C212

鋼部品の焼入れシミュレーション精度に及ぼす 表面熱伝達率の影響

奈良崎道治 大木英二[○][院] 小河原稔 白寄篤 淵沢定克 (宇都宮大学)

Effect of Surface Heat Transfer Coefficients on Quench Simulation Accuracy of Steel Parts

Michiharu NARAZAKI, Eiji OHKI, Minoru KOGAWARA, Atsushi SHIRAYORI
and Sadakatsu FUCHIZAWA

ABSTRACT

For optimization of heat-treating process of steel parts, the improvement of the analytical accuracy in heat-treatment simulation is required. The influence of the surface heat transfer coefficients on the quench simulation accuracy was studied. It was clarified that the simulated microstructure, residual stress and distortion are very sensitive to the surface heat transfer coefficients. Therefore, we need to employ the accurate heat transfer coefficients on each surfaces of quenched steel parts.

Keywords: Quench simulation, Simulation accuracy, Heat transfer coefficient, Virtual heat treatment, Steel parts

1. はじめに

熱処理される鋼部品の強度や寸法精度などを予測し、熱処理時のトラブルの原因を解明して諸条件の最適化をはかるには、熱処理シミュレーションによる熱処理プロセスの解析とその可視化が有効であるが、その解析精度の向上が望まれている。特に、鋼部品焼入れ時の変形や焼入れ後の残留応力と強度(硬さ)の予測精度を左右する重要な因子の一つとして、焼入冷却時の表面熱伝達率の精度があげられる。本報告では、焼入れ時の冷却曲線の実測値から同定された表面熱伝達率の精度が、鋼の焼入れプロセスのシミュレーション精度に及ぼす影響について検討した例について示す。

2. 焼入実験及び熱伝達率同定

2.1 焼入液

鋼部品の焼入れ、特に浸炭焼入れのシミュレーションを想定して、焼入液には JIS2 種 1 号油相当の市販の熱処理油を液温 100℃で用いた。なお、焼入れ実験は攪拌なしの静止油を用いて実施した。

2.2 焼入冷却曲線測定と熱伝達率同定

焼入れシミュレーションに用いる表面熱伝達率の同定には、金属試片の焼入冷却曲線の実測データから集中熱

容量法または逆解析的方法により表面熱伝達率を同定する方法を用いた。

試片としては、Fig. 1 に示す直径 10mm、長さ 30mm の銀円柱試片と、Fig. 2 に示す高さ 30mm、幅 40mm、長さ 60mm の SUS304 ステンレス鋼角柱試片を用いた。Fig. 1 の銀試片は、熱処理油冷却能試験法 JIS-K-2242 に規定されている銀円柱試片と同寸法の試片であり、これをビーカー内の 250mL の油に焼入れした際の冷却曲線を測定した。銀の熱伝導率が非常に大きく、試片寸法が小さいため、冷却中の銀円柱試片の温度はほぼ一様とみなせるため、熱伝達率は冷却曲線の実測データから集中熱容量法を用いて容易に算出できる¹⁾。

Fig. 2 の高さ 30mm、幅 40mm、長さ 60mm の SUS304 ステンレス鋼角柱試片は、油量約 10L の角形油槽内に焼入れし、図中に示した代表点の冷却曲線の実測データから熱伝達率を同定した。熱伝達率の同定は、銀円柱の冷却曲線から算出した熱伝達率を初期表面境界条件として SUS304 角柱試片の冷却過程の解析を行い、冷却曲線の計算値が実測値に近づくように熱伝達率を繰り返し修正して行った。なお、角柱試片の両端に断熱シートを固定して断熱したので、解析では二次元問題とみなして Fig. 3 に示す有限要素モデル(左右対称として 1/2 モデル)を用いた。

Fig. 1 Silver cylindrical specimen (10mm dia. by 30mm long)

Fig. 3 FEM model for prismatic specimen (30mmx40mm)

Fig. 2 SUS304 stainless steel prismatic specimen (30mmx40mmx60mm)

Fig. 4 Heat transfer coefficients estimated from cooling curves of silver cylindrical specimen and SUS304 stainless steel prismatic specimen.

2.3 熱伝達率同定結果

Fig. 4 に同定した表面熱伝達率を示す。なお、角柱の熱伝達率は、上面、側面、下面及び上下のエッジ部近傍に区分して、それぞれの領域毎に異なる熱伝達率を同定した。Fig. 5 と Fig. 6 は、それぞれ銀円柱試片及び SUS304 角柱試片の冷却曲線から同定した熱伝達率を熱的表面境界条件として計算した冷却曲線を、実測した冷却曲線と比較して示したものである。解析では簡単化のために角柱断面が左右対称の 1/2 二次元問題(Fig. 3)とし、熱処理解析用有限要素法解析ソフト GRANTAS(クオリカ㈱)を用いて焼入冷却過程のシミュレーションを行った。Fig. 3 より、試片の形状寸法、材質が異なる銀円柱試片で求めた熱伝達率をそのまま SUS304 角柱試片の表

面に一様に与えても角柱試片中心の冷却曲線の解析値はほぼ実測値と一致するものの、表面近傍の冷却曲線はいずれも高温域において解析値と実測値の不一致が明確に認められる。したがって、Fig. 6 のように角柱表面各所にそれぞれ異なる熱伝達率を与えて冷却曲線の解析値と実測値をほぼ一致させることが、焼入れ解析の精度を保証するためには必要と考えられる。

Fig. 5 Measured cooling curves of oil-quenched SUS304 prismatic specimen and calculated cooling curves. Heat transfer coefficient was estimated with silver cylindrical specimen.

Fig. 6 Measured cooling curves of oil-quenched SUS304 prismatic specimen and calculated cooling curves. Heat transfer coefficients were estimated with SUS304 prismatic specimen.

3. S45C 鋼角柱の浸炭焼入れプロセスの解析

3.1 解析方法

鋼部品の焼入れシミュレーションにおける解析精度が表面熱伝達率の精度にどのように左右されるかを確認するために、SUS304 角柱試片と同寸法の S45C 角柱の浸炭焼入れプロセスのシミュレーションを実施した。ここでも解析は簡単化のために角柱断面が左右対称の 1/2 二次元モデル(Fig. 2)を用いた。解析ソフトは GRANTAS (クオリカ㈱)を用い、浸炭焼入れプロセスは Fig. 7 に示すとおりである。浸炭処理後の油焼入れ時の熱的表面境界条件はそれぞれ銀円柱試片及び SUS304 角柱試片の冷却曲線から同定した熱伝達率を熱的表面境界条件として計算し、それらの場合の解析結果を比較した。

3.2 冷却曲線の解析結果

Fig. 8 に S45C 角柱の冷却曲線の解析結果を示す。SUS304 角柱の場合とほぼ同様に、中心の冷却曲線はさほど相違が認められないものの、表面近傍の冷却曲線は、特に高温域において熱伝達率による差が大きく認められる。なお、SUS304 角柱の冷却曲線から同定した熱伝達率を用いた場合は、角柱下端面の冷却が他の表面よりも冷却がかなり遅くなっている。これは、SUS304 角柱の油焼入れ時の観察によると、下端面に比較的大きな空気泡が残留して冷却を阻害しているためであり、実際の冷却状態が解析結果にも反映されている。

3.3 浸炭焼入れ後の組織分布の解析結果

Fig. 9 に S45C 角柱の浸炭焼入れ後のマルテンサイト、ベイナイト及びパーライトの体積分率の分布を示す。Fig. 8 に示したように、表面近傍の冷却は表面熱伝達率に大きく依存するにもかかわらず、表面近傍のマルテンサイト分布は用いた熱伝達率の相違にほとんど依存せず、どちらの場合もほぼ同様の分布を示している。これは浸炭深さ約 1 mm の表面近傍では炭素含有量が多いのでい

Fig. 7 Carburizing and quenching process.

Fig. 8 Comparison of calculated cooling curves of prismatic S45C steel during quenching in 100°C still oil.

ずれも冷却速度が臨界冷却速度以上になっており、マルテンサイト生成が浸炭層のみに限定されているからである。しかし、浸炭層下部の組織すなわちベイナイトとパーライトの分布は熱伝達率に大きく依存している。

Fig. 9 Comparison of calculated volume rates of martensite, bainite and pearlite in prismatic S45C steel after carburizing and quenching in 100°C still oil.

3.4 浸炭焼入れ後の残留応力と形状の解析結果

Fig. 10 と Fig. 11 に浸炭焼入れ後の S45C 角柱内部の残留応力分布と断面形状(変形量拡大率×200)を示した。Fig. 10 の浸炭層での残留応力分布は、用いた熱伝達率の相違にほとんど依存せず、どちらの場合もほぼ同様の分布を示している。しかし、浸炭層下部の残留応力分布は熱伝達率に依存しており、SUS304 角柱の冷却曲線から同定した熱伝達率を用いた場合は、上面と下面の熱伝達率の相違に依存して上下非対称性が明確に認められる。

Fig. 11 の形状においても変形形状に及ぼす熱伝達率の影響が明確に認められ、SUS304 角柱の冷却曲線から同定した熱伝達率を用いた場合は、形状の上下非対称性が明確に認められる。

4. まとめ

鋼部品の熱処理プロセスの最適化に有用な熱処理シミュレーションの解析精度に及ぼす表面熱伝達率の影響を検討した結果、組織、残留応力及び変形の解析精度が表面熱伝達率の精度に敏感に依存すること、したがって鋼部品の焼入れプロセス解析においてはできるだけ正確な熱伝達率を使う必要があることが確認された。

Fig. 10 Comparison of calculated residual stress distribution in prismatic S45C steel after carburizing and quenching in 100°C still oil.

Fig. 11 Comparison of calculated shapes of prismatic S45C steel after carburizing and quenching in 100°C still oil.

【謝辞】本研究は IMS 国際共同研究プロジェクト IMS 0236(熱処理プロセスのモニタリングと最適化のための仮想熱処理ツールの構築)の研究成果の一部である。また、熱処理シミュレーションソフト GRANTAS の使用についてはクオリカ (株) のご助力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Narazaki M., Kogawara M., Shirayori A. and Fuchizawa S.: Analysis of quenching processes using lumped-heat-capacity method, Proceedings of the 6th international seminar of IFHT(1997) Kyongju, Korea, pp. 428-435.