结合4组不锈钢的点蚀点位、临界点蚀温度和点蚀浸泡实验结果可以看出，同样的表面状态下，A-430SS的耐点蚀性能最好，B-430SS次之，C-430SS和D-430SS的耐点蚀性能最差。

3 讨 论

不锈钢的耐点蚀性能受多种因素影响，其中化学成分和微观组织结构是两大关键要素。

3.1 化学成分与PREN

点蚀当量(PREN)是评估不锈钢耐点蚀能力的一个重要理论指标，其计算公式为PREN=Cr%+3.3Mo%+16N%[17]。理论上，PREN值越高，不锈钢的耐点蚀能力越强[18]。在本文分析的4种430不锈钢中，A-430SS、C-430SS和D-430SS的Si、N、Cr、Mn质量分数相似，而B-430SS的Si、N、Cr和Mn质量分数相对较高。根据PREN公式可得，A-430SS、B-430SS、C-430SS和D-430SS的PREN值分别为16.74，17.61，16.72和16.88。从这些数值

可以看出，B-430SS具有最高的理论PREN值，暗示其应具备最佳的耐点蚀能力。铬（Cr）是形成不锈钢钝化膜的关键元素，对提高耐腐蚀性至关重要[19]。钼（Mo）能显著提高不锈钢在含氯化物环境中的抗点蚀能力，增强钝化膜的稳定性并促进再钝化[20]。氮（N）则能通过在钝化膜中的积累来减小局部酸性环境的范围，抑制点蚀的萌生和扩展[21]。因此，B-430SS较高的Cr和N质量分数确实为其提供了理论上的优势。

然而，PREN作为一个基于化学成分的经验公式，存在明显的局限性。它未能直接反映材料的微观结构、第二相的存在及其析出物对耐腐蚀性的影响[22]，也未考虑不锈钢的实际表面特性（如机械加工、表面处理和冷加工）对腐蚀行为的影响[23]。

3.2　微观组织结构对耐点蚀性能的影响

不锈钢的耐点蚀性能与微观组织结构密切相关，其中钝化膜的完整性和稳定性起着决定性作用[24]。微观组织结构对钝化膜及其耐点蚀性能的影响主要体现在以下几个方面：

1）夹杂物对不锈钢的耐点蚀性能有显著影响。不锈钢中的夹杂物会破坏其表面均匀性，在夹杂物与基体相界面处，由于原子排列紊乱，能量较高，热力学稳定性差，极易诱发点蚀[25]。研究表明，通过优化夹杂物类型和数量可以提高耐点蚀性能[26]。MnS夹杂物是最具活性的点蚀诱发源，其危害源于电化学溶解行为：在含Cl^-溶液中，MnS发生$MnS+2H_2O \rightarrow Mn^{2+}+H_2S+2OH^-$或$MnS \rightarrow Mn^{2+}+S^0+2e^-$的反应。此过程不仅直接形成微坑，其产物（如$H_2S$）更会强烈局部酸化微环境，从而催化钝化膜破裂并抑制再钝化。相比之下，氧化物夹杂（如B类Al_2O_3和D类球状氧化物）本身的化学惰性，其危害主要来自于基体间的物理界面，该界面是缺陷和内应力的集中区，导致钝化膜附着力变差，成为Cl^-渗透的薄弱通道。最危险的情况是形成“复合夹杂物”[27]，例如以$MnO\cdot Cr_2O_3$为核心、外围包裹MnS的结构。在此体系中，MnS的优先溶解会迅速破坏并深化由氧化物界面引发的初始缺陷，二者产生协同放大效应，其点蚀敏感性远高于单一夹杂物。结合本文数据，A-430SS的优异性能正得益于其极低的D类夹杂物数量（仅5个），最大限度地减少了此类活性形核位点；而C/D-430SS中大量的D类夹杂物（23和20个）很可能作为MnS的形核核心，形成复合夹杂物，导致其点蚀坑数量多、尺寸大。因此，耐点蚀性能的提升不仅需要控制夹杂物的总量，更关键的在于通过冶炼工艺精准控制MnS及复合夹杂物的数量。

2）晶粒组织和再结晶状态对耐点蚀性能至关重要。本研究中观察到的条带组织，是不完全再结晶的典型特征[28]。从微观机理上看，条带结构的形成通常与塑性变形后恢复不充分有关，可能导致合金元素的微观偏聚、晶粒的择优取向（织构），以及遗留高密度的位错胞结构[29]。这种微观结构与成分的不均匀性对钝化膜的稳定性构成严重威胁[30]。条带之间的界面是晶体缺陷（如位错、亚晶界）的集中地，这些高能量区域原子排列紊乱，其溶解倾向性高于完整晶体，因此会优先发生选择性腐蚀，并阻碍完整、致密钝化膜的形成。另外，如果条带伴随有Cr等关键钝化元素的微观尺度起伏，则会在相邻条带间形成微观电化学电池，其中贫Cr区作为阳极被优先溶解，从而直接诱发点蚀。因此，条带组织的本质危害在于为点蚀形核提供了大量预先存在的、具有高反应活性的薄弱通道。当侵蚀性Cl^-存在于介质中时，钝化膜首先在这些条带界面处发生局部破裂，点蚀随即优先形核并可能沿此路径扩展。

结合本文结果，B-430SS中存在的明显条带组织（见图2（b））意味着其内部存在着上述严重的微观结构不均匀性与潜在的成分起伏。这为其点蚀的萌生提供了大量优越的形核位点，尽管其整体Cr、N质量分数较高，但这些微观缺陷极大地限制了其宏观耐点蚀性能的发挥。相反，A-430SS的无条带、均匀的完全再结晶组织（图2a）则最大限度地消除了这类微观缺陷，保障了钝化膜的整体性与均匀性，这是其获得最佳耐点蚀性能的关键组织保障。

3）内应力与位错也是影响不锈钢耐点蚀性能的因素。由于退火不完全，材料内部会堆积大量的塑性变形位错[31]。这些高能量的位错露头也可能成为点蚀萌生的起源，因为它们会改变局部电化学活性，导致钝化膜的稳定性下降[32]，增加了点蚀敏感性。

3.3　PREN与实际耐点蚀性能的对比

不同厂家430不锈钢的化学成分、PREN值及耐点蚀性能参数汇总于表3中，可以看出，尽管B-430SS在化学成分上具有最高的PREN值（17.61），理论上应表现出最佳的耐点蚀能力，但其较多的夹杂物、不完全的再结晶以及明显的条带组织限制了其耐点蚀性能的充分发挥。A-430SS、C-430SS和D-430SS的化学成分基本一

致，但A-430SS材料因其纯净度最优、再结晶最好、晶粒均匀且无条带组织，使其耐点蚀性能表现更为优异。这充分说明了仅依靠PREN值来评估不锈钢耐点蚀性能存在局限性，实际应用中必须综合考虑材料的微观结构和加工历史等因素。

表3 不同厂家430不锈钢的化学成分、PREN值及耐点蚀性能参数汇总

Tab. 3 Summary of chemical composition, PREN, and pitting resistance parameters of 430SS from different manufacturers

样品	ω_{Cr}/%	ω_N/%	PREN	平均点蚀电位/mV	临界点蚀温度CPT/℃		
					50×10^{-6} Cl^-	100×10^{-6} Cl^-	500×10^{-6} Cl^-
A-430SS	16.16	0.036	16.74	40.7	57.3	45.9	21.6
B-430SS	16.78	0.052	17.61	29.4	44.7	39.7	20.4
C-430SS	16.16	0.035	16.72	21.5	34.2	30.7	18.6
D-430SS	16.18	0.044	16.88	19.2	31.3	29.7	18.1

尽管具体的生产工艺参数未知，但四组样品显著的微观组织差异为其生产工艺的优化提供了清晰的逆向指标。A-430SS表现出纯净度高、晶粒均匀且无条带组织的完全再结晶特征，这强烈暗示其背后拥有一套良好的生产工艺，可能包括：1）先进的炉外精炼技术以有效控制夹杂物；2）合理控制的板坯冷却与热轧工艺以减少元素偏析；3）在完全再结晶温度以上、时间窗口充足的最终退火工艺。反之，B-430SS中明显的不完全再结晶与条带组织，表明其最终退火环节可能存在温度不足或时间过短的问题；而C/D-430SS中大量的夹杂物则指向其冶炼与精炼环节的纯净度控制尚有提升空间。

在商用430不锈钢中，微观组织缺陷可以主导耐点蚀性能，从而使基于成分的PREN预测失效。然而，确立PREN失效的定量组织判据，例如界定导致性能急剧恶化的临界夹杂物密度或再结晶率阈值，仍然是未来研究的关键目标。解决这一挑战需要设计系统的实验，制备具有梯度组织参数的材料，并运用大数据分析手段，最终建立起成分-工艺-组织-性能的定量预测模型，为高性能不锈钢的精准设计提供坚实的理论依据。

4 结 论

本文通过点蚀浸泡实验、临界点蚀温度(CPT)和点蚀电位测试，结合化学成分与微观组织分析，系统比较了4种商用430不锈钢的耐点蚀性能，并得出如下结论：

1）4种不锈钢的耐点蚀性能呈现出明确的优劣排序，A-430SS最优，B-430SS次之，C-430SS与D-430SS最差且性能接近。该排序得到了多项定量测试结果的支持：在3.5% NaCl溶液中，A-430SS的平均点蚀电位为40.7 mV，优于B-430SS（29.4 mV）、C-430SS（21.5 mV）和D-430SS（19.2 mV）；在腐蚀性更弱的Cl^-质量分数为50×10^{-6}溶液中，A-430SS的临界点蚀温度（57.3 ℃）也比B-430SS（44.7 ℃）高出12.6 ℃，比C/D-430SS（34.2/31.3 ℃）高出23.1/26 ℃，这一规律在其他Cl^-质量分数下保持一致。

2）尽管B-430SS因其较高的Cr（16.78%）与N（0.052%）质量分数拥有最高的PREN值（17.61），但其实际耐点蚀性能却逊于PREN值仅为16.74的A-430SS，这揭示了PREN理论公式在预测实际性能时存在局限性。最终决定性能的关键在于材料的微观组织：A-430SS凭借最优的纯净度（D类夹杂物总数仅为5个，远低于C-430SS的23个和D-430SS的20个）以及均匀的完全再结晶组织（晶粒度8级，无条带组织），最大限度地减少了点蚀形核位点，保证了材料优异的耐点蚀性能；而B-430SS则因再结晶不完全（晶粒度不均，7～9级）和明显的条带组织，限制了其成分优势的发挥。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] THUBLAOR T, SRIHATHAI P, TENGPRASERT W, et al. The roles of CO_2 and water vapour on the high temperature corrosion of a type 430 stainless steel as an interconnect of bio-gas fuel intermediate temperature SOFCs[J]. Corrosion Science, 2025, 257: 113330.

[2] WANG R, LI Z, YANG X, et al. Effect of secondary cold-rolled and annealing on ridging and corrosion properties of 430 ferritic stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 7783-7797.

[3] 杨永超，李玉贵，赵子钧. 430不锈钢的连续退火工艺[J]. 金属热处理，2024，49(8)：130-135.

YANG Yongchao, LI Yugui, ZHAO Zijun. Continuous annealing process of 430 stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(8): 130-135. (in Chinese)
[4] VASHISHTHA H, TAIWADE R V, SHARMA S. Effect of acetic acid on corrosion behavior of AISI 201, 304 and 430 stainless steels[J]. International Journal of Materials Research, 2017, 108(5): 406-415.
[5] MATSUMURA K, NISHIMOTO M, MUTO I, et al. Sudden pH and Cl^- concentration changes during the crevice corrosion of type 430 stainless steel[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2022, 169(10): 101506.
[6] HASTUTY S, TSUTSUMI Y, NISHIKATA A, et al. Pitting corrosion of type 430 stainless steel in the process of drying of chloride solution layer[J]. ISIJ International, 2012, 52(5): 863-867.
[7] SHUKLA S, KISHORE K, SINGH B. Effect of cryogenic cooling and forging on microstructure, mechanical and corrosion behaviour of AISI 430 ferritic stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(18): 19957-19967.
[8] BACELIS Á, VELEVA L, FELIU S, et al. Corrosion activity of carbon steel B450C and low chromium ferritic stainless steel 430 in cement extract solution [J]. Buildings, 2021, 11(6): 220.
[9] XU N, SHEN J, ZHOU J, et al. Microstructure and pitting corrosion resistance of AISI 430 ferritic stainless steel joints fabricated by ultrasonic vibration assisted cold metal transfer technique[J]. Metals, 2022, 12(3): 382.
[10] OBAID A Y, GANASH A A, QUSTI A H, et al. Corrosion inhibition of type 430 stainless steel in an acidic solution using a synthesized tetra-pyridinium ring-containing compound [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10: S1276-S1283.
[11] STEINER PETROVIČ D, MANDRINO D. AES and XPS investigations of the cleaning-agent-induced pitting corrosion of stainless steels used in the food-processing environment [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 100: 230-237.
[12] 李伟峰, 张天理, 徐连勇, 等. 合金元素对汽车排气系统用铁素体不锈钢抗高温氧化和耐腐蚀影响的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(16): 188-197.
LI Weifeng, ZHANG Tianli, XU Lianyong, et al. Research progress in effect of alloying elements on high temperature oxidation resistance and corrosion resistance of ferritic stainless steel for automobile exhaust system[J]. Materials Reports, 2025, 39(16): 188-197. (in Chinese)
[13] SUSLOV R, PROKOPIEV V, FILATOV I, et al. Effect of chemical composition on pitting corrosion resistance of AISI 430 stainless steel after laser surface structuring[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 183: 112286.
[14] BANSOD A, SHUKLA S, GAHIGA G, et al. Influence of filler wire on metallurgical, mechanical, and corrosion behaviour of 430 ferritic stainless steel using a fusion welding process [J]. Materials Research Express, 2023, 10(3): 036513.
[15] AMUDA M O H, MRIDHA S. Analysis of sensitization profile in medium chromium ferritic stainless steel (FSS) welds[J]. International Journal of Integrated Engineering, 2011, 3(1): 17-22.
[16] YUE Y Y, LIU C J, SHI P Y, et al. Corrosion of hot-rolled 430 stainless steel in HCl-based solution [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2016, 51(8): 581-587.
[17] OOI S. A new index to estimate the corrosion resistance of aluminium-containing steel[J]. Materials and Corrosion, 2024, 75(7): 902-913.
[18] WANG D B, ZHANG S D, WANG Q, et al. Underlying mechanism for the effects of composition and microstructure on the corrosion resistance of Al-based amorphous alloys: a review[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2024, 49(6): 1120-1152.
[19] MARTÍNEZ-APARICIO B, GAONA-TIBURCIO C, ALMERAYA-CALDERON F, et al. Evaluation of passive films on 17-7PH and 410 stainless steel exposed to NaCl solution [J]. Materials, 2024, 17(16): 4060.
[20] HAN Y, LIU Z H, WU C B, et al. A short review on the role of alloying elements in duplex stainless steels[J]. Tungsten, 2023, 5(4): 419-439.
[21] ZHANG Y Y, LIU Z J, JIN M L, et al. Effects of nitrogen element on microstructure and pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welded joints [J]. Materials Research Express, 2021, 8(2): 026514.
[22] FEDOROV A, KARASEV V, KOVALEV P, et al. Development of thermodynamic criteria for determining the composition of duplex stainless steels with high corrosion resistance[J]. Materials, 2024, 17(2): 294.
[23] LADWEIN T L, SORG M. PRE-S-a new formalism to rank the pitting corrosion resistance of stainless steels depending on the actual functional surface properties[C]//Corrosion 2012, 2012: 1-13.
[24] ZHANG B, WEI X X, MA X L. New understanding on the critical factors determining stability of passive

film on Fe-Cr alloy based on aberration-corrected TEM study[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2024, 71(1): 20-29.
[25] SUN Y T, TAN X, LAN R L, et al. Mechanisms of inclusion-induced pitting of stainless steels: A review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 168: 143-156.
[26] SHI W N, YANG S F, LI J S. Correlation between evolution of inclusions and pitting corrosion in 304 stainless steel with yttrium addition [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4830.
[27] LIU Z, REN Q, ZHANG L F. Pitting initiated by $MnO\cdot Cr_2O_3$-MnS and MnS inclusions in a Si-/Mn-killed stainless steel[J]. Steel Research International, 2024, 95(9): 2400144.
[28] MENG Y G, JIANG X J, RAN Q X, et al. Corrosion resistance improvement of 430 stainless steel via plastic deformation induced uniform substructure [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134245.
[29] HA H Y, KANG J Y, LEE T H, et al. Effect of grain size on the pitting corrosion resistance of lean duplex stainless steel [J]. Steel Research International, 2023, 94(2): 2200227.
[30] WANG D B, CUI J P, MA A L, et al. Unveiling the pitting corrosion mechanism of borated stainless steel in the wet storage environment of spent nuclear fuels [J]. Acta Materialia, 2024, 263: 119477.
[31] TOKUDA S, MUTO I, SUGAWARA Y, et al. (Invited) relationship between protective film on sulfide inclusions and pitting corrosion resistance on type 304 stainless steel under applied stress[J]. ECS Meeting Abstracts, 2020(12): 1267.
[32] XIAO Y, LIN B, TANG J L, et al. Effect of elastic tensile stress on the pitting corrosion mechanism and passive film of 2205 duplex stainless steel[J]. Electrochimica Acta, 2024, 477: 143765.