

変態塑性係数の実験的同定と その熱処理シミュレーションへの応用

京都大学エネルギー科学研究科 ○大塚貴之 若洲豊 井上達雄

1 緒 言

変態塑性現象とは、材料が相変態をうけると、応力が負荷されていると、それが降伏応力以下の応力であっても、大きな塑性ひずみを生じる現象をいう¹⁾。熱処理シミュレーションにおいて、変態塑性を考慮することによって、解析結果として得られる残留応力や、形状に大きな影響を与えることが知られている。したがって、より正確なシミュレーションを行うために、対象とする材料の変態塑性係数を精度良く求めておく必要がある²⁾。ところが、変態塑性係数の同定実験は多大なコストや時間を必要とするために、これまでに限られた材料の変態塑性係数しか得られていなかった。このために、前報では、変態塑性係数を簡単に正確に求められる方法として、4点曲げによる同定法を提案した³⁾。本報では4点曲げを用いて求めた、4種の鋼材(S45C, SCM420, SCR240, SUJ2)についてのパーライト変態、マルテンサイト変態それぞれの変態塑性係数を示すとともに、得られた変態塑性係数を実際の熱処理シミュレーションに応用し、結果を示す。

2 変態塑性係数の同定法および実験結果

2.1 パーライト変態 パーライト変態の変態塑性係数の同定実験では細い線材を用いる。この材料を電気炉内で1200℃まで加熱し、一様にオーステナイト化した後、炉外に取り出し、空気放冷とともに4点曲げの荷重をかける。4点曲げ試験の概念図をFig.1に示す。実験に用いる線材は $a=45.0\text{mm}$, $b=145\text{mm}$, 直径 $d=5$ である。ここで相変態開始時から終了時までの試験片中央部分のたわみ δ を測定することにより、変態塑性ひずみの式

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = 3K(1-\xi)\dot{\xi}s_{ij} \quad (1)$$

を相変態開始 $\xi=0$ から終了 $\xi=1$ まで積分することによって得られる次式

$$K_p = \frac{4\pi\delta(d/2)^4}{aP(4\delta^2 + b^2)} \quad (2)$$

から、パーライト変態の変態塑性係数を簡単に求めることが出来る。以上の方法を用いて、S45Cについて得られた実験結果として、時間-たわみ曲線をFig.2(a)に示す。Fig.2(a)では、相変態中には、たわみが著しく増大していることを示している。以上の結果から、式(2)を用いてS45Cのパーライト変態における変態塑性係数を求めると、 $K_p=7.6 \times 10^5 \text{MPa}^{-1}$ となる。同様の方法で、SCM420, SCR420とSUJ2についてのパーライト変態の変態塑性係数を求めると、それぞれ $K_p=1.2 \times 10^4 \text{MPa}^{-1}$, $K_p=1.1 \times 10^4 \text{MPa}^{-1}$, $K_p=6.5 \times 10^5 \text{MPa}^{-1}$ となる。

2.2 マルテンサイト変態 マルテンサイト変態を起こすに

は、材料を急冷する必要があるため、本研究ではパイプ材を用い、内部に水を流すことによって高い冷却速度を得る。その他の方法はパーライト変態の場合と同様である。得られた実験結果で、S45Cの時間-たわみ曲線をFig.2(b)に示す。Fig.2(b)から、パーライト変態の場合と同様、変態開始から終了までにたわみが著しく増大していることがわかる。以上の結果から、パーライト変態の場合と同様、S45Cのマルテンサイト変態における変態塑性係数を求めると、 $K_M=6.6 \times 10^5 \text{MPa}^{-1}$ となる。同様に、SCM420, SCR420とSUJ2では、それぞれ $K_M=7.0 \times 10^5 \text{MPa}^{-1}$, $K_M=1.7 \times 10^4 \text{MPa}^{-1}$, $K_M=1.0 \times 10^4 \text{MPa}^{-1}$ となる。以上で得られたパーライト変態、マルテンサイト変態それぞれについての結果を材料ごとにまとめたものをTable Iに示す。

3 熱処理解析への応用

3.1 変態塑性を考慮した熱弾塑性解析 熱処理解析では、一般に材料の組織、熱、応力/ひずみの場が相互に影響を及ぼす、変態・熱・力学的連成解析を行う。ここで、変態塑性現象は相変態に起因してひずみまたは応力が生じる現象を言うから、相変態時には、全ひずみは一般に弾性ひずみ、塑性ひずみ、熱ひずみ、変態ひずみ、変態塑性ひずみの和として表される。したがって本研究では、変態塑性ひずみ増分として式(1)を用い、以下のような有限要素式によってシミュレーションを行う。

$$\begin{aligned} \sum \int [B]^T [D] \{B\} du dV &= \sum \int [N] \{d\} ds \\ &+ \sum \int [B]^T [D] \{\alpha\} dT dV \\ &+ \sum \int [B]^T [D] \left(\sum_{i=2}^N \{\beta_i\} d\xi_i \right) dV \\ &- \sum \int [B]^T \left\{ \dot{\xi} \right\} \frac{2\ddot{\sigma}_0}{3S_0} \frac{\partial \ddot{\sigma}_0}{\partial T} dT dV \\ &+ \sum \int [B]^T \left\{ \dot{\xi} \right\} \sum_{i=2}^N \frac{3K_i}{S_0 \dot{G}} \left(\sum_{j=1}^{i-1} \xi_j \right) d\xi_i dV \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、式(3)の右辺第1項目は力学的境界条件、第2項目は熱ひずみ、第3項目は温度変化による降伏応力の変化、第4項目は変態塑性を表している。最終項が変態塑性の効果を表している。実際の解析では、変態塑性の効果が与える影響について詳しく調べるために、変態塑性を考慮した解析と、考慮しない解析を共に行う。

3.2 解析モデルおよび条件 解析対象とするモデルおよび境界条件をFig.3に示す。要素は3角形要素であり、総節点数326総要素数600である。また、初期条件として全体が温度800℃のオーステナイトとし、熱伝達境界によって雰囲気温度

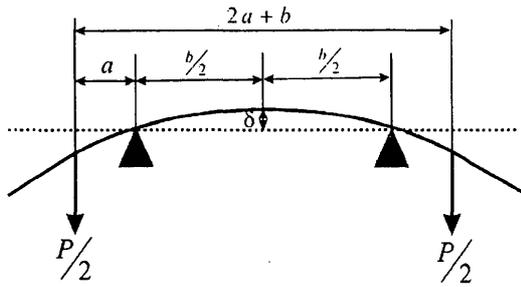


Fig.1. Four-point bending of a beam.

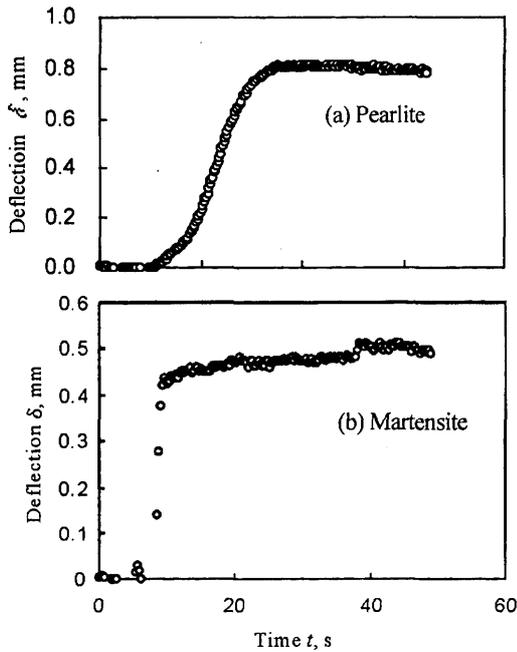


Fig.2. Variation of deflection with time.

20℃で冷却する。ヤング率、熱伝導や相変態特性などの材料物性値は S45C のものを用いる。

3.3 解析結果と考察 解析結果として、温度変化、マルテンサイトの体積分率の時間推移を Fig.4 に示す。また、変態塑性を考慮した場合と、考慮していない場合の相当応力の変化を Fig.5 に示す。Fig.4, Fig.5 から、急冷される材料の外側部分はマルテンサイト変態を起こし、徐冷される内部ではパーライト変態を起こしていることが分かる。また、相変態にしたがって、応力が著しく変化するが、変態塑性を考慮した結果と、考慮していない結果とでは、応力の分布に大きな差が出ていることが分かる。

Table I. Coefficient of transformation plasticity of each material.

Material name	Transformation type	TP coefficient (MPa ⁻¹)
S45C	A → P	7.6 × 10 ⁻⁵
SCM420	A → P	1.2 × 10 ⁻⁴
SCR420	A → P	1.1 × 10 ⁻⁴
SUJ2	A → P	6.5 × 10 ⁻⁵
S45C	A → M	6.6 × 10 ⁻⁵
SCM420	A → M	7.0 × 10 ⁻⁵
SCR420	A → M	1.7 × 10 ⁻⁴
SUJ2	A → M	1.0 × 10 ⁻⁴

4 結 言

本研究では、4点曲げ試験によって4種の鋼材のパーライト変態およびマルテンサイト変態における変態塑性係数を同定した。また、以上の結果を熱処理解析に応用し、変態塑性の効果を導入することによって、結果として得られる残留応力の分布に大きな影響を与えることが分かった。したがって、精度良い熱処理解析を行うためには、あらかじめ対象とする材料の変態塑性係数を精度良く求めておく必要があることが示された。

参考文献

- 1) G. W. Greenwood and R. H. Johnson, Proc. Roy. Soc. London, **283A**, 403 (1965), pp.403-422
- 2) 宮尾光介, 王志剛, 井上達雄, 材料, **35**, 399 (1986), pp.1352-1357
- 3) 大塚貴之, 井上達雄, 第51期定期公演会論文集, 555 (2002).

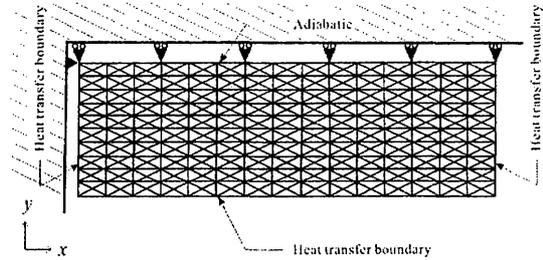


Fig.3. Finite element division of 2-dimensional object.

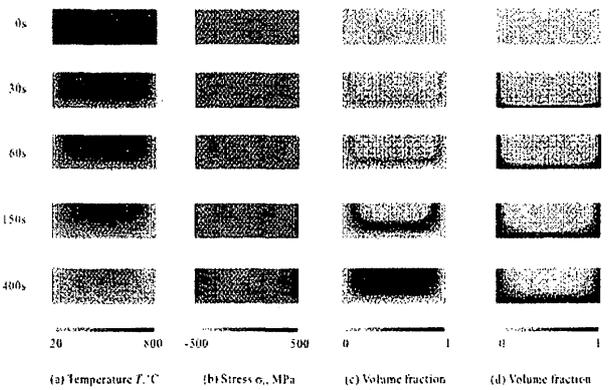


Fig.4. Variation of temperature, stress, volume fraction of pearlite and volume fraction of martensite with time.

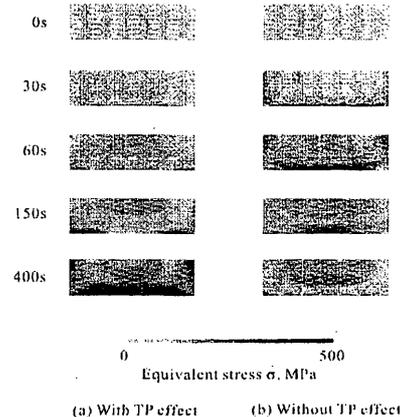


Fig.5. Comparison of stress with TP effect and without TP effect.