

プラント設備における修復技術と再発防止策の実践

中野 正大（技術本部 企画開発部）

プラント設備に発生する損傷は多岐に渡る。ここでは、損傷を修復するための基礎技術を紹介するとともに、損傷事例を用いて修復時の注意事項および再発防止策を解説する。プラント設備のトラブルを解決するための一助になれば幸いである。

1. はじめに

わが国のプラント設備の多くは建設から 40 年以上が経過し、高経年化が進んでいる。それらに対して建設時から保守と保全に従事し、様々な経験を積んだ熟練技術者は減少している。また、企業統治や法令遵守など会社を取り巻く環境は大きく変化している。一方では、1990 年代後半からの規制緩和により設備の連続運転期間は長期化し、維持管理や溶接補修に関する規格およびガイドラインが示され、さらにはプラントユーザが設計および施工に関するマニュアルを整備している。そして、インターネットの普及によって文献などの技術情報が得られやすく、技術情報の共有化もしやすくなった。

こういった背景の中で、プラント設備の損傷によって漏えいなどのトラブルが発生した場合には、その都度対処法を検討し、プラント設備の信頼性を確保し、かつ合理的な方法によってそのトラブルを解決しなければならない。本稿では、経年変化した材料を中心に修復技術と再発防止策を紹介する。プラント設備のトラブルを解決するための一助になれば幸いである。

2. 修復技術

プラント設備において、損傷が発生した場合にはその原因を調査するとともに、同様の損傷が類似設備に発生していないかを検証する必要がある。そして、調査結果に基づいて損傷部の修復方法と再発防止策を検討することになる。損傷の原因を明らかにできない場合はいくつかの想定される原因に対応した修復方法と再発防止策を定めなければならない。

らない。また、方針を定める際には、国内外の溶接補修に関する法規および規格ならびに関連する文献を参考にすることが必要である。

図 1 および表 1 に補修溶接の種類と特徴を示す¹⁾。どの補修溶接を選択するかは、損傷の種類とその範囲、補修期間、補修後の運転期間、経済性などを考慮する必要がある。溶接方法には、溶着量をコントロールしやすいティグ溶接を適用することが多く、拘束条件が厳しい場合や被溶接部に不純物が多く含まれる場合には被覆アーク溶接を適用すると解決することがある。また、溶着量が大きい場合には作業効率を高めるために被覆アーク溶接または半自動溶接を適用することが多い。

3. 適用部位に応じた修復の注意事項

プラント設備に発生する損傷は多岐に渡るため、修復をどのようにして行い、再発防止策をどうするかはその都度検討する必要がある。そして、修復方法に補修溶接を適用する場合は、被溶接部となる既設材料が溶接入熱や溶接ひずみに耐えうるか否かに注意しなければならない。この注意が特に必要なのは、既設材料が高温で長時間使用されている場合、全面腐食などの減肉によって残存肉厚がほとんどない場合、または補修溶接に伴う変形によって性能が維持できなくなる場合などがある。

高温で長時間使用した材料は、金属組織の形態が変化し、炭化物や金属間化合物などの析出物の影響によって強度や延性が低下する場合がある。また、表層付近では高温酸化、窒化、浸炭などが発生する場合もある。補修溶接を行う際にはそれらの影響を加味しなければならない。

残存肉厚がほとんどない材料を補修溶接する方法としては、図1に示すように強度部材を用いて当て板溶接を行う方法と減肉部を肉盛溶接する方法がある。前者は減肉した範囲が大きく比較的単純な構造のものに適用され、後者は減肉した範囲が小さい場合または構造が複雑で前者が適用できない場合に適用される。

補修溶接に伴う変形によって性能が維持できなくなる可能性がある場合には、事前に熱弾塑性解析を行うことで想定される変形量を確認するとともに、変形量が要求品質を満足できなかった場合を想定して、補修溶接の対象となる製品を機械加工やプレス成形などによって要求品質を満足できるか確認する必要がある。

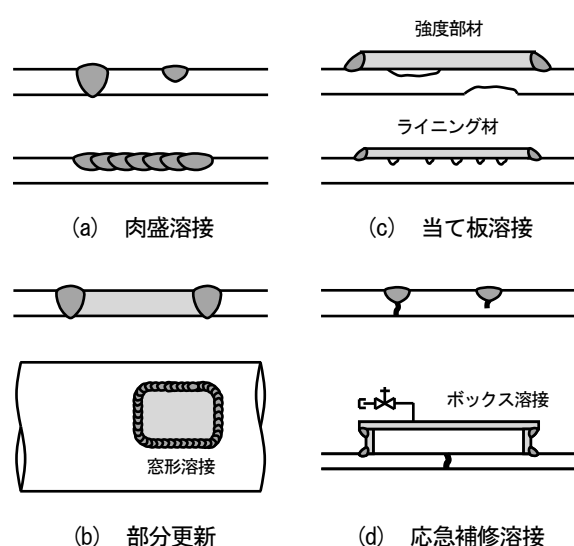


図1 補修溶接の種類

表1 補修溶接の種類と特徴

種類	特徴
肉盛溶接	損傷部を完全に除去して減肉した部分を肉盛溶接する方法で、割れや局部腐食などの損傷した範囲が小さい場合に適用される。
部分更新	損傷した部分を切断して取り除き、その部分を新材に取り換える方法である。全周を切断して部分的に更新する方法と局所的に損傷した部分を切り抜いて更新する窓形補修方法がある。構造物が配管の場合には前者が適用されることが多い。
当て板溶接	損傷した部分をそのままにして、当て板によって強度または耐食性を満足させる方法である。損傷した範囲が大きい場合に適用される。
応急補修溶接	損傷した部分を部分的に除去して肉盛溶接を行う方法、または損傷した部分をそのままにして全体を覆うことで漏えいを防止する方法である。応急補修溶接は、補修期間が短い場合や補修後の運転期間が短い場合に適用される。

4. 修復と再発防止策の事例

4.1 ケース1: 高温酸化の対処法

高温で長時間使用した材料は表層に酸化層ができる場合がある。図2に酸化層の事例を示す²⁾。この酸化層は溶接を行っても火花が発生するなど溶接欠陥の原因になりやすいため、グラインダで除去する必要がある。その際には被溶接部のみではなく、溶接の熱影響がおおよぶ範囲も除去することが望ましい。これは補修溶接後に浸透探傷試験を行った場合に、被溶接部の周辺に高温酸化した部分が残存していると、その部分に指示模様が検出され、本来の目的とする溶接熱影響部に指示模様が発生しているか判定できなくなるためである。高温酸化した部分が除去できたことを確認する方法としては、浸透探傷試験や磁性検査などがある。図3に高温酸化した部分を除去できていないまま補修溶接を行い、補修溶接後の浸透探傷試験で亀甲状の指示模様が検出された事例を示す²⁾。これは有害なものではないが、前述したように溶接熱影響部に指示模様が発生しているか否か判定できなくなるため、指示模様が検出された部分をグラインダにて研削し、再度浸透探傷試験を行い、指示模様がいないことを確認することが望ましい。

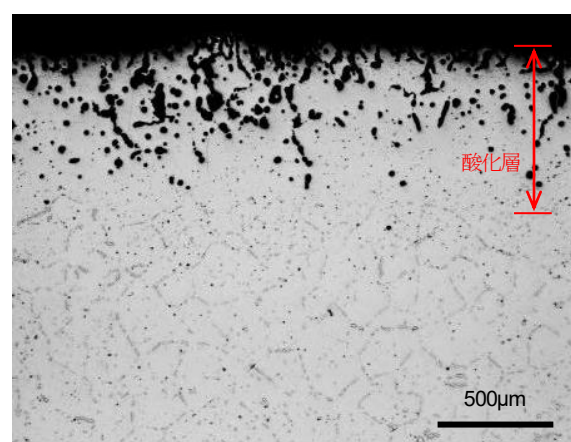


図2 高温で長時間使用した材料の表層部

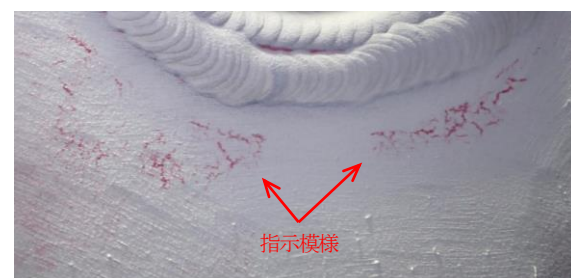


図3 高温酸化した部分に発生した指示模様

4.2 ケース2：高温酸化と浸炭の対処法

高温で長時間使用した既設の溶接ビードに対して外面側の溶接止端部に割れが発生しているか否かを浸透探傷試験で確認する場合がある。その際に表層の高温酸化した部分を除去せずに浸透探傷試験を行うと、溶接止端部に割れが発生していたとしても検出されない場合がある。このような場合は表層の酸化スケールを除去してから浸透探傷試験を行わなければならない。そして、溶接止端部に発生した割れを除去して、補修溶接を行う場合には被溶接部が溶接入熱や溶接ひずみに耐えるか否かを確認する必要がある。

図4に溶接止端部の割れを想定して母材部分に溝状の加工を行い、補修溶接試験を行った事例を示す²⁾。補修溶接後の浸透探傷試験では指示模様は検出されていないが、断面マイクロ組織観察では塊状に析出したCr炭化物に無数のき裂が確認された。このき裂は、経年変化によって析出した塊状のCr炭化物が内部流体の影響に伴う浸炭によって拡大し、そこに溶接ひずみが加わったことで発生したものと推測された。この結果から溶接止端部の割れを図1の肉盛溶接によって補修溶接を行うことはできないと判断し、補修溶接には部分更新を適用した。

このように既設材料の状況に合わせて、補修溶接が行えるか否かを事前に検証することができれば、安定した品質の補修溶接ができる。

4.3 ケース3：窒化の対処法

高温で長時間使用した材料は表層に窒化層ができる場合がある。窒化層は酸化層と同様に溶接を行っても火花が発生するなど溶接欠陥の原因になりやすいため、グラインダで除去する必要がある。図5に窒化層のある部分をティグ溶接でビードオン溶接した際に火花が発生した事例を示す³⁾。

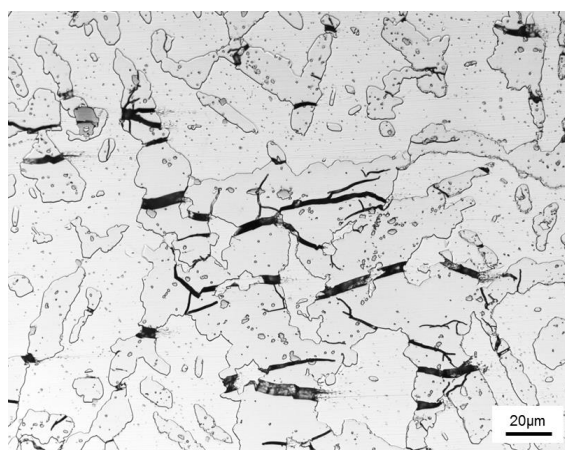
既設材料が窒化しているか否かを非破壊試験によって判定することは難しく、窒化した部分が除去できたことを確認する方法としては図6に示すような断面マクロ組織観察およびビードオン溶接試験がある³⁾。

4.4 ケース4：減肉部の修復

炭素鋼製の水壁管を長時間使用することで水壁管の内面、外面または内外面が減肉する場合がある。このような場合の補修溶接方法としては図1に示す当て板溶接と肉盛溶接がある。前者は外面からの減肉に対しては有効であるが、水壁管と当て板のすき間が新たな問題を引き起こす可能性がある。後者はどのケースにも有効であるが、残存肉厚がほとんどない場合には溶落ちや溶接始末端部の割れなどが発生し、補修溶接が困難になる場合がある。



(a) 外面の浸透探傷試験の状況



(b) 母材の断面マイクロ組織

図4 高温で長時間使用した材料の補修溶接試験



図5 窒化した部分のビードオン試験



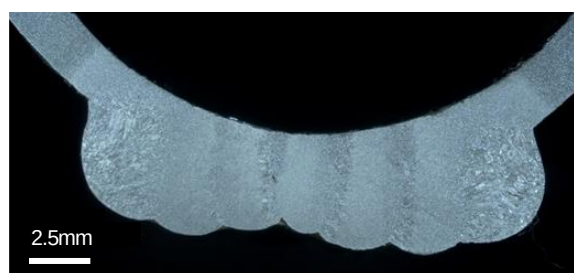
図6 窒化層を有する材料の断面マクロ組織

図7に残存肉厚が2mm程度となった水壁管 STB340Sの肉盛溶接後の外観および肉盛溶接部の断面マクロ組織を示す。通常の溶接方法では溶落ちが発生するため、溶接電流を小さくし、母材の希釈を低減した補修溶接の条件を実験から定めた。表2に補修溶接の条件を示す⁴⁾。これによって、残存肉厚が1mm程度の部位であっても肉盛溶接によって補修溶接を行うことができた。また、溶接始末端部では溶接の熱収縮応力によって割れが発生しやすいため、溶接始末端部に周方向の帯状の肉盛溶接を予め行い、溶接始末端部の肉厚を厚くしたところ、割れを防止することができた。

補修溶接では、工期が短く、既設材料に適した溶接条件を検討する時間が確保できない場合が多い。しかし、事前に溶接条件を定めることができれば、安定した品質の補修溶接ができる。



(a) 肉盛溶接後の外観



(b) 肉盛溶接部の断面マクロ組織

図7 水壁管の肉盛溶接の状況（上向溶接）

表2 補修溶接の条件

溶接方法	半自動溶接
シールドガス	Ar 80% + CO ₂ 20%
ワイヤ銘柄	YM-25S *
ワイヤ径	0.8mm
溶接電流	50～80A
溶接速度	200～400mm/min
溶接姿勢	上向，立向下進

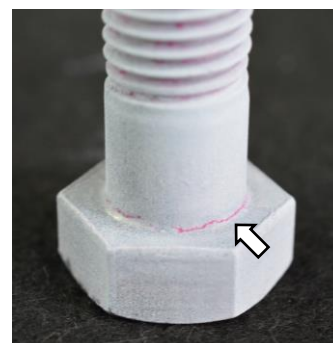
* 日鉄溶接工業株式会社

4.5 ケース5: 応力腐食割れの原因

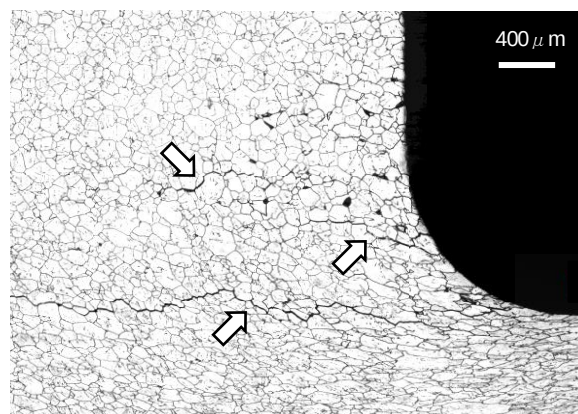
オーステナイト系ステンレス鋼製の容器および配管では外面応力腐食割れが発生する場合がある。外面応力腐食割れは塩化物イオン濃縮型と鋭敏化型に分類できる⁵⁾。

図8に配管のフランジを締結している六角ボルトに発生した鋭敏化型の外面応力腐食割れを示す。割れは六角ボルトの首部から軸方向に対して垂直方向に結晶粒界に沿って進展していた。そして、六角ボルトは供用中の温度が常温にも関わらず金属組織は一樣に鋭敏化していた。すなわち、この六角ボルトは供用前から鋭敏化していたために外面応力腐食割れが発生したものと推定された。再発防止策としては、六角ボルトの製造時に固溶化熱処理が行われ、鋭敏化していないものを使用する必要がある。

一般に六角ボルトには、JIS G 4303 のSUS304J3などの素材が使用され、JIS B 1180の附属書品が適用されている⁶⁾。素材が国産品の場合には固溶化熱処理が行われているものが多く、輸入品の場合には固溶化熱処理が行われていないものが多い。設備の重要度が高く、腐食環境が厳しい部位で使用する六角ボルトおよび六角ナットには、固溶化熱処理が行われた素材を使用し、かつJIS B 1180およびJIS B 1181の本体規格品を適用することが望ましい⁶⁾。



(a) 六角ボルトの外観



(b) 首部の断面ミクロ組織

図8 六角ボルトの外面応力腐食割れの状況

4.6 ケース6：応力腐食割れの再発防止策

炭素鋼製の液体アンモニアタンクにおいて接液部の溶接金属に無数の応力腐食割れが発生する場合がある。図9に磁粉探傷試験で検出された応力腐食割れを示す⁷⁾。割れは底板や側板の溶接ビードおよびジグ跡にみられた。このような場合の補修溶接方法としては図1に示す肉盛溶接があるが、肉盛溶接を行ったとしても数年後に再び応力腐食割れが発生する可能性が高く、再発防止策が必要となる。この事例では、再発防止策としてショットピーニングを適用した。

ショットピーニングは、金属表面に小さな鋼球などを投射し、塑性変形を加えることで表層に圧縮の残留応力を付与する手法で、溶接によって発生する引張の残留応力に対して表層のみを圧縮の残留応力に変換することができる。

図10に溶接熱影響部の残留応力におよぼすショットピーニングの影響を示す⁷⁾。溶接のままでは溶接熱影響部に200N/mm²程度の引張の残留応力があるが、ショットピーニングを行うと表面から深さ0.8mm程度の範囲に圧縮の残留応力を付与することができた。ショットピーニングを適用してからの開放検査では、割れの発生量が大幅に減少した。

4.7 ケース7：疲労破壊の再発防止策

圧縮機や回転機に接続している配管では、その振動の影響で配管に引張応力が繰返し負荷されると、応力集中部などに疲労き裂が発生し進展することで漏えいに至る場合がある。このような疲労破壊の補修溶接方法としては図1の部分更新がある。しかし、部分更新を行ったとしても数年後には再び疲労破壊が発生する可能性が高いため、再発防止策が必要となる。

図11に配管ノズルのサポート溶接止端部に発生した疲労破壊の事例を示す¹⁾。ノズル部に発生する疲労破壊を防止するために本管とノズルに溶接構造のサポートを取り付けたが、そのサポート溶接止端部から疲労き裂が発生し漏

えいした事例である。疲労破壊が想定される部位では溶接止端部を滑らかに仕上げるなど応力集中を緩和させる対策が必要である。そして、ノズル部の疲労破壊に伴う漏えいを防止するには、ノズルをバンドで機械的に固定するなど、疲労き裂が発生し進展しても本管に影響をおよぼさない構造にする必要がある。



図9 底板に発生した応力腐食割れ

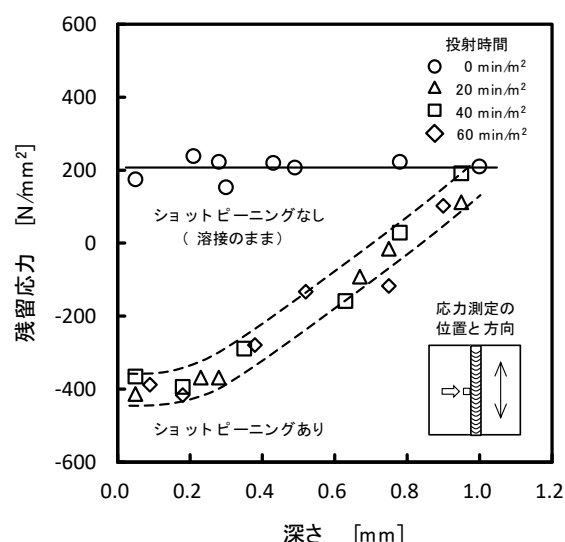
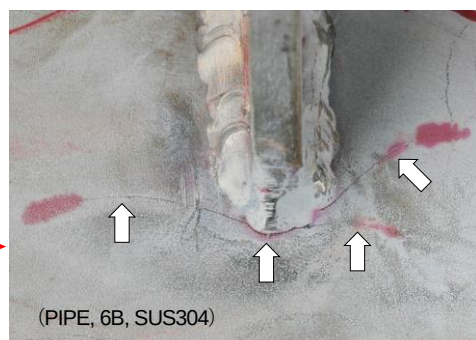
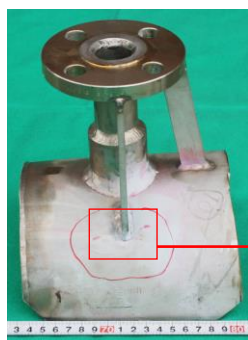


図10 溶接熱影響部の残留応力におよぼすショットピーニングの影響



(a) ノズルサポート部の外観

(b) 疲労き裂部の断面マイクロ組織

図11 配管のノズルサポート部に発生した疲労破壊

5. おわりに

経年変化した材料を中心に修復技術と再発防止策を紹介した。プラント設備の損傷に伴うトラブルを解決するためには、各プロセスの専門技術に加えて、発生している事象と対処法を詳しく洞察してトータルコーディネートができる技術が必要である。そして、トラブルが解決した後は、経緯を体系的に記録して報告書とし、それを設計思想に反映させ、次代を担う技術者にはその解決プロセスを伝える必要がある。

参考文献

- 1) 中野正大：配管の保全と補修溶接技術，溶接技術，Vol.65(4)，pp.62-68 (2017)
- 2) 中野正大：プラント機器の補修溶接技術と再発防止策，溶接技術，Vol.67(6)，pp.65-69 (2019)
- 3) 中野正大，安西敏雄：エチレン製造装置の分解炉に発生する損傷とその対策，高田技報，Vol.21，pp.32-37 (2011)
- 4) 岩崎良二：半自動溶接による低入熱肉盛補修溶接施工法の確立，高田技報，Vol.28，pp.46-48 (2018)
- 5) Q&A，材料と環境，Vol.40，pp.363-364 (1991)
- 6) ねじ商工連盟：六角ボルト・ナット 附属書品から本体規格品への切り替えガイド (2014)
- 7) 中野正大：液体アンモニアタンクに発生した応力腐食割れ対策，高田技報，Vol.18，pp.32-33 (2008)