



Cu 对含 Sn 铁素体不锈钢的力学及耐腐蚀性能的影响

李 阳¹, 陈常勇^{1,2}, 方 勇¹, 马 帅¹, 张咪娜³, 姜周华¹

(1 东北大学冶金学院, 沈阳 110819; 2 香港理工大学工业与系统工程系, 香港 999077;

3 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波, 315201)

摘 要:以 0.30%Sn 的 430 铁素体不锈钢为基础, 在实验钢中添加一定量的 Cu 来研究 Cu 对实验钢力学性能和耐腐蚀性能的影响。常温拉伸实验和高温拉伸实验结果表明, Cu 原子在基体中发挥固溶强化效果而增强不锈钢的抗拉强度, 但同时因晶界处生成大量的富 Cu 相而相应降低不锈钢的塑性。实验钢的耐均匀腐蚀性能随着 Cu 含量的增加而呈现先提高, 后降低的趋势, 且在含 0.45%Cu 的钢中达到最佳的效果。此外, Cu 对实验钢的耐晶间腐蚀性能有类似的规律, 且在含 0.98%Cu 的钢中达到最佳的效果。

关键词:锡; 铜; 铁素体不锈钢; 力学性能; 耐腐蚀性能

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00188 **中图分类号:**TG162.83

Effect of Cu on the Mechanical and Corrosion Resistance of Ferritic Stainless Steel Containing Sn

Li Yang¹, Chen Changyong^{1,2}, Fang Yong¹, Ma Shuai¹, Zhang Mina³, Jiang Zhouhua¹

(1 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2 Department of Industrial and Systems Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 3 Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: This study focuses on the investigation of the mechanical properties and corrosion resistance of 430 ferritic stainless steel with an addition of 0.30% Sn, by incorporating varying amounts of Cu into the experimental steel. The results of room temperature and high temperature tensile tests reveal that Cu atoms act as solid solution strengtheners in the matrix, enhancing the tensile strength of the stainless steel. However, the formation of a significant amount of Cu-rich phase at grain boundaries leads to a decrease in the steel's plasticity. The uniform corrosion resistance of the steel initially increases and then decreases with increasing Cu content, reaching the highest effectiveness at 0.45% Cu. Similarly, Cu exhibits a comparable pattern in its resistance to intergranular corrosion in the experimental steel, achieving the best outcomes at a content of 0.98% Cu.

Key Words: Tin; Copper; Ferritic Stainless Steel; Mechanical Properties; Corrosion Resistance

铁素体不锈钢在不锈钢系列中的用量仅次于奥氏体不锈钢, 它具有良好的耐蚀性和较好的加工成型性能, 而且价格低廉。现代铁素体不锈钢广泛应用于以下几个方面^[1-5]: 1) 汽车制造业; 2) 家电行业、家用设备; 3) 化工设备。一直以来 Cu 和 Sn 元素都被认为是钢中的杂质, 但是近年来对这个问题有了新的发现。郑健等^[6]研究表明, Cu 和 Sn 的增加会通过固溶强化和析出强化方式提高 09CrCuSb 钢屈服强度和抗拉强度, 并使得屈服平台消失。Pardo 等研究^[7]表明, 在 304 和 316 奥氏体不锈钢中 Cu 和 Sn 的协同作用, 能使不锈钢在稀硫酸和有机含氯酸中有较好的耐腐蚀作用。2010 年日本新日铁成功开

发出了低间隙含 Sn 铁素体不锈钢 NSSCFW1, 通过往钢中加入微量 Sn 元素来提高铁素体不锈钢的耐腐蚀性, 同时钢材的可加工性也得到了提高。NSSCFW1 钢同时兼具高耐腐蚀、低 Cr 和低间隙等特性, 它以 14%Cr 含量达到了传统标准中 18%Cr 含量不锈钢的耐腐蚀性。之后他们又开发出了 NSSCFW2 钢, 将 Sn 的含量进一步增加到了 0.30%, 其加工性也很出色^[8]。

目前, 国内研究主要集中在传统铁素体不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能方面, 对含 Cu 和 Sn 铁素体不锈钢的研究还很少, 国外虽然有研究含 Sn 铁素体不锈钢的相关性能, 然而对相关核心技术进行

基金项目: 国家自然科学基金(51674071)

作者简介: 李 阳(1973—), 男, 博士, 教授;

E-mail: liy@smm.neu.edu.cn;

收稿日期: 2023-08-30

通信作者: 姜周华(1963—), 男, 博士, 教授;

E-mail: jiangzh@smm.neu.edu.cn;

保密,且也未涉及Cu、Sn在不锈钢中的耐腐蚀机理。在此背景下,本实验打破传统的认为Cu、Sn等低熔点元素在不锈钢中是杂质元素的观点,用Cu、Sn改善铁素体不锈钢的性能,并系统地研究Cu、Sn元素对铁素体不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能的影响规律。

1 实验材料及方法

实验所用的原材料的化学成分见表1。采用10 kg真空感应炉冶炼实验钢。冶炼过程为:将切割好的工业纯铁、金属铬放入MgO坩埚中,打开冷却水、电源、真空阀,抽真空至10 Pa,待原料全部熔化后保温5 min,然后,将合金硅、电解锰、锡和铜依次加入到坩埚中,进入精炼期,控制温度在1 600 ℃,真空度0.1~1.0 Pa,精炼时间为20~25 min,精炼结束后充入2~5 kPa氩气,并保温5 min,在氩气保护气氛下浇注出钢,出钢温度为1 580 ℃,在1 min内浇注完。

冶炼所得钢锭的形貌和尺寸如图1(a)所示,切样位置和尺寸如图1(b)-(c)所示。其中10 mm×10 mm的样品为金相样,4 mm×6 mm的样品为测定氮氧的样。

表1 原料的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of raw materials %							
原料	C	Si	Mn	Cr	Sn	Fe	Cu
工业纯铁	0.002	0.10	0.02	-	-	bal.	-
金属铬	0.005	0.24	-	99.27	-	0.160	-
金属锰	0.030	0.01	99.80	-	-	0.025	-
工业硅	-	99.37	-	-	-	≤0.300	-
锡粒	-	-	-	-	99.97	-	-
电解铜	-	-	-	-	-	-	99.90

将按照图1(c)所切取的薄片经400目的砂纸打磨干净,采用直读光谱仪检测钢中Mn、Si、Cr等合金成分;车取一定量的铁屑,用碳硫分析仪分析钢中C、S含量;此外,用线切割切取3个规格为 $\phi 4$ mm×8 mm的氮氧样,用氧氮分析仪分析钢中T、O、N质量分数。

冶炼所得的钢锭在加热炉内加热到1 250 ℃,保温3 h后,用PM-650型二辊轧机经过6道次轧制,将其轧制成厚度为5 mm的板材,终轧温度为750~800 ℃。轧后在马弗炉中850 ℃下保温30 min退火后待用。轧制各道次压下量(mm)为53→38→29→21→14→9→5。

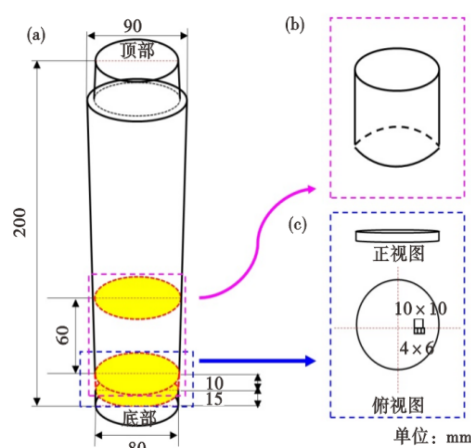


图1 铸锭及取样示意图:(a)铸锭的形貌和尺寸,(b)用于轧制的钢锭,(c)取样位置

Fig. 1 Ingot and sampling diagram: (a) shape and size of ingot, (b) ingot to be rolled, (c) sampling location

拉伸试样在终轧板中切取,其取样位置及试样尺寸如图2所示。

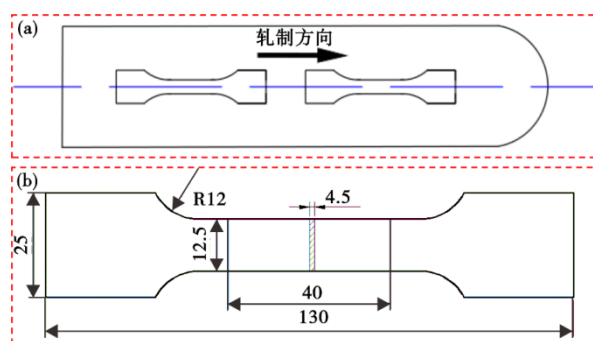


图2 热轧板中拉伸样的取样位置及尺寸示意图:(a)取样位置,(b)试样尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Sampling position and size diagram of tensile sample in hot rolled plate: (a) sampling position, (b) sample size (unit: mm)

实验所用的电化学装置如图3所示,实验步骤如下:(1)测量前,向溶液中持续通入氮气(纯度不低于99.99%)进行0.5 h以上的预除氧,氮气流量为0.5 L/min;(2)测定开路电位,维持10 min;(3)从自然腐蚀电位以下,以20 mV/min的速度进行扫描,扫描到0 V左右;(4)实验结束后,试样分别用蒸馏水和酒精清洗,吹干,便于进行扫描电镜的观察;(5)每次实验要用新的试样和实验溶液。

2 实验结果与分析

2.1 实验钢的成分

实验钢的成分见表2, No.0为空白对照组,不添加Cu; No.1~No.4为不同Cu含量的实验钢。

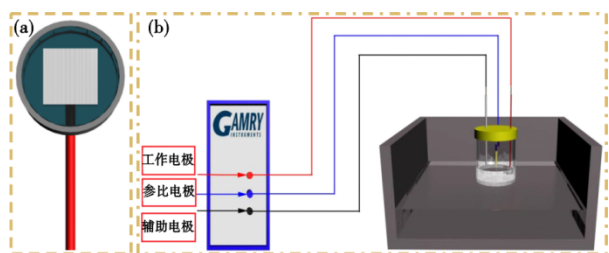


图 3 电化学装置: (a) 电化学样品示意图, (b) 电化学系统结构示意图

Fig. 3 Electrochemical device: (a) electrochemical sample schematic, (b) schematic diagram of the electrochemical system structure

轧制过程中发现 No.3 和 No.4 钢板的边缘和表面均出现了肉眼可见的裂纹,且 No.4 钢板更为严重,出现了严重的开裂现象。研究表明^[5, 7-8],含铜钢在 1 000 °C 以上加热时, Si、Mn 和 Fe 等元素会首先被氧化,而铜元素在高温下与氧的结合力不强,不易形成氧化物,将富集在铁鳞与钢材界面上,这使得轧材的边缘和表面容易形成富铜相。高温时富铜相呈液态会沿着晶界聚集,降低晶界强度并导致钢材的热脆现象。本实验结果表明,添加 1.97%Cu 对实验钢的性能已经开始出现恶化的效果。

对 No.3 样品(1.97%Cu+0.29%Sn)的晶界形貌和成分进行分析。使用线切割在 No.3 铸锭上切取尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 小样,经研磨、抛光后,选

用 10% 草酸溶液电解腐蚀出晶界,利用扫描电镜和能谱仪对晶界和基体成分进行分析,结果如图 4 所示。从 EDS 能谱图中可以看出,在铁素体不锈钢中加入一定量的铜和锡在晶界会有析出,铜与锡相比在晶界的析出量更多。

2.2 力学性能

2.2.1 常温拉伸实验结果

对 No.0~No.4 试样进行常温拉伸测试,实验在 CMT-10(T)型微机控制电子万能(拉力)试验机上进行,采用位移加载控制方式,拉伸速度为 3 mm/min,实验结果见表 3。由表 3 可知,在钢中添加 Cu 之后,实验钢的屈服强度和抗拉强度随着钢中 Cu 含量的增加而提高,并且,在 2.54%Cu 时都达到最大值,分别为 472 MPa 和 555 MPa。与之相反的是,实验钢的伸长率随着 Cu 含量的增加而降低,从 38.27% 降低至 17.27%。

采用扫描电镜对 No.3 和 No.4 拉伸试样断口处元素的富集情况进行分析,结果分别如图 5 和图 6 所示。从能谱图中可以看出,加入到钢中的 Cu 和 Sn 在拉伸断口处出现了明显的富集,这会显著降低实验钢的塑性。

采用扫描电镜对 No.0~No.4 拉伸试样的断口进行分析,结果如图 7 所示。五组试样拉伸断口的宏观形貌较为接近,整个断口呈不规则形状,有多条垂直于拉伸方向且贯穿断口的裂纹,使得断口呈现分层开裂的形貌;同时,这些贯穿型的长裂纹均呈

表 2 铁素体不锈钢的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of the ferritic stainless steels

编号	Cu	Sn	Cr	C	Si	Mn	P	S	T. O	N	%
No. 0	0	0.30	16.97	0.017	0.35	0.44	0.017	0.003	0.006 1	0.007 7	
No. 1	0.45	0.29	16.97	0.014	0.38	0.45	0.018	0.003	0.011 7	0.008 0	
No. 2	0.98	0.30	17.31	0.01	0.34	0.45	0.010	0.004	0.009 1	0.008 6	
No. 3	1.97	0.29	17.03	0.013	0.38	0.45	0.018	0.003	0.009 0	0.006 1	
No. 4	2.54	0.29	17.09	0.018	0.39	0.45	0.018	0.004	0.008 5	0.007 8	

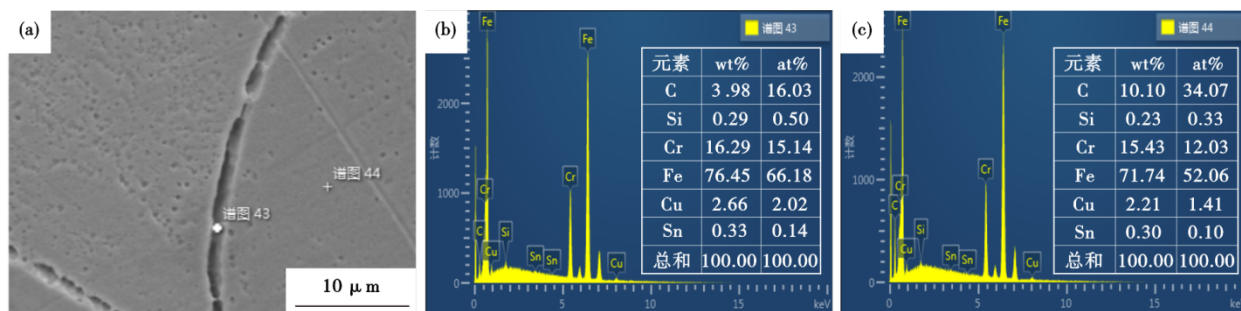


图 4 No. 3 试样的晶界处扫描电镜分析: (a) 晶界形貌, (b) 晶界处的能谱图, (c) 基体的能谱图

Fig. 4 SEM results of grain boundary of No. 3 sample : (a) grain boundary morphology, (b) energy spectrum at grain boundaries, (c) energy spectrum of the matrix.

表 3 含铜、锡铁素体不锈钢的常温拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of ferritic stainless steel bearing tin and copper at room temperature

编号	铜含量/%	屈强比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
No. 0	0.00	0.68	292	432	38.27
No. 1	0.45	0.73	308	423	36.95
No. 2	0.98	0.73	340	466	35.29
No. 3	1.97	0.84	450	535	22.13
No. 4	2.54	0.85	472	555	17.27

现出不同程度的弯曲。

五组试样拉伸断口的显微组织则呈现出较大的差异:1)五组试样拉伸断口均有明显的尖锐撕裂棱和解理台阶;2)No.0试样中存在大量的河流状的撕裂棱,还存在少量的韧窝,韧窝内部比较干净;3)No.1和No.2试样的形貌与No.0较为接近, No.3和No.4试样最明显的特点是韧窝处存在大量的第二相粒子。根据图5和图6的分析可知,这些第二相粒子为富集于晶界的富Cu相。

研究表明^[9],钢中Cu的强化机制有两种,即固溶强化和沉淀强化。在时效处理之前主要发挥固溶强化的作用,时效处理之后,Cu会以细小弥散的颗粒形式析出,从而产生显著的沉淀强化效果。本实验中的钢样未经时效处理,所以其强度的提升主要是Cu的固溶强化的效果。而Cu易在晶界处富集,甚至形成第二相粒子,降低晶界的连续性,这使得钢材在拉伸过程中更容易在晶界处发生开裂,从而降低其塑性。

2.2.2 高温拉伸试验结果

由于轧制过程中发现No.3和No.4钢板的边缘和表面均出现了肉眼可见的裂纹,且No.4钢板更为严重,出现了严重的开裂的现象。这说明添加1.97%Cu对实验钢的性能已经开始出现恶化的效

果,因此,本实验中只选取No.0~No.3进行高温拉伸测试。高温拉伸结果如图8所示,可知:1)所有实验钢的抗拉强度和屈服强度总体趋势是随着温度的升高而逐渐降低(仅No.2钢的屈服强度在500℃时出现略微的波动),且在500~700℃强度降低的速率最大;2)400℃以下,当温度相同时,实验钢的抗拉强度随着Cu含量的增加而逐渐增加,当温度继续升高时差异较小,没有明显的规律;3)在相同的温度下,当钢中Cu含量 $\leq 0.93\%$ 时,实验钢的屈服强度没有明显的规律。但1.97%Cu的实验钢的屈服强度在所有的温度下都保持最高值;4)所有实验钢的断面收缩率和断后伸长率都随着温度的升高而呈现先降低后升高的规律,在500℃出现塑性谷底;5)在相同的温度下,实验钢塑性随着Cu含量的增加而逐渐降低。

Cu恶化实验钢热塑性有以下几个原因^[2]:1)一方面由于钢中Cu元素和钢中的S、空气中的O发生相互作用,形成 Cu_2S 、 Cu_2O 等脆性化合物,这些脆性化合物在热加工过程中容易引起钢脆裂,使得热塑性变差;2)另一方面,Cu元素能与一些有害的杂质元素生成低熔点的共晶体,在不锈钢热变形过程中,共晶体会熔化并破坏晶间结合力,从而造成脆性开裂。

2.3 耐腐蚀性能

对No.0~No.4实验钢进行腐蚀实验,分别测定其耐均匀腐蚀性能和耐晶间腐蚀性能。

2.3.1 耐均匀腐蚀性能

对No.0~No.4实验钢进行耐均匀腐蚀实验,试样的尺寸为50 mm长、15 mm宽、5 mm厚,且在试样最顶端的中间位置切割一个直径3 mm的小孔用于悬挂样品。

实验步骤:(1)配置40% H_2SO_4 溶液1000 mL于

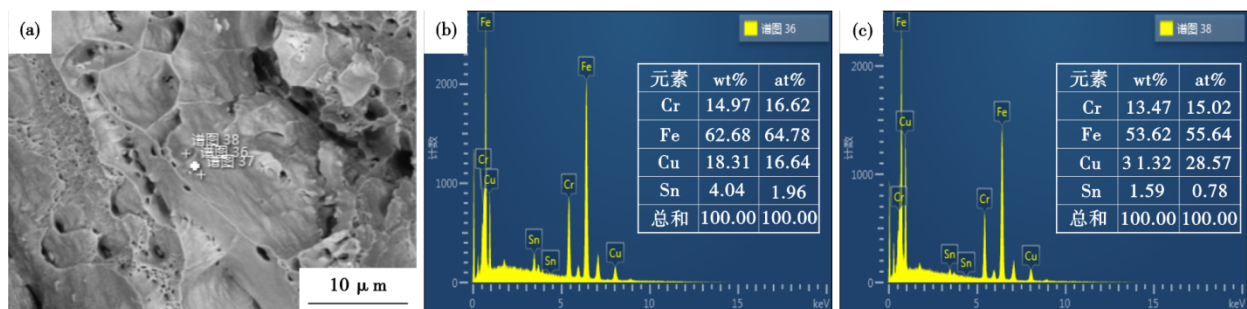


图5 No.3试样的拉伸断口处不同位置的扫描电镜结果:(a)断口的显微形貌;(b)(c)断口的能谱图

Fig. 5 SEM results of different position in stretching the fracture of No. 3 sample : (a) microscopic morphology of the fracture surface; (b) (c) energy spectrum of fracture surface

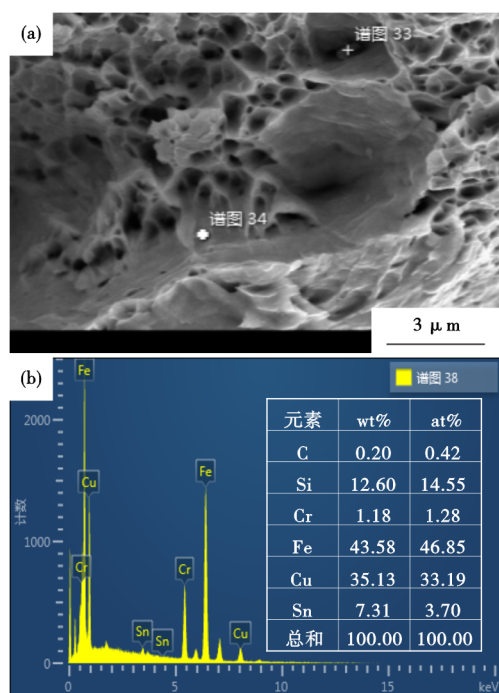


图6 No. 4试样的断口处扫描电镜分析结果:(a)断口的显微形貌,(b)断口的能谱图

Fig. 6 SEM analyze results of fracture of No. 4 sample : (a) microscopic morphology of the fracture surface, (b) energy spectrum of fracture surface

已经充分洗净的容器中;(2)打开升温装置,设置终点温度为60℃,待溶液达到设定温度时,悬挂试样,并开始计时;(3)每组试验取三个平行样,每次实验加入的试样数目保持一定;(4)实验期间时刻观察试样和溶液的变化情况;(5)待达到预定时间时取出试样,观察并记录试样的外观、沉淀物的位置、种类的变化;(6)用水冲洗试样,然后用毛刷、橡皮器具清洗试样表面的腐蚀产物,最后使用超声波进行清洗;(7)清洗后的试样经过酒精清洗,使用吹风机吹干后置入干燥器一段时间后再测定腐蚀后试样的质量。

实验钢浸泡70 min之后的宏观形貌如图9所示,可以看出每个试样的表面各处腐蚀程度较为平均。

实验钢浸泡不同时间之后质量见表4,并由此计算出试样单位面积的腐蚀失重和拟合方程见表5。根据拟合方程,得出实验钢的均匀腐蚀失重曲线,如图10所示。同时计算出含0、0.45%、0.98%、1.97%、2.54%Cu实验钢的腐蚀速率分别为0.122 7、0.067 2、0.092 3、0.096 6、0.103 3 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,可以看出实验钢的均匀腐蚀速率都有一定程度的降低,表明实验钢的耐均匀腐蚀性能得到了一定的提升。含0.45%Cu的实验钢的腐蚀速率最低,为0.067 2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,其耐腐

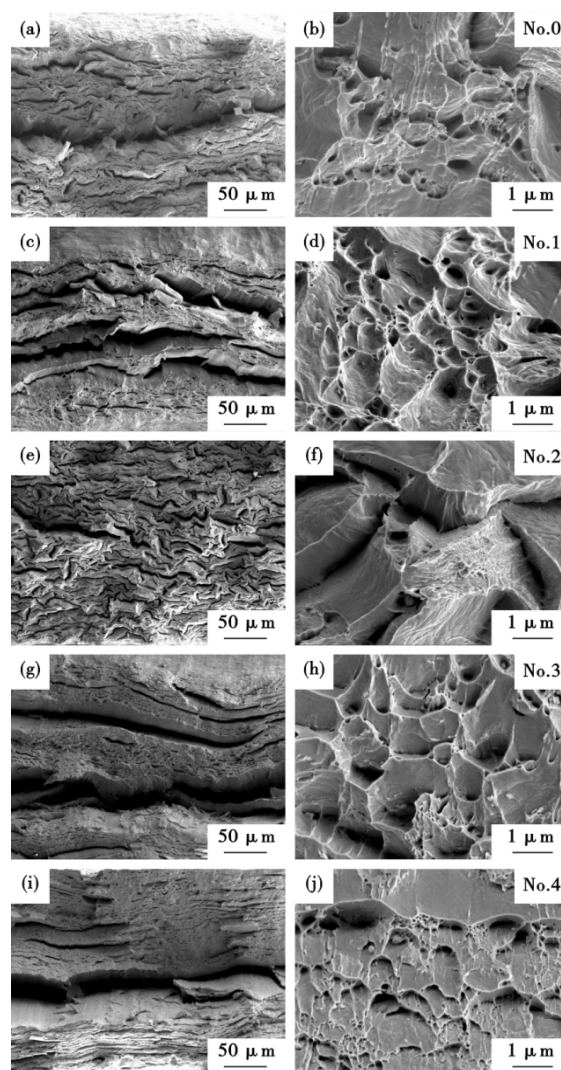


图7 实验钢常温拉伸断口的形貌:(a) (c) (e) (g) (i)分别为No. 0~No. 4的宏观形貌;(b) (d) (f) (h) (j)分别为No. 0~No. 4的显微组织

Fig. 7 Morphology of tensile fracture surface of experimental steel at room temperature: (a) (c) (e) (g) (i) macro morphologies of No. 0~No. 4, respectively; (b) (d) (f) (h) (j) microstructures of No. 0 to No. 4, respectively

蚀性也最好。

根据以上数据绘制出实验钢的腐蚀速率与Cu、Sn含量之间的关系图,如图11所示。从图11中可以看出:1)在实验钢中加入一定量的Sn,可以极大的提高其的耐均匀腐蚀性能;2)在含0.29%Sn的实验钢中,添加一定含量的Cu可以进一步提高其耐均匀腐蚀性能;3)试验表明,0.29%Sn + 0.45%Cu的实验钢有最佳的耐均匀腐蚀性能。

2.3.2 耐晶间腐蚀性能

对No.0~No.4实验钢进行耐晶间腐蚀实验。实验步骤:(1)将试样表面抛光,经无水乙醇洗净、干

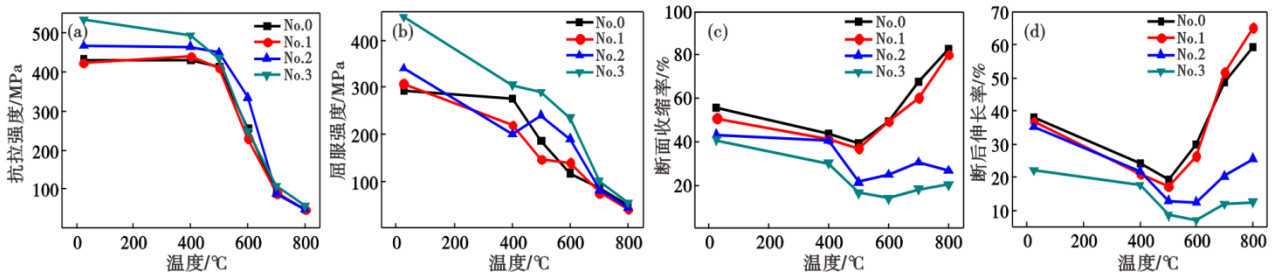


图 8 实验钢在不同温度下的拉伸实验结果:(a) 抗拉强度, (b) 屈服强度, (c) 断面收缩率, (d) 断后伸长率

Fig. 8 Tensile test results of experimental steel at different temperatures: (a) tensile strength, (b) yield strength, (c) shrinkage, (d) elongation

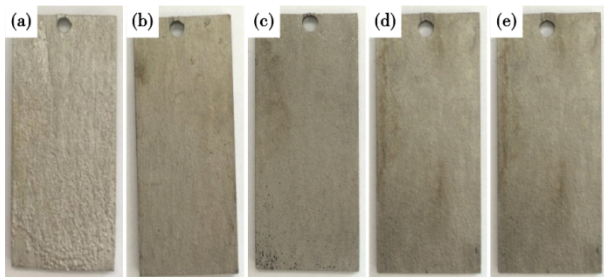


图 9 均匀腐蚀 70 min 后试样的形貌:(a) No. 0, (b) No. 1, (c) No. 2, (d) No. 3, (e) No. 4

Fig. 9 The morphology of steel samples after 70 minutes of uniform corrosion: (a) No. 0, (b) No. 1, (c) No. 2, (d) No. 3, (e) No. 4

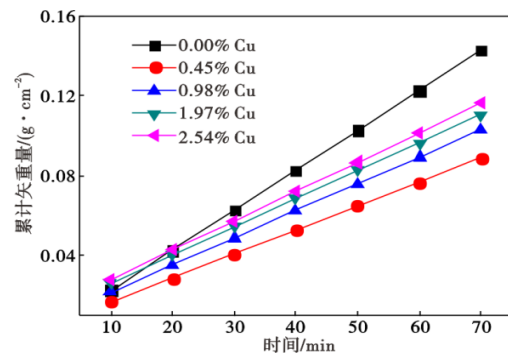


图 10 不同 Cu 含量的实验钢的均匀腐蚀失重

Fig. 10 Homogeneous corrosion and weight loss of experimental steel with different Cu content

干燥后置于 65% 硝酸溶液中,加热升温;(2)待硝酸溶液微沸后开始计时,对于实验钢样腐蚀 48 h;(3)48 h 后,将试样取出,用无水乙醇清洗试样表面的腐蚀产物,干燥后称重,得到试样腐蚀前后质量的变化

与时间的关系,见表 6。

从表 6 可以看出:1) No.0~No.4 实验钢的失重率随着 Cu 含量的增加呈先下降后上升的趋势,且 No.2 (0.98%Cu) 实验钢的失重率最低,表明 No. 2 实验钢

表 4 不同实验钢的浸泡实验结果

Table 4 Results of immersion of experiment steels.

钢号	铜含量/%	浸泡不同时间后试样质量/g						
		10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min
No.0	0	46.432 8	43.505 9	40.788 3	38.351 6	36.497 3	34.524 7	32.384 2
No.1	0.45	48.866 2	48.520 5	48.048 4	47.595 9	47.307 5	46.934 6	46.601 2
No.2	0.98	44.803 8	44.080 3	43.517 1	43.153 5	42.850 2	42.439 4	42.117 8
No.3	1.97	34.835 3	34.054 9	33.483 6	33.124 2	32.827 6	32.470 2	32.187 6
No.4	2.54	34.928 3	34.231 4	33.601 6	33.167 2	32.848 6	32.458 1	32.180 4

表 5 试样单位面积的腐蚀失重和拟合方程

Table 5 Corrosion weight loss per unit area of the sample and fitting equation.

钢号	不同时间单位面积的腐蚀失重/(g·cm ⁻²)							拟合方程
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	70 min	
No.0	0.022 4	0.041 8	0.061 0	0.081 5	0.101 2	0.119 7	0.136 4	y=0.002 0x+0.002 7
No.1	0.006 5	0.017 3	0.032 1	0.046 3	0.055 4	0.067 1	0.077 5	y=0.001 2x+0.004 8
No.2	0.014 4	0.037 2	0.055 0	0.066 5	0.076 0	0.089 0	0.099 1	y=0.001 4x+0.008 3
No.3	0.016 9	0.042 9	0.062 0	0.074 0	0.083 8	0.095 8	0.105 2	y=0.001 4x+0.012 6
No.4	0.020 2	0.043 1	0.063 7	0.078 0	0.088 5	0.101 3	0.110 4	y=0.001 5x+0.013 3

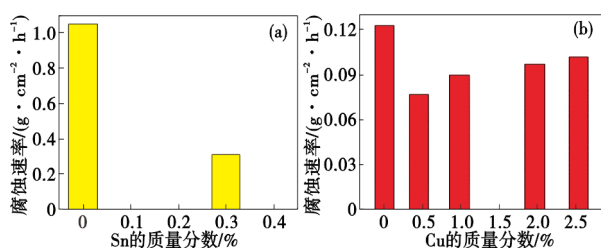


图11 Cu、Sn含量对实验钢腐蚀速率的影响:(a) 430+Sn, (b) 430+0.30% Sn+Cu

Fig. 11 The effect of Cu and Sn content on the corrosion rate of experimental steel: (a) 430+Sn, (b) 430+0.30% Sn+Cu

的耐晶间腐蚀性能最好。

3 结论

(1)在含Sn铁素体不锈钢中添加0.45%~2.54%Cu后,Cu能够提高实验钢的常温抗拉强度和屈服强度,这可能是由于Cu原子在基体中发挥固溶强化的效果。但同时因晶界处容易生成富Cu相,从而导致实验钢的塑性被降低。

(2)在实验钢中添加 $\geq 0.98\%$ Cu之后,实验钢的高温抗拉强度变化不大,但屈服强度和塑性明显变差。

表6 实验钢耐晶间腐蚀实验的测试结果
Table 6 Test results of intergranular corrosion resistance of experimental steel.

钢号	Cu含量/%	试样表面积/mm ²	腐蚀前质量/g	腐蚀后质量/g	腐蚀失重/g	失重率/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
No.0	0	3 254.80	53.571 8	53.220 3	0.351 5	54.00
No.1	0.45	3 228.99	48.918 2	48.675 5	0.242 7	37.58
No.2	0.98	3 235.74	49.370 1	49.198 1	0.172 0	26.58
No.3	1.97	3 033.90	35.156 9	34.923 4	0.233 5	36.08
No.4	2.54	3 063.71	37.787 8	37.509 4	0.278 4	45.44

(3)Cu能显著影响实验钢的耐均匀腐蚀性能,当实验钢中Cu含量为0.45%时,效果最佳,此后实验钢的耐均匀腐蚀性能会随着Cu含量的增加而降低。

(4)实验钢的耐晶间腐蚀性能随着Cu含量的增加而呈现先提高后降低的趋势,当实验钢中Cu含量为0.98%时效果最佳。

参考文献

- [1] Nishikoori M, Nishikawa H, Sorimachi K. Recent progress of stainless steel making process at Kawasaki steel [J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1994, 8(31): 5-11.
- [2] 韩纪鹏. 含锡铁素体不锈钢的制备工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [3] 姚聪林. 铜对含锡 430L 铁素体不锈钢的组织性能和耐腐蚀性能[D]. 沈阳, 东北大学, 2017.
- [4] 杜鹏飞. 稀土处理对含锡铜不锈钢组织和性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [5] Li Y, Yao C L, Li H B, et al. Effect of Cu addition on the micro-structure and passivation behavior of Sn alloyed ferritic stainless steel in NaCl solution [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(12): 8422-8430.
- [6] 郑 健, 彭志贤, 袁 渊, 等. Cu/Sb/Sn/Mo/W对新国标09CrCuSb钢组织及力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 84-89.
- [7] Pardo A, Merino M C, Carboneras M, et al. Influence of Cu and Sn content in the corrosion of AISI 304 and 316 stainless steels in H₂SO₄[J]. Corrosion Science, 2006, 48(5): 1075-1092.
- [8] http://www.ns-sus.co.jp/product/c_01.html [Z].
- [9] 张永权, 刘天军, 杨才福. 铜的时效行为及其对06NiCuCrMoNb钢力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(4): 41-45.
- [10] 曹国良, 李国明, 常万顺, 等. 脱氧对碳钢耐点蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2009, 37(11): 27-30+35.
- [11] 马李洋, 丁 毅, 马立群, 等. 316L不锈钢柠檬酸钝化工艺及其耐点蚀性能研究[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 39-41.
- [12] 宋志刚, 陈 斌, 郑文杰, 等. 固溶温度对00Cr₂₂Ni₅Mo₃N钢组织及耐点蚀性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(6): 69-71+98.
- [13] 杨永超. 含锡铁素体不锈钢力学性能及耐腐蚀性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.