C112 ガス冷却過程における冷却能評価と熱流れの可視化

鈴木 貴博[○](埼玉工業大学大学院), 巨 東英 (埼玉工業大学)

Cooling performance evaluation and visualization of thermal flow in gas cooling process

Takahiro SUZUKI and Dong-Ying JU

ABSTRACT

The quenching of steel products is a heat-treatment technology that improves durability and fatigue strength. In order to control distortion and strain due to quenching, recently, a new technology of gas quenching such as nitrogen gas was developed in mobile car industry. We developed the gas cooling evaluation device that it was possible to be visible of a thermal flow around a specimen during gas quenching at the same time to measure cooling ability of gas to use for cooling. In this paper, the gas flow velocities have been measured in situ using a PIV method (laser imaging method) and compared to gas locations in the cylinders.

Keywords: Gas quenching, Cooling performance, Visualization, PIV

1. 緒 論

鋼に多様な特性と機能をもたらしている技術の一つが熱処理技術であり、熱処理を施された鋼は多くの用途に使われている。熱処理技術のうち、最も重要なものが焼入れである。焼入れとは、鋼を加熱した後、水、油等の冷却材を用いて急冷することによってマルテンサイト組織を生じさせる技術であり、マルテンサイト組織を得ることによって圧縮残留応力と表面硬化を得て、疲労強度や耐摩耗性を向上させることが目的である。この焼入れの際に窒素ガスなどの気体を冷却に使用するのがガス焼入れである。ガス焼入れは、水、油を使用しないので環境に優しく、また水、油を使用した時に発生する蒸気膜がないために焼きむらが少なく、焼入れ後の変形にばらつきが少ないとされている。

しかし、焼入れにおいて重要な要素となる冷却能について、使用されるガスにどれほどの冷却能があるのか、ガス冷却中の流れが冷却に対しどれほど影響を与えているのかなどの研究はあまり行われていない。

そこで本研究では、実際にガス焼入れが行え、また熱電対を用いて試験片の表面における温度変化を測定できるガス冷却評価装置を開発し、窒素ガスを用いたガス焼入れを実施する。そして、ハイスピードカメラを用いて試験片表面及び周辺の撮影を行い、窒素ガスの熱流れの可視化を行う。また熱電対より得られる温度変化の値から窒素ガスの伝熱挙動の評価を行う。

2. 可視化用ガス冷却槽寸法

可視化用ガス冷却槽の寸法を Fig.1 に示す。冷却槽は可視化が行えるようアクリル材を使用し作製した。また、窒素ガス噴出のためのノズルは冷却効率や対称性を考慮し

4本設置し、流出口も4つ設けてある。冷却槽の中ほどにあるのは試験片であり、ノズルから試験片の距離も冷却効率を考慮し設計した。また、これらガス冷却槽の寸法を決める際、熱・流体解析ソフトウェアである CFD2000 によるシミュレーションを実施し設計した。

Fig. 1 Cooling bath model.

3. ガス冷却評価装置の概要

Fig.2 にガス冷却評価装置の概要を示す。冷却には窒素ガスを用い、電気炉での加熱時には雰囲気ガスとしてアルゴン・水素混合ガスを用いる。

窒素ガスの使用圧力範囲は0～15barであり、流量測定範囲は0～50l/minである。窒素ガスボンベからの流れを減圧器と流量計を用い制御した後、分岐させてノズル2本に接続している。これを二組用意した。実験時において、電気炉で加熱された試験片を、電気炉の下に設置された冷却槽に移動させ、ノズル4本から窒素ガスを噴出させ冷却させるようになっている。Fig.3に装置の全体写真と冷却槽の写真に記載する。

Fig. 2 Outline of gas cooling system

Fig. 3 Photograph in device and cooling bath

4. CFD2000 におけるシミュレーション

4.1 解析モデル

Fig.4 に示すように解析するモデルは鉄を材料とする円柱($\phi 20 \times 60$ mm)のガス焼入れである。冷却槽の寸法はFig.1 に示した寸法と同様のものである。シミュレーションにおいては、中心軸を対称とした2次元1/2モデルを使用した。総要素数は2900である。流入に与える気体は、ノズル位置及び冷却槽寸法における冷却効率を見るために、分かりやすさのため、密度 1.177kg/m^3 、比熱 $3000\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、熱伝導率 $20\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 、粘性係数 $1.85\text{e-}5\text{Pa}\cdot\text{s}$ と冷却能の高い熱物性値を与えた。また、ノズルから気体が噴出する速さは 8m/s 、 20m/s の2種類とし、温度測定点として、A、B、Cの三点を設定した。

Fig. 4 Analytical model in CFD2000

4.2 速度分布

(a) $V = 8\text{ m/s}$

(b) $V = 20\text{ m/s}$

Fig. 5 Velocity distribution in Y direction

Fig.5 にシミュレーションより得られたY方向における速度分布を示す。二つの図の流線図から、ノズルから噴出されたガスが試験片及び試験片支持棒に沿って流れていることが分かる。このことから試験片が冷却されることが期待できる。また流速を変化させても流れ方は変わらず、上部に設けた流出口から流れ出ていることも分かる。

5. 実験条件および可視化の概要

Fig.6 に実験に使用した試験片寸法及び熱電対の位置を示す。試験片は車の部品等によく用いられるSCM420を用い、寸法は $\phi 15 \times 60\text{mm}$ とした。熱電対はクロメル-アルメル熱電対を使用し、測定位置は表面から 1mm 、下から 1.6mm をPoint A、 30mm をPoint B、上から 1.6mm をPoint Cの三点である。この試験片を 800°C まで過熱し、30分保持した後冷却を開始する。冷却時の実験条件は、窒素ガスを圧力 15bar 、流量 46l/min で流した。また可視化のために、冷却槽内に線香の煙を充満させた。

Fig. 6 Experiment model

Fig. 7 Outline of visualization

Fig.7 に可視化システムの概要を示す。可視化を行うために、冷却槽内を線香の煙で充満させ、拡散レンズによりシート上にしたレーザで照らしハイスピードカメラで撮影する。またハイスピードカメラは1秒間に500枚の画像を撮影するように設定した。また撮影した画像はPIV法を用いて、画像解析を行う。

6. 実験結果及び考察

6.1 冷却曲線

Fig.8に実験より得られた冷却曲線を示す。これより、窒素ガスによる冷却は温度のばらつきが少ないことが分かる。これは液体による冷却時に発生する蒸気膜がガス冷却では発生しないことから冷却にばらつきが生じたためと考えられる。また、温度のばらつきが少ないことからガス冷却は焼きむらが起き難く、焼入れ後の変形もばらつきが少ないと考えられる。A点だけが他二点より冷却が速いのは、ノズル位置に一番近いため速く冷却され、また他二点は、次節で考察を記すが、熱対流の影響を受けたためと考えられる。しかし、液体と比べ窒素ガスは冷却能がまだ低いと言える。これは窒素ガスの比熱や熱伝導率など、熱物性値が油といった液体等と比べて低いためであると考えられる。

Fig. 8 Image in visualization

6.2 撮影画像及びPIV解析結果

Fig.9に実験時に撮影した画像を示し、Fig.10, Fig.11にPIVの解析結果を流線図とベクトル図でそれぞれ示す。撮影した画像はガス冷却開始から終了までに4つの段階に分けられ、まずノズルからガスが流れ始める冷却開始段階(I)、次にノズルからのガスが試験片上部に達し渦が発生する段階(II)、ノズルからの強制対流と壁面を上部から伝ってきた自然対流とが衝突する段階(III)、ノズルからの強制対流と乱流になりそれが最後まで続く段階(IV)である。Fig.8, Fig.9に示す画像は、上記(II)~(IV)の画像である。また画像中左側に見える白く光っているように見えるのが試験片である。また(II)の画像右側に見える流れは煙を冷却槽内に入れるための冷却槽下部に設けた煙孔によるものであると考えられる。流線図、ベクトル図からもわかるように、先に流れたガスが上部から下部へ流れ、ノズルからの強制対流と衝突し、試験片の方に流れている。このことから試験片側面中心から上部にかけて冷却が阻害されていると考えられる。

(a) Photographic image of II

(b) Photographic image of III and IV

Fig. 9 Photographic image

(a) Current line chart of II

(a) Vector diagram of II

(b) Current line chart of III

(b) Vector diagram of III

(c) Current line chart of IV

Fig. 10 Current line chart

(c) Vector diagram of IV

Fig. 11 Vector diagram

7. 結論

本研究では、実際にガス焼入れが行え、また熱電対を用いて試験片の表面近傍における温度変化を測定できるガス冷却評価装置を開発し、窒素ガスを用いたガス焼入れを実施した。そして、ハイスピードカメラを用いて試験片表面及び周辺の撮影を行い、PIV法を用いて窒素ガスの熱流れの可視化を行った。また熱電対より得られる温度変化の値から窒素ガスの伝熱挙動の評価を行った。

謝辞 本研究は平成 17-18 年度 NEDO の産業技術実用化開発事業費補助事業の援助を頂き、感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 杉本, 覃, 渡辺, 平成 18 年度 IMS 成果報告会論文集, p p. 9-13(2006)
- 2) 藤澤, 熱流体の可視化と計測, コロナ社, p p. 125-142 (2003)