

(討13)

鋼の変形能および延性破壊過程におよぼす組織の効果

神戸製鋼所 中央研究所

○井上 毅

工博 木下 修司

1. 結 言 1962年 Edelson ら⁽¹⁾が銅合金において、第2相粒子の体積率(V_f)と破壊延性(ϵ_f)の関係を調べ、第1次近似として ϵ_f は V_f によつて決まることを示して以来、 ϵ_f を V_f の関数として表わそうとする努力が行なわれ、多くのモデルとそれにもとづくクライテリアが提唱されてきた。しかしこれらのモデルの問題点として、①これらの多くはボイドの成長段階を取扱うもので、ボイドは変形前から存在するか、または変形のごく初期に発生し、ボイド発生までの歪量は無視できるとしていること、②これらのモデルに基づく理論式では、第2相粒子の大きさ、形状、分布などの第2、第3の近似項の効果については説明されていないこと等が挙げられる。①については実用材ではこのような条件は必ずしも満足されず、たとえば鋼中の球状炭化物にボイドが発生するのは変形のかなり後期に入つてからであり、ボイドの発生までの歪量は無視できない^(2,3)。②についても多くの実用材で第2相粒子の形状などが破壊延性に大きな効果をもつことはよく知られており、鋼においても炭化物の体積率が同一でも析出形態によつて破壊延性は大巾に異なる。

このようなマクロ的なアプローチとは別に、Ashby⁽⁴⁾らの行なっているような、個々の第2相粒子のまわりの局部応力-歪場のミクロ的な解析からボイドの発生を論じようとするものがあり、このようなアプローチでは第2相粒子の大きさ、形状などの効果は取扱い易い反面、体積率などの取扱いがむづかしく、材料全体としてのマクロ的な挙動にまで拡張するに到っていない。

本研究では、鋼の変形能(破壊延性)および延性破壊過程におよぼす組織の効果を調べ、従来の ϵ_f と V_f の考察から一歩進め、第2相粒子の形態の効果も考慮に入れて考察を試みる。

2. 実験結果2.1 炭化物の体積率および析出形態の効果

Fe-C系においてC量を0.05~0.91 wt%に変

え、それぞれの組織を(フェライト+)パーライトと球状炭化物組織とした。前者は焼ならし処理で、後者は焼入れ後700℃で焼もどし処理により得、焼もどし時間を1, 20, 100 hrに変えて球状炭化物粒径を変化させた。各組織における ϵ_f と V_f の関係を図1に示す。この結果によると、まず ϵ_f と V_f の関係は夫々の組織について双曲線的な関係を示し、Edelsonらの結果と一致しているが、同一 V_f においても ϵ_f は組織によつて大きく異なり、 ϵ_f は V_f によつてのみ決まるものではないことを示している。もう1つ注目すべきことは、球状炭化物組織においては、炭化物の大きさが異なつても ϵ_f はほぼ同じであることである。この点については後で詳しく述べるが、炭化物の大きさが延性破壊過程に関係しないのではなく、ボイドの発生および成長という個々の過程には大きな効果をもつが、結果的に ϵ_f がほぼ同じになつてしまうと考えるべきである。

2.2 球状炭化物組織における粒径の効果

上記の点について

詳しく調べるため、 V_f 一定(0.4% C)とし、同様の焼入れ焼もどし法により焼もどし時間を1, 3, 5, 20, 50, 100, 200 hrに変え、平均炭化物粒径を0.3~2 μ に変えた。このときの ϵ_f は粒径によらずほぼ一定

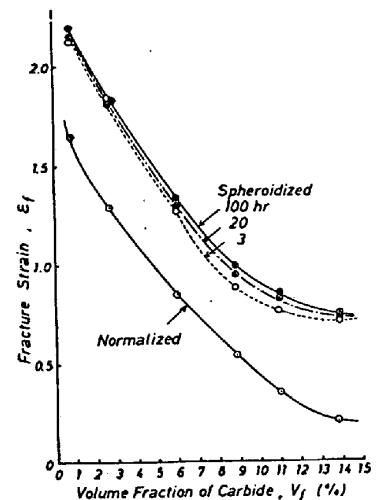


図1 炭化物の体積率と破壊延性の関係

である。 つぎに球状炭化物粒径 (d_p) が延性破壊過程にどのような効果をもつかを調らべた。 V_f が一定であれば d_p が大きくなることは粒間距離 (L) が大きくなることであり、この点にも着目し、 d_p および L と炭化物にポイドが発生するまでの歪量 (ϵ_I) との関係性を調らべた結果が 図 2 である。この結果によると、 d_p が大きくなるほど、即ち L が大きくなるほど ϵ_I は大きくなる。 即ち、 d_p は延性破壊の第 1 段階 (塑性変形の開始からポイドの発生まで) に大きな効果をもつことを示している。 この結果についてはすでに発表した⁽³⁾ ので詳細は割愛するが、 ϵ_I はマトリックスの転位密度が臨界値に達したときにポイドが発生すると考えることにより説明できる。

2.3 フェライト+パーライト組織, パーライトとベイナイトの混合組織, ベイナイト組織の破壊延性

C 量の異なる 2 種類の Cr-Mn 鋼 (SCM21, SCM4) を用い、オーステナイト化後 680, 650, 600, 550, 500 および 450℃ の各温度に保持した鉛浴中で恒温変態を行ない、上記の各組織を得、夫々の ϵ_f および延性破壊過程を調らべた。 ϵ_f と変態温度の関係を 図 3 に示す (後で述べるモデルによる計算値も合わせて示す)。 各変態温度における生成組織は 680~600℃ ではフェライト+パーライトで、変態温度が低くなるにつれてパーライトの体積率の増加 (過冷現象)、層間隔の減少という組織要因の変化をともなっている。 550℃ ではパーライトとベイナイトの混合組織となり、大きなパーライトノジュールとその間を埋める、細かく均一に分布した炭化物をともなりベイナイトからなっている。 さらに変態温度が低下し 450℃ になるとベイナイト 1 相となる。 SCM4 の 500 および 450℃ 変態の組織を写真 1 に示す。 変態温度および組織の変化にともなり ϵ_f の挙動を見ると、組織がパーライトとなる温度域では温度の低下とともに ϵ_f は減少する傾向を示し、パーライトとベイナイトが混在すると ϵ_f はいちじるしく低下する。 さらに変態温度が低下しベイナイト 1 相になると ϵ_f はかえって回復する。 この挙動は両鋼種とも同じである。

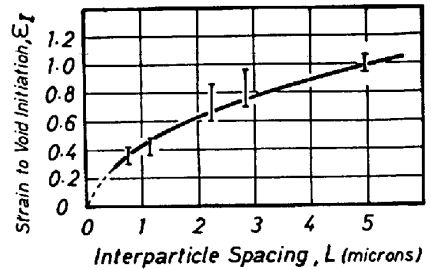


図 2 球状炭化物組織における粒間距離とポイド発生までの歪量の関係

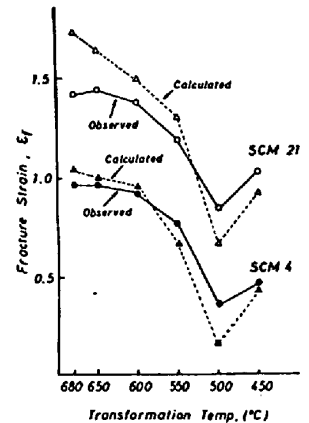


図 3 SCM21, SCM4 における変態温度と破壊延性の関係

3. 考察

3.1 延性破壊過程

延性破壊過程はポイドの発生、その成長および最終破断の段階からなっている。 いま塑性変形の開始からポイド発生までを第 1 段階とし、この段階の塑性歪量を ϵ_I とする。 またポイドが発生した後成長し、最終破断に移るまでを第 2 段階としこの間の歪量を ϵ_{II} とする。 最終破断段階を第 3 段階とし、この段階の歪量を ϵ_{III} とする。 各段階の機構は後で述べるとし

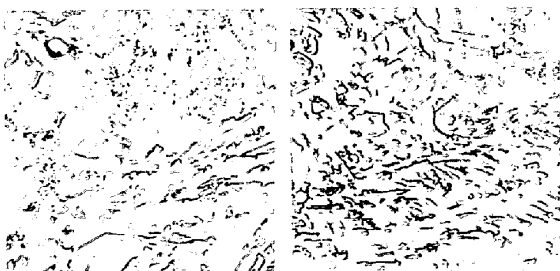


写真 1 SCM4 の 500℃ (左) および 450℃ (右) の変態生成組織

これらの歪量を対数歪で表わした場合、 ϵ_f はこれらの和で示される。 第 3 段階は局部的には大きな歪をともなりことが予想されるが、マクロ歪としては無視しうるほど小さいと考えてよいから次式となる。

$$\epsilon_f = \epsilon_I + \epsilon_{II} \dots\dots\dots (1)$$

3.2 延性破壊の第 1 段階

この段階の機構については、すでに発表したように⁽³⁾、マトリックスの転位

密度が臨界値 (ρ_c) に達したときにポイドが発生すると仮定すると、 ϵ_I は L と次式の関係となる。

$$\epsilon_I = (a \epsilon_0 b \rho_c L)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで a は 0.5 程度の定数、 ϵ_0 は転位の tangling などが起こりはじめる歪量、 b はバース・ベクトルである。(2)式は ϵ_I と L との間の放物線的な関係を示すものであり、図 2° の実験結果と一致する。なお、 L は V_f および d_p から次式で計算できるものとする。

$$L = \left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{V_f} - 1 \right)^{1/2} \cdot d_p \dots\dots\dots (3)$$

3.3 延性破壊の第2段階および第3段階

第1段階が終つて材料中にポイドが導入され、その

後もある量の塑性変形をとめない、最終破断に到る。従来の Internal Necking⁽⁵⁾ をはじめとする延性破壊のクライテリアは前にも述べたようにすでに材料中に存在するポイドの成長を取扱うものであり、ここでいう第2段階の歪量に対するクライテリアの1つであるといえる。Internal Necking などのモデルによるとこの歪量はポイドの体積率によつて決まることになる。しかし本稿で述べた球状炭化物の実験では、この第2段階の歪量は炭化物粒径(または粒間距離)によつて異なり、粒径が大きいほど小さくなる。またこの段階におけるポイドの成長を観察すると、小さなポイドでは引張り軸方向に優先的に成長し、ポイドが歪に応じて相似形的に成長することはない。第2相粒子が大きい場合には、これにともなうポイドも大きく、この段階の歪量は小さくなり、ポイドが発生するとすぐに最終破断に達することが予想される(この例が後で示すパーライト組織の場合である)。

第2段階の終りを決める機構についてはポイドの観察から考えて、最初は引張り軸方向に成長し、このようなポイドから引張り軸とは直角またはある角度をなした(局部的には最大せん断応力の)方向に破壊をひき起こすせん断クラックが発生することによるものと思われる。南雲ら⁽⁶⁾はこの考え方をエネルギー的に考察し破断のクライテリアとしている。ポイドが小さいものでは、個々のポイドは破壊のイニシヤティブをとることはできず別個に応力軸方向に成長し、たまたまどれかのポイドからせん断クラックが生じるか、隣接する2,3のポイドの合体により大きなポイドになつたときにその先端での応力集中が十分に大きくなり、マクロ的には引張り軸方向とは直角に成長し、すでに存在する多くのポイドまたは第2相粒子を連れて大きくなり破断に到る。しかし、第2相粒子がきわめて大きい場合には、それにとりうて発生したポイドが単独でもその先端の応力集中は十分に大きくなり破壊へのイニシヤティブをとりうる。この場合には ϵ_{II} はきわめて小さくなり、 ϵ_f はほとんど ϵ_I で決まつてしまう。

延性破壊の最終段階は上述のように、多数のポイドの"共同作業"として起こると考えるよりも、特定のイニシヤティブをとりうるポイドの出現により決まると考えた方がよいと思われる。ポイドがいつイニシヤティブをとりうるようになるかというクライテリアは、ポイドからのせん断クラックの先端の応力集中とマトリックスの理論破壊強度の兼ねによつて決まるものである。

ここでは定性的なモデルとして、ポイドがある大きさ c^* に達したときに最終破断に到るとし、また第1段階の終りに第2相粒子に導入されたポイドの初期の大きさは、第2相粒子程度の大きさ($\approx d_p$)とし、歪の増大に対して一定の割合 g で成長するとする。このモデルを図式的に示したものが図4である。これによると第2段階の歪量 ϵ_{II} は次式で示される。

$$\epsilon_{II} = (c^* - d_p) / g \dots\dots\dots (4)$$

但し、 d_p が c^* よりも大きければ $\epsilon_{II} \approx 0$ と考える。以下このモデルに沿つて実験結果で示した組織の効果について定性的に説明する。

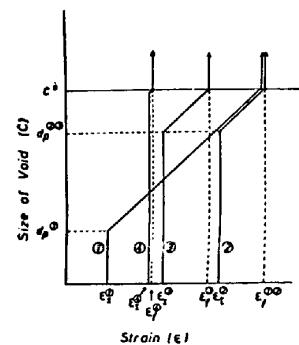


図4 延性破壊モデルの図式表示

3.4 球状炭化物の場合 まず V_f が一定で d_p を変えた場合について考える。この場合、 d_p が小さいとき(図4①)には L も小さくなり(2)式より ϵ_I は小さい。しかし初期ボイドの大きさも小さく(4)式より ϵ_{II} が大きくなる。 d_p が大きい場合には逆に(2)式、(4)式から ϵ_I は大きくなり、 ϵ_{II} が小さくなる。このため結果的には(1)式から ϵ_f は大差がなくなることになる($\epsilon_f^{(1)} \approx \epsilon_f^{(2)}$)。

つぎに V_f を変えた場合を考える。いま V_f が上記の例よりも大きいとし、仮に d_p を②の場合と同じ($d_p^{(3)} \approx d_p^{(2)}$)であるとする。 V_f が大きいと d_p が同じでも(3)式より L は小さくなり $\epsilon_I^{(3)} < \epsilon_I^{(2)}$ となる。一方 ϵ_{II} はあまり変わらないため、 $\epsilon_f^{(3)} < \epsilon_f^{(2)}$ となる。即ち、炭化物粒径が同じであれば、炭化物体積率が大きいほど ϵ_f は低下する。

3.5 フェライト+パーライトの場合 V_f が同じでも球状炭化物にくらべ、この場合の ϵ_f は小さくなることを前に示した。フェライト+パーライトの延性破面ではデンプル底に多くのパーライト・ラメラが見られること、また変形途中のボイド観察でパーライト・ノジュール程度のボイドが多く見られることから、この組織においてはノジュールを1つの第2相粒子と見ることができる。この場合球状炭化物では第2相粒子は炭化物単味であるが、パーライト・ノジュールでは炭化物とフェライトの混合物であり、炭化物の体積率が同じでも第2相粒子の体積率は当然大きくなる。平衡的に生成されたパーライトでは炭化物1に対してフェライト7の体積割合となり、パーライト・ノジュールの体積率は $8V_f$ となる。(3)式の V_f の代りに $8V_f$ とし、 d_p の代りに実測ノジュール径を用い、(2)式からの ϵ_I の計算値を図5に示した。この結果によるとフェライト+パーライトの場合には ϵ_f 中に占める ϵ_I の割合は大きく、 V_f が大きくなるほどこの傾向が強い。即ち、第2相粒子が大きい場合には、粒間距離に応じた歪(ϵ_I)後にボイドが発生し、すぐに最終破断に到つてしまう(図4④)。

3.6 パーライトとベイナイトの混合組織の場合 この場合の組織はパーライト・ノジュール間のフェライト域は細かく分散したベイナイト炭化物で埋められ、大きな第2相粒子とその間を埋める細かく分散した第2相粒子の混合組織とみてよい。この場合には L が小さいため(2)式より ϵ_I が小さく、さらに大きな第2相粒子があるために(4)式より ϵ_{II} も小さくなる。このため、このような混合組織が最も不利な条件が重なることになり ϵ_f はいちじるしく小さくなる。

3.7 ベイナイトの場合 この場合には、上記の混合組織とくらべて、細かいベイナイト炭化物が分散していることには変わりがなく、 L は同程度であり、 ϵ_I も同程度である。しかるに、大きな第2相粒子の役割をするパーライトがないため、 ϵ_{II} は当然大きくなり、結果として ϵ_f は回復することになる。図3の実測値と合せて、パーライト、パーライトとベイナイトの混合、ベイナイト組織における上記モデルからの ϵ_f の計算値を示した。

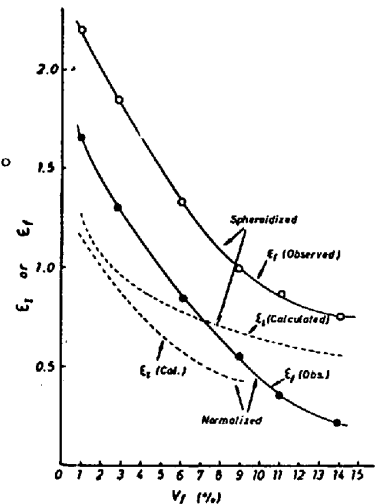


図5 球状化および焼ならし組織の ϵ_f 実測値と ϵ_I の計算値

4. 文献

1) B.I. Edelson, W.M. Baldwin: Trans ASM, 55 (1962) 230 2) F.B. Pickering: 鋼の強靱性 (1971 京都国際会議) P.9 3) T. Inoue, S. Kinoshita: The Microstructure and Design of Alloys (第3回金属と合金の強度国際会議, 1973, Cambridge, England) P. 159 4) M.F. Ashby: Phil. Mag., 14 (1966) 1157 5) F.A. McClintock: J. Appl. Mech., 35 (1968) 363 6) M. Nagumo: Acta Met., 21 (1973) 1661