

# 模拟高低空交替环境下 30CrMnSiNi2A 钢力学性能研究

张泰峰, 张勇, 樊伟杰, 齐阳, 杨振

(海军航空大学 青岛校区 航空机械工程与指挥系, 山东 青岛 266041)

**摘要:** **目的** 研究 30CrMnSiNi2A 钢制腔体的力学性能影响及演化规律。**方法** 借助高低温低气压试验和中性盐雾试验交替进行, 模拟高低空交替变化的腐蚀环境。通过比较静力拉伸试验和疲劳试验的结果, 进一步揭示预腐蚀对静力拉伸性能和疲劳性能的影响。**结果** 经过预腐蚀处理, 30CrMnSiNi2A 钢制腔体的力学抗拉强度下降了 0.73%, 规定塑延伸强度上升了 0.04%, 断后伸长率下降了 0.95%。疲劳寿命数据与对数疲劳寿命数据均符合正态分布, 未发生明显变化。**结论** 高低空交替环境下, 腔体内部会发生一定程度的腐蚀, 但由于腐蚀程度较小, 对 30CrMnSiNi2A 钢力学性能影响不大。

**关键词:** 低气压; 预腐蚀; 疲劳; 呼吸作用

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.011

**中图分类号:** TG172.5 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)02-0066-06

## Mechanical Properties of 30CrMnSiNi2A Steel in Simulated High and Low Air Alternation Environment

ZHANG Tai-feng, ZHANG Yong, FAN Wei-jie, QI Yang, YANG Zhen

(Department of Aeronautical Mechanical Engineering and Command, Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the influence of mechanical properties and evolution law of 30CrMnSiNi2A Steel cavity. The corrosion environment was simulated by alternating high and low temperature low air pressure test and neutral salt spray test. By comparing the results of static tensile test and fatigue test, the influence of pre-corrosion on static tensile and fatigue properties was further revealed. The results showed that the mechanical tensile strength of 30CrMnSiNi2A steel cavity decreased by 0.73%; the specified plastic elongation increased by 0.04%; and the elongation after fracture decreased by 0.95% after pre-corrosion treatment; the fatigue life data and logarithmic fatigue life data were in accordance with the normal distribution. There was no significant change. The results show that there will be a certain degree of corrosion in the cavity under the high and low air alternation environment, but the mechanical properties of 30CrMnSiNi2A Steel will not be affected by the small degree of corrosion.

**KEY WORDS:** low pressure; pre-corrosion; fatigue; respiration effect

收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-10-22

Received: 2019-08-16; Revised: 2019-10-22

作者简介: 张泰峰 (1976—), 男, 满族, 辽宁大连人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为材料的腐蚀与疲劳。

**Biography:** ZHANG Tai-feng (1976—), Male, Manchu, from Dalian Liaoning, Master, Associate professor, Research focus: material of corrosion and fatigue.



酸溶液+六次甲基四胺缓蚀剂”对表面非附着性的腐蚀产物进行清除,依次进行脱油脱水处理。将试件进行单独包装后,放置于干燥器中备用。首先对所有试件工作区进行腐蚀坑深度测量,测量在科士达体视显微(KH-7700)平台上进行,采用三维扫描模式进行。

静力拉伸试验按照 HB 5143—96《金属室温拉伸试验方法》的相关要求进行。试验平台采用 MTS 810 型材料综合试验机,加载速度为 2 mm/min。通过采集试验过程中试件力值和位移数据变化,对抗拉强度、屈服强度等参数进行拟合计算。拉伸试验结束后,每组选取具有代表性的一个试件进行断口切割,并在彻底清洗后置于日立 S3400N 扫描电子显微镜下观察。

疲劳试验按照 HB5287—1996《金属材料轴向加载疲劳试验方法》中相关要求进行。试验平台采用 MTS 810 型材料综合试验机。依据某部位在飞机中实际承力情况,设置等幅谱正弦波疲劳试验: $\sigma_{\max}=440$  MPa,应力比为 0.06,频率为 10 Hz。通过测量试件工作区域实际尺寸,设置疲劳试验参数,并进行试验。待所有试验结束后,选取具有代表性的试件进行断口切割,然后进行微观形貌观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀坑深度

经过预腐蚀后,试件腐蚀坑深度的测量结果如图 3 所示。在金属基体上出现了不同程度的盘形腐蚀坑,这些腐蚀坑均呈现深度小、面积大、均匀分布的特点。对腐蚀坑深度进行测量统计,结果见表 1。

表 1 腐蚀坑深度测量  
Tab.1 Measurement of corrosion pit depth

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	AVE
C 组	15.362	15.326	15.264	10.254	6.559	8.227	11.832
S 组	13.264	15.268	9.542	8.625	7.115	16.259	11.679

表 1 中结果显示,C 组和 S 组试件表面腐蚀坑平均深度均为 11.6~11.8  $\mu\text{m}$ ,这一数值相对较小。这是因为腐蚀介质仅存在于腔体内,在气压恢复到正常大气压之前的过程中,氧气有限的条件下,腔体内部阴极氧去极化过程减缓了材料腐蚀的速度<sup>[12]</sup>。

### 2.2 静力拉伸试验

由图 4 中试验件断口宏观形貌可知,两组试件均存在明显的韧窝断口特征和 45°剪切角特征。进一步由微观形貌可知,断口中存在大量韧窝的主要原因是试样在回火过程中,沿晶界位置析出结构细小的碳化物,改变了晶界层材料的性质和成分,使晶界受到了损伤,降低了晶体之间的结合力,但仍具有一定的塑性变形能

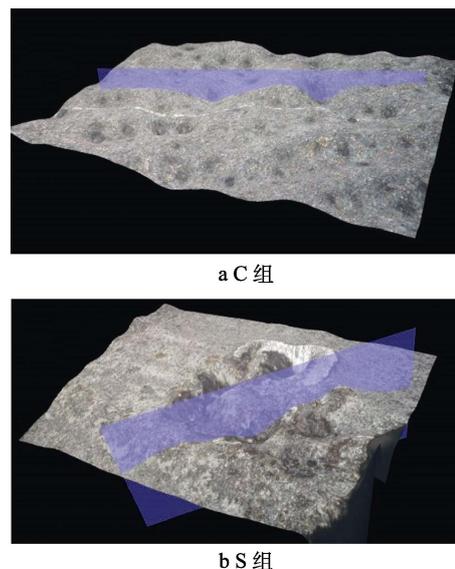


图 3 试件表面腐蚀坑深度测量  
Fig.3 Measurement of corrosion pit depth on specimen surface: a) group C; b) group S

从图 3 中可知,在预腐蚀期间,腔体有腐蚀坑的存在,表明腔体内部发生了腐蚀。分析原因认为,在单次循环试验中,低温作用使得腔体与盖板之间的密封垫发生短暂“硬化”现象,导致腔体内部密封性下降,而因受低气压影响同时使得腔体内部气压减小<sup>[10]</sup>。在转移至盐雾试验阶段初,由于腔体内外存在较大压差,在密封垫未完全软化前,环境中的腐蚀介质(如氧气和氯离子)进入腔体内部,而发生了腔体内腐蚀情况<sup>[11]</sup>。直到盐雾试验持续一定时间后,密封垫恢复粘弹性,使得腔体密封性得以保证。在不断循环的过程中,腔体内外也不断发生“呼吸作用”,这一现象也是导致腔体内部发生腐蚀的重要因素。

力。因此材料先发生宏观屈服变形以及塑性硬化,然后在应力集中的地方按微孔聚集型断裂机制形成微孔,并沿晶界扩展,最终呈现韧窝型断口特征。通过对比试验组和对照组试件形貌特征变化可见,静力拉伸断口均未从边缘腐蚀坑位置开始扩展,两组之间未观察到明显差异。由此表明,预腐蚀过程中试件表面腐蚀坑点分布均匀,未对试件的静力拉伸断裂机理产生影响。

通过对比图 5 中力学性能曲线和图 6 中得到的力学参数,经预腐蚀处理的试件与对照组相比,抗拉强度下降了 0.73%,规定塑性延伸强度上升了 0.04%,断后伸长率下降了 0.95%。这一结果也进一步表明,预腐蚀处理中,试件表面发生的腐蚀情况较轻。从力学性能参数分析,未对试件性能产生显著影响。

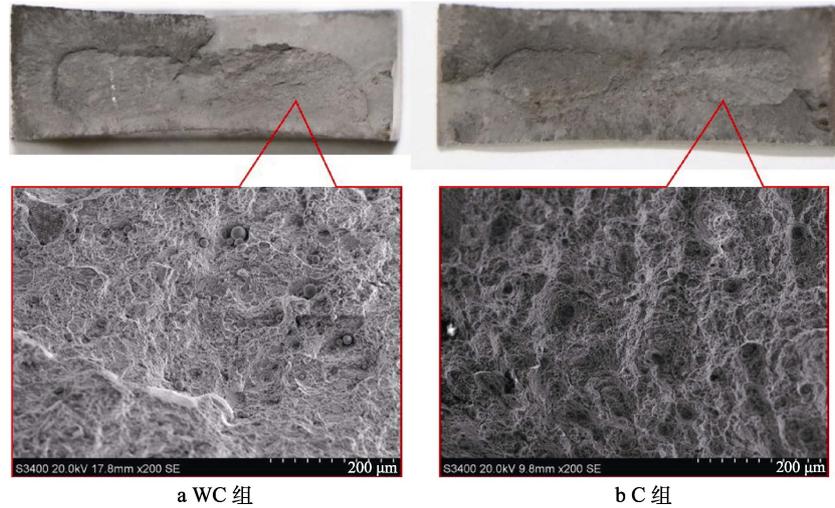


图 4 静力拉伸试件断口微观形貌

Fig.4 Fracture microstructure static tensile specimen: a) group WC; b) group C

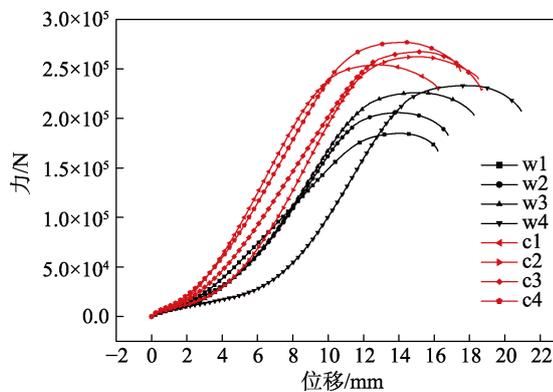


图 5 试验前后试验件力学性能测试曲线

Fig.5 Mechanics performance curves of specimen before and after test

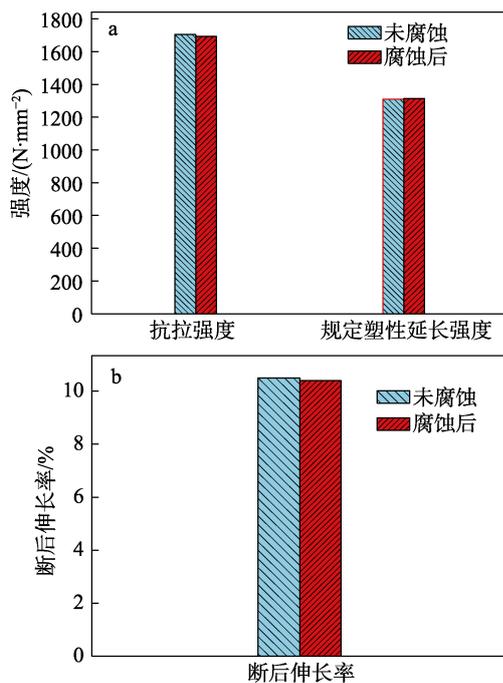


图 6 试验前后力学性能参数对比

Fig.6 Experimental mechanics performance parameters before and after contrast

### 2.3 疲劳寿命对比

是否发生腐蚀的试件进行疲劳试验得到结果见表 2。

表 2 试件疲劳寿命  
Tab.2 Fatigue life of specimen cycles

试件编号	寿命	试件编号	寿命
S1	165 382	WS1	114 596
S2	265 498	WS2	186 324
S3	185 326	WS3	152 369
S4	154 268	WS4	147 850
S5	148 625	WS5	114 562
S6	175 236	WS6	125 489
S7	145 862	WS7	145 236
S8	175 268	WS8	147 563

为了对试验结果准确性进行验证，采用  $W$  检验法对所测得的疲劳试验结果进行正态和对数正态分布检验。将疲劳寿命或者对数疲劳寿命  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  按由小到大的顺序排列，检验统计量：

$$W = \frac{L^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad L = \sum_{k=1}^m \alpha_k (X_{n+1-k} - X_k) \quad ,$$

$$m = \begin{cases} n/2 & n \text{ 为偶数} \\ (n-1)/2 & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

式中： $n$  为试件数； $\alpha_k$  为  $W$  检验的参数； $W_\alpha$  为下侧临界值； $\alpha$  为置信度，这里  $\alpha=0.05$ 。

经查表得：当  $n=8$  时， $\alpha_1=0.6052$ ， $\alpha_2=0.3164$ ， $\alpha_3=0.1743$ ， $\alpha_4=0.0561$ ， $W_\alpha=0.818$ 。若计算出的  $W$  值满足  $W_\alpha \leq W \leq 1$ ，则符合正态性假设。

试验件的疲劳试验结果见表 3。

验证结果显示，本试验所测得试验组和对照组的疲劳寿命数据与对数疲劳寿命数据均满足正态分布函数要求。表明测得数据可靠性较高。

表3 疲劳试验结果 ( $K_t=1.0, R=0.06$ )  
Tab.3 Results of fatigue test ( $K_t=1.0, R=0.06$ )

应力水平/MPa	试件编号	疲劳寿命/cycles	对数疲劳寿命	对数疲劳寿命	疲劳寿命/cycles
$P_{max}=440$	S7	145 862	5.163	均值: 5.2390 标准差: 0.2027 $W=0.904$ $W_\alpha=0.818$	均值: 176933 标准差: 87650 $W=0.8186$ $W_\alpha=0.818$
	S5	148 625	5.172		
	S4	154 268	5.188		
	S1	165 382	5.218		
	S6	175 236	5.243		
	S8	175 268	5.243		
	S3	185 326	5.267		
	S1	265 498	5.424		
	WS1	114 596	5.059	均值: 5.1460 标准差: 0.0552 $W=0.9152$ $W_\alpha=0.818$	均值: 141748 标准差: 75243 $W=0.9021$ $W_\alpha=0.818$
	WS5	114 562	5.059		
	WS6	125 489	5.098		
	WS7	145 236	5.162		
	WS8	147 563	5.168		
	WS4	147 850	5.169		
	WS3	152 369	5.182		
	WS2	186 324	5.270		

借助扫描电镜观察,进一步对疲劳断口腐蚀是否存在腐蚀坑进行表征<sup>[9]</sup>。图7中结果显示,腐蚀前后疲劳断口形貌均呈腐蚀典型疲劳断口特征,存在较为明显的疲劳源、扩展区和瞬断区。以图7b为例,上部三角状银白色的平整区域为疲劳区,下部银灰色区

域均为瞬断区。对比疲劳试验结果,在预腐蚀前后,疲劳试验件寿命未发生明显变化,疲劳源均出现在过渡角位置或加工边缘,在疲劳源附近未发现明显的腐蚀坑迹象。由此也进一步表明,模拟高低空交变环境不影响30CrMnSiNi2A钢的疲劳性能。

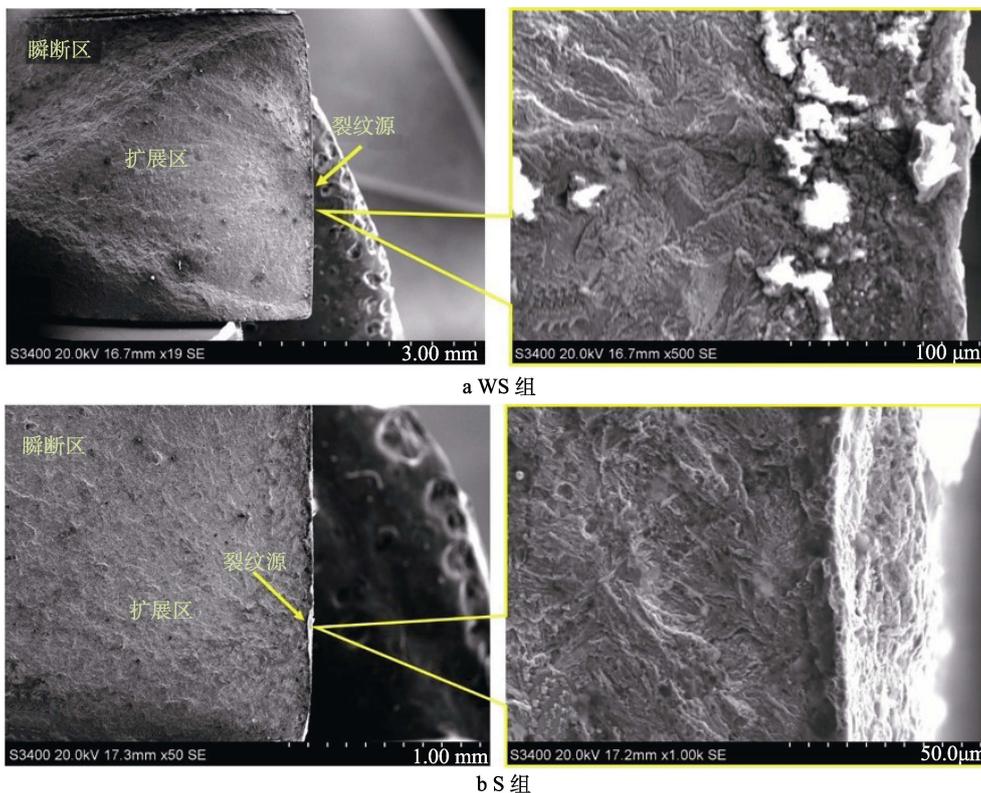


图7 疲劳试件断口形貌对比  
Fig.7 Comparison on fatigue fracture morphology: a) group WS; b) group S

### 3 结论

本研究主要借助低气压与盐雾试验模拟再现飞机服役状态下腐蚀环境,通过腐蚀坑深度测量、静力

拉伸试验、疲劳加载试验、断口观察等一系列表征对腐蚀前后30CrMnSiNi2A材料的性能进行对比分析,最终得到以下结论。

1) 在密闭的环境中,受飞机外部气压变化和盐雾环境的影响,30CrMnSiNi2A钢内部发生了电化学

腐蚀, 平均腐蚀坑深度为 13.539  $\mu\text{m}$ 。这一现象缘于密闭腔体发生“呼吸作用”, 使得腐蚀性介质进入腔体内部。

2) 通过对未腐蚀和腐蚀后试件的力学性能和疲劳性能进行对比分析发现, 30CrMnSiNi2A 钢在平均腐蚀深度为 13.539  $\mu\text{m}$  时, 其力学性能和疲劳性能未发生明显变化。

#### 参考文献:

- [1] 牛康民, 陈美英. 30Cr MnSiNi2A 钢在飞机环境下的腐蚀疲劳裂纹扩展研究[J]. 航空学报, 1990, 11(8): 400-404.  
NIU Kang-min, CHEN Mei-ying. Corrosion Fatigue Crack Growth of 30Cr MnSiNi2A Steel in Aiplane Environments[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1990, 11(8): 400-404.
- [2] 陆文杰, 华小珍, 周贤良. 感应加热工艺参数对 30CrMnSiNi2A 钢轴件温度分布的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(8): 187-192.  
LU Wen-jie, HUA Xiao-zhen, ZHOU Xian-liang. Effect of Induction Heating Process Parameters on Temperature Distribution of 30CrMnSiNi2A Steel Shaft[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(8): 187-192.
- [3] YU H C, CAI Z Z, FU G Q, et al. Effect of V-Ti Addition on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Hot-Rolled Transformation-Induced Plasticity Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 32(3): 352-360.
- [4] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 7050 高强铝合金在我国四种典型大气环境下腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 49-53.  
LUO Lai-zheng, XIAO Yong, SU Yan, et al. Corrosion Behavior of 7050 High-strength Aluminum Alloy in Four Typical Atmospheric Environments in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 49-53.
- [5] 许良, 刘鹏. 超声波冲击对 30 CrMnSiNi2 A 钢疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(10): 60-63.  
XU Liang, LIU Peng. Influence of Ultrasonic Impact on Fatigue Properties of 30 CrMnSiNi2 A Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(10): 60-63.
- [6] 王绍明. 模拟大气环境加速腐蚀试验的研究[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 65-68.  
WANG Shao-ming. Study on Accelerated Corrosion Test of Simulating Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(4): 65-68.
- [7] 肖葵, 董超芳, 李晓刚, 等. 碳钢和耐候钢加速腐蚀实验研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 5-8.  
XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Study on Accelerated Corrosion Tests for Carbon Steels and Weathering Steels[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(3): 5-8.
- [8] 陈群志, 孙祚东, 韩恩厚, 等. 典型飞机结构加速腐蚀试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2004, 1(5): 13-17.  
CHEN Qun-zhi, SUN Zuo-dong, HAN En-hou, et al. Study on Accelerated Corrosion Test Methods of Typical Aircraft Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(5): 13-17.
- [9] 王振尧, 于国才, 韩薇. 钢的大气暴露腐蚀与室内模拟加速腐蚀的相关性[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(2): 70-73.  
WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, HAN Wei. Investigation on Interrelation of Indoor Accelerated Corrosion and Atmospheric Exposure Corrosion of Steels[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(2): 70-73.
- [10] DONG R, LV K, GUO H, et al. Effect of Annealing Processes on Microstructures and Mechanical Properties of Medium Mn Steel[J]. 2019, 944: 337-343.
- [11] 钱余海, 李自刚. 加速腐蚀环境下高强耐候钢 Q450NQR1 的耐蚀性能研究[J]. 宝钢技术, 2007(2): 5-8.  
QIAN Yu-hai, LI Zi-gang. Research on Corrosion Resistance of High Strength Weathering Steel Q450NQR1 in Accelerated Corrosion Environment[J]. Baosteel Technology, 2007(2): 5-8.
- [12] WANG T Y, SONG R B, CAI H J, et al. Influence of Cold Rolling Reduction on Microstructure and Mechanical Properties in 204C2 Austenitic Stainless Steel[J]. 2019, 944: 193-198.