

深冷处理工艺对 440A 铸造不锈钢 耐空蚀性能的影响研究

张娅琳

(广西北港新材料有限公司, 广西北海 536017)

摘要: 为降低空蚀对不锈钢表面的破坏, 本文研究了深冷处理工艺对440A铸造不锈钢耐空蚀性能的影响。试验中, 将处理后的440A铸造不锈钢置于液氮深冷试验箱中进行不同工艺步骤的深冷处理, 在超声材料气蚀试验机中进行1~6 h的空蚀处理。通过对比不同深冷工艺, 确定预处理+退火+淬火+深冷的工艺3为最佳, 其在6 h空蚀时长下的空蚀损失量为5 mg, 平均空蚀速率为1.2 mg/h。进一步测试表明, 在工艺3条件下, 30 min深冷时长的空蚀损失量为4.5 mg, 平均空蚀速率为1.3 mg/h; -150 °C深冷温度下的空蚀损失量为3.4 mg, 平均空蚀速率同样为1.3 mg/h。结果表明, 30 min深冷时长和-150 °C深冷温度均能有效降低空蚀失重, 可以提升不锈钢的耐空蚀性能。

关键词: 深冷处理; 440A铸造不锈钢; 耐空蚀性能; 不锈钢损失量; 细化晶粒

深冷处理工艺作为一种新型材料改性技术, 近年来在提升金属材料综合性能领域展现出显著潜力。该工艺通过将材料冷却至液氮温度(-196 °C)或更低, 利用极端低温环境促使材料发生微观结构转变, 从而改善其力学性能与抗蚀特性^[1]。不锈钢性能研究一直是研究领域的关注重点, 空蚀现象作为流体动力学作用下的特殊磨损形式, 本质上是液体中气泡在材料表面反复形成和溃灭过程中释放的冲击波造成表面剥蚀^[2]。其破坏机制涉及机械冲击、化学腐蚀及热效应的多重耦合作用。材料耐空蚀性能主要取决于表面硬度、微观组织均匀性、残余应力状态及钝化膜稳定性等因素。

对于不锈钢空蚀问题, 任倩楠等学者分析不锈钢上的表面微结构变化对于不锈钢空化和空蚀变化的影响^[3]。确定最佳占空比能够有效降低不锈钢可能发生的损失。该研究使用数值模拟技术, 但是多基于均质流假设, 未充分考虑微结构导致的边界层分离和涡旋结构变化对空泡动力学的影响, 马氏体相变的温度敏感性与空蚀过程中的瞬态热效应耦合作用未被纳入模型, 导致寿命预测精度不足。刘海霞等人研究使用氯化钠预腐蚀不锈钢材料, 再测试该材料的空蚀性能, 试验过程中调整腐蚀液的浓度为3.5%, 获得空蚀破坏最小的试验材料^[4]。但是氯化钠预腐蚀条件与空蚀参数之间存在复杂的非线性耦合关系, 该研究设计采用单一变量控制, 难以揭示多因素协同作用下的损伤机制, 导致预测模型普适性差。王岩等人研究不同热处理对于不锈钢空蚀性能的影响, 确定一种工艺较为复杂的热处理方法能够有效改善不锈钢的空蚀性能^[5], 激光熔化技术本身存在诸多缺陷, 热处理过程中这些缺陷对空蚀性能有重要影响, 该研究只关注热处理后微观组织变化, 而缺乏对初始缺陷在热处理-空蚀耦合作用下的演化机制研究。肖云鹤等学者研究改变不锈钢的表面粗糙度后对不锈钢空蚀性能的影响, 确定表面粗糙度增加会导致不锈钢腐蚀坑密度上升^[6]。不同表面处理工艺引入的残余应力与粗糙度特征存在关联, 而该研究多孤立分析粗糙度影响, 未系统研究工艺参数和粗糙度联合作用性能的映射关系, 限制了对工程实践的指导价值。

作者简介:

张娅琳(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究领域为深冷处理对铸造不锈钢性能的影响。电话: 18275764152, E-mail: Zhangyalin2504@163.com

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)10-1329-07

收稿日期:

2025-04-29 收到初稿,
2025-07-21 收到修订稿。

深冷处理工艺通过诱发马氏体相变,细化晶粒尺寸,析出弥散分布的碳化物,调整残余应力分布,能够优化不锈钢的微观结构特征^[7-9],可促使奥氏体向马氏体充分转变,提高基体硬度。在低温下的原子扩散激活能降低,有利于碳元素均匀分布并形成细小碳化物,增强对位错运动的阻碍作用;材料在升降温过程中因热胀冷缩差异产生残余压应力,有助于闭合表面微裂纹,提升抗疲劳性能^[10]。这些微观层面的优化将协同作用于材料表面,形成更致密的钝化膜,提高电学稳定性,从而有效抵御空泡溃灭产生的微射流冲击和化学侵蚀的复合作用。

因此,本文以440A铸造不锈钢为例,针对深冷处理工艺对440A铸造不锈钢耐蚀性能的影响展开研究。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本文研究的440A铸造不锈钢的基础力学参数列于表1。

表1 440A铸造不锈钢力学参数
Tab. 1 Mechanical parameters of 440A cast stainless steel

力学参数	数值
退火后硬度HB(布氏硬度)	255
回火后硬度HRC(洛氏硬度)	54
屈服强度/MPa	760
抗拉强度/MPa	929
冲击韧性/(J·m ⁻²)	872
伸长率/%	43

440A铸造不锈钢中的化学成分详情如表2所示。

表2 440A铸造不锈钢化学成分
Tab. 2 Chemical composition of 440A cast stainless steel
w_B/%

C	Cr	Ni	Si	Mn	P	Mo
0.65	17.00	0.55	1.00	1.00	0.04	0.75

1.2 深冷处理工艺

1.2.1 预处理

440A铸造不锈钢深冷处理之前需要先进行预处理,以便提升处理效果。对440A铸造不锈钢工件进行彻底的清洗,以去除表面的油污、灰尘和其他杂质,清洗溶剂为丙酮溶液和去离子水,两种溶液交替冲洗,保证不锈钢表面不存在污渍^[11]。

1.2.2 退火处理

将清洗后的440A铸造不锈钢放置在退火炉中,注意避免不锈钢材料之间相互接触,以免影响退火效果。具体退火工艺为:将不锈钢加热到800~1 100℃范围内,加热速率适中,以避免材料因快速加热而产生新的应力。在退火温度下保持一定时间,以确保材料内部达到均匀的温度分布,促使晶粒生长和相转变。具体的保温时间根据材料的厚度和装炉量来确定,一般需保证材料整体温度均匀。将加热保温后的不锈钢缓慢冷却至室温,采用缓慢冷却的方式,避免因快速冷却而引起应力变形。冷却速度应控制在不会产生新的内应力的范围内,通常可以采用炉冷或空冷至室温^[12]。

1.2.3 淬火处理

将退火后的不锈钢放置在淬火设备中,具体淬火工艺步骤为:首先进行预热处理,将不锈钢加热至300~500℃范围并按实际需求持续一段时间,以减少淬火时的热应力并防止材料开裂;将预热好的不锈钢继续加热至淬火温度950~1 050℃,确保材料达到奥氏体化状态,为后续的马氏体转变做准备;最后将加热至淬火温度的不锈钢迅速浸入盐水中进行冷却,冷却速度需足够快以确保获得高硬度和良好的耐磨性,但需注意淬火后的不锈钢硬度会显著提高,可能会在一定程度上影响韧性,因此后续需进行回火处理以调整材料的力学性能^[13]。

1.2.4 不同深冷工艺的选择

完成淬火冷却处理后,应立即进行深冷处理,以避免在室温停留时间过长引起奥氏体热稳定化。将淬火440A铸造不锈钢直接放入盛有液氮的深冷试验箱中,处理温度通常为-150~-196℃,工件在液氮中深冷处理的时长为10~60 min,可根据试验设计调整,确保不锈钢内部温度均匀,误差控制在±3℃范围内。采用PID温控系统,配备三层真空绝热层,以确保深冷箱温度波动范围在±1.5℃以内,满足ASM 2769标准要求^[14]。深冷处理结束后,从冷处理设备中取出不锈钢,在空气中自然回升到室温,禁止强制加热,以防止因热应力导致微裂纹,回温时间设定为8 h。完成回温以后的不锈钢应在160~180℃温度下回火2 h,以提高其韧性和稳定性。

为使分析具有对比性,选取不同深冷处理工艺的组合,详细组合方式如表3所示。

对不同深冷处理工艺组合的测试结果,选择最优工艺组合,进行后续测试,并将最优工艺中深冷处理时间分别设置为10 min、30 min和60 min,调整深冷工艺的温度分别为-50℃、-150℃和-250℃,以验证深

表3 深冷处理工艺组合
Tab. 3 Cryogenic treatment process combination

组合编号	深冷处理工艺组合
工艺1	预处理+深冷
工艺2	预处理+淬火+深冷
工艺3	预处理+退火+淬火+深冷
工艺4	退火+深冷

冷处理工艺中不同时长和温度对440A铸造不锈钢耐腐蚀性能的影响。

1.3 耐空蚀后处理

440A铸造不锈钢经深冷处理后, 对其进行耐空蚀后处理, 以便分析深冷处理对于该不锈钢耐空蚀性能影响。

1.3.1 打磨处理

使用砂轮对不锈钢材料粗磨, 粗磨砂轮的粒度为60#, 打磨时应保持均匀的力度和一致的方向, 避免产生交叉划痕。完成粗磨以后用中粒度的砂轮进一步打磨, 细化粗磨产生的划痕, 使表面更加平整。最后对不锈钢进行细磨, 使用最细粒度的砂轮进行最终打磨, 消除中磨产生的所有划痕, 使表面达到光滑无痕的状态, 打磨完成后, 用干净的布擦拭表面, 去除打磨产生的粉尘。

1.3.2 抛光处理

使用抛光膏和抛光轮初步抛光, 抛光时应保持均匀的力度和适中的速度, 避免过热和产生新的划痕, 在初步抛光的基础上, 使用更细的抛光膏和抛光轮精抛光, 使不锈钢表面达到镜面效果, 无任何划痕和瑕疵, 抛光完成后, 用干净的布擦拭表面, 去除抛光膏残留^[15]。

1.3.3 空蚀处理

完成一系列处理后的不锈钢材料通过超声材料气蚀试验机实现空蚀处理。空蚀处理之前先使用电子天平称量各个试验样品的重量并记录。此后将试验样品泡在去离子水中(露出液面)后, 置于试验机的样品台上, 试验机上的振动头与去离子水和不锈钢试样之间的距离分别为10 mm和1 mm, 试验机的超声频率设定为25 kHz, 试验过程的环境温度控制在25 °C范围, 通过低温循环控制器实现环境温度控制, 总空蚀时间设定为6 h。为了提高试验结果的可靠性和重复性, 每个试验条件下均设置了5个重复试样。

完成空蚀处理后, 将试验样品通过超声清洗仪进

行清洗, 随后置于烘干箱中加热以去除表面残留的水分。虽然文档中未明确指出烘干箱的具体加热温度, 但通常情况下, 为了确保样品完全干燥且避免高温对材料性能产生影响, 烘干箱的温度会设定在一个适中的范围, 如60~100 °C之间。在本试验中, 烘干箱加热时间设定为60 min, 以保证不锈钢材料的充分干燥。

1.4 深冷处理工艺对耐空蚀性影响分析

1.4.1 不同深冷工艺对耐空蚀性影响

使用表3中不同深冷处理工艺对本文所研究的440A铸造不锈钢进行处理, 完成空蚀处理后, 通过称量质量损失, 确定不锈钢的空蚀损失量与平均空蚀速率。平均空蚀速率的计算公式如下。

$$V = \frac{W}{t} \quad (1)$$

式中: V 表示平均空蚀速率, W 表示空蚀过程中的质量损失量, t 表示空蚀时间。

1.4.2 不同深冷时长对耐空蚀性影响

经过试验确定最佳深冷处理工艺后, 在该工艺中深冷处理阶段, 设置液氮中深冷处理的时长分别为10 min、30 min和60 min, 检测不同深冷时长下, 经空蚀后不锈钢的空蚀损失量与空蚀速率。

1.4.3 不同深冷温度对耐空蚀性影响

在最佳深冷处理工艺中, 调整深冷工艺的温度分别为-50 °C、-150 °C和-250 °C, 完成深冷处理后再进行空蚀处理, 通过试验分析不同深冷温度对该不锈钢耐空蚀性能影响。

1.4.4 不同空蚀时长下微观形貌分析

经过试验分析确定最佳深冷工艺、深冷时长和深冷温度后, 在此基础上使用SEM测试不同空蚀时长下不锈钢空蚀界面的微观形貌, 以此确定不锈钢的空蚀微观形貌, 对最佳深冷处理工艺操作下不锈钢耐空蚀性能进行分析。

2 试验结果

2.1 不同深冷工艺对耐空蚀性能影响

设计空蚀时间为1~6 h, 使用不同深冷工艺对440A铸造不锈钢进行处理, 得到不同工艺条件下不锈钢的空蚀损失量与平均空蚀速率, 如图1所示。图1中的数据点均代表5个重复试样的平均值, 并且为了直观展示数据的波动范围, 添加了误差棒。

从图1可以看出, 随着空蚀时间增加, 不锈钢的损失量呈现上升状态, 空蚀速率呈现下降状态。在空

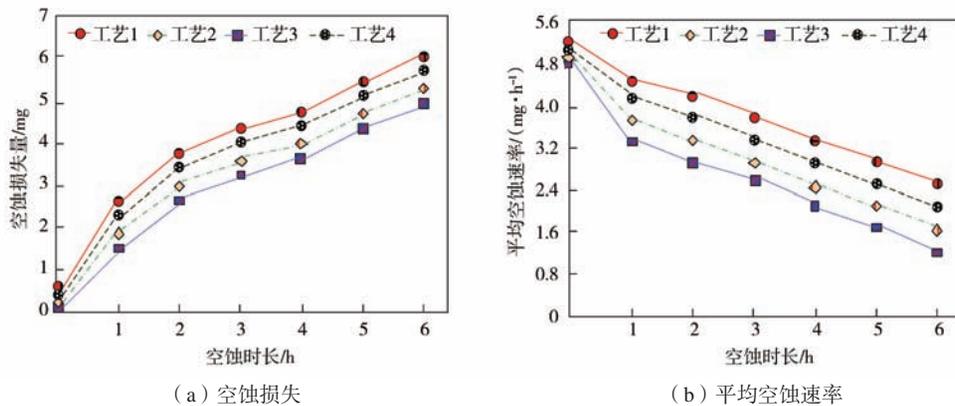


图1 不同深冷工艺对耐空蚀性影响

Fig. 1 Influence of different cryogenic processes on cavitation corrosion resistance

蚀时长最高6 h时, 工艺3的空蚀损失量为5 mg, 平均空蚀速率为1.2 mg/h, 包含预处理+退火+淬火+深冷的处理, 工艺3的空蚀损失量和平均空蚀速率最低。说明采用工艺3处理不锈钢后, 不锈钢的空蚀损失量最少, 且空蚀速率下降最小。这是由于经过淬火和深冷后, 不锈钢中的奥氏体转变为马氏体, 不锈钢从低硬度转变为高硬度, 同时由于受到深冷处理工艺影响, 退火和淬火导致的晶体膨胀得到低温抑制, 提升不锈钢内部结构的稳定性, 经过退火和淬火工艺后不锈钢的奥氏体向马氏体转化, 经过深冷处理后晶粒得到进一步细化, 结构中的空隙被充分填补, 不锈钢的耐磨面积增大, 因此工艺3处理后的不锈钢试样空蚀损失最小。从试验结果可以看出, 深冷处理工艺中, 除了深冷工艺是关键步骤外, 预处理、退火、淬火这些处理步骤缺一不可, 每一个处理步骤都为深冷处理打下良好基础。图1 (b) 中, 空蚀时长增加, 空蚀速率呈现下降趋势, 这种情况是由于长时间空蚀后, 不锈钢表面形成空蚀缺陷, 不锈钢的光滑程度降低, 因此空蚀的速度受这些缺陷影响逐渐下降, 而工艺3处理后的不锈钢

硬度较大, 空蚀缺陷较少, 空蚀速率相比于其他工艺处理的试验样品更高。

2.2 不同深冷时长对耐空蚀性能影响

由试验结果可知, 包含预处理+退火+淬火+深冷的处理工艺3的空蚀损失量和平均空蚀速率最低, 确定为最佳的深冷工艺。调整液氮中深冷处理的时长分别为10 min、30 min和60 min, 应用工艺3对440A铸造不锈钢进行处理, 对比不同深冷时长下, 不锈钢经空蚀后的损失量与空蚀速率变化, 结果如图2所示。图2中的数据点包含5个重复试样的平均值, 并添加了误差棒以显示数据的离散程度。

分析图2 (a) 可以看出, 深冷时间从10 min增长至60 min, 不锈钢的空蚀损失量也先降低后升高, 深冷10 min时, 不锈钢的空蚀损失量最高。在空蚀时长最高6 h时, 深冷时间为30 min的空蚀损失量为4.5 mg, 平均空蚀速率为1.3 mg/h。这是由于深冷时间较短时, 不锈钢中受热膨胀的晶体不能得到良好收缩, 不锈钢的硬度也严重不足, 导致受到空蚀影响时出现严重损失;

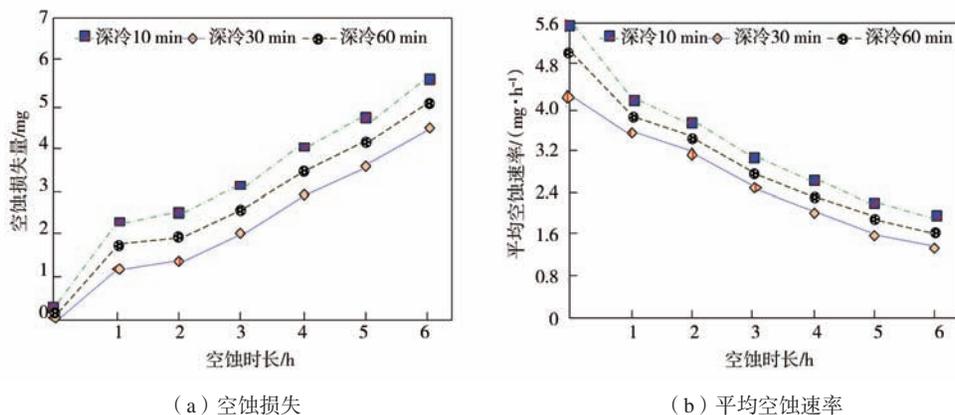


图2 深冷时长对耐空蚀性影响

Fig. 2 Influence of cryogenic duration on cavitation corrosion resistance

深冷时间为60 min时, 不锈钢在低温环境中保存时间较长, 脆性上升, 经空蚀后发生大量损失; 深冷时间为30 min时, 属于较为适中的深冷时长, 不锈钢的硬度与内部组织都较为理想, 因此空蚀损失量也最少。图2 (b) 显示空蚀时间增加, 不锈钢的空蚀速率保持下降变化, 其中深冷30 min的不锈钢空蚀速率保持在较低水平, 表明该深冷时长下不锈钢的空蚀量累积更慢。综合来看, 深冷时长为30 min时, 不锈钢的耐空蚀效果最好。

2.3 不同深冷温度对耐空蚀性影响

调整深冷工艺的温度分别为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应用工艺3对440A铸造不锈钢进行处理, 对比不同深冷温度下, 不锈钢经空蚀后的损失量与空蚀速率变化, 如图3所示。图3中的数据点包含5个重复试样的平均值, 误差棒的添加使得试验数据的波动情况一目了然。

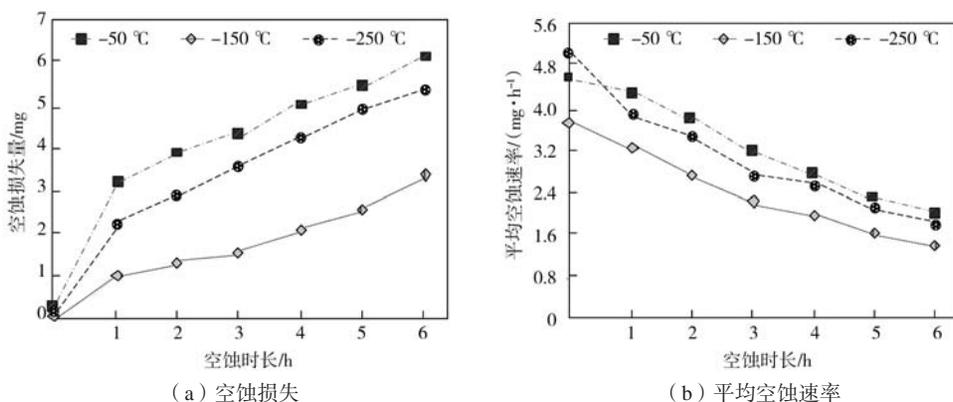


图3 深冷温度对耐空蚀性影响

Fig. 3 Influence of cryogenic temperature on cavitation corrosion resistance

440A铸造不锈钢的耐空蚀性能有显著提升作用。这一提升主要归因于深冷处理促进了不锈钢中奥氏体向马氏体的转变, 进而提高了材料的硬度, 细化了晶粒。为了更准确地揭示这一转变过程及其对耐空蚀性能的具体影响, 通过X射线衍射 (XRD) 分析来计算残余奥氏体的含量。XRD分析能够精确测定材料中不同相的相对含量, 从而提供关于马氏体转变量的直接证据。通过结合XRD分析结果与空蚀试验数据, 可以更深入地理解深冷处理如何通过改变材料的微观结构来提升其耐空蚀性能。具体而言, 马氏体转变量的增加有望减少空蚀过程中因机械冲击和化学腐蚀导致材料损失, 因为马氏体相通常具有更高的硬度和更好的抗腐蚀性能。因此, 通过XRD分析来量化马氏体转变量, 能够提供更科学的依据, 以优化深冷处理工艺并进一步提升不锈钢的耐空蚀性能。

深冷温度的变化会影响不锈钢的空蚀性能。其中, 在空蚀时长最高6 h时, 深冷温度为 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的空蚀损失量为3.4 mg, 平均空蚀速率为1.3 mg/h 。从图3 (a) 能够明显看出, 深冷温度过高 ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) 或者过低 ($-250\text{ }^{\circ}\text{C}$), 都会导致空蚀后不锈钢的损失量上升, 且空蚀时间增加, 该损失量上升幅度加大, 呈现线性上升趋势。这是由于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 深冷不能将奥氏体充分转变为马氏体, 不锈钢的硬度不能有效提升。而 $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 深冷环境处理不锈钢后, 不锈钢的内部晶体脆性上升, 受到空蚀影响, 不锈钢材料大量剥离, 导致损失量上升。图3 (b) 中, 各个试样的平均空蚀速率变化趋势与图3 (a) 相对应, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种温度环境下深冷后, 都会导致不锈钢的空蚀速率降低, 表明这两种低温深冷后不锈钢破坏较为严重。综合来看, $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 深冷温度更能降低空蚀损失量, 提升不锈钢的耐空蚀性能。

在分析空蚀影响机理时, 发现深冷处理工艺对

2.4 不同空蚀时长下微观形貌

经过深冷时长与深冷温度的试验可知, 在深冷温度为 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行30 min深冷处理后, 不锈钢的耐空蚀效果最好。因此, 调整液氮中深冷处理的时长为30 min, 深冷温度为 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应用工艺3对440A铸造不锈钢进行处理, 对比不同空蚀时长下不锈钢的空蚀微观形貌。如图4所示。

分析图4可知, 经过深冷处理后, 随着空蚀时间的增加, 不锈钢表面形貌呈现出明显的时间依赖性, 但深冷处理的保护作用显著降低了破坏程度。具体而言, 在短期空蚀 (1~3 h) 阶段, 如图4 (a) - (c) 所示, 不锈钢表面出现分散的微小蚀坑, 直径约为10~20 μm , 深度较浅, 未形成明显裂纹, 剥落面积均匀; 进入长期空蚀 (4~6 h) 阶段后, 如图4 (d) - (f) 所示, 蚀坑数量增加且部分连通, 形成不规则的剥落

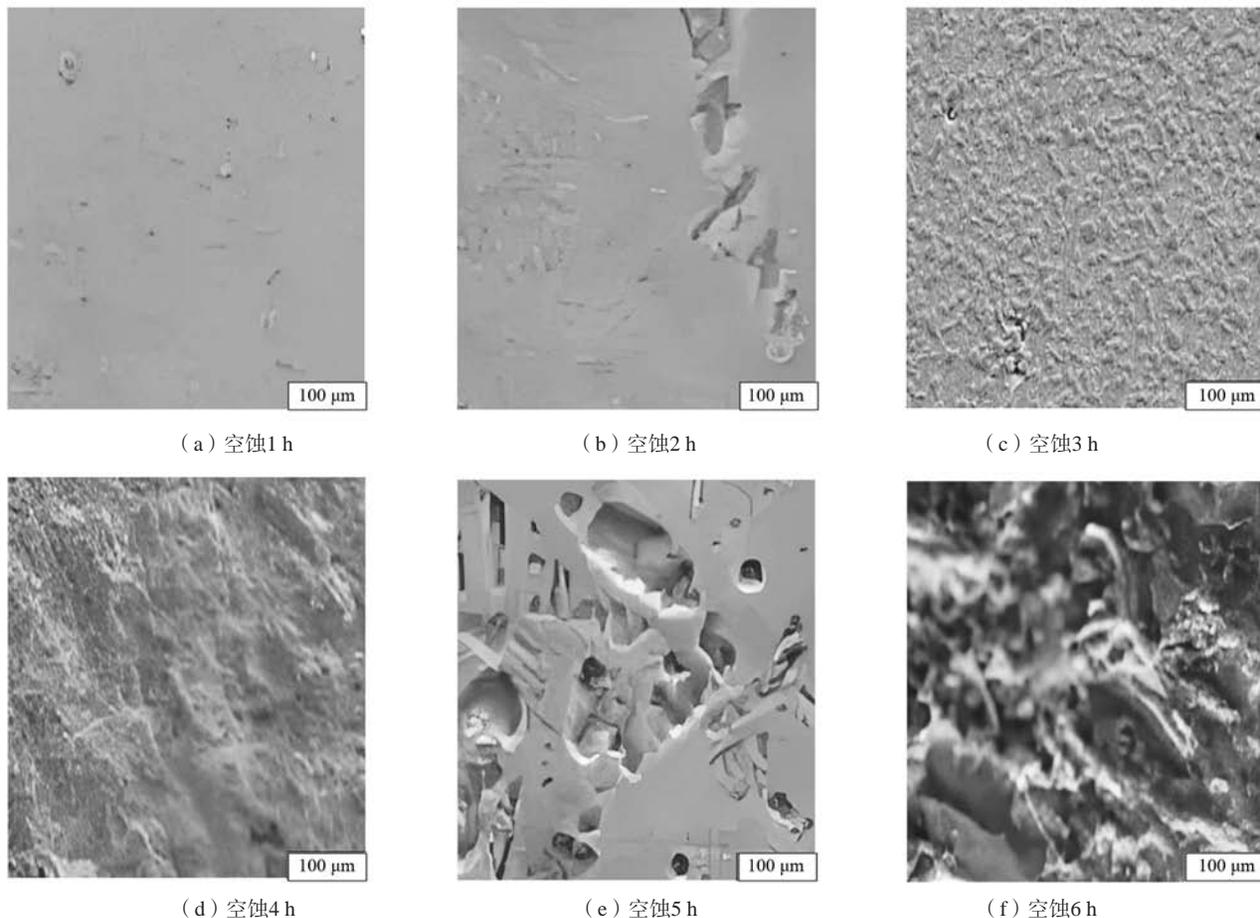


图4 不同空蚀时长下微观形貌

Fig. 4 Micromorphologies under different cavitation duration

区域，但最大破坏深度仍严格控制在 $15\ \mu\text{m}$ 以内，未穿透不锈钢表层晶粒组织。这种破坏深度的精确控制得益于深冷处理的多重效应，一方面，通过细化晶粒及提高表面硬度，显著增强了材料对空蚀冲击的抵抗能力；另一方面，深冷处理诱发的残余压应力与马氏体相变形成协同作用，有效抑制了裂纹向深层扩展。

3 结论

(1) 预处理+退火+淬火+深冷的处理工艺，能够提升440A铸造不锈钢耐空蚀性能，在空蚀时长最高6 h时，工艺3的空蚀损失量为5 mg，平均空蚀速率为

1.2 mg/h。

(2) 深冷时长能够影响不锈钢的硬度与内部晶体结构，在空蚀时长最高6 h时，深冷时间为30 min的空蚀损失量为4.5 mg，平均空蚀速率为1.3 mg/h。

(3) 深冷温度的变化会影响不锈钢的空蚀性能。其中，在空蚀时长最高6 h时，深冷温度为 $-150\ ^\circ\text{C}$ 的空蚀损失量为3.4 mg，平均空蚀速率为1.3 mg/h。

(4) 从微观形貌来看，经过深冷处理后，尽管空蚀导致440A铸造不锈钢出现空蚀破坏，但是破坏深度未达到不锈钢结构的深处，不锈钢仍旧保持较为稳定的状态。

参考文献:

- [1] 苏允海, 刘锺琦, 梁学伟, 等. 深冷处理对ZG06Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢组织及力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(4): 150-152.
- [2] 李慧东, 张覃轶, 刘伟, 等. 深冷处理对440C马氏体不锈钢组织和耐蚀性的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47(8): 152-157.
- [3] 任倩楠, 胡红祥, 郑玉贵. 表面微结构的宽深比与占空比对马氏体不锈钢空化和空蚀的影响 [J]. 表面技术, 2024, 53(11): 67-79.
- [4] 刘海霞, 欧阳亚东, 陈杰, 等. 氯化钠溶液预腐蚀对304不锈钢表面空蚀的影响 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 351-358.

- [5] 王岩, 魏钢, 魏瑛康, 等. 热处理对选区激光熔化制备17-4PH空蚀性能影响 [J]. 钢铁, 2023, 58 (10): 140-150.
- [6] 肖云鹤, 刘峰斌, 阎红娟, 等. 表面粗糙度对304不锈钢空蚀腐蚀联合作用的影响 [J]. 润滑与密封, 2024, 49 (5): 136-143.
- [7] 徐锋, 孙强, 陆瑞. 冷处理对S46500超高强度不锈钢组织和性能的影响 [J]. 特殊钢, 2023, 44 (6): 107-111.
- [8] 王中琳, 李权, 龚志华, 等. 丝杠用1Cr15Ni4Mo2CuN不锈钢热处理温度场的有限元数值模拟 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (4): 245-252.
- [9] 刘星, 黄久超, 杨叶, 等. 1Cr18Ni9Ti不锈钢深冷处理后的钻削加工试验研究 [J]. 工具技术, 2022, 56 (3): 36-38.
- [10] 张昀浩, 马雁, 张涛, 等. 超低温热疲劳对Z2CND18.12奥氏体不锈钢显微组织与力学性能的影响 [J]. 原子能科学技术, 2024, 58 (10): 2180-2188.
- [11] 孙辉, 徐进, 胡树兵, 等. 镀镍碳纳米管对激光熔覆钴基金属涂层组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2023, 44 (12): 118-128.
- [12] 贺秀丽, 马干钧, 梁红玉, 等. 电刷镀镍对30Cr13钢耐腐蚀和力学性能的影响 [J]. 电镀与涂饰, 2023, 42 (3): 12-16.
- [13] 杨琰嘉, 王雪峰, 宋延达, 等. 炼厂污水臭氧处理系统中奥氏体不锈钢的腐蚀行为 [J]. 工业水处理, 2024, 44 (11): 122-131.
- [14] 肖浩, 黄剑, 汪鹏, 等. 高速激光熔覆FeCoCrNiMo高熵合金涂层微观组织演变及耐蚀性研究 [J]. 中国激光, 2025, 52 (4): 122-133.
- [15] 李阳, 陈常勇, 方勇, 等. Cu对含Sn铁素体不锈钢的力学及耐腐蚀性能的影响 [J]. 特殊钢, 2024, 45 (3): 49-55.

Study on the Effect of Cryogenic Treatment on Cavitation Corrosion Resistance of 440A Cast Stainless Steel

ZHANG Ya-lin

(Guangxi BG New Materials Co., Ltd., Beihai 536017, Guangxi, China)

Abstract:

In order to reduce the damage of cavitation on the surface of stainless steel, this paper studied the effect of cryogenic treatment process on the cavitation resistance of 440A cast stainless steel. In the experiment, the processed 440A cast stainless steel specimens were placed in a liquid nitrogen cryogenic test chamber for different process steps of cryogenic treatment, and subjected to 1-6 hours of cavitation treatment in an ultrasonic material cavitation testing machine. By comparing different cryogenic processes, it was determined that process 3, which includes pretreatment, annealing, quenching, and cryogenic treatment, is the best. The cavitation loss under 6 hours of air erosion duration is 5 mg, and the average cavitation rate is 1.2 mg/h. Further testing showed that under process 3 conditions, the cavitation loss during 30 minutes of deep cooling was 4.5 mg, and the average cavitation rate is 1.3 mg/h; The cavitation loss at a cryogenic temperature of -50 °C is 3.4 mg, and the average cavitation rate is also 1.3 mg/h. The results indicate that both a 30 minute deep cooling duration and a -150 °C deep cooling temperature can effectively reduce cavitation losses and improve the cavitation resistance of stainless steel.

Key words:

cryogenic treatment; 440A cast stainless steel; cavitation corrosion resistance; stainless steel loss; refined grain
