

レーザー高温ピーニングとアーク補修の複合技術開発

大阪大学 接合科学研究所
助教 呉 東升

(2021年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021235-C2)

キーワード：レーザー高温ピーニング，レーザーピーニング，アーク補修

1. 研究の目的と背景

輸送機器や石油化学などに関連する各種構造部品の損傷は、応力腐食や疲労および摩擦摩耗によって引き起こされることが多い。構造部品の補修は、再製造に比べて、期間短縮だけではなく、コストが大幅に削減される。

図1に示すように、レーザーピーニングシステム、回転システム、冷却システム、CMTアーク補修システムなど、レーザー高温ピーニングとアーク補修の複合プロセス用の装置を利用する。レーザー高温ピーニングおよびアーク補修の適正条件パラメータを実験および数値解析で決定する。実験により補修した構造部品の性能改善効果を実験により検証する。

本複合プロセスにおける科学的な課題として、レーザー高温ピーニングによる組織の微細化、材料特性の改善および圧縮残留応力の生成などがある。本研究により、短パルスレーザーの熱源および圧力と補修金属の微細組織、機械的特性の定量関係を実験で明らかにすると共に、複合補修プロセスにおける非定常熱サイクルと補修層の残留応力分布を数値解析で予測する。

2. 実験方法

レーザーピーニングとアーク補修の複合プロセスを図

2に示す。従来技術として、MIG (Metal Inert Gas) 溶接補修技術 (図2 (A)) とレーザーピーニング技術 (図2 (B)) は、それぞれ独立に利用されている。本研究では、図2 (C) に示す省エネのCMT (Cold Metal Transfer) アーク溶接を用い、CMTワイヤ (ER110S-G) による補修層と母材 (Q460 steel) の希釈率を下げるると共に、後方の高温金属に短パルスレーザーピーニング処理を加える複合技術を提案する。レーザー吸収層とプラズマ閉じ込め層を必要とせず、補修層の高温凝固金属の表面に直接作用して、金属の蒸発とイオン化を誘発し、衝撃波を生成する。ピーク衝撃波圧力はGPaのオーダーとなる。表面欠陥を除去すると共に、晶粒を微細化し、圧縮残留応力を生成する。本技術はアーク溶接とレーザー処理の単独補修技術と比較して、後処理プロセスを必要とせず、アーク溶接補修とレーザー高温ピーニングを一体化し、組織の微細化と圧縮残留応力の生成を同時に実現し、構造部品の性能を改善する[1]。

3. 実験成果

図3に示すように、 $t=3.0$ 秒、 $y=0$ 断面において、熔融金属は液滴の前後では主に上面を後方に流れ、溶融池端では前方に流れた。熔融金属は液滴の下方の溶融池内を下向きに流れ、時計回りの渦が形成された。溶融池の後流部では反時計回り



図1 レーザー高温ピーニングとアーク補修の複合プロセスの装置

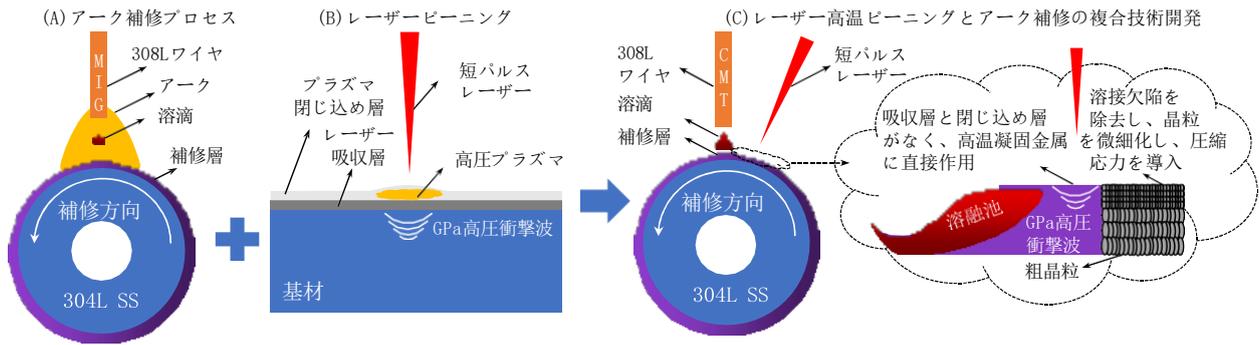


図2 従来技術(A, B)およびレーザー高温ピーニングとアーク補修の複合技術(C)の概略

の渦が形成された。x=22.1mmの断面の上側では、熔融金属は主にプール端からプール中央に向かって上方かつ内側に流れた。熔融金属は溶融池内部を下向きに流れた。x=25.1mm断面の上側では、熔融金属は主にプール端からプール中央に向かって下向きかつ内向きに流れた。熔融金属は溶融

池内部を上方に流れた。

x=27.3mm断面のプールエッジでは、熔融金属は主に下方と内側に流れる。プール中央部では、熔融金属は上部で上方に、下部で下方に流れた。

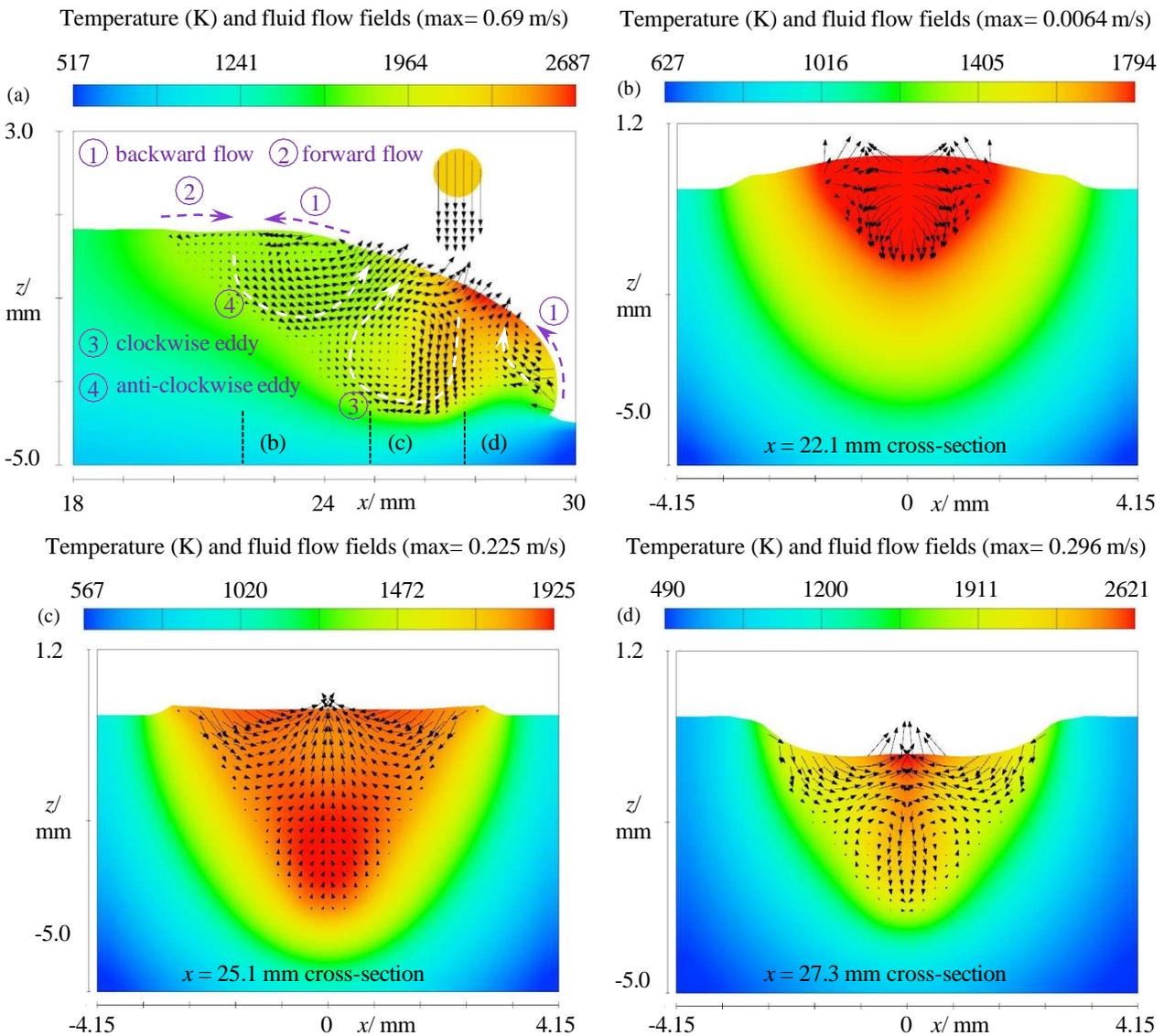


図3 t=3sにおける温度と流体の流れ場(a)y=0断面、(b)x=22.1mm断面、(c)x=25.1mm断面、(d)x=27.3mm断面

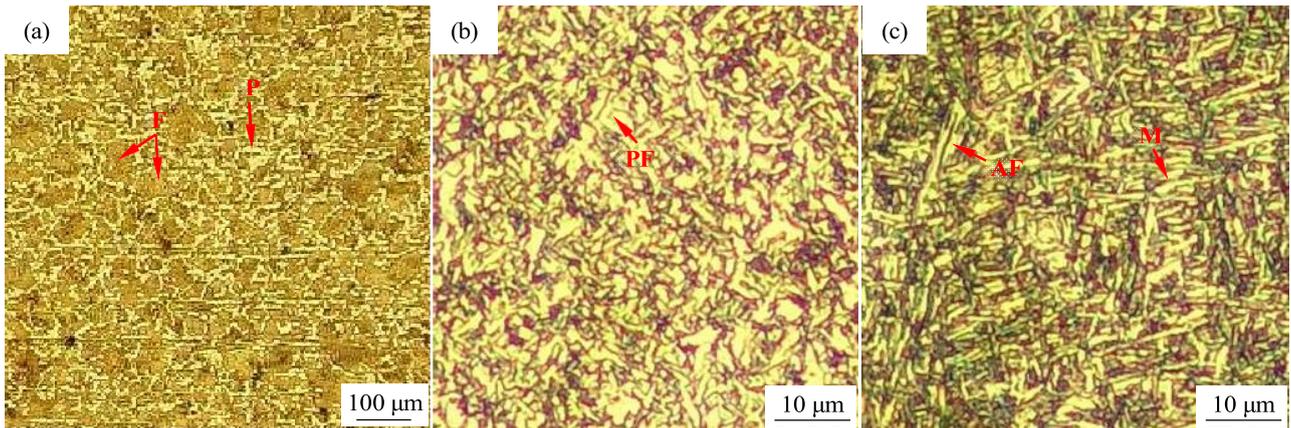


図4 (a) Q460鋼の微細組織、(b)アーク添加補修プロセスの融合部、
(c)ハイブリッドレーザー鍛造とアーク添加補修プロセスの融合部

図4に示すように、Q460 鋼の組織はフェライト(F)とパーライト(P)からなり、パーライトクラスターはフェライト中に不連続に分布している。アーク添加型補修プロセスにおける融合部の組織は、主にポリゴナルフェライト(PF)と少量のアシキュラーフェライト(AF)からなり、フェライトサイズは約 1.6~6.4 μm である。ハイブリッドレーザー鍛造とアークアディティブ補修プロセスの融合ゾーンの組織は、少量のマルテンサイト(M)を含む微細なアシキュラーフェライト(AF)が主体で、フェライトサイズは約 1.2~2.4 μm である。

図5に示すように、アーク添加補修法で作製した補修層の引張強さは 590MPa、伸びは6.05%であった。また、引張試験片は融着部で破断した。ハイブリッドレーザー鍛造とアーク添加補修プロセスで作製した補修層の引張強さは683MPa、伸びは9.54%であり、引張強さは15.76%、伸びは57.69%向上した。実験的な補修層の幅は6.77mmであったが、短パルスレーザーの直径はわずか4mmであった。その結果、レーザー鍛造は融合部に影響を与えたが、HAZの微細構造にはほとんど影響を与えず、鍛造された試験片はHAZで破断した。

図6(a)に電位差分極曲線を示す。検出されたすべての曲線は不動態化現象の特徴を持ち、明らかな不動態化領域があることから、試験片表面に不動態皮膜が形成されていることがわかる。アーク添加型補修プロセスの試料では、自己腐食電位は-0.651 V、腐食電流は8.141 e-6 Aであった。ハイブリッドレーザー鍛造とアーク添加型補修プロセスの試験片では、分極曲線が右に移動し、正極に近づいた。鍛造では、自己腐食電位は5.7%上昇し、腐食電流は43.8%減少するため、腐食傾向は低下する。図6(b)に電気化学インピーダンス分光法の測定結果を示す。ハイブリッドレーザー鍛造とアーク添加補修プロセスの試験片の容量性アークは半径が大きく、耐食性が優れていることがはっきりとわかる。

図7は、これら2つのプロセスによる典型的な腐食面を示している。どちらも孔食の典型的な特徴を示している。アーク添加型補修の試験片表面には多数の腐食ピットがあり、ピット面積は29.4%である。ハイブリッドレーザー鍛造とアーク添加型補修の試料表面の腐食ピットは減少し、ピット面積は8.7%である。

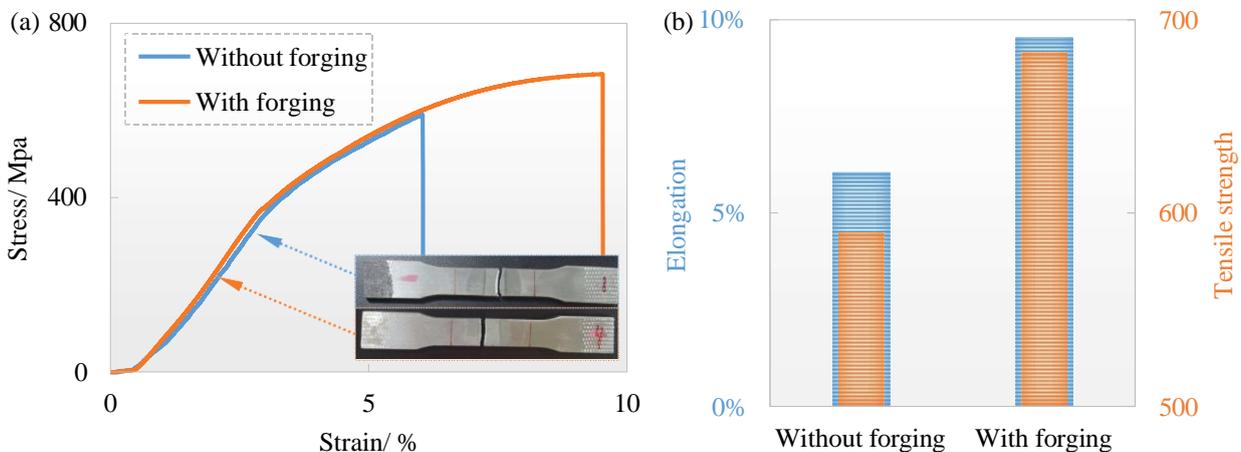


図5 (a) 引張応力-ひずみ曲線 (b) 引張強さと伸び

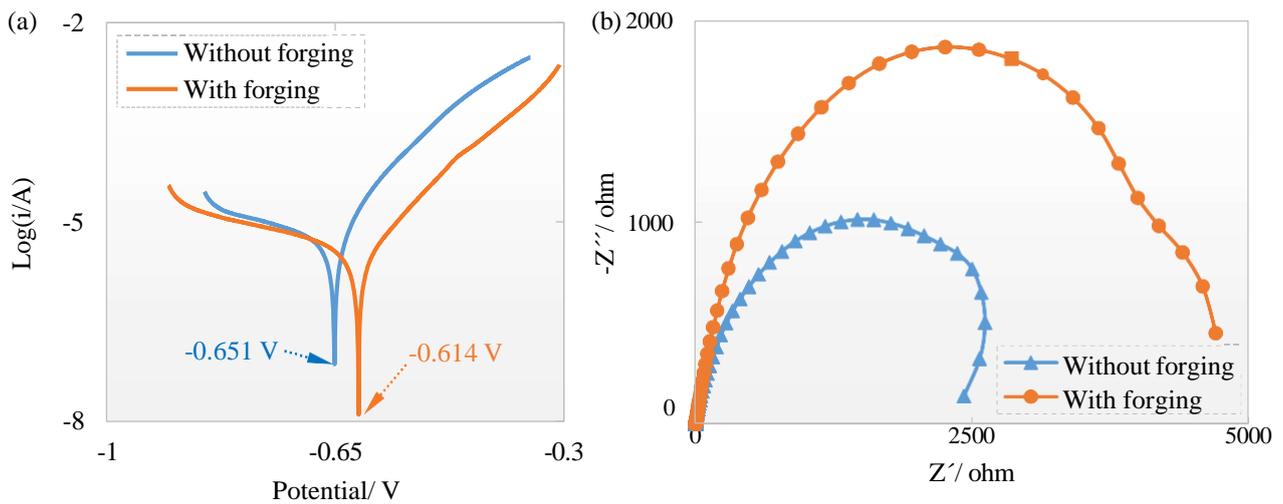


図6 (a) 電位力学分極曲線、(b) 電気化学インピーダンス分光測定結果

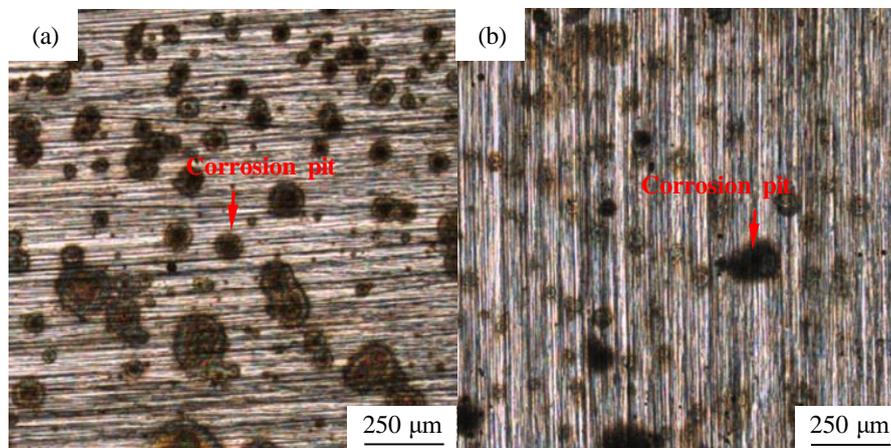


図7 電気化学腐食形態：(a)アーク添加修復プロセス、(b)ハイブリッドレーザー鍛造とアーク添加修復プロセス

4. 結論

レーザーピーニングとアーク補修プロセスを組み合わせることにより、新しいレーザー高温ピーニングとアーク補修の複合プロセスを開発する。CMT アーク溶接ワイヤ、後方に短パルスレーザーは凝固した高温金属に作用する。GPaオーダーの衝撃波が発生し、凝固した金属に衝撃を与える。表面欠陥を除去すると共に、晶粒を微細化し、圧縮残留応力を生成する。

謝辞

天田財団のプロジェクトからの資金援助を受けて、私は多くの研究を行い、国際溶接学会から賞を受け、3本のSCI論文を発表した。

参考文献

- 1) Zhang, Y., Wu, D., Xie, D., Wu, H., Lin, C., Zhang, Q., ... & Guo, Y. (2023). Novel hybrid laser forging and arc additive repairing process for improving component performances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 212, 124289.