

# 不同热处理态 TP2 铜的冲刷腐蚀性能研究<sup>①</sup>

肖来荣<sup>1,2</sup>, 王森<sup>1</sup>, 赵小军<sup>1,2</sup>, 杨焯焱<sup>1</sup>, 任鹏禾<sup>1</sup>, 余华丽<sup>1</sup>, 彭振武<sup>1</sup>, 蔡圳阳<sup>1,2</sup>

(1.中南大学材料科学与工程学院,湖南长沙410083; 2.有色金属材料科学与工程教育部重点实验室,湖南长沙410083)

**摘要:** 对不同热处理态(硬态、软态)TP2铜进行不同流速的3.5%NaCl溶液冲刷腐蚀实验,测试了TP2铜的冲刷腐蚀速率,表征了冲刷腐蚀240h后的腐蚀形貌及腐蚀产物,探讨了TP2铜的冲刷腐蚀机理。结果表明,流动的腐蚀介质加快了TP2铜的腐蚀速率;在相同流速条件下腐蚀240h后,软态TP2铜的腐蚀速率大于硬态TP2铜;高流速下TP2铜经冲刷腐蚀240h后的表面腐蚀形貌主要呈沟壑状,形成的主要腐蚀产物为Cu<sub>2</sub>O。

**关键词:** TP2铜;冲刷腐蚀;腐蚀速率;晶间腐蚀

中图分类号: TB302

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.034

文章编号: 0253-6099(2023)04-0158-06

## Erosion Corrosion Properties of TP2 Copper After Different Heat Treatments

XIAO Lairong<sup>1,2</sup>, WANG Sen<sup>1</sup>, ZHAO Xiaojun<sup>1,2</sup>, YANG Yesong<sup>1</sup>, REN Penghe<sup>1</sup>,

YU Huali<sup>1</sup>, PENG Zhenwu<sup>1</sup>, CAI Zhenyang<sup>1,2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Key Laboratory of Nonferrous Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** Experiments of erosion corrosion with 3.5% NaCl solution at different flow rates were performed for TP2 copper after different heat treatment (hard and soft states), and the erosion corrosion rates of TP2 copper were tested. The morphology and products after 240 hours of corrosion were characterized, and the mechanism of erosion and corrosion for TP2 copper was also discussed. The results show that flowing medium in corrosion test accelerates the corrosion rate of TP2 copper. The soft TP2 copper presents a higher corrosion rate, compared to hard TP2 copper, after 240 hours of corrosion at the same flow rate. And after 240 hours of erosion corrosion at a higher flow rate, TP2 copper has its surface morphology predominated by gully-like structure and a product of Cu<sub>2</sub>O is generated after corrosion.

**Key words:** TP2 copper; erosion corrosion; corrosion rate; intergranular corrosion

TP2紫铜是在纯铜中加入适当的P-Cu脱氧后得到的铜材,广泛应用于汽油与气体的供应管道及冷凝器、换热器等器件上<sup>[1-2]</sup>。在应用于这些场景时,TP2铜管内外受流体或各种腐蚀介质的作用,易发生晶间应力腐蚀断裂<sup>[3-4]</sup>。管内流体运动时,受表面剪切应力或流速的影响,铜表面的氧化膜被剥离后开始加速腐蚀<sup>[5-6]</sup>。因此,深入了解不同处理态TP2铜的冲刷腐蚀性能及腐蚀机制对于优化管道材质处理状态、制订保护性措施非常必要。

目前对铜及铜合金的耐腐蚀行为已经有大量研

究<sup>[7-8]</sup>。蚁巢腐蚀是空调或制冷设备中TP2铜管常见的失效方式之一,失效形式主要为晶间腐蚀<sup>[9-11]</sup>。而对于沿海地区的换热器管、冷凝管,TP2铜管受Cl<sup>-</sup>侵蚀导致的腐蚀更为常见<sup>[12-13]</sup>。文献[14]研究了纯铜在不同流速NaCl溶液中的冲刷腐蚀性能,发现不同流速下纯铜的冲刷腐蚀过程显著不同。目前国内外学者对不同热处理态TP2铜管的冲刷腐蚀性能研究较少。

本文对不同热处理态的TP2铜管在3.5%NaCl溶液中进行冲刷腐蚀试验,研究不同流速条件下TP2铜管的冲刷腐蚀性能,探讨其冲刷腐蚀机理,为TP2铜

① 收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 中车青岛四方机车车辆股份有限公司科研项目(SF/JS-梁字-2020-256);国防基础科研计划重点项目(2020208B020)

作者简介: 肖来荣(1968-),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要研究方向为铜及铜合金。

通信作者: 蔡圳阳(1988-),男,江西上饶人,博士,副教授,主要从事铜合金与材料表面研究。

管的冲刷腐蚀防护提供理论指导。

## 1 试验材料及方法

试验材料为外径 25 mm、壁厚 3 mm 的软态及硬态 TP2 管材, 试样经线切割后, 将内外表面磨抛为平面, 形成测试面为 10 mm × 10 mm 的块状样品。冲刷腐蚀所用设备为自制设备, 如图 1 所示。将试样固定后, 腐蚀液(3.5% NaCl)冲刷腐蚀试样的测试面, 通过旋转轴调控腐蚀介质流动速度, 在 0 m/s(静态)、1 m/s(低速)、3 m/s(中速)、5 m/s(高速)的流速下进行 240 h 腐蚀试验。对腐蚀后的试样进行失重及电化学测试, 并用扫描电镜观察腐蚀 240 h 后试样腐蚀形貌, 采用 X 射线衍射仪分析腐蚀产物。

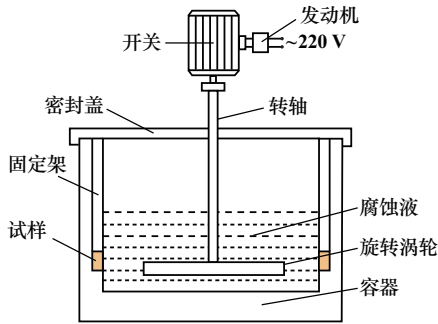


图 1 冲刷腐蚀试验装置

## 2 实验结果与讨论

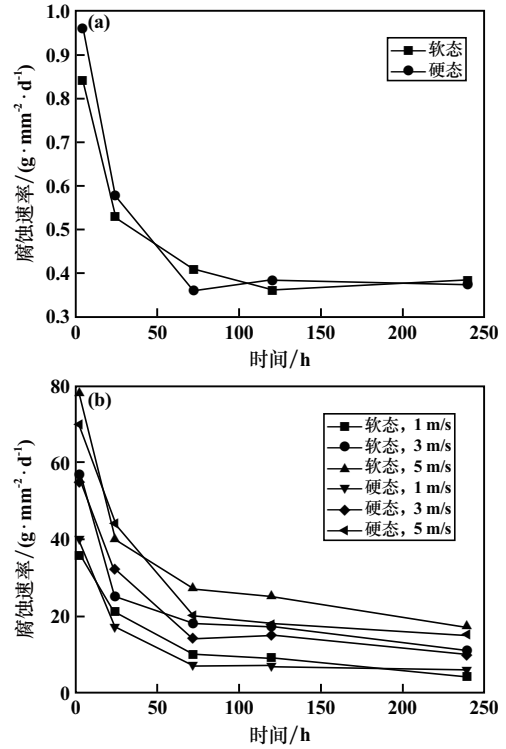
### 2.1 腐蚀失重实验

图 2 是室温下软态及硬态 TP2 铜在不同流速的 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀失重曲线。从图 2 可以发现, TP2 铜在冲刷初期腐蚀速率最大, 随着腐蚀时间增加, 腐蚀速率逐渐减小并趋于平稳。相对静态腐蚀, 在流动腐蚀介质中, TP2 铜的腐蚀失重率呈数量级增加, 这表明流速对 TP2 铜的耐蚀性能影响较大。在静态条件下, 腐蚀 240 h 的软态和硬态 TP2 铜的腐蚀速率分别为 0.384 g/(mm<sup>2</sup> · d) 和 0.372 g/(mm<sup>2</sup> · d), 在流速增至 5 m/s 时, 软态和硬态 TP2 铜的腐蚀速率分别为 17 g/(mm<sup>2</sup> · d) 和 15 g/(mm<sup>2</sup> · d)。

### 2.2 电化学测试结果

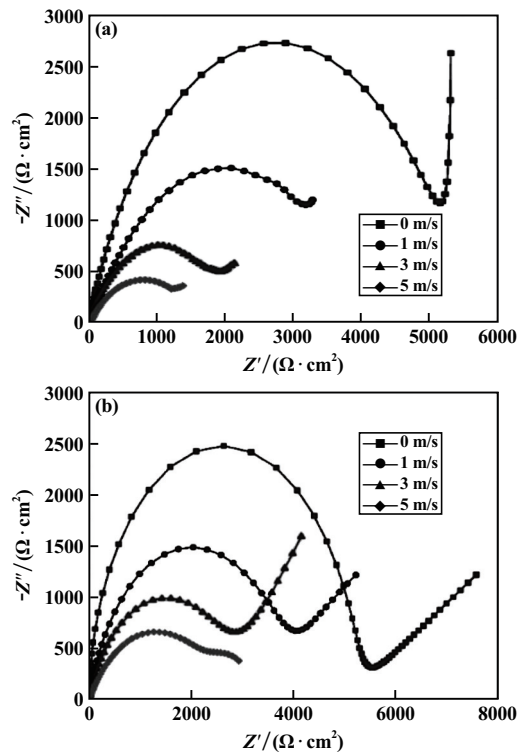
#### 2.2.1 交流阻抗谱结果

图 3 为 TP2 铜在不同流速的 3.5% NaCl 溶液中腐蚀 240 h 后的交流阻抗谱。流速增加后, 容抗弧半径明显减小, 这可能是由于流动的腐蚀介质加快了腐蚀速率, 促进了表面氧化膜的迅速生成。流速 3 m/s 和 5 m/s 时, 软态 TP2 铜的容抗弧小于硬态 TP2 铜, 说明软态 TP2 铜腐蚀膜层薄, 受冲刷腐蚀的影响更大。



(a) 0 m/s; (b) 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s

图 2 不同处理态 TP2 铜在不同流速的 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀失重曲线



(a) 软态 TP2 铜; (b) 硬态 TP2 铜

图 3 TP2 铜在不同流速的 3.5% NaCl 溶液中冲刷腐蚀 240 h 后的交流阻抗谱

使用 ZsimpWin 软件对交流阻抗谱进行拟合分析,

等效电路如图4所示,其中 $R_s$ 为参比电极与被测样品之间的溶液电阻, $R_f$ 为表面膜层电阻, $CPE1$ 为表面膜层电容, $R_t$ 为基体金属的反应电阻, $CPE2$ 为基体金属的反应电容<sup>[15]</sup>。使用软件拟合出等效电路模型中的各项元件值,其中不同条件下的TP2铜表面膜层电阻 $R_f$ 随流速的变化如图5所示。两种处理态的TP2铜的膜层电阻都呈下降趋势。随着流速增加,软态TP2铜的 $R_f$ 值下降得更快,说明在流动腐蚀介质的作用下,软态TP2铜表面的腐蚀产物层被破坏得更快。

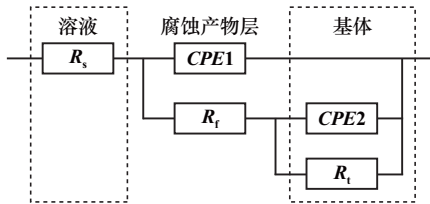


图4 不同处理态TP2铜在3.5%NaCl溶液中冲刷腐蚀240h后的阻抗谱拟合等效电路

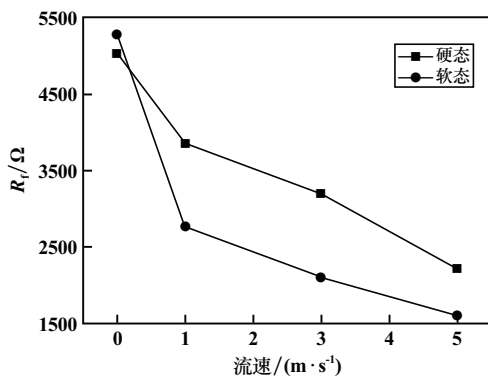
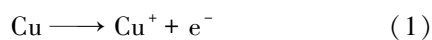


图5 不同处理态TP2铜的表面膜层电阻 $R_f$ 随流速的变化曲线

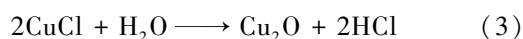
### 2.2.2 动电位极化曲线

图6为不同处理态TP2铜在不同流速的3.5%NaCl溶液中冲刷腐蚀240h后的动电位极化曲线。从图6可见,不同处理态TP2铜的极化曲线随流速的变化规律相似;随着流速增加,阴极曲线向正方向移动,说明随着流速增加,阴极反应加速。TP2铜的阳极极化曲线主要包括3个区<sup>[16]</sup>,由下至上分别为活性溶解区、阳极钝化区、极限电流区。

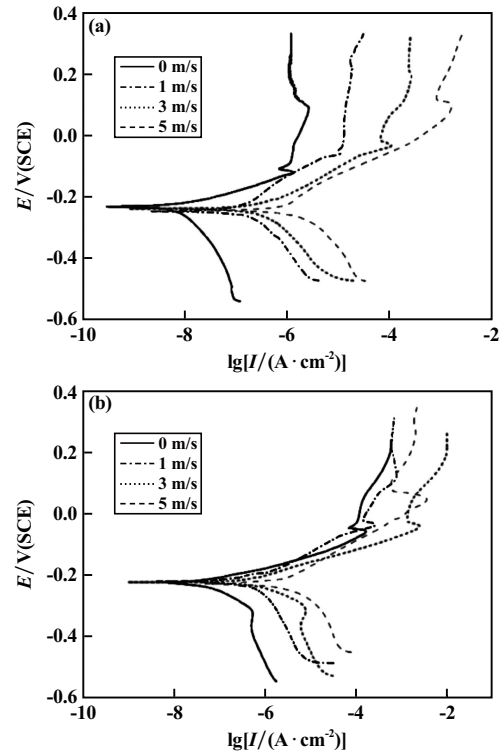
在活性溶解区主要发生以下反应<sup>[17]</sup>:



在阳极钝化区,CuCl水解生成热力学更加稳定的 $\text{Cu}_2\text{O}$ ,反应为:



在极限电流区,随着极化电位继续升高,阳极反应的电流持续增大。



(a) 软态TP2铜; (b) 硬态TP2铜

图6 不同处理态TP2铜在不同流速的3.5%NaCl溶液中的极化曲线

不同流速条件下,TP2铜都发生了钝化现象,而且随着流速增加,钝化区间逐渐减小,这是因为随着流速增加,腐蚀层厚度减小,阳极反应中 $\text{Cl}^-$ 的传输速度加快,导致阳极钝化区范围减小。

利用Tafel拟合出各条曲线的自腐蚀电位及腐蚀电流密度,结果见表1。自腐蚀电位表明了材料的腐蚀倾向,自腐蚀电位越大,材料的腐蚀倾向越小<sup>[18]</sup>。从整体上看,流速对材料的自腐蚀电位影响不大。硬态TP2铜的自腐蚀电位略大于软态TP2铜,这是因为在硬态TP2铜表面形成了更为稳定的氧化膜层。随着流速增加,TP2铜的腐蚀电流密度增大,表明冲刷加速了TP2铜在腐蚀介质中的腐蚀速率。此外,在相同的流速条件下,软态TP2铜的腐蚀速率大于硬态TP2铜,

表1 不同处理态的TP2铜Tafel拟合的电化学参数

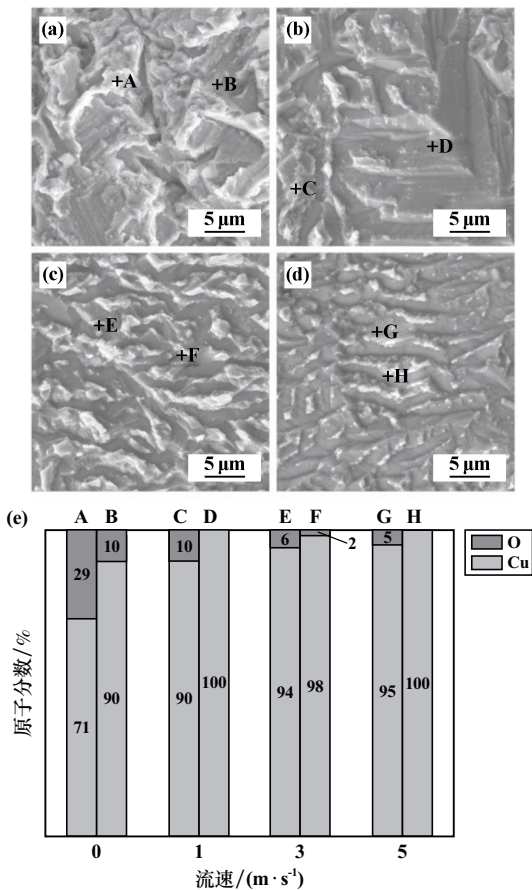
处理态	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	自腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(A·cm <sup>-2</sup> )
软态	0	-0.240	$1.58 \times 10^{-8}$
	1	-0.241	$9.89 \times 10^{-8}$
	3	-0.243	$3.16 \times 10^{-7}$
	5	-2.244	$1.26 \times 10^{-6}$
硬态	0	-0.226	$1.17 \times 10^{-8}$
	1	-0.224	$7.94 \times 10^{-8}$
	3	-0.226	$1.62 \times 10^{-7}$
	5	-0.227	$7.24 \times 10^{-7}$

表明流速对软态 TP2 铜的影响要大于硬态 TP2 铜。

### 2.3 腐蚀形貌及腐蚀产物分析

#### 2.3.1 软态 TP2 铜冲刷腐蚀形貌

图 7 为不同流速下腐蚀 240 h 后软态 TP2 铜试样表面。当腐蚀介质流速逐渐增加时, 样品表面腐蚀产物逐渐变少, 间距越来越大, 腐蚀层厚度逐渐减小。对图中标注点进行 EDS 分析, 得到的结果如图 7(e) 所示。静态条件下, TP2 铜大部分表面被腐蚀产物覆盖, 其中 O 元素含量最高; 流速 1 m/s 时, 金属表面呈阶梯状, O 元素含量大幅降低; 流速 3 m/s 时, 金属表面呈沟壑状, 腐蚀产物主要分布在表面较高处(点 E), 在低处(点 F) O 元素含量较低; 流速 5 m/s 时, 金属表面的沟壑趋于同一个方向, 即腐蚀介质冲刷方向, 且表面的腐蚀产物更为稀疏, 体积更小, 表明在较高的流速下, TP2 铜表面的腐蚀产物很难留存下来。

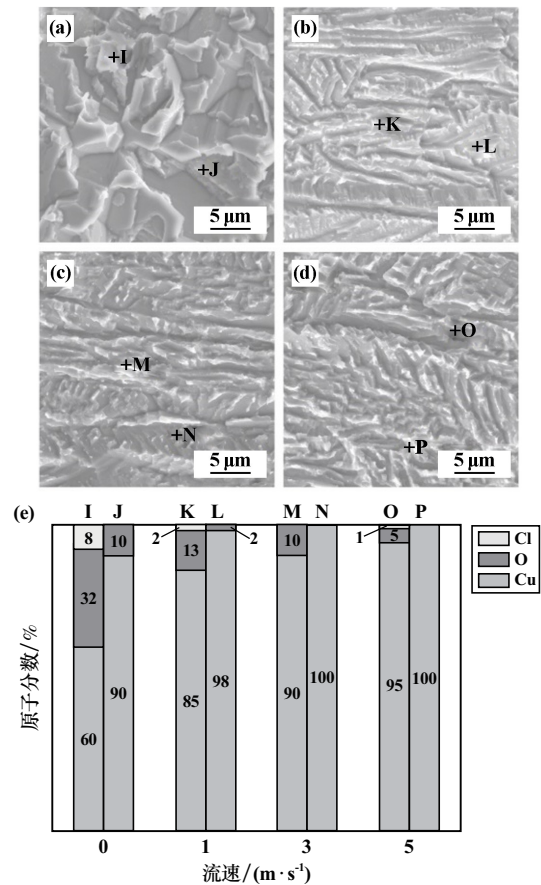


(a) 0 m/s; (b) 1 m/s; (c) 3 m/s; (d) 5 m/s; (e) EDS 结果  
图 7 软态 TP2 铜在不同流速下腐蚀 240 h 后的表面形貌及 EDS 测试结果

#### 2.3.2 硬态 TP2 铜冲刷腐蚀形貌

图 8 为不同流速下腐蚀 240 h 后硬态 TP2 铜试样表面。可以观察到, 随着流速增加, 试样表面沟壑增多, 腐蚀产物主要以块状或长条状分布在沟壑旁。此

外, 腐蚀产物生长方向也随着流速增加趋向于腐蚀介质冲刷方向。在较高流速下腐蚀相同时间后, 硬态 TP2 铜表面仍以凸出的腐蚀产物为主。对试样表面进行 EDS 点分析, 结果如图 8(e) 所示。随着流速增加, 试样表面氧元素含量降低。对比同一腐蚀条件下不同处理态下的试样表面 O 元素含量分布, 可以发现在不同流速条件下硬态 TP2 铜试样氧元素含量略高于软态 TP2 铜。



(a) 0 m/s; (b) 1 m/s; (c) 3 m/s; (d) 5 m/s; (e) EDS 结果  
图 8 硬态 TP2 铜在不同流速下腐蚀 240 h 后的表面形貌及 EDS 测试结果

#### 2.3.3 腐蚀产物分析

采用 XRD 对在不同流速 3.5% NaCl 溶液中冲刷腐蚀 240 h 后的不同处理态 TP2 铜样品进行表面相分析, 结果如图 9 所示。可以看出, 在不同流速冲刷腐蚀后, 2 种处理态的 TP2 铜表面都检测到  $\text{Cu}_2\text{O}$  和 Cu 基底的特征峰。流速 5 m/s 时, 软态 TP2 铜试样表面未检测到明显的  $\text{Cu}_2\text{O}$  特征峰, 结合试样表面 EDS 分析, 发现在此条件下软态试样表面  $\text{Cu}_2\text{O}$  含量很少, 而硬态 TP2 铜的  $\text{Cu}_2\text{O}$  特征峰更为明显。这与腐蚀形貌的观察结果及电化学测试结果吻合, 硬态 TP2 铜表面的腐蚀产物膜层更厚。

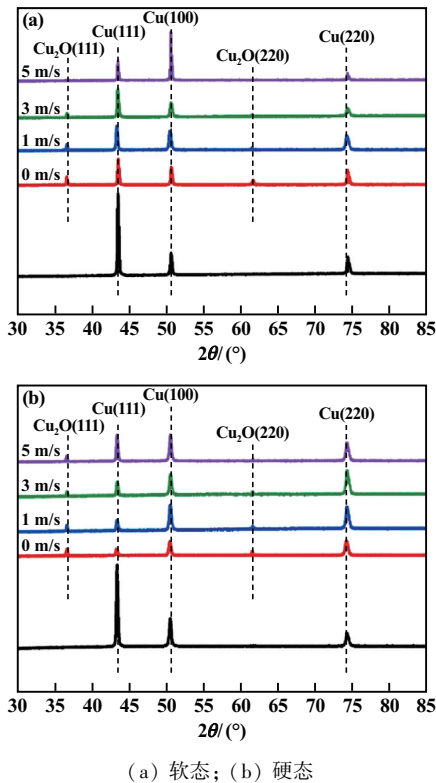


图9 不同处理态 TP2 铜经冲刷腐蚀 240 h 后的表面 XRD 图谱

## 2.4 腐蚀过程与机理讨论

静态腐蚀条件下,  $\text{Cl}^-$  对 TP2 铜的腐蚀主要以点蚀为主, 蚀孔沿着重力方向或横向发展, 并向深处加速进行<sup>[19]</sup>。当 TP2 铜试样处于流动腐蚀介质中时, TP2 铜试样表面的腐蚀主要从晶界开始, 并沿晶界向晶粒内部发展。随着流速增加, 腐蚀介质传质过程加快, 铜晶粒氧化速度加快。流动的腐蚀介质对 TP2 铜表面腐蚀层的破坏可以用其在流动过程中对铜表面施加剪切应力来解释<sup>[20]</sup>。剪切应力达到足以破坏腐蚀层时的剪切应力为临界剪切应力。流动腐蚀介质在 TP2 铜表面产生的剪切应力随着流速增加而增大。TP2 铜表面腐蚀产物的形成与破坏是一种同时存在的循环过程。

图 10 为 TP2 铜的冲刷腐蚀过程示意图。TP2 铜在冲刷腐蚀初期能够形成一层完整的氧化膜, 如图 10(b) 所示。随着腐蚀时间增加, 腐蚀层随流速的变化而发展成不同的表面腐蚀形貌。当流动速度较小时, 即流动腐蚀介质的剪切应力小于 TP2 铜表面剪切应力时, 铜管表面生成一层  $\text{Cu}_2\text{O}$  膜, 并沿晶界向晶粒内部发展, 其表面如图 10(c) 所示。当流速增加至中速 (3 m/s) 时, 腐蚀介质流动产生的剪切应力增大, 在暴露出更多的铜基底时, TP2 铜表面的腐蚀产物更加疏松, 表面有更多的腐蚀坑出现,  $\text{Cu}_2\text{O}$  晶粒之间的间距增大, 如图 10(d) 所示。当流速增加到高速时, 流动剪切应力足够

大,  $\text{Cu}_2\text{O}$  颗粒与 TP2 铜基体之间接触面积减小, 结合力减小, 腐蚀层几乎被完全剥离, 如图 10(e) 所示。不同处理态 TP2 铜在同样的流速下试样表面的腐蚀形貌并不完全相同, 这可能是由于在高速冲刷腐蚀过程中, 硬态 TP2 铜表面腐蚀层的临界剪切应力更高, 表面的腐蚀产物膜层不容易被破坏。

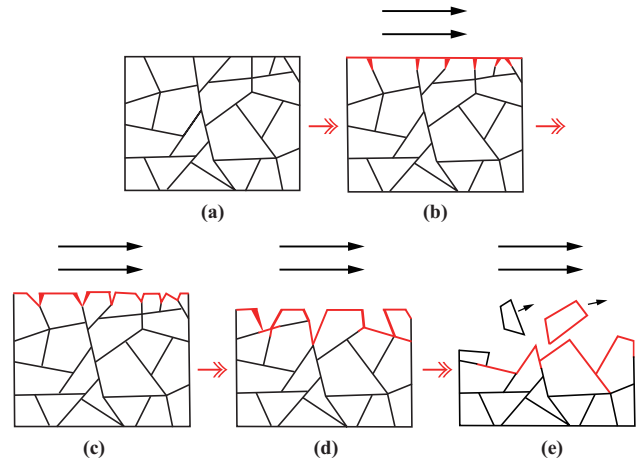


图 10 TP2 铜冲刷腐蚀过程

总之, 在冲刷腐蚀条件下, TP2 铜表面的  $\text{Cu}_2\text{O}$  处于不断地形成与破坏的循环过程, 且在腐蚀产物膜层产生的初期, 其表面腐蚀速率最快, 这也是冲刷加剧腐蚀的根本原因。在实际应用过程中, 内部流体的流速越大, TP2 铜的腐蚀速率越大, 且软态 TP2 铜较硬态 TP2 铜的腐蚀速率更高, 因此针对含  $\text{Cl}^-$  高流速环境, 建议采用硬态 TP2 铜或含防护涂层的软态 TP2 铜。

## 3 结 论

1) TP2 铜在 3.5% NaCl 环境下冲刷腐蚀 240 h 后表面呈沟壑状, 形成主要为  $\text{Cu}_2\text{O}$  的腐蚀膜层。在高流速腐蚀条件下, 硬态 TP2 铜表面的腐蚀膜层更为致密。

2) TP2 铜的冲刷腐蚀是腐蚀产物形成与破坏的循环过程。硬态 TP2 铜表面腐蚀产物膜层的临界应力值大于软态 TP2 铜, 相对不容易被流动腐蚀介质破坏。

3) 流速的增加能够显著增加 TP2 铜的腐蚀速率, 在含  $\text{Cl}^-$  高流速冲刷环境下, 硬态 TP2 铜耐蚀性更好。

## 参考文献:

- [1] 鲁海洋, 于海然, 崔志国, 等. 工作温度对 TP2 铜管组织与性能的影响规律研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 121-124.
- [2] ZHOU J, YAN L, TANG J, et al. Interactive effect of ant nest corrosion and stress corrosion on the failure of copper tubes[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 83: 9-16.
- [3] Tzevelekou T, Flampouri A, Rikos A, et al. Hot-water corrosion failure of a hard-drawn copper tube[J]. Engineering Failure Analysis,

- 2013,33:176-183.
- [4] 杨刚毅,汪冰峰,刘源,等. 铸造铜合金冲刷腐蚀及机理研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(1):125-127.
- [5] 崔志国,鲁海洋,于海然,等. 不同处理态的高速列车用 TP2 铜导体腐蚀行为研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):124-128.
- [6] 武兴伟,聂全鑫,吴恒. 几种典型管路材料在流动海水中的冲刷腐蚀行为[J]. 材料保护, 2021,54(5):7-12.
- [7] 颜鹏飞,刘志义,柏松,等. Cu/Mg 比对 Al-Cu-Mg-Ag 合金耐腐蚀性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):218-220.
- [8] Lachowicz M M. A metallographic case study of formicary corrosion in heat exchanger copper tubes-ScienceDirect[J]. Engineering Failure Analysis, 2020,111:104502-1045018.
- [9] 张萌. 换热铜管泄漏原因分析[J]. 金属加工:热加工, 2019(10):24-26.
- [10] Situmorang R S, Kawai H. Investigating the mechanism behind ant nest corrosion on copper tube[J]. Materials, 2018,11(4):533-540.
- [11] 陈湘平,马春宇,陈德东,等. 外销除湿机蒸发器铜管腐蚀失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2018,39(12):966-970.
- [12] LIU X, ZHU H, YU C, et al. Analysis on the corrosion failure of U-tube heat exchanger in hydrogenation unit[J]. Engineering Failure Analysis, 2021,125(6):105448.
- [13] Subramanian C, Ghosh D, Reddy D S, et al. Stress corrosion cracking of U tube heat exchanger used for low pressure steam generation in a hydrogen unit of petroleum refinery[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,137:106245.
- [14] WU L, MA A, ZHANG L, et al. Intergranular erosion corrosion of pure copper tube in flowing NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2022,201:110304.
- [15] 王凤平,康万利. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2017.
- [16] Fayeka M Fazal. Effect of aluminum addition on the electrochemical corrosion behavior of Sn-3Ag-0.5Cu solder alloy in 3.5wt% NaCl solution[J]. Journal of Materials Science. Materials in Electronics, 2016,27(11):12193-12200.
- [17] Borode A O, Ahmed N A, Olubambi P A. Electrochemical corrosion behavior of copper in graphene-based thermal fluid with different surfactants[J]. Heliyon, 2021,7(1):e05949.
- [18] 邱婕. 高速管流管壁电化学腐蚀特性分析及预测[D]. 西安:西安石油大学机械工程学院, 2021.
- [19] LIU Y, LIU Z, XU A, et al. Understanding pitting corrosion behavior of AZ91 alloy and its MAO coating in 3.5%NaCl solution by cyclic potentiodynamic polarization[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022,10(5):1368-1380.
- [20] 曾莉. 管道弯管段冲刷腐蚀机理与流体动力学特征[D]. 武汉:华中科技大学化学与化工学院, 2017.
- 引用本文:肖来荣,王森,赵小军,等. 不同热处理态 TP2 铜的冲刷腐蚀性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):158-163.

(上接第 157 页)

- [2] 王龙,唐修检,汪刘应,等. 20CrMnTi 钢齿轮磨削表面的摩擦磨损试验研究[J]. 工具技术, 2021,55(4):69-72.
- [3] 付钰,赵秀桐,魏俊华,等. 切削参数对车削 20CrMnTi 表面粗糙度的影响及优化研究[J]. 机床与液压, 2020,48(22):50-53.
- [4] MO P C, CHEN C, CHEN J R, et al. Effect of sintering temperature on synthesis of PCBN in cBN-Ti-Al-W system[J]. Diamond and Related Materials, 2020,103:107714.
- [5] 邹娟,成照楠,邹芹,等. CBN 含量对 PCBN 车刀切削性能影响的模拟与实验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):134-137.
- [6] 韩旭,李嫚,房祥辉. PCBN 刀具切削堆焊钴基合金的试验研究[J]. 工具技术, 2020,54(1):28-32.
- [7] 张燕,夏志辉,徐东鸣. PCBN 刀具高速精密切削 W-Ni-Fe 合金的性能研究[J]. 粉末冶金工业, 2016,26(6):35-40.
- [8] 胡小龙,邵芳,王仁伟. PCBN 刀具切削镍基合金时的氧化与扩散磨损分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020,40(1):99-102.
- [9] 高妮萍. 高速硬车 20CrMnTi 刀具耐用度研究[J]. 机械设计与制造工程, 2021,50(2):97-100.
- [10] Gutnichenko O, Bushlya V, Zhou J, et al. Tool wear and machining dynamics when turning high chromium white cast iron with pcBN tools[J]. Wear, 2017,390:253-269.
- [11] REN Z, QU S, ZHANG Y, et al. Machining performance of PCD and PCBN tools in dry turning titanium alloy Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,102(5):2649-2661.
- [12] Diaz J, Criado V, Migulez H, et al. Pcbn performance in high speed finishing turning of inconel 718[J]. Metals, 2018,8(8):582.
- [13] CHEN Z, LIN PENG R, ZHOU J, et al. Effect of machining parameters on cutting force and surface integrity when high-speed turning AD 730™ with PCBN tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019,100(9):2601-2615.
- [14] 叶智彪,江文清,罗涛. PCBN 刀具高速切削淬硬钢材料的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021,41(2):69-74.
- [15] 胡小龙,邵芳,王仁伟. 基于热力学的聚晶立方氮化硼刀具切削镍基合金的磨损机理[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(3):123-126.
- [16] 林勇传,朱能熠,王凯,等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN 涂层硬质合金刀具干切削 N 型 HT250 灰铸铁表面粗糙度研究[J]. 机床与液压, 2021,49(14):47-50.
- 引用本文:苏君,冯佩佩. PCBN 刀具以车代磨加工 20CrMnTi 合金钢试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):154-157.