

جزوه اصول شیمی خوردگی

۱- تعریف خوردگی و اهمیت آن

خوردگی (Corrosion):

در مهندسی به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن یک ماده (معمولاً فلز) به طور برگشت‌پذیر با محیط اطراف خود واکنش داده و به اشکال پایدارتر شیمیایی (مانند اکسیدها یا نمک‌ها) تبدیل می‌شود. در واقع، طبیعت تمایل دارد فلزات را به حالت اولیه (سنگ معدن) بازگرداند.

اهمیت:

- کاهش عمر مفید: از بین رفتن ساختارها و تجهیزات (لوله، مخزن، پل‌ها).
- هزینه‌های اقتصادی: هزینه‌های سنگین تعمیر، تعویض و نگهداری.
- خطرات ایمنی: شکست ناگهانی تجهیزات تحت فشار یا در سازه‌های حیاتی.

۲- انواع خوردگی:

خوردگی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد:

الف) خوردگی شیمیایی (Chemical Corrosion):

- تعریف: واکنشی که بدون حضور یون‌های هدایت‌کننده (مانند آب یا الکترولیت) رخ می‌دهد.
- مثال: واکنش فلزات با گازهای خشک و داغ (مانند اکسیداسیون در دماهای بالا، یا واکنش با گازهای گوگردی در کوره‌ها).

ب) خوردگی الکتروشیمیایی (Electrochemical Corrosion) :

- **تعریف:** رایج‌ترین نوع خوردگی که نیازمند وجود یک محیط الکترولیت (معمولاً آب) و تشکیل یک مدار الکتریکی بسته بین مناطق مختلف روی سطح فلز است.

• اجزا لازم:

- آند (محل اکسیداسیون و از دست رفتن الکترون).
- کاتد (محل کاهش یا مصرف الکترون‌ها).
- الکترولیت (محیط رسانای یون‌ها).
- مسیر فلزی (رسانا برای حرکت الکترون‌ها).

۳- سلول خوردگی و نقش آند و کاتد

خوردگی الکتروشیمیایی همیشه در یک سلول خوردگی رخ می‌دهد. این سلول شبیه یک باتری کوچک عمل می‌کند.

دیاگرام مفهومی سلول خوردگی:

تصور کنید یک قطعه فلز (مانند آهن) در آب نمک قرار دارد. نقاط مختلف روی سطح فلز یا نواحی متفاوت در دو فلز متصل، نقش آند و کاتد را ایفا می‌کنند.

• آند (Anode) :

- محل اکسیداسیون (از دست دادن الکترون)
- فلز در این ناحیه خورده می‌شود.
- واکنش: $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$ (فلز به یون تبدیل می‌شود)

• کاتد (Cathode) :

- محل کاهش (جذب الکترون)
- در این ناحیه خوردگی رخ نمی‌دهد (محافظت می‌شود).
- واکنش: مصرف الکترون‌های تولید شده در آند توسط یک گونه محیطی (مانند اکسیژن یا یون هیدروژن).

مسیر حرکت:

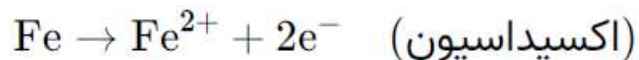
- الکترون‌ها در فلز از آند به کاتد حرکت می‌کنند.
- یون‌ها در محیط الکترولیت (آب) حرکت می‌کنند تا مدار کامل شود.

۴- واکنش‌های آندی و کاتدی (مثال آهن در محیط خنثی/کمی اسیدی):

فرض کنید آهن در آب حاوی اکسیژن (محیط رایج) خورده می‌شود.

واکنش آندی (محل خوردگی):

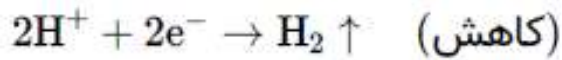
آهن الکترون از دست می‌دهد و به یون آهن (II) تبدیل می‌شود



واکنش کاتدی (بسته به محیط):

۱. در محیط اسیدی (pH پایین):

یون هیدروژن الکترون‌ها را مصرف می‌کند.

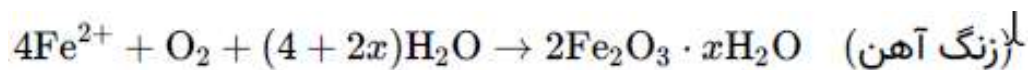


۲. در محیط خنثی یا قلیایی (وجود اکسیژن):

اکسیژن الکترون‌ها را مصرف می‌کند (رایج‌ترین حالت در محیط‌های آبی).

واکنش کلی (تشکیل زنگ):

یون‌های Fe^{2+} تولید شده در آند در نهایت با یون‌های OH^- و اکسیژن محیط ترکیب شده و اکسید آهن هیدراته (زنگ آهن) را تشکیل می‌دهند.



۵- عوامل مؤثر بر خوردگی:

سرعت فرآیند خوردگی به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی و متالورژیکی است.

• pH محیط:

- در محیط‌های بسیار اسیدی ($\text{pH} < 4$)، سرعت خوردگی بالا است (به دلیل واکنش کاتدی H^+)
- در محیط‌های قلیایی ($\text{pH} > 10$)، بسیاری از فلزات (مانند آلومینیوم) محافظت می‌شوند (تشکیل لایه‌های اکسیدی پایدار).
- آهن در نزدیکی pH خنثی (۶ تا ۸) نیز فعالانه خورده می‌شود.

- **دما:**

- افزایش دما معمولاً سرعت واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی را افزایش می‌دهد (طبق قانون آرنیوس).
- **استثنا:** در برخی موارد، افزایش دما باعث کاهش حلالیت گاز اکسیژن در آب شده و سرعت خوردگی را کاهش می‌دهد.

- **غلظت اکسیژن:**

- در خوردگی‌های تحت کنترل اکسیژن (محیط‌های آبی تهویه شده)، افزایش اکسیژن مستقیماً سرعت واکنش کاتدی را افزایش داده و خوردگی را تشدید می‌کند.

- **رطوبت و آب:**

- آب به عنوان الکترولیت ضروری برای خوردگی الکتروشیمیایی است. رطوبت نسبی بالای ۷۰٪ معمولاً آستانه شروع خوردگی است.

- **یون‌های مهاجم (مخرب):**

- **یون کلرید (Cl^-):** بسیار مخرب است. این یون‌ها به راحتی لایه‌های محافظ اکسیدی (Passive Layer) را شکسته و باعث خوردگی حفره‌ای می‌شوند.
- **سولفات (SO_4^{2-}):** در محیط‌های اسیدی، می‌تواند به خوردگی بیولوژیکی کمک کند.

۶- انواع رایج خوردگی

خوردگی می‌تواند به روش‌های مختلفی خود را نشان دهد:

۱. خوردگی یکنواخت (Uniform Corrosion):

- خوردگی با سرعت تقریباً یکسان در کل سطح فلز.

○ آسان‌ترین نوع برای پیش‌بینی و کنترل.

۲. خوردگی حفره‌ای (Pitting Corrosion) :

○ تخریب موضعی و عمیق فلز که به شکل سوراخ‌های کوچک ظاهر می‌شود.

○ ناشی از شکست موضعی لایه محافظ (اغلب به دلیل یون کلرید). بسیار خطرناک زیرا تشخیص آن دشوار است و می‌تواند منجر به نفوذ سریع شود.

۳. خوردگی گالوانیکی (Galvanic Corrosion) :

○ رخ می‌دهد زمانی که دو فلز با پتانسیل متفاوت (بر اساس سری گالوانیکی) در تماس الکتریکی و الکترولیتی قرار گیرند.

○ فلز فعال‌تر (آندی) سریع‌تر خورده می‌شود.

۴. خوردگی شیاری (Crevice Corrosion) :

○ خوردگی متمرکز در شکاف‌ها، زیر واشرها یا در محل اتصال دو قطعه، جایی که گردش الکترولیت محدود است.

○ در داخل شکاف، اکسیژن مصرف شده و محیط اسیدی می‌شود (ناشی از تجمع یون‌های فلزی).

۵. خوردگی بین‌دانه‌ای (Intergranular Corrosion) :

○ تخریب در امتداد مرز دانه‌ها (Grain Boundaries) مواد، نه در داخل دانه‌ها.

○ معمولاً ناشی از نابه‌جایی‌های شیمیایی در مرز دانه‌ها (مثلاً حساس‌سازی فولاد ضد زنگ).

۶. خوردگی تنشی (Stress Corrosion Cracking - SCC) :

○ ترک خوردگی ناشی از اثر همزمان تنش کششی (استاتیک یا چرخه‌ای) و یک محیط خورنده خاص.

○ می‌تواند در موادی رخ دهد که در حالت عادی مقاوم هستند (مانند فولاد ضد زنگ در آب با کلر بالا).

۷- سری گالوانیکی (مفهومی)

سری گالوانیکی (یا ولتاژ فلزات) فهرستی از فلزات است که پتانسیل الکتریکی نسبی آن‌ها را در یک الکترولیت استاندارد (معمولاً آب نمک) نشان می‌دهد.

توضیح مفهومی:

این سری به ما می‌گوید کدام فلز در شرایط استاندارد تمایل بیشتری به از دست دادن الکترون (آند شدن) و خورده شدن دارد و کدام تمایل به دریافت الکترون (کاتد شدن) و محافظت شدن.

- **فلزات فعال (بالای سری) :** مانند منیزیم، روی، آلومینیوم) پتانسیل منفی‌تری دارند؛ در صورت اتصال گالوانیکی، این فلزات به سرعت خورده می‌شوند (نقش آند فداشونده را ایفا می‌کنند).
- **فلزات نجیب (پایین سری) :** مانند مس، نقره، طلا) پتانسیل مثبت‌تری دارند؛ در صورت اتصال، این فلزات محافظت می‌شوند (نقش کاتد را ایفا می‌کنند).

نکته عملی: رای جلوگیری از خوردگی گالوانیکی، باید از اتصال فلزاتی با فاصله زیاد در این سری خودداری کرد یا فلز فعال‌تر را به عنوان آند فداشونده استفاده نمود.

۸- روش‌های جلوگیری و کنترل خوردگی

کنترل خوردگی مستلزم کاهش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی در آند یا کاتد است.

الف) حفاظت پوششی (Protective Coatings)

- پوشش‌های غیرفعال (Inert Coatings) :

ایجاد یک سد فیزیکی بین فلز و محیط خورنده.

رنگ‌ها، لاک‌ها، اپوکسی‌ها، لعاب‌ها.

- پوشش‌های محافظ (Sacrificial Coatings):

پوشش فلزی که فعال‌تر از فلز زیرین است (مانند گالوانیزه کردن آهن با روی). روی فدا می‌شود تا آهن محافظت شود.

- (ب) حفاظت کاتدی (Cathodic Protection):

- تمام سطح فلز را به کاتد تبدیل می‌کنیم تا از اکسیداسیون جلوگیری شود.

۱. آند فداشونده (Sacrificial Anode): اتصال یک فلز فعال‌تر (مانند روی، منیزیم) به سازه مورد نظر. این

فلز خورده می‌شود و جریان لازم برای محافظت سازه را فراهم می‌کند.

۲. جریان تحمیل شده (Impressed Current): استفاده از یک منبع DC خارجی برای اجبار کردن جریان

به سمت سازه و حفظ پتانسیل آن در محدوده محافظت کاتدی.

- (ج) آلیاژسازی (Alloying)

- افزودن عناصر خاصی به فلز پایه برای بهبود مقاومت به خوردگی.

- مثال: افزودن کروم به آهن (بیش از ۱۲٪) برای ساخت فولاد ضد زنگ (ایجاد لایه کروم اکسید پایدار).

- (د) بازدارنده‌های خوردگی (Corrosion Inhibitors)

- موادی که در غلظت کم به محیط الکترولیت اضافه می‌شوند تا سرعت خوردگی را کاهش دهند.

- بازدارنده‌های آندی: با تشکیل یک لایه نازک محافظ روی سطح آند عمل می‌کنند (مثلاً نیترات‌ها).

- بازدارنده‌های کاتدی: سرعت واکنش‌های کاتدی (کاهش اکسیژن یا هیدروژن) را کاهش می‌دهند (مثلاً ترکیبات

آرسنیک یا گوگرد).

۹- مثال‌های کاربردی صنعتی و روزمره

- **لوله‌کشی آب :** استفاده از فولاد کربن بدون محافظت در آب سخت، منجر به خوردگی یکنواخت و کاهش ضخامت لوله می‌شود.
- **مخازن آب گرم :** به دلیل دمای بالاتر و اکسیژن محلول، خوردگی سریع‌تر است؛ از آند فداشونده منیزیم در داخل مخازن استفاده می‌شود.
- **کشتی‌ها و خطوط لوله زیر دریا :** حفاظت کاتدی اجباری (جریان تحمیل شده) برای محافظت فولاد سازه در برابر آب شور (الکترولیت قوی) ضروری است.
- **ساخت و ساز در مناطق ساحلی :** وجود یون کلرید باعث فعال شدن خوردگی حفره‌ای در میلگردهای بتن مسلح می‌شود؛ استفاده از فولاد ضد زنگ یا پوشش‌های اپوکسی توصیه می‌شود.
- **قاب پنجره‌های آلومینیومی :** خوردگی معمولاً رخ نمی‌دهد زیرا آلومینیوم به سرعت یک لایه اکسیدی پایدار تشکیل می‌دهد (پدیده خودپاسیون).