# TM210A 马氏体时效钢在典型大气环境 中的腐蚀行为研究

# 赵起越<sup>1</sup>, 仲莹莹<sup>1</sup>, 郑玉侠<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 刘艳<sup>2</sup>, 郭文营<sup>1</sup>, 白雪<sup>2</sup>

(1.航天科工防御技术研究试验中心,北京 100854; 2.北京电子工程总体研究所,北京 100854)

摘要:目的 研究湿热海洋、干热沙漠大气环境对重要受力材料 TM210A 马氏体时效高强度钢腐蚀行为及机 理的影响。方法 在万宁湿热海洋、敦煌干热沙漠 2 种典型大气环境中开展 TM210A 钢户外暴露试验,采用 形貌观察、腐蚀产物膜分析、力学性能检测及断口观察等方法,分析暴露后 TM210A 钢的腐蚀行为及力学 性能变化。结果 TM210A 马氏体时效钢在湿热海洋、干热沙漠大气环境暴露 2 a 的抗拉强度分别下降 6.0%、 4.2%,断后伸长率分别下降 16.7%、8.3%。在暴露 1、2 a 后,TM210A 钢在干热沙漠环境中的力学性能下 降量均低于其在湿热海洋环境中的力学性能下降量。结论 TM210A 钢表面腐蚀是其强度和塑性下降的主要 原因,TM210A 钢在湿热海洋、干热沙漠大气环境暴露 2 a 后,表面均发生了明显的腐蚀,但在湿热海洋大 气环境下腐蚀更严重,主要是由于湿热海洋大气环境湿度及 CF浓度更高,加速了 TM210A 钢表面电化学腐 蚀,降低了腐蚀产物层对基体的保护性。

关键词: TM210 钢; 湿热海洋环境; 千热沙漠环境; 力学性能; 大气腐蚀 中图分类号: TG172 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)01-0106-08 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2025.01.011

#### **Corrosion Behavior of TM210A Maraging Steel in Typical Atmospheric Environments**

ZHAO Qiyue<sup>1</sup>, ZHONG Yingying<sup>1</sup>, ZHENG Yuxia<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, GUO Wenying<sup>1</sup>, BAI Xue<sup>2</sup>

(1. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China;
 2. Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effect of damp hot marine and dry heat desert atmospheric environments on the corrosion behavior and mechanism of TM210A maraging high-strength steel, which is an important load-bearing material. An outdoor exposure test was conducted on TM210A steel in two typical atmospheric environments, Wanning and Dunhuang. The corrosion behavior and mechanical property change were analyzed by means of morphology observation, corrosion product layer analysis, mechanical property test and fracture analysis. The results showed that the tensile strength of TM210A steel decreased by 6.0% and 4.2% and the elongation decreased by 16.7% and 8.3% after 2-year exposure to damp hot marine and dry heat desert atmospheric environments, respectively. The mechanical properties of TM210A steel in the dry heat desert atmospheric environment by less than those in the damp hot marine environment. In conclusion, the surface corrosion of TM210A steel is the main reason for its strength and plasticity decline. TM210A steel has undergone significant corrosion on its

收稿日期: 2024-07-23; 修订日期: 2024-08-13

**Received:** 2024-07-23; **Revised:** 2024-08-13

**引文格式:** 赵起越, 仲莹莹, 郑玉侠, 等. TM210A 马氏体时效钢在典型大气环境中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 106-113. ZHAO Qiyue, ZHONG Yingying, ZHENG Yuxia, et al. Corrosion Behavior of TM210A Maraging Steel in Typical Atmospheric Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 106-113.

surface after being exposed to damp hot marine and dry heat desert atmospheric environments for two years. However, the corrosion is more severe in the damp hot marineenvironment, mainly due to higher humidity and Cl concentrationin the environment, which accelerate the electrochemical corrosion on the surface of TM210A steeland reduce the protectiveness of corrosion product layer to the matrix.

**KEY WORDS:** TM210A steel; damp hot marine environment; dry heat desert environment; mechanical property; atmospheric corrosion

TM210A 钢属于 18Ni 系列新型 300 级超高强度 马氏体时效钢,由国内某钢铁研究单位根据应用自行 设计研制,具有高强高韧的特点,已广泛应用于航空 航天领域的重要受力件<sup>[1-2]</sup>。TM210A 钢除了马氏体 组织强化外,时效时合金元素会形成金属间化合物进 行强化<sup>[3-5]</sup>。目前,关于 TM210A 钢研究主要集中于 冶炼工艺、锻造工艺及部分零件失效分析[6-9]。赵肃 武等<sup>[6]</sup>的研究表明,TM210A 钢中的强化元素含量、 适当的真空自耗重熔速度能有效改善棒材组织,并提 高其力学性能。马平地<sup>[9]</sup>对 TM210A 钢的锻造工艺进 行了研究,获得了完整的锻造工艺参数,并在某产品 零件上进行了自由锻、模锻工艺试验。樊伟刚等[8]对 TM210A 三联齿磁痕显示原因进行了分析,结果表 明,其磁痕显示的原因是局部成分偏析使 TM210A 钢在固溶处理后存在大量残余奥氏体,从而造成了磁 痕显示。此外,磁痕显示部位残余奥氏体含量较高, 降低了局部硬度,对三联齿的疲劳断裂性能产生了严 重影响。

TM210A 高强钢作为重要的受力结构材料,可用 于航天飞行器的关键受力部件<sup>[10]</sup>。在实际服役过程 中,航天飞行器会遭遇湿热海洋大气、干热沙漠大气 等多种严酷使用环境<sup>[10-12]</sup>,大气中的温度、湿度及腐 蚀性介质等因素势必对裸露在外的 TM210A 钢部件 造成严重的腐蚀影响<sup>[13-15]</sup>,使部件发生断裂失效,增 加航天飞行器失控风险。因此,在典型气候环境中开展 TM210A 高强结构钢的自然环境试验及腐蚀行为研究十分必要。

然而,由于材料自然环境暴露试验周期较长,且 所需专业试验场地较大<sup>[16]</sup>,关于 TM210A 高强钢在 大气环境中腐蚀行为的研究鲜有报道。为阐明 TM210A 高强钢在大气环境中的腐蚀行为及机理,本 文以万宁的典型海洋大气环境和敦煌的典型干热沙 漠大气环境为腐蚀试验条件,研究 TM210A 高强钢 的腐蚀行为及机理,对揭示 TM210A 高强钢的腐蚀 规律,提高其环境适应性能,保障航天飞行器的安全 服役具有重大意义。

#### 1 试验

#### 1.1 材料

试验用 TM210A 钢, 系马氏体时效高强钢, 主要化学成分见表 1。将试样切成 10 mm×10 mm×3 mm的片状试样, 经 60#~2000#水砂纸逐级打磨后, 对试样进行机械抛光, 然后用去离子水、丙酮清洗, 去除表面的油污。经 4%硝酸酒精溶液侵蚀后, 使用金相显微镜观察其金相组织, 结果如图 1 所示。TM210A钢的组织为典型的板条马氏体, 原奥氏体晶界清晰, 晶粒内部分布大量碳化物。

表 1 TM210A 高强钢的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of TM2T0A high-strength steel (mass fraction, %)										
С	Si	Mn	Р	S	Ti	Ni	Мо	Со	Al	Fe
0.005	0.01	0.01	0.004	0.004	0.97	18.49	4.51	10.48	0.12	余量



图 1 TM210A 钢的金相组织 Fig.1 Microstructure of TM210A steel.

根据 GB/T 228.1—2021《金属材料室温拉伸试验 方法》,制备圆棒状 TM210A 高强钢试拉伸试样,尺 寸为 *L*=70 mm,φ=5 mm。之后根据 GJB 8893.1—2017 《军用装备环境试验方法》在属于湿热海洋大气环境 的海南万宁(海拔 12.3 m)和沙漠环境的甘肃敦煌(海 拔 1 139.0 m)进行室外暴露试验,拉伸试样每组 5 个平行样,试验周期为 2 a,试验期间暴露场环境年 平均数据见表 2。

### 1.2 分析方法

将暴晒2a后的拉伸试样回收,对表面宏观形貌

表 2 试验期间万宁试验站和敦煌试验站环境数据 Tab.2 Environmental data of Wanning and Dunhuang stations duringexperiment

试验站	环境类型	气象因素 (年平均)	盐雾沉降速率/ (mg·100 <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )		
万宁	海洋大气环境	温度: 26.0 ℃ 降水: 2 199 mm 相对湿度: 83%	0.355		
敦煌	干热沙漠环境	温度: 12.5 ℃ 降水: 19.6 mm 相对湿度: 41%	0.060		

进行拍照。利用扫描电子显微镜(SEM,Zeiss GeminiSEM 300)对表面及截面进行微观形貌观察, 并用其附带的能谱(EDS)分析腐蚀产物成分。采用 Rigaku DMAX-RB 12kW X 射线衍射仪(XRD)对 TM210A 钢表面腐蚀产物的物相组成进行分析,扫描 范围为 10°~90°,扫描速率为 5 (°)/min。按照 GB/T 16545—1996《金属和合金的腐蚀试样上腐蚀产物的 清除》,使用除锈液(500 mL 盐酸+3.5 g 六次甲基四 胺+蒸馏水配成 1 000 mL 溶液)对试样除锈 3 min, 并使用 SEM 对去除腐蚀产物后的试样表面形貌进行 观察。

按照 GB/T 228.1—2021《金属材料室温拉伸试验 方法》,使用 MTS 型拉伸机进行力学性能测试,每 个试样的标距为 25 mm,在室温下进行拉伸试验,得 到 TM210A 高强钢试样经 1、2 a 暴露后的强度(下 屈服强度  $\sigma_{0.2}$ ,抗拉强度  $\sigma_b$ )和塑性(断后伸长率  $\delta$ ) 变化。将拉断试样用上述除锈方法除去断口表面上的 腐蚀产物之后,用 SEM 观察断口宏观形貌及断口中 心的微观形貌。

# 2 结果与分析

## 2.1 力学性能

对万宁海洋大气环境和敦煌沙漠大气环境暴晒2 a 后的 TM210A 试样进行拉伸试验, 各试样的屈服强 度、抗拉强度和断后伸长率的变化曲线如图2所示。 由图 2 可知, 在湿热海洋大气环境中, TM210A 的强 度随暴露时间的延长总体呈下降趋势。在暴露初期, 试样强度急剧下降,暴露1a,试样抗拉强度和屈服 强度分别下降 5.4%、4.5%。随着暴露时间的延长, 暴露 2 a 后,试样抗拉强度和屈服强度均下降 6.0%, 二者下降率均明显降低,这可能与试样表面生成锈层 的保护性有一定关联。在干热沙漠大气中,TM210A 钢的强度随暴露时间的延长逐渐下降,其中暴露1 a 后试样的抗拉强度和屈服强度分别下降 2.7%、1.3%, 暴露 2 a 后分别下降 4.2%、1.9%,二者下降率逐渐降 低,这一结果与其在湿热海洋大气环境中的变化规律 一致。同时,从图 2c 中可知, TM210A 钢的断后伸 长率在2种典型大气环境中均急剧下降,暴露1a后, 断后伸长率在万宁和敦煌大气环境中分别下降 12.6%、4.2%; 暴露 2 a 后, 断后伸长率分别下降 16.7%、8.3%,这表明在2种典型大气环境中初期的 断后伸长率下降速度更快。此外,对比 TM210A 钢 在2种典型环境中的力学性能(强度及断后伸长率) 可知,在暴露1、2a后,TM210A钢在干热沙漠环境 中的力学性能下降量均显著低于其在湿热海洋环境 中的力学性能下降量。这一结果表明,万宁湿热海洋 大气的高湿度、高降水量、高盐雾环境对 TM210A 钢的力学性能的降低作用更加明显。





## 2.2 表面腐蚀形貌及腐蚀产物分析

TM210A 钢在万宁湿热海洋大气和敦煌干热沙 漠大气环境进行2a的室外暴露后,试样的宏观形貌 如图3所示。由图3可知,在2种环境中暴露后,试 样的宏观形貌有所差异。其中,经2a万宁室外暴露 后,TM210A试样腐蚀较为严重,表面无金属光泽, 出现较为均匀的红褐色腐蚀产物层,且已有部分锈层 已发生脱落掉渣现象;而在敦煌室外暴露2a后,试 样表面腐蚀产物明显较薄,极少部分区域还未被腐蚀



图 3 TM210A 拉伸试样在不同大气环境中暴露 2 a 后的宏观腐蚀形貌 Fig.3 Macro corrosion morphologies of TM210A samplesafter 2-year exposure in different atmospheric environments: a) Wanning; b) Dunhuang

产物覆盖,可见金属基体。此外,在2种环境中暴露的试样,两侧腐蚀更为严重,这主要是由于试样边缘 易使水渍聚集,使这些区域常处于液膜环境下,进而 加剧了试样的腐蚀<sup>[17]</sup>。因此,2种环境下TM210A试样的腐蚀程度存在较大区别,干热沙漠大气环境下TM210A钢的腐蚀程度明显低于湿热海洋大气环境。

TM210A 钢在万宁湿热海洋大气环境暴露后的 微观形貌如图 4a 所示,表面均覆盖了大量腐蚀产物, 腐蚀产物主要呈疏松的片状和颗粒状,并伴随有大量 裂纹,易脱落。在敦煌干热沙漠大气环境暴露 2 a 后, TM210A 钢腐蚀明显更加轻微,表面有少量腐蚀产物 堆积,部分区域保持平整,裂纹几乎不可见,如图 4b 所示。一般来说,钢在大气环境中发生电化学腐 蚀后,表面形成的腐蚀产物密度小于钢基材,因此腐 蚀产物体积发生膨胀,并发生相互挤压,产生内应力, 进而造成锈层内部出现大量裂纹。在万宁海洋大气环 境中,环境湿度较高,降雨丰沛,表面电化学腐蚀更 快,更易产生大量腐蚀产物堆积现象,锈层内部进而 出现大量裂纹。在敦煌干热沙漠大气环境中,气候干 燥,湿度更低,因此在该环境中形成的锈层较为完好。





c万宁,除锈后









Fig.4 Micro morphologies of TM210A steel after 2-year exposureindifferent atmospheric environments: a) beforerust removal in Wanning; b) beforerust removal in Dunhuang; c) afterrust removalin Wanning; d) afterrust removalin Dunhuang

使用除锈液对试样表面腐蚀产物进行清除,得到的形貌如图 4c、d 所示。由图 4c 可知,在湿热海洋 大气环境暴露 2 a 后,试样表面出现明显的腐蚀坑, 且蚀坑尺寸较大,深度较深。同时,坑底呈现典型的 优先溶解形貌,三叉晶界处出现大量裂纹及凹陷。一 般来说,蚀坑的出现通常与腐蚀产物膜的形成及膜下 局部剧烈的阳极溶解相关<sup>[18]</sup>。研究表明<sup>[19]</sup>,在马氏 体钢中,原奥氏体晶界、碳化物等微观组织结构处与 基体界面存在明显的电势差,这些区域较易发生选择 性溶解,因此蚀坑底部出现大量阳极溶解特征,甚至 出现整颗晶粒脱落的形貌。由图 4d 可见,在敦煌干 热沙漠环境暴露 2 a 后,试样除锈后较为平整,表面 仅出现少量较小的腐蚀坑,阳极溶解现象较弱,这表 明干热沙漠气候条件下 TM210A 钢的腐蚀较轻。

为进一步确认 2 种环境下暴露后试样表面腐蚀 产物成分及腐蚀机理,对二者进行 EDS 能谱分析, 结果见表 3 所示。由表 3 可知, TM210A 钢在 2 种环 境中的腐蚀产物主要由 Fe、O 和 Ni 元素组成,其中 万宁暴露试样锈层中还含有少量 Cl 元素,这些 Cl 元素主要与海洋大气中的盐雾沉降相关。在万宁湿 热海洋大气环境中,环境湿度高达 83%,年降水量 较大,因此 TM210A 钢表面易形成薄液膜,并在薄 液膜形成处发生局部腐蚀,即发生铁的阳极溶解和 氧的还原<sup>[20-22]</sup>:

$Fe-2e^- \rightarrow Fe^{2+}$	(1)
$O_2+2H_2O+4e^-\rightarrow 4OH^-$	(2)
在氧气充足的条件下,Fe <sup>2+</sup> 进一步反应:	
$Fe^{2+}+2OH^{-}\rightarrow Fe(OH)_2$	(3)
$3Fe(OH)_2+1/2O_2 \rightarrow Fe_3O_4+3H_2O_3$	(4)

#### 表 3 2 种典型大气环境下 TM210A 表面腐蚀产物化学成 分(质量分数,%)

Tab.3 Chemical composition of corrosion products on TM210A steel in two different atmospheric environments (mass fraction %)

environments (mass fraction, 70)					
位置	Fe	0	Cl	Ni	
P1	49.97	32.5	0.16	17.37	
P2	47.64	34.67	0.07	19.62	

随着反应的进行,表面逐渐形成蚀坑,坑内钢基体发生溶解,同时坑内氧不断消耗,造成坑内缺氧而 坑外富氧,阴极去极化反应向坑外转移,形成坑内外 "氧浓差电池"。坑内金属离子水解会产生 H<sup>+</sup>,金属 离子聚集产生正电荷,在电场的作用下使 CI<sup>-</sup>等阴离 子向内部迁移,这样就形成了闭塞电池的自催化效 应。坑内钢基体处于 HCl介质中成为阳极,呈现活化 溶解状态<sup>[23]</sup>,使腐蚀进一步加剧,蚀坑进一步扩大, 最终形成了如图 4c 所示的形貌。

在敦煌干热沙漠大气环境下,腐蚀产物成分与湿 热海洋大气环境较为接近,但 Cl 元素含量明显下降。 敦煌干热沙漠环境具有昼夜温差大、沙暴频发、空气 含尘量高等显著特点<sup>[24]</sup>。由表 2 可知,其盐雾沉降速 率为 0.06 mg/(100 cm<sup>2</sup>·d),因此沙尘中含有较多的 Cl<sup>-</sup>。这些 Cl<sup>-</sup>在风力作用下会逐步沉积在 TM210A 试样表面,一旦发生降雨潮湿或表面由于昼夜温差出 现结露现象时,钢表面会发生式(1)~(4)所述的 电化学反应,进而使 TM210A 钢发生腐蚀。然而, 由于干热沙漠环境降水量、湿度及盐雾沉降速率均远 低于湿热海洋大气,钢表面薄液膜并未持续存在,因 此相应的电化学反应更难发生,腐蚀萌生及闭塞电池 自催化效应显著低于湿热海洋大气环境,最终形成了 如图 4d 所示的腐蚀形貌。

对在万宁和敦煌大气环境中暴露 2 a 后试样的腐 蚀产物进行 XRD 分析,结果如图 5 所示。可以看出, 在 2 种自然环境中暴露后试样的腐蚀产物相组成基 本一致,主要为 α-FeOOH、γ-FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 及 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,最高峰均为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 及 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的混合物。研 究表明,钢表面腐蚀产物对基体的保护能力主要由具 有相对致密结构的 α-FeOOH 相及 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 相决定,而 γ-FeOOH 相疏松多孔, 难以阻挡腐蚀介质的渗入, 并 易参与电化学反应, 加速钢的腐蚀<sup>[25]</sup>。因此, 利用 RIR 半定量分析法计算了腐蚀产物中各相的比例<sup>[26]</sup>, 并通过计算腐蚀产物中  $a^*/\gamma$  比值来评价锈层保护性 大小, 其中  $a^*$ 代表 α-FeOOH 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>在锈层中所占 比例的总和,  $\gamma$  代表 γ-FeOOH 在锈层中所占比例,  $a^*/\gamma$ 值越大, 锈层保护性越强。结果表明, 在万宁和敦煌 暴露 2 a 后,  $a^*/\gamma$  的值分别为 8.5 和 16.2, 由此可知, 敦煌沙漠环境中形成的锈层保护性明显高于万宁海 洋大气环境。



图 5 TM210A 钢在不同大气环境暴露 2 a 后腐蚀产物 XRD 分析

Fig.5 XRD analysis of TM210A steel after 2-year exposure in different atmospheric environments

此外,干热沙漠环境沙尘暴频发、空气含尘率高的特点会加速产品表面磨蚀、活动部件卡死等环境适应性问题<sup>[24]</sup>。然而本次试验中所用的 TM210A 钢为 18Ni 系列超高强度马氏体钢,具有高强高韧的特点, 经 2 a 暴露数据观测结果可知,空气中的沙尘对钢表 面的磨蚀很低,因此本研究中沙尘对钢表面的影响可 忽略不计。

## 2.3 锈层截面分析

TM210A 钢在湿热海洋、干热沙漠大气环境下暴 露 2 a 后的锈层截面形貌如图 6 所示。如图 6a 可知, 万宁湿热海洋大气环境下经 2 a 暴露后的 TM210A 钢 试样表面锈层分布不均匀,最厚处可达 63.9 μm,且 由于锈层内部应力,导致锈层出现大量裂纹,这些裂 纹可为 CΓ等腐蚀性粒子提供反应通道,进一步加剧 腐蚀的发生。在敦煌干热沙漠大气环境下经 2 a 暴露 后,TM210A 钢试样表面的锈层更加均匀,厚度约为 10.1 μm,锈层内部几乎无裂纹出现,同时基体与锈 层之间结合较好。据此可推知,在低 CΓ、低湿度环 境条件下,表面形成的锈层对侵蚀性离子有一定的阻 碍作用,可在一定程度上延缓基体腐蚀进程,该结果 与前文的形貌特征相一致。 中存





此外,在湿热海洋、干热沙漠大气环境下暴露 2 a 后,锈层中均含有较高含量的 Ni 元素,这主要与钢 中较高含量的 Ni 元素相关。研究表明<sup>[27-29]</sup>,Ni 元素 会在钢的腐蚀产物层中大量富集并发生一系列的化 学反应,见式(5)~(8),这些反应生成的 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 可有效提高腐蚀产物的致密性并降低腐蚀速率。

$2Ni^{+}+2H_{2}O+O_{2}\rightarrow 2Ni(OH)_{2}$	(5)
$Ni(OH)_2 \rightarrow NiO+H_2O$	(6)
$4Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2NiFe_2O_4 + 6H_2O$	(7)
$4Fe(OH)_2 + 2NiO + O_2 \rightarrow 2NiFe_2O_4 + 4H_2O$	(8)
在湿热海洋大气环境中, TM210A 钢的腐蚀	产物
在较高含量的 Cl 元素, 大气环境中高含量的	匀 Cl-
	Los dad

对腐蚀产物膜具有强烈的破坏作用,从而抑制 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的生成<sup>[30]</sup>,降低了腐蚀产物层的致密性。在 敦煌干热沙漠环境中,大气中 Cl<sup>-</sup>浓度及湿度较低, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的生成未被抑制,因此腐蚀产物层较为致密, 进而提高了该环境下 TM210A 钢的耐蚀性。

### 2.4 拉伸试样断口及侧面分析

截取拉伸试样断口,使用 SEM 观察试样断口的 宏观形貌及中心的微观形貌,如图 7 所示。由图 7a 可知,TM210A 钢试样在湿热海洋大气、干热沙漠 大气环境经室外暴露 2 a 后,断口的宏观形貌差异较 小,出现了颈缩现象,为典型的杯锥状韧性断口, 由外至内分别剪切唇、放射区及纤维区。由图 7b 可 知,在万宁湿热海洋大气环境暴露后,在试样断口 中心纤维区可观察到大量韧窝,韧窝间分布有较多 微裂纹,该区域的"小杯锥"是由塑性变形过程中微 裂纹不断扩展和连接造成的<sup>[16]</sup>。在干热沙漠大气环 境中,试样中心区域也为典型的韧窝形貌,且韧窝 之间无明显裂纹出现。这一结果表明,在 2 种环境 下,试样的断裂方式不变,但湿热海洋大气环境下 试样的脆性更高。



图 7 TM210A 钢在 2 种典型大气环境下暴露 2 a 后的断口形貌 Fig.7 Fracture morphologies of TM210A steel after 2-year exposure in two typical atmospheric environments: a) macro morphologies; b) micro center morphologies

结合前文的表面和截面形貌分析可知,TM210A 钢表面腐蚀是其强度和塑性下降的主要原因。在干热 沙漠大气环境中,试样表面腐蚀产物层较薄,蚀坑较 浅,拉伸应力在腐蚀坑处引起应力集中较弱,其相应 的力学性能损失也较低。在湿热海洋大气环境下,表 面腐蚀产物疏松,减小了材料的有效截面积,同时较 深的腐蚀坑可诱发应力集中,显著降低了材料的力学 性能。

# 3 结论

1) TM210A 钢在湿热海洋、干热沙漠大气环境 中暴露 2 a 后,均会发生腐蚀及力学性能下降。其中, 抗拉强度分别下降 6.0%、4.2%,断后伸长率分别下 降 16.7%、8.3%,建议在实际使用过程中预留出一定 的性能设计裕度。

2) TM210A 钢在湿热海洋大气环境暴露 2a 后, 腐蚀比干热沙漠环境更严重。在湿热海洋大气环境 中, TM210A 钢表面电化学更快,表面腐蚀产物层保 护性更弱,建议在海洋大气环境使用时对 TM210A 钢进行适当的表面防护。

3) TM210A 钢表面腐蚀造成了其强度和塑性下降,在干热沙漠大气环境中, TM210A 钢的强度和伸长率能够更好地保持。

#### 参考文献:

 姜越, 尹钟大, 朱景川, 等. 马氏体时效不锈钢的发展 现状[J]. 特殊钢, 2003, 24(3): 1-5.
 JIANG Y, YIN Z D, ZHU J C, et al. Development Status of Maraging Stainless Steel[J]. Special Steel, 2003, 24(3): 1-5.

- [2] 赵成志, 庞学东, 翟羽佳, 等. TM210A 钢低倍环状花 样挽救办法探讨[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(4): 70-73. ZHAO C Z, PANG X D, ZHAI Y J, et al. Discussion on Remedy Methods for Ring Pattern Defect of TM210A Steel[J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(4): 70-73.
- [3] 刘振宝,梁剑雄,杨志勇,等.碳含量对15-5PH沉淀硬 化不锈钢板材的组织与性能的影响[J].航空材料学报, 2011, 31(1): 7-12.
  LIU Z B, LIANG J X, YANG Z Y, et al. Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Type 15-5PH Precipitation Hardened Stainless Steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(1): 7-12.
- [4] 钟平,夏明赟,王俊丽,等. 时效对 0Cr<sub>15</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>2</sub>Ti 钢微 观组织与力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003, 23(4): 21-25.
   ZHONG P, XIA M Y, WANG J L, et al. Effect of Aging on Microstructure and Mechanical Properties of

on Microstructure and Mechanical Properties of  $0Cr_{15}Ni_5Cu_2Ti$  Steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(4): 21-25.

[5] 王树志, 葛子亮, 任学冬, 等. 15-5PH 沉淀硬化不锈钢

磁粉检测磁痕分析[J]. 航空材料学报, 2015, 35(1): 77-81.

WANG S Z, GE Z L, REN X D, et al. Analysis of Magnetic Particle Indication about 15-5PH Precipitation-Hardening Stainless Steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(1): 77-81.

[6] 赵肃武, 刘春明. TM210A 钢冶炼工艺对其组织和性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(10): 1404-1408.

ZHAO S W, LIU C M. Effects of Smelting Process on Microstructure and Properties of TM210A Steels[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(10): 1404-1408.

- [7] 聂小武,陈同彩. TM210A 钢棒及锻件的超声波探伤[J]. 无损探伤, 2008, 32(1): 45-46.
   NIE X W, CHEN T C. Nondestructive Testing Technology, 2008, 32(1): 45-46.
- [8] 樊伟刚,司马亦奎,张亚梅,等.TM210A 钢制零件磁 痕显示原因分析[J]. 金属热处理, 2018, 43(10): 237-241.
   FAN W G, SIMA Y K, ZHANG Y M, et al. Magnetic Par-

ticle Indication Analysis of TM210A Steel Parts[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(10): 237-241.

- [9] 马平地. 超高强度钢锻造工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2003(4): 17-21.
   MA P D. The Forging Process Research for the High Strength Steel[J]. Heavy Casting and Forging, 2003(4): 17-21.
- [10] 令狐喜欢,赵杨. 某装备舵杆开裂原因分析及解决[J]. 装备制造技术, 2014(12): 122-124.
  LINGHU X H, ZHAO Y. Analysis and Solution of the Rudder Stock Cracks of One Equipment[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(12): 122-124.
- [11] 曾文波, 揭敢新, 张晓东, 等. 汽车整车濒海热带沙漠 环境失效行为研究[J]. 环境技术, 2019, 37(2): 43-45. ZENG W B, JIE G X, ZHANG X D, et al. Study on Failure Behavior of Vehicle in Coastal Tropical Desert[J]. Environmental Technology, 2019, 37(2): 43-45.
- [12] 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 L Z, XIAO Y, SU Y, 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.
- [13] WU W, CHENG X Q, ZHAO J B, et al. Benefit of the Corrosion Product Film Formed on a New Weathering Steel Containing 3% Nickel under Marine Atmosphere in Maldives[J]. Corrosion Science, 2020, 165: 108416.
- [14] ZHAO Q Y, ZHAO J B, CHENG X Q, et al. Galvanic Corrosion of the Anodized 7050 Aluminum Alloy Coupled with the Low Hydrogen Embrittlement Cd Ti Plated 300M Steel in an Industrial-Marine Atmospheric Environment[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 382: 125171.

- [15] SUN M H, DU C W, LIU Z Y, et al. Fundamental Understanding on the Effect of Cr on Corrosion Resistance of Weathering Steel in Simulated Tropical Marine Atmosphere[J]. Corrosion Science, 2021, 186: 109427.
- [16] 赵起越,赵晋斌,刘彦宁,等. PH13-8Mo不锈钢在半乡 村大气环境中长周期腐蚀行为[J]. 工程科学学报, 2021, 43(3): 400-408.
  ZHAO Q Y, ZHAO J B, LIU Y N, et al. Corrosion Behavior of PH13-8Mo Stainless Steel after Long-Term Exposure to Semi-Rural Atmosphere[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(3): 400-408.
- [17] 赵起越,贾志浩,赵晋斌,等.阳极氧化 6061 铝合金在 工业海洋大气环境长周期暴晒时的腐蚀行为[J].中国 有色金属学报, 2020, 30(6): 1249-1262.
  ZHAO Q Y, JIA Z H, ZHAO J B, et al. Corrosion Behavior of Anodized 6061 Aluminum Alloy in Industrial-Marine Atmosphere in Qingdao after Long-Term Exposure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1249-1262.
- [18] MA H C, LIU Z Y, DU C W, et al. Stress Corrosion Cracking of E690 Steel as a Welded Joint in a Simulated Marine Atmosphere Containing Sulphur Dioxide[J]. Corrosion Science, 2015, 100: 627-641.
- [19] ZHAO Q Y, FAN E D, ZHAO J B, et al. Improved Stress Corrosion Cracking Resistance of High-Strength Low-Alloy Steel in a Simulated Deep-Sea Environment *via*NbMicroalloying[J]. Steel Research International, 2021, 92(5): 2000596.
- [20] YANG Y, CHENG X Q, ZHAO J B, et al. A Study of Rust Layer of Low Alloy Structural Steel Containing 0.1 % Sb in Atmospheric Environment of the Yellow Sea in China[J]. Corrosion Science, 2021, 188: 109549.
- [21] SUN B Z, ZUO X M, CHENG X Q, et al. The Role of Chromium Content in the Long-Term Atmospheric Corrosion Process[J]. NPJ Materials Degradation, 2020, 4: 37.
- [22] 赵晋斌,赵起越,陈林恒,等.不同表面处理方式对 300M 钢在青岛海洋大气环境下腐蚀行为的影响[J].中 国腐蚀与防护学报,2019,39(6):504-510.
  ZHAO J B, ZHAO Q Y, CHEN L H, et al. Effect of Different Surface Treatments on Corrosion Behavior of 300M Steel in Qingdao Marine Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019,

39(6): 504-510.

- [23] WU W, CHENG X Q, HOU H X, et al. Insight into the Product Film Formed on Ni-Advanced Weathering Steel in a Tropical Marine Atmosphere[J]. Applied Surface Science, 2018, 436: 80-89.
- [24] 赵全成,徐强,张凯,等.湿热海岸沙漠环境特征与干热沙漠环境特征对比分析[J].装备环境工程,2023,20(8):128-135.
  ZHAO Q C, XU Q, ZHANG K, et al. Comparative Analysis of Environmental Characteristics between Hot and Humid Coastal Desert and Hot and Dry Desert[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(8):128-135.
- [25] WU W, LIU Z Y, WANG Q Y, et al. Improving the Resistance of High-Strength Steel to SCC in a SO<sub>2</sub> polluted Marine Atmosphere through Nb and SbMicroalloying[J]. Corrosion Science, 2020, 170: 108693.
- [26] HARA S, KAMIMURA T, MIYUKI H, et al. Taxonomy for Protective Ability of Rust Layer Using Its Composition Formed on Weathering Steel Bridge[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1131-1142.
- [27] 柯伟,董俊华. Mn-Cu 钢大气腐蚀锈层演化规律及其耐候性的研究[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1365-1378.
  KE W, DONG J H. Study on the Rusting Evolution and the Performance of Resisting to Atmospheric Corrosion for Mn-Cu Steel[J]. ActaMetallurgicaSinica, 2010, 46(11): 1365-1378.
- [28] NISHIMURA T, RAJENDRAN N. Nano Structure and Electrochemical Behavior of the Rust Formed on Ni Bearing Steel after Exposure Tests in a Tropical Indian Environment[J]. Materials Transactions, 2014, 55(10): 1547-1552.
- [29] FAN Y M, LIU W, SUN Z T, et al. Corrosion Behaviors of Carbon Steel and Ni-Advanced Weathering Steel Exposed to Tropical Marine Atmosphere[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(10): 6417-6426.
- [30] 范玥铭. Ni-Mo 低合金钢热带海洋大气环境腐蚀行为和 机理研究[D]. 北京:北京科技大学,2021.
   FAN Y M. Corrosion Behavior and Mechanism of Ni-Mo Low Alloy Steels in Tropical Marine Atmosphere[D].
   Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.