

ひずみ速度および温度依存性を有する構成式の決定

正 立矢 宏 (金沢大)
 正 放生 明廣 (金沢大)
 駒形 雄一 (金沢大)

○ 川端 一吉 (金沢大)
 正 茶谷 明義 (金沢大)

1. 諸言

材料の応力-ひずみ関係はひずみ速度および温度に依存し、一般にはひずみ速度の上昇に伴い変形応力が増加し、また温度の上昇に伴い変形応力が低下することが知られている。従って機械や構造物の衝撃破壊のシミュレーションや塑性加工時の加工パラメータの決定の際には、材料強度のひずみ速度依存性および温度依存性を共に考慮する必要がある。そのため衝撃応力下や高温下における材料の変形挙動解析は非常に重要であると考えられ、現在までにも、いくつか動的構成式が提案されている。しかし、その式形は基本的に複雑で、式に含まれる材料定数の決定も容易でなく、必ずしも実用的ではない。そのため、本研究ではSS400鋼を供試材として、種々のひずみ速度および温度下における動的な塑性変形挙動を測定し、温度およびひずみ速度依存性を有する、比較的簡潔な動的構成式および式中の材料定数の決定方法を提案する。

2. 動的構成式と材料定数の決定法

2.1 動的構成式 本論文で対象とするひずみ速度および温度下では、塑性変形の数と温度に対する依存性が、熱活性化過程で進行する転位の運動で説明されると考えられる。転位論によれば、熱活性化過程がアレニウスの式に従うとし、塑性せん断ひずみ速度を次式のように表す。

$$\dot{\gamma}^p \propto Nbv \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \quad (1)$$

$\dot{\gamma}^p$, N , b , v , U , k および T はそれぞれ塑性せん断ひずみ速度、可動転位密度、パーガーズベクトルの大きさ、熱エネルギーによる転位の振動数、活性化エネルギー、ボルツマン定数および温度を表す。また、以前に谷村らは塑性変形の進行の大部分は、転位が熱活性化過程によりパイエルス・ポテンシャルを越えることにより生じると考えて次式に示す動的構成式を提案している。

$$\dot{\epsilon}^p = bv(N_0 + C\dot{\epsilon}^p) \exp\left\{-\frac{D}{T(\sigma_x + \sigma_y)}\right\} \quad (2)$$

ただし N_0 , C および D は定数であり、 σ_x および σ_y は過応力および降伏応力を示す。上式は塑性ひずみに対する可動転位密度 N の増加を考慮しているが、本研究の範囲では、可動転位密度の増加による影響を示す定数 C の影響が無視できうることを確認した。したがって、ひずみ速度および温度依存性を考慮した動的構成式として、 A を定数とし、次式を提案する。なお $\dot{\epsilon}_0$ は単位ひずみ速度を表す。

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\epsilon}_0 \exp\left\{A - \frac{D}{T(\sigma_x + \sigma_y)}\right\} \quad (3)$$

2.2 材料定数の推定方法

動的構成式内の未知の材料定数 A および D は、ひずみ速度波形の測定値から以下のように推定する。まず、ホプキンソン棒形一軸圧縮試験 (HPB 試験) を行い、入力棒に作用する衝撃端速度および試験片に作用するひずみ速度の変化を測定する。次に、測定した衝撃端速度波形を境界条件として、式(3)を用いた弾塑性波伝ば解析を行う。さらに、解析より得られるひずみ速度変化の計算値が測定値に一致するようにガウス・ニュートン法を用いた非線形最小二乗近似法で動的構成式内の材料定数を決定する。

3. 高温下における試験方法および結果

3.1 高温下圧縮試験方法 動的構成式を決定するための測定値を得る材料の衝撃試験には、前述のようにホプキンソン棒形一軸衝撃圧縮試験機を用い、常温から 673K までの様々な温度における、最大塑性ひずみ速度 500, 1000(1/s) 近傍の動的応力-ひずみ関係を測定した。衝撃試験における試験片の加熱には小型炉を用い、あらかじめ加熱した試験片を試験時に炉から試験機に迅速に移動させることにより試験を行った。また静的試験には万能試験機を用い、常温から 523K までの温度域において試験を実施した。応力は試験機に付属のロードセルより、また、ひずみは非接触変位測定器を用いて測定した。なお、静的圧縮負荷時は市販のニクロム線を試験片に直接巻きつけて加熱した。

3.2 高温下圧縮試験結果 試験を行った結果得られた、代表的な例としてひずみが 3% 時における衝撃および静的応力と温度との関係を図 1 に示す。同図より、ひずみ速度の上昇に伴い応力値も増加し、ひずみ速度依存性が確認される。また、グラフが全体的に右下がりであることから温度依存性も確認される。しかし、衝撃試験では約 673K 付近、静的試験では約 523K 付近以降において温度に対する応力値の変化が緩やかになっていく、青熱脆性の影響が見受けられる。なお、現段階では提案する動的構成式によって青熱脆性域内の材料の変形挙動を表すことは困難であるため、本論文では対象とする構成式の適用温度範囲を 293K から 473K までとした。

4. 推定結果および構成式の妥当性

4.1 材料定数の推定結果 式(3)に示す、ひずみ速度および温度依存性をともに考慮した動的構成式に含まれる未知の材料定数 A , D を以上で述べた試験結果より、非線形最小二乗法を用いて推定した。293K から 473K までの 5 種類の温度下における最大塑性ひずみ速度約 500s⁻¹ および 1000s⁻¹ となる計 10 個のひずみ速度測定結果より、一組の材料定数を推定した。得られた材料定数の値を表 1 に、また、同結果を用いて弾塑性波伝ば解析を行い得られ

た 293K および 473K における計算結果と測定値の時間-全ひずみ速度関係における比較を図2に示す。同図より計算値は測定値をよく近似しており、良好な推定が行えたことが確認できる。

4.2 提案する動的構成式の妥当性 提案する動的構成式の妥当性を検討するため、決定された材料定数を用いて弾塑性波伝ば解析を行い、得られた計算値と測定値とを応力-ひずみ関係において比較した。図3には 293K および 473K における同関係を示す。図3より、弾塑性波伝ば解析を行い、算出された計算値は測定値とよく一致していることが確認される。すなわち試験片の各温度における変形挙動をほぼ正確に表現しており、提案した動的構成式の妥当性が確認された。

5. 結言

本論文では、ひずみ速度および温度依存性を共に表現しうる動的構成式を提案し、試験結果を基に同式内の未知の材料定数を決定した。また同式を用いたシミュレーション結果と測定値を比較することにより妥当性の検討を行った。得られた結果を以下に要約する。

- (1) ひずみ速度および温度依存性を共に表現しうる比較的簡単な式形の動的構成式を谷村らの考えを基に提案した。
- (2) 高温下衝撃圧縮試験結果および高温下静的圧縮試験結果より、弾塑性波伝ば解析および非線形最小二乗法によって提案した動的構成式内の未知の材料定数を求め、時間-全ひずみ速度関係において計算値と測定値を比較することにより良好な推定結果が得られたことを確認した。
- (3) 決定された材料定数を用いて弾塑性波伝ば解析を行った結果得られた計算値と測定値を、応力-ひずみ関係において比較したところ、提案した動的構成式は、本研究におけるひずみ速度および温度範囲において、実際の試験片の変形挙動をよく表現しており妥当性を確認した。

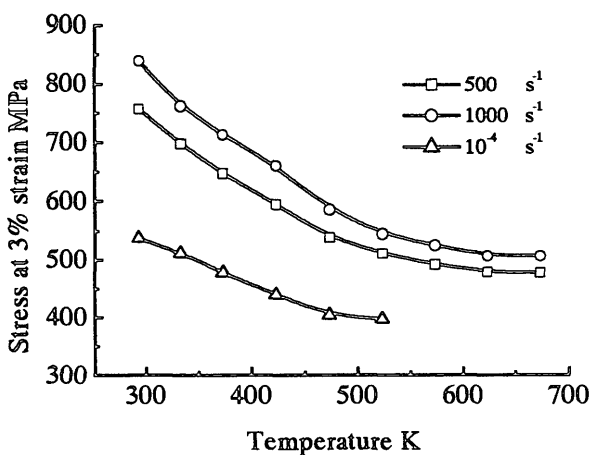


Fig.1 Relationship between the stress at 3% strain and temp.

Table1 Values of the parameters about equation(3)

Parameter	A	D
Value	12.95	12.54×10^5

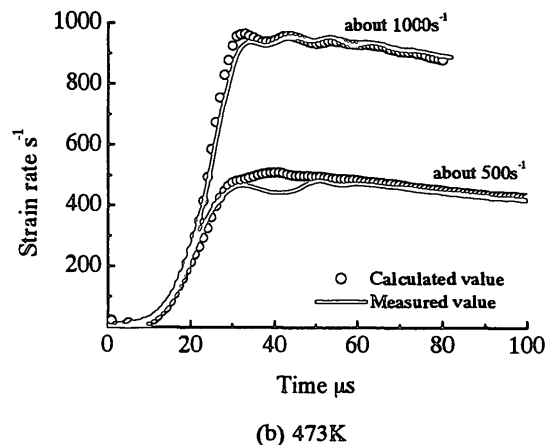
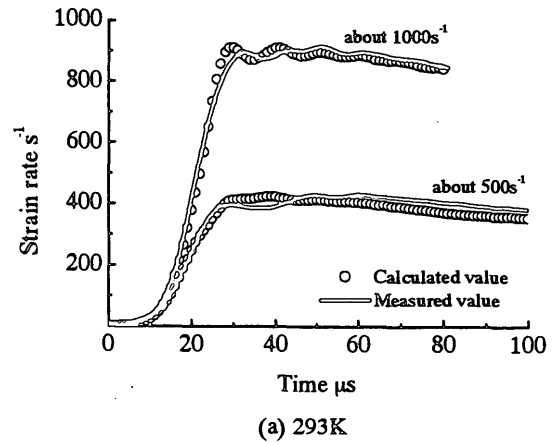


Fig2 Relationship between time and strain-rate

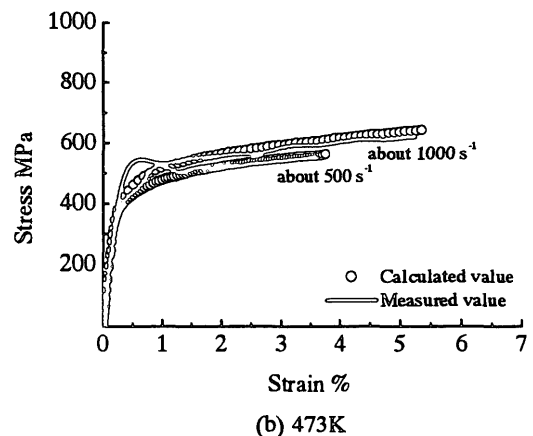
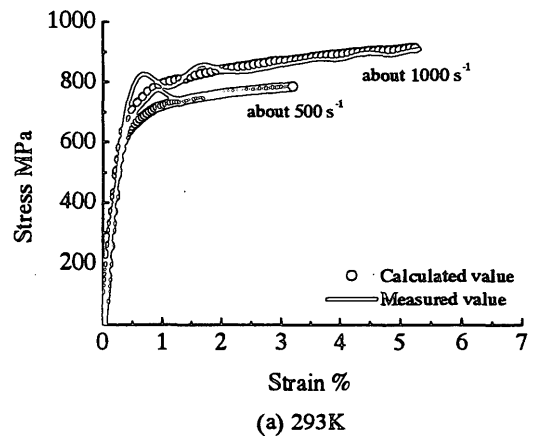


Fig3 Relationship between the strain and stress