

D-01 水素脆化 (V1)

D-01-1 損傷の種類

高強度鋼は水素原子進入による延性の低下で脆性割れを引き起こす。水素脆化 (HE) は水環境、腐食環境、ガス環境において水素が鋼の中に混入することがある製作加工時、溶接時または運転中に生じる。

D-01-2 影響する材料

炭素鋼、低合金鋼、400 シリーズステンレス、析出強化系ステンレス、高強度のニッケル基合金。

D-01-3 主な要因

- (a) 以下の三つの条件に起因する。
 - i) 鋼・合金中の水素が臨界濃度で存在すること。
 - ii) 強度と結晶構造が脆化に影響する。
 - iii) HE 発生限界以上の応力が残留応力、作用応力として存在する。
- (b) 水素の発端
 - i) 溶接—湿性電極や高湿度の融解溶接電極が使われた場合、水素が鋼に混入する(遅れ破壊)。
 - ii) 酸溶液での清掃、酸洗浄。
 - iii) 高温水素ガス中の運転で、鋼表面で水素分子が解離し水素原子が形成すると、鋼中に拡散する。
 - iv) 湿性 H₂S や湿性 HF 環境の装置では鋼中に水素原子が拡散する。(青酸カリ、ヒ素、FeS は水素の再結合剤として働き、水素ガス反応を減少させ、水素浸透速度を速める。)
 - v) 製造—特にメッキした部品の融解や製造プロセス。(水素フレーク)
 - vi) カソード防食
- (c) 脆化は常温～149℃で生じる。温度の上昇と共に効力は薄れ、HE は 71℃から 82℃以上ではあまり生じなくなる。
- (d) HE は衝撃特性よりも静的特性に大きく影響する。水素が存在し、十分な応力が加えられると、破壊がすぐに発生する。
- (e) トラップ水素の総量は環境、表面反応、格子欠陥、介在物、先在欠陥や割れなどのトラップサイトの程度によって左右される。
- (f) 強度レベル、組織構造、合金の熱処理などの機械的特性へ影響が起こるためには、ある程度の水素量を要する。
- (g) 応力は製造時の冷却、溶接残留応力、荷重を含む。
- (h) 熱応力を上げ、拘束が強く、水素を拡散排出する時間がかかるため、厚さのある部品は壊れやすい。
- (i) 一般的に強度が上がると HE 感受性は高くなる。焼き戻ししていないマルテンサイトやパーライトのような組織構造は、同じ応力下での焼き戻しマルテンサイトよりも感受性が高い。水素を著しくチャージした炭素鋼では水素をチャージしていないものより靱性が劣る。

D-01-4 影響を受ける装置

- (a) FCC 装置 (流動接触分解)、水素プロセス、アミン、サワー水処理施設、HF アルキレーション設備における、湿潤 H₂S 中での炭素鋼容器、配管で水素脆化が懸念される。しかし、石油精錬、火力発電施設、応用プロセスにおいて容器や配管に使われる軟鋼は低硬度で通常は HE 感受性がないが、適切な PWHT が扱われなかつ

- た溶接熱影響部がある場合は脆化感受性がある。
- (b) 球状タンクはやや高い強度の鋼でできており、製油所の他の機器よりも感受性が高い。
 - (c) 高強度鋼でできたボルトやばねは HE を発生しやすい（引張強度が 150ksi 以上の合金は電気メッキ中に水素が吸収され、割れる）。
 - (d) 溶接影響部の硬さが 235BHN 以上であれば、水素化プロセス装置や触媒改質装置における Cr-Mo リアクター、ドラム、熱交換器シェルは水素脆化感受性がある。

D-01-5 現象・損傷形態

- (a) HE による割れは表面直下で発生するがほとんどが表面開口する割れである。
- (b) HE は残留応力や切り欠き、拘束のある三軸応力の存在する場所、溶接熱影響部などの組織不連続がある場所で発生する。
- (c) 巨視的には、たびたびわずかな痕跡として、材料破面は脆性破面として現れることがある。ミクロ的には、延性破面が少ないが、水素が無いときの破面とは区別される。
- (d) 高強度鋼の亀裂はしばしば粒界割れを示す。

D-01-6 防食・緩和

- (a) 水素の起源、合金組成、製造工程、熱履歴しだいである。
- (b) 低合金鋼を使用する。焼き戻し組織には PWHT により延性、残留応力、硬さを改善する。
- (c) 溶接中は低水素系、乾燥電極状態で、予熱して行う。水素が金属中に拡散すると予測される場合、溶接する前に水素排除を行うため、加熱（204℃以上）させる必要がある。
- (d) 高温水素運転の厚肉の機器では停止時、スタートアップ時の加圧温度をコントロールするために S/U、S/D 時の要領が要求される。
- (e) 腐食性溶液中では表面での水素反応を防ぐため保護ライニング、SS 被覆、溶接オーバーレイが適用される。

D-01-7 検査・モニタリング

- (a) 表面亀裂は浸透探傷検査、磁粉探傷、質式蛍光磁粉探傷検査が用いられる。
- (b) 超音波探傷法は HE 亀裂の発見に効果的。
- (c) 放射線透過試験では HE を十分探知できない。
- (d) 水素の起源が低温水環境であれば、特別な装置で水素の透過量をモニタリングできる。

D-01-8 関連事項

水素フレーク（水素剥離）、溶接ビート下割れ、遅れ破壊、水素助長割れ、水素誘起割れとしても知られている。

硫化物応力割れとフッ化水素での水素応力腐食割れは水素脆化と近い形態である。