

[12]

氏名	やまもと りょうすけ 山本 亮介
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	理工博第97号
学位授与の日付	2023年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	共晶温度以上における超高速浸炭の 反応メカニズム解明と実用検討に関する研究
論文審査委員	主査教授 西本 明生 副査教授 丸山 徹 副査教授 竹中 俊英

論文内容の要旨

機械部品に対する表面改質技術において、脱炭素社会への適応を見据えた新たな浸炭手法を確立するため、インライン化を可能とする高速浸炭処理の研究として「共晶温度以上における超高速浸炭の反応メカニズム解明と実用検討に関する研究」を推進した。一般的な肌焼鋼に対して 1473 K～1573 K の浸炭温度を用い、処理時間や浸炭雰囲気である CH₄ 濃度をパラメーターに実験を行った。その結果、共晶温度以上における浸炭処理についても従来から活用される Harris の実験式が適用できる、すなわち全浸炭硬化層深さは放物線則に従うことを確認した。処理時間の短縮効果は、従来ガス浸炭で用いられる 1203 K に対し超高速浸炭における 1573 K では 4%の処理時間に短縮できることがわかり、部品製造工程においてインライン化の可能性が示唆された。また、浸炭中に炭素が一定速度で鋼に侵入していることを明らかにし、固相線に到達しても炭素侵入速度が不変であることを明らかにした。さらに、炭素の侵入速度は CH₄ ガス濃度に比例することを明らかにした。炭素侵入速度の温度依存性を調査し、アレニウスの式に基づき活性化エネルギーを求め、共晶温度以上における浸炭反応がオーステナイトにおける CH₄ ガス分解反応の活性化エネルギーに近いことを突き止めた。これによって、本処理が CH₄ の分解反応に律速し炭素が鋼に侵入することを明らかにした、次に、浸炭時の炭素プロファイル予測モデルの構築として、得られた炭素侵入速度および既知のオーステナイト中の炭素拡散係数および Fick の第 2 法則とを合わせて検討し、浸炭拡散モデルを確立した。さらに工業的活用を見据えて、得られた炭素濃度予測モデルを用いて、浸炭処理条件の効率的な条件を予測し、実験検証によりその有効性を確認した。さらに、熱処理品質への影響として高温処理による結晶粒粗大化に対する検討を通じて、超高速浸炭処理後のマイクロ組織による再焼入れ後における結晶粒への影響を明らかにした。また、超高速浸炭装置の実用的仕様を検討整理し、超高速浸炭の工業的活用につい

での展望をまとめた。

論文審査結果の要旨

本論文では、機械部品の表面改質技術において、脱炭素社会への適応を見据えた新たな浸炭手法を確立するため、インライン化を可能とする超高速浸炭処理の研究について、実際の実験、予測手法の検討、モデル実験および実製品への適用を論じている。

共晶温度以上における浸炭処理の実現性として処理断面の硬さ試験を行い、試料表面から内部にかけて硬さが漸減し、全硬化層深さは Harris の実験式で知られる放物線則に従うことを明らかにした。また、処理時間短縮効果は従来のガス浸炭の 1203 K 処理と比較して 1573 K 処理ではわずか 4%の処理時間に短縮できることを見出した。さらに、浸炭における炭素侵入量を調査した結果、炭素侵入量は浸炭時間に対して比例関係にあり、超高速浸炭処理では炭素が一定の速度で鋼に侵入していることを明らかにした。さらに、各処理温度において炭素侵入速度を調査し処理温度依存性を確認し、アレニウスの式を用い活性化エネルギーを求めることにより、共晶温度以上における超高速浸炭の浸炭反応は CH_4 ガスの分解反応によって律速し炭素が鋼に侵入することを明らかにしている。また、鋼中の炭素濃度分布について予測手法を検討した。本研究で得られた炭素侵入速度を活用し、鋼中における炭素の拡散については Fick の第 2 法則に基づき差分法による計算方法を考案した。鋼中の炭素拡散については先行研究において既知となっているオーステナイト中の炭素拡散係数について調査し、炭素濃度の実測値を比較し適切な拡散係数を選定し計算モデルに組み込んだ。検証として各温度において計算値は実測値と近い結果であることを確認でき、超高速浸炭における鋼中の炭素濃度予測モデルを確立した。

また、工業的な活用として環境負荷低減や処理の高速化を狙い、前章で確立した炭素濃度予測モデルを用いて効率的な条件の検討を行った。表面炭素濃度を 0.6 mass%、有効硬化層深さを 0.8 mm に設定し、処理温度、時間および CH_4 ガス濃度を変化させてモデルを検証し、処理時間が最短となる条件を求め、その条件で実験検証した結果、炭素濃度および硬さプロファイルの結果が計算検討結果と同等であり、実用として有効性があるとわかった。以上より、同様の浸炭品質を得る場合において効率的な条件算出が可能であることを確認し、工業的な活用に向けた検証ができた。

共晶温度以上で処理する超高速浸炭における結晶粒の粗大化防止の観点から、結晶粒微細化の観点に立った結晶粒粗大化対策を検討するため、超高速浸炭後の冷却方法で得られる組織によって、再焼入れ工程における結晶粒径に及ぼす影響について調査しその対策を検討した。その結果、共晶温度以上の浸炭処理後にポリマー水溶液への焼入れによりマルテンサイト単相とし、その後の再焼入れにより微細な結晶粒とすることで結晶粒粗大化を防止できることを見出した。

最後に、実部品への適用検討として、本実験で用いた超高速浸炭装置を用いて SCM420 材の直径 136 mm のギヤ部品および SCM415 材の長さ 700 mm のシャフト部品を対象に実施

し、いずれも狙いの熱処理品質を満足することを実証した。

本研究で得られた以上の結果は、脱炭素社会や技術者不足の対応などの課題を含む今後の市場を鑑み、機械機能部品の熱処理に必要となる浸炭インライン化を実現するための高速浸炭手法として、共晶温度以上における浸炭反応に関する基礎研究と実用化に向けた研究成果を含み、本手法が従来の浸炭技術から代替するブレイクスルーを起こす可能性を秘めた貴重な知見を与えるものである。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。