

密度の異なる焼結鋼の機械的性質と被切削性の改善に及ぼす銅溶浸の効果

大 島 聡 範*・林 忠 夫**・菊 池 希***

Effects of Copper Infiltration on the Mechanical Properties of Sintered Steel with Various Density

Tosinori OSHIMA, Tadao HAYASHI and Nozomi KIKUCHI

Abstract

The effects of copper infiltration on the mechanical properties of sintered steel with various original density are investigated. Differences in the mechanical properties of the sintered steel resulted from the difference in the original density are almost diminished after the copper infiltration. Tensile and fatigue properties of low original density steel are markedly improved to be comparable to those of high original density steel. Fracture toughness, machinability and wear resistance of low original density steel exceeded those of high original density steel. After the copper infiltration, low density steel contains more copper than high original density steel in their pores. The copper plays the role of ductile second phase, which relaxes stress concentration and disperses the energy in the process of fatigue crack growth.

1. 目 的

粉末焼結鋼は自動車を中心とする機械部品として広く使用されているが、その製造過程に起因する内部欠陥は材料特性を低下させる主要因として常に問題となる。焼結体のミクロ的構造は粉体粒子の結合体として構成される連続的なスケルトン構造であり、結合粒子間の空隙が欠陥の実体である。したがって、この空隙に外部から熔融金属を浸透させて欠陥を充填することは材料特性の改善に極めて有効である。またこの方法は、材料複合化の手法として着目すれば、マトリックス材と溶浸材の組合せによっては、溶浸を利用した複合材料の開発へと展開することも期待できる。

これまでの研究においては、銅溶浸による焼結鋼の材料強度特性の改善効果に関する基本的なデータを得ることを目的として、引張り特性および疲労特性に及ぼす銅溶浸率の影響、および、引張り特性および疲労特性に及ぼす基材密度の影響、について検討を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。本報では基材密度の異なる焼結鋼に銅を100%溶

浸させた供試材について、焼結鋼の引張り特性、破壊靱性特性、疲労特性ならびに被切削特性に及ぼす基材密度と熟処理の影響について、検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

供試材は、日立粉末冶金(株)より提供された、社内規格14EPC、JIS規格MPF4相当の焼結鋼で、13×10×65mmの角棒である。原料は市販アトマイズ鉄粉に銅粉1.5%、グラファイト1.0%に潤滑剤としてステアリン酸亜鉛0.8%を加えたものである。焼結鋼の密度は低密度(6.0gr/cm³)、中密度(6.5gr/cm³)、および高密度(7.0gr/cm³)の三段階を目標として変化させている。また、銅溶浸は焼結体の上に必要量の銅粉末成型体を載せ、分解アンモニアガス雰囲気中で1140℃、30min加熱して行なった。試験片は図1(a)、(b)および(c)に示す形状に加工して、引張り、破壊靱性、疲労および疲労き裂進展の各試験を行なった。負荷方式は引張りを除いてすべて三点曲げである。また被切削特性は、形削盤による切削抵抗と切削面の最大あらさR_{max}によって評価した。切削条件は切削速度0.3m/s、切込み、送りともに0.3mmである。破壊靱性試験、疲労および疲労き裂進展試験は油圧サーボ

* 教授 機械工学科

** 技官 機械実習工場

*** 日邦パルプ株式会社

式疲労試験機Lab-5を使用した。疲労および疲労き裂進展試験は、応力比0.1、繰返し速度20Hzで行ない、次式によって応力拡大係数幅を計算した。

$$\Delta K = (\Delta P / t W^{1/2}) \{ (2 + L/W) (0.886 + 4.64 L/W - 13.32 L^2/W^2 + 14.72 L^3/W^3 - 5.6 L^4/W^4) \} / (1 - L/W)^{3/2} \quad (1)$$

ここで、 ΔP ：荷重幅、 L ：き裂長さ、 W ：試験片幅、 t ：試験片厚さである。

破壊靱性試験はASTM E339に準拠し、疲労予き裂を入れた三点曲げ試験片の開口変位をクリップゲージで検出し、荷重－開口変位曲線から次式によって平面歪破壊靱性 K_{IC} を計算した。

$$K_{IC} = (P_{max} / B W^{1/2}) \{ 29.6 (a/w)^{1/2} - 185.5 (a/w)^{3/2} + 655.7 (a/w)^{5/2} - 1017 (a/w)^{7/2} + 638.9 (a/w)^{9/2} \} \quad (2)$$

ここで、 a ：き裂長さ、 B ：試験片幅、 W ：荷重軸から背面までの距離である。

3. 実験結果および考察

3. 1 引張り特性

図2は基材密度と引張り特性の関係を示す。未溶浸材の引張り強さおよび伸びは低密度ではきわめて低く、密度の増加すなわち欠陥の減少に伴って向上するが、各密度における値は著しく異なり、密度すなわち欠陥によって支配されることが明確である。これに対して銅溶浸材では、引張り特性は全基材密度にわたって大幅に上昇し、伸びは低密度材で4倍、中密度材で2.3倍、高密度材で1.7倍となり、引張り強さは、低密度材で3.7倍、中密度材で3倍、高密度材では2倍となる。このように銅溶浸によって低密度、中密度材の引張り特性は著しく改善され、基材密度すなわち基材欠陥量の相違による引張り特性の差はほとんど解消する。未溶浸焼結鋼に内在する欠陥は、引張り変形過程において応力集中源となり、延性き裂の発生を助長して引張り強さおよび伸びを低下させる。しかし、銅溶浸によって欠陥が充填されると、欠陥先端部の応力集中は大幅に緩和されることから、延性き裂の発生応力が増加し引張り強さは向上する。同時に延性き裂発生までの塑性変形量が大幅に増加するので、伸びも増加する。しかし、基材密度の大小による欠陥量の相違、すなわち充填された銅量の相違による引張り特性の変化はほとんど認められない。

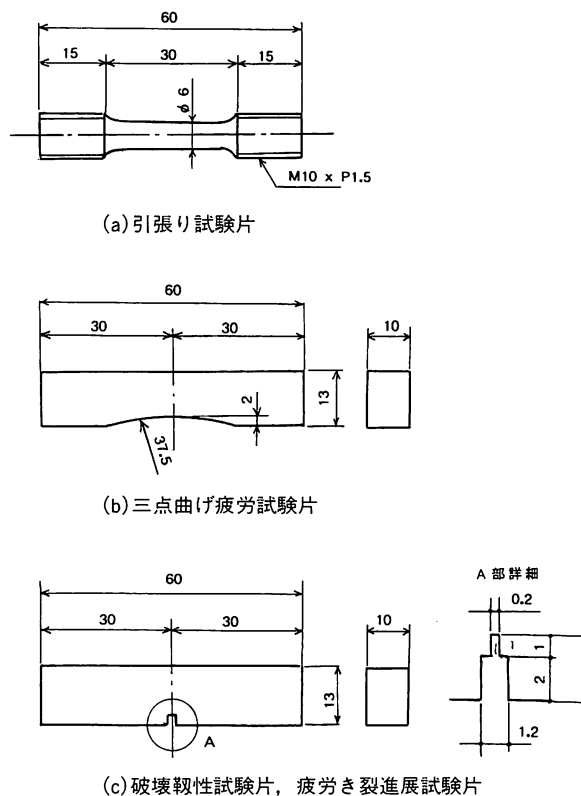


図1 試験片の形状と寸法

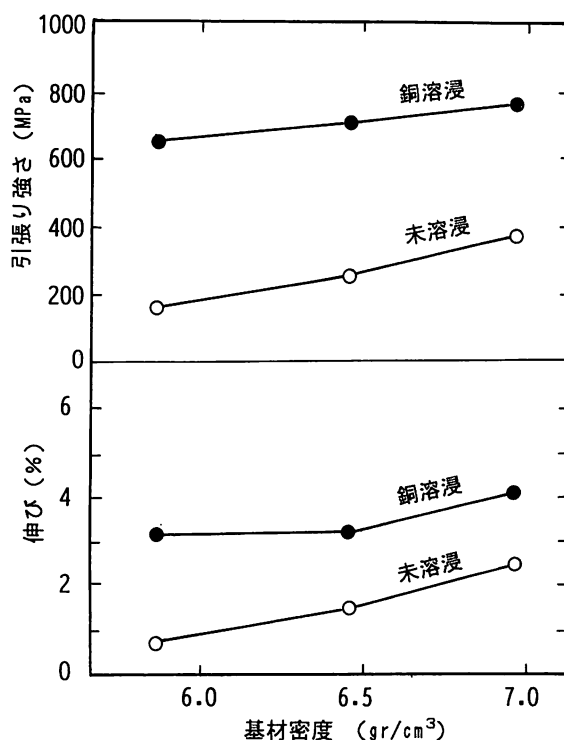


図2 基材密度の異なる焼結鋼の引張り特性に及ぼす銅溶浸の効果

3.2 破壊靱性特性

図3は基材密度の異なる焼結鋼の未溶浸材および銅溶浸材の破壊靱性試験結果を示す。未溶浸においては、低密度材の破壊靱性はきわめて低く、基材密度の増加に伴って直線的に向上している。一方、銅溶浸材においては、低密度材および中密度材の破壊靱性の増加は著しく、高密度材とほとんど等しいレベルに達するので基材密度による差はほとんど解消し、ほぼ一定の高い値となる。未溶浸材は多数の欠陥を含む材料であるから、その破壊靱性を評価するには種々の問題があるが、き裂伝播開始条件は基本的には結合粒子のネック部分、すなわち欠陥の先端に発生するき裂の応力拡大係数によって支配されるとすれば⁽⁶⁾、基材密度すなわち欠陥率の影響が支配的であると考えられる。一方、銅溶浸材の破壊靱性は、疲労予き裂の先端部分の応力拡大係数にもとづく、本来のき裂伝播開始条件に支配されると考えられる。したがって、低密度すなわち溶浸銅量の多いものが最も高い増加率を示すことは、欠陥に充填された銅が延性の大きい第二相としての役割を果たすためであると考えられる。

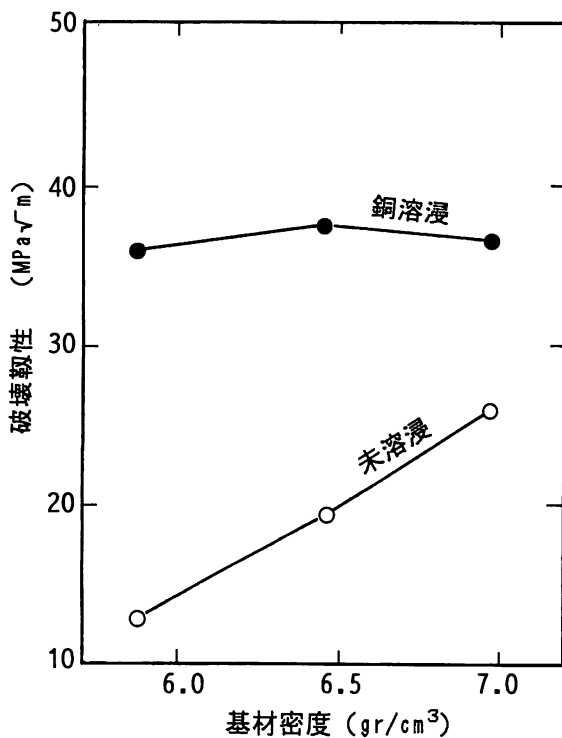


図3 基材密度の異なる焼結鋼の破壊靱性に及ぼす銅溶浸の効果

3.3 疲労特性

図4は、基材密度の異なる焼結鋼の疲労特性に対する銅溶浸の効果を示すS-N線図で示す。未溶浸材の疲労特性は、欠陥の多い低密度材から欠陥の少ない高密度へと、欠陥の減少にともなって次第に向上しているが、基材密度による疲労強度の差は著しい。これに対して、銅溶浸材では、低密度材および中密度材の疲労特性が著しく向上し、高密度材とほぼ同レベルに達するので、基材密度による差異はほとんど解消する。

図5(a), (b)は基材密度の異なる焼結鋼の未溶浸材および銅溶浸材について、応力拡大係数幅 ΔK と疲労き裂進展速度 da/dN の関係を示す。(a)の未溶浸材では、低密度材から中密度材さらに高密度材へと基材密度の増加にともなってき裂進展速度は減少し、基材密度の差異によるき裂進展速度の差が明確に現れている。これに対して(b)の銅溶浸材では、基材密度の差によるき裂進展特性の差はほとんど認められず、すべてのデータはほぼ一本の曲線で整理され、さらに全体のき裂進展速度も減少する。図4および5の結果は、銅溶浸によって応力集中源およびき裂進展経路としての

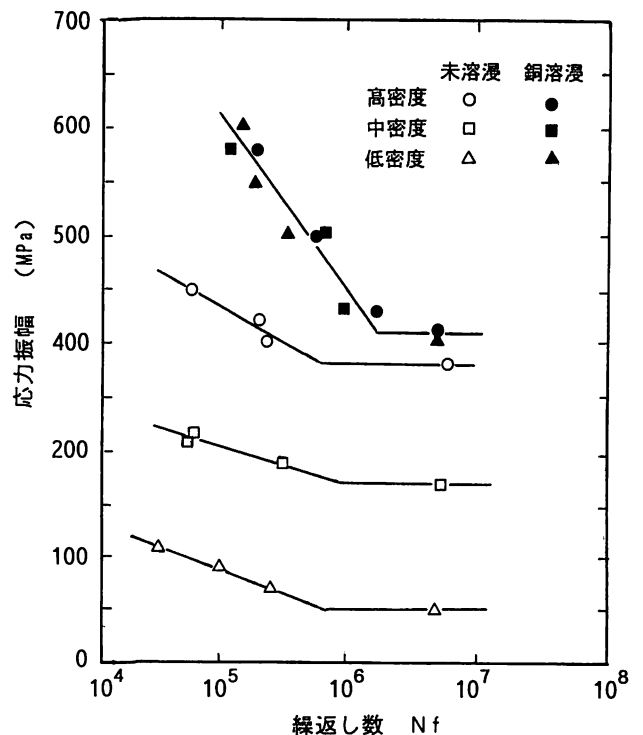


図4 基材密度の異なる焼結鋼の疲労特性に及ぼす銅溶浸の効果

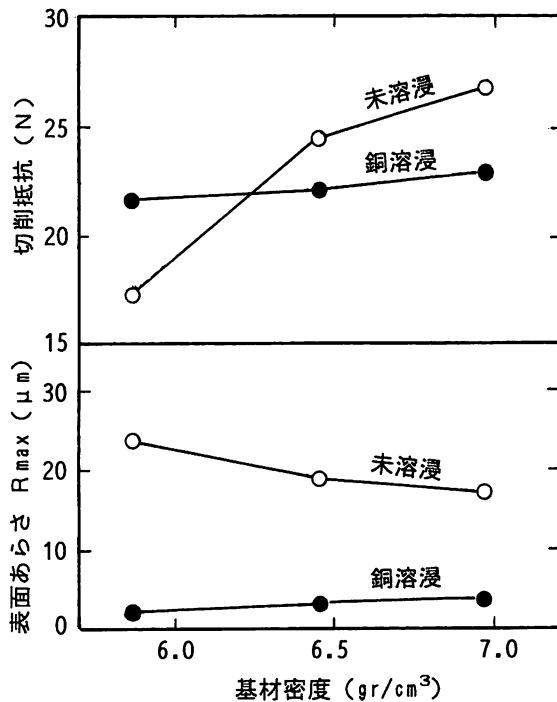


図6 基材密度の異なる焼結鋼の被切削特性に及ぼす銅溶浸の効果

欠陥がほぼ完全に充填されたことによって、き裂の発生が抑制され、き裂進展抵抗が増加した結果であると考えられる。すなわち未溶浸材では、き裂は欠陥から欠陥を辿って結合粒子のネック部を切断する形式で容易に伝播するが、銅溶浸によって欠陥がほぼ完全に充填された状態では、き裂の進展経路はマトリックスおよび銅溶浸部あるいは両者の境界面を通るので進展抵抗は増加し、疲労き裂の進展速度は減少する⁽³⁾。

3.4 被切削性

図6は未溶浸材および銅溶浸材における、基材密度と切削抵抗および切削面の表面粗さ R_{max} の関係を示す。未溶浸材の切削抵抗は低密度では非常に小さく、密度の増加に伴って増加するが中密度から高密度への変化は少ない。ここで未溶浸低密度材の切削抵抗が非常に小さいのは、欠陥が非常に多いので、切削過程で切屑が分断されることによるものである。これに対して銅溶浸材の切削抵抗は、低密度では増加するが中密度および高密度では減少し、密度による差はほとんど解消して、ほぼ一定の切削抵抗を示す。また切削面の粗さ R_{max} は、未溶浸材では低密度材が最も大きく、密度の増加とともに減少するがその変化は小さい。

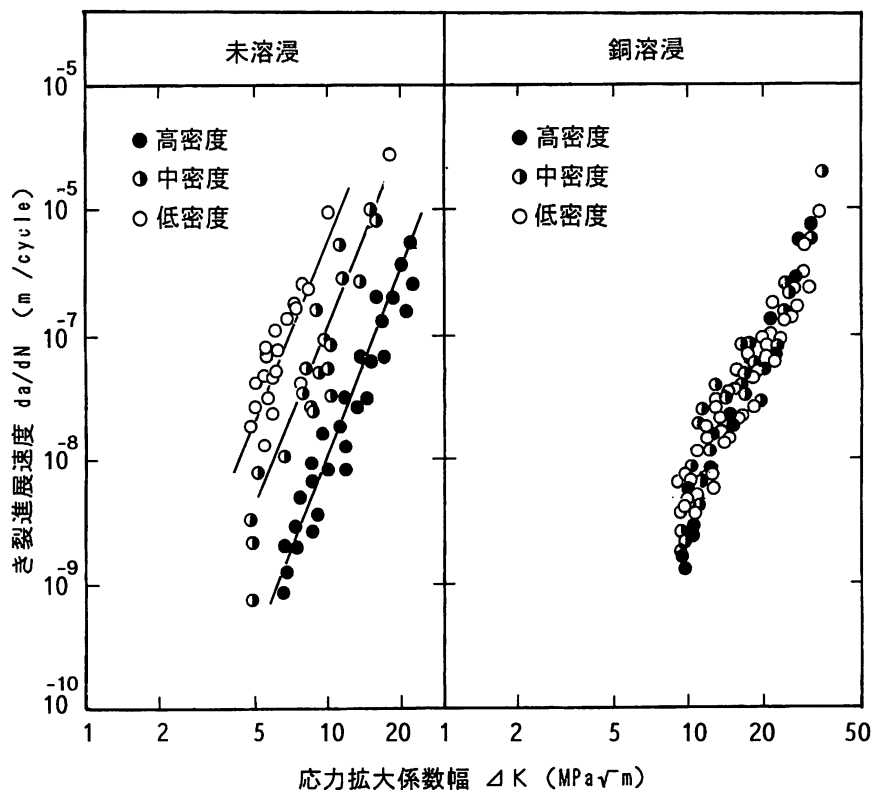


図5 基材密度の異なる焼結鋼の疲労き裂進展特性に及ぼす銅溶浸の効果

これに対して銅溶浸材の $R_{\max}$ は、すべての密度にわたって大幅に減少し、きわめて良好な切削仕上面が得られる。 $R_{\max}$ の減少が溶浸銅量の多い低密度材においてとくに顕著であることからして、銅溶浸による切削仕上面の改善効果は欠陥中に充填された銅によってもたらされたものと考えられる。銅溶浸材はフェライトパーライト組織中に、延性に富む銅の混在する一種の複合組織であると考えられるが、このように優れた被切削特性を示す理由については今後の研究課題である。

4. 総 括

銅溶浸による焼結鋼の材料強度特性の改善効果に関する基本的なデータを得ることを目的として、密度の異なる焼結鋼の未溶浸材および銅溶浸材の、引張り特性、破壊靱性、疲労特性ならびに被切削性に及ぼす基材密度の影響について検討を行なった結果は以下に要約される。

- (1) 焼結鋼の引張り特性における強度および延性は銅溶浸によって著しく向上し、基材密度による差はほとんど解消して、一定の高い値を示した。
- (2) 焼結鋼の破壊靱性は銅溶浸によって著しく向上し、基材密度に関係無くほぼ一定の高い値を示した。

- (3) 焼結鋼の疲労特性および疲労き裂進展特性は銅溶浸によって著しく向上し、基材密度に関係無くほぼ一定の高い値を示した。
- (4) 焼結鋼の被切削特性は銅溶浸によって著しく向上し、切削抵抗および切削面あらさは、基材密度に関係無くほぼ一定の低い値を示した。

謝 辞

本研究は北海道テクノネットワーク共同研究のテーマである「粉末を利用した新素材開発」の一環として行われたものである。ご支援いただいた北海道テクノネットワーク推進協議会、(財)道央テクノポリス開発機構、ならびに、試験材料を提供された日立粉末冶金㈱に深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) 大島, 林, 平成2年度北海道テクノネットワーク共同研究成果報告書, 122
- (2) 大島, 林, 平成3年度北海道テクノネットワーク共同研究成果報告書, 95
- (3) 大島, 林, 中村 苫小牧工業高等専門学校紀要 第27号 (1992), 23
- (4) 大島, 林, 菊池 日本機械学会平成4年度材料力学講演論文集, (1992), 399
- (5) N.A.Freck and R.A.Smith, Powder Metallurgy, No.3(1981), 112

(平成7年11月30日受理)

