

# 討22

## オーステナイト系高合金油井管の機械的性質

日本鋼管 中央研究所

石沢嘉一 島田 透  
高岡達雄 稲積 透

### 1 緒言

最近の腐食性ガス井では、13%Cr 鋼からNi 基合金に至る広範囲の合金が耐食性油井管として使われるようになった。これらの油井管の使用にあたっては、井戸環境における耐食性が材料選択の決定的な要素であるが、油井管には耐食性のみならず優れた機械的性質も必要とされることは言をまたない。一般に、高合金化するほど高い強度が要求されるので、およそ25%以上のNiとCr, Moを含有するオーステナイト合金ないしNi基合金は冷間加工によって強化され、高深度サワーガス井のような厳しい腐食環境で用いられている。油井管のような構造材料の主たる強化法として加工硬化を利用することは、あまり例を見ないことであり、材料工学的に興味ある問題も含んでいる。そこで、本報ではこのようなオーステナイト系高合金油井管の機械的性質に着目してそれらを概観しつつ、強度と延性の関係、延・靱性の評価方法、残留応力、抗井温度での時効といった問題について若干の考察を加えたい。

### 2 加工方法と強度

#### 2-1 冷間加工プロセス

オーステナイト系高合金油井管の加工プロセスは、Fig. 1に示すように、熱間押し出しによって製造された管を素材にして、溶体化熱処理後、冷間引抜加工または冷間ピルガー圧延により所定の寸法に仕上げるといものである。引抜加工では、断面減少率で10~30%、ピルガー圧延では同40~60%の加工が加えられる。また、素材の均質化を目的として溶体化処理前に冷間引抜加工を行なうこともある。高い強度を得るためには、溶体化処理後の総加工量を大きくする必要がある、引抜加工を繰り返したり、引抜加工した上にさらにピルガー圧延を行なう場合もある。

#### 2-2 冷間加工による強度変化

Table 1に示す組成の合金から、上述のプロセスで加工された油井管の降伏強さ(0.2%耐力)、破断伸びと冷間加工度(溶体化処理後の総加工量)の関係をFig. 2に示す。降伏強さは加工度の増大とともに上昇しているが、合金

Table 1 Chemical compositions. (%)

	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Fe
A	22	25	3	-	0.14	bal
B	22	32	4.5	-	-	"
C	22	42	3	1.5	-	"
D	22	42	6	1.5	-	"
E	25	52	7	1.5	-	"

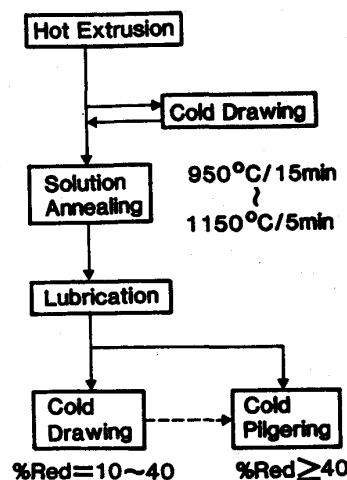


Fig.1 Cold work process of austenitic alloy tubulars.

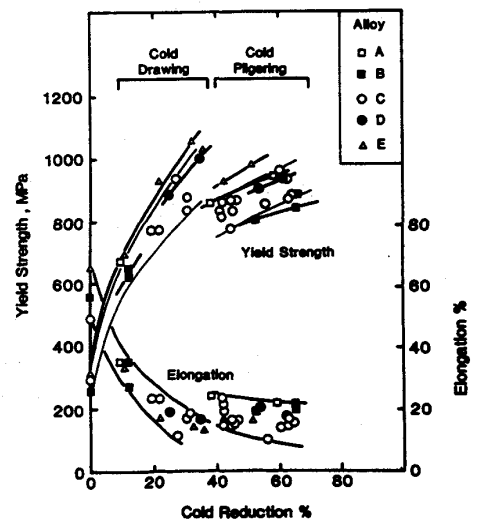


Fig.2 Yield strength and elongation of cold reduced austenitic alloy tubulars.

の種類にも依存する。また、ピルガー圧延の場合には加工度が大きい割に強化の度合いが小さい。いっぽう、破断伸びは加工度の増大によって低下する。このように合金の種類や加工方法が冷間加工度と強度の関係に影響を与えることは興味深いことであるが、まだ詳しいことは解っていない。見掛け上、NiとMoの含有量が増すほど、またNの添加によっても強度が高くなるといえる。引抜加工とピルガー圧延の差が強度・延性以外の諸性質に決定的な影響を与えるわけではなく、同一強度レベルであれば、ほぼ同等の品質を有すると考えてよいようである。

2-3 強度の異方性と肉厚方向の硬さ分布

冷間引抜加工あるいはピルガー圧延による管の加工は強度の異方性をもたらす、また加工中の変形が一様でないために肉厚方向の位置による強度差をもたらす。Fig. 3は降伏強さの管周(T)方向と管軸(L)方向の比を冷間加工度に対してプロットしたものである。この値は、加工度が小さいとき1に近いが、加工度が増すほど小さくなる傾向がある。管の加工においては、L方向への展伸と同時にT方向の収縮が加えられるので、このような異方性が現われたと考えられる。

管の断面上で硬さ分布を測定すると冷間加工した管の強度が肉厚方向の位置によって異なることが解る。Fig. 4に代表的な硬さ測定例を示す。引抜加工の場合、肉厚方向の硬さの変動は比較的小さいが、ピルガー圧延では、管の外表面がより硬化している。これはピルガー圧延のひとつの欠点と思われる。

3 延・靱性とその評価方法

オーステナイト系合金は、本来、延性に富む材料であるが、Fig. 1にも示したように、冷間加工を加えると強度の上昇とともに延性が低下する。延・靱性の評価には引張試験や衝撃試験を行なうことが一般的であるが、冷間加工した管では、T方向の延性が重要であり、試験片の採取が困難な小径管のT方向延性の評価には偏平試験が用いら

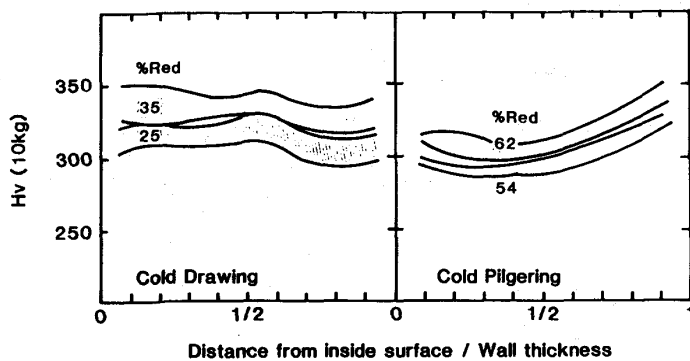


Fig. 4 Hardness distribution of cold reduced tubulars. Alloy D.

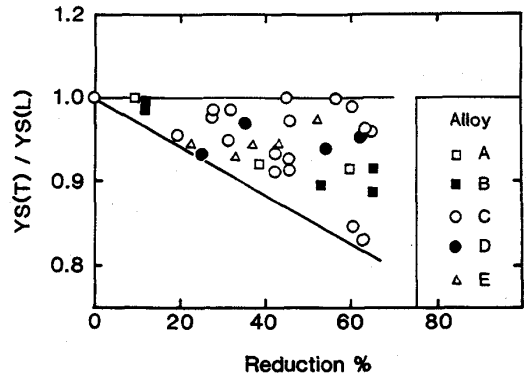


Fig. 3 Ratio of yield strength of transverse direction to that of longitudinal direction.

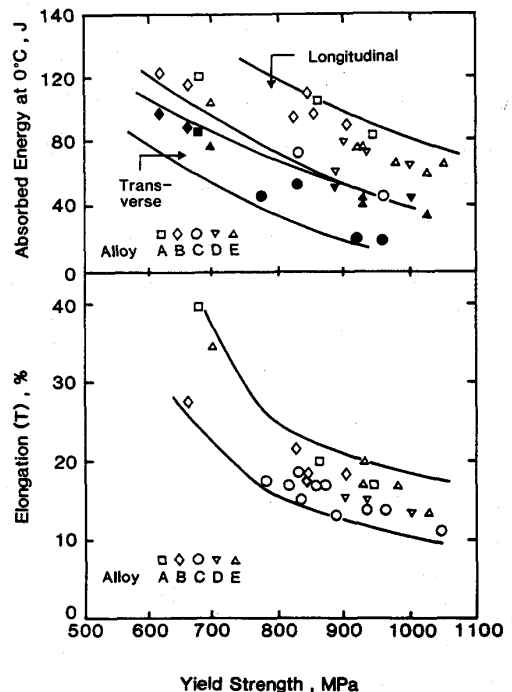


Fig. 5 Relations between impact strength, elongation of transverse direction, and yield strength.

れる。また、破壊力学的な手法によって延・靱性を評価することも試みられている。<sup>1)</sup>ここでは、冷間加工した高合金油井管のT方向延性と各種の評価方法について述べる。

### 3-1 T方向延性と強度の関係

衝撃吸収エネルギーとT方向の破断伸びの降伏強さに対する関係をFig. 5に示す。T方向の吸収エネルギーはL方向のそれよりかなり低い。これは冷間加工した管が持つ管軸方向に展伸した組織に起因すると考えられる。このような大きな差違は破断伸びによる評価ではとらえにくい。吸収エネルギーや破断伸びは、概して強度の上昇に従って低下するが、合金の種類にもある程度依存する。これは、冷間加工度と強度の関係について述べたように、合金によって加工硬化率が異なるためであろう。

### 3-2 偏平試験

鋼管の偏平試験はASTM A450に規定されているが、その評価規準は強度の低い材料を想定したもので、そのまま高強度の油井管に適用することはできない。そこで、まずASTM A450に準じて偏平試験を行ない、オーステナイト系油井管の変形挙動を観察して、偏平試験による延性の評価が可能かどうかを検討した。供試管の中には、Fig. 6に示すように、荷重点に近い管の内面あるいは直角方向の外面にき裂を生じるものがあり、き裂の発生にともなって荷重の低下を示した。このときの最大荷重に対応するたわみの初期外径に対する比 $\Delta$ によって、延性を評価することができる。Fig. 7に示すように $\Delta$ と(外径と管厚の比)の間には一定の関係があり、また、T方向の破断伸びが低いほど $\Delta$ が小さくなるので、 $\Delta$ を測定すればT方向の延性を推定することができる。偏平試験は、簡便法として製品出荷時の検定試験などに有用な方法である。

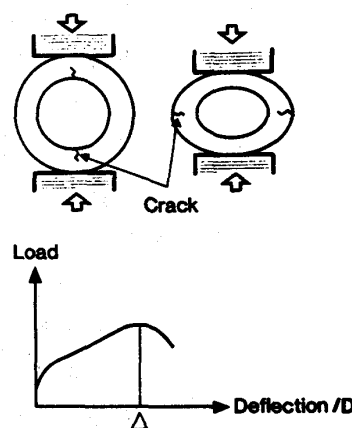


Fig.6 Schematic illustration of ring flattening test.

### 3-3 破壊靱性試験

材料の延靱性は、一般に、破断伸びや衝撃吸収エネルギーで評価されるが、実装置の安全性を確かめるには、線型破壊力学に基く破壊靱性試験を行なうことが望ましい。そこで、全管圧のコンパクトテンション試験片を用い、ASTM E813に従って破壊靱性値( $J_{Ic}$ )を測定した。 $J_{Ic}$ をKに換算した値を、油

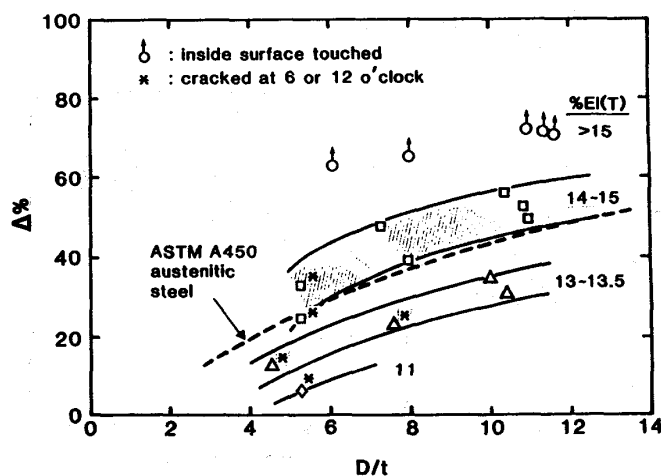


Fig.7 Relationship between  $\Delta\%$  and diameter-to-thickness ratio ( $D/t$ ) of pipes different in ductility. Alloy C.

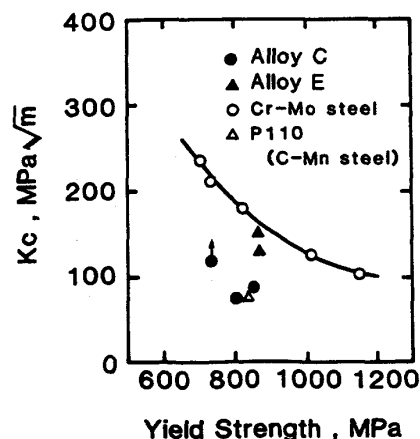


Fig.8 Fracture toughness of various oil country tubular goods.

井管の代表的鋼種であるCr-Mo鋼とC-Mn鋼の値とともにFig. 8に示す。800MPa程度に強化されたオーステナイト系油井管の破壊靱性は、Cr-Mo鋼のそれより低く、C-Mn鋼と同程度である。しかし、この値でも破壊力学に基いた計算から油井管として十分な靱性を有することが確かめられている。

4 残留応力

オーステナイト系油井管は冷間加工仕上げのまま使用されるので残留応力を取り去ることは困難である。残留応力の存在は使用中に予想される環境破壊を促進する可能性があるので十分な注意を払う必要があり、加工条件によってどのような応力分布が生じるかをよく知っておくべきであろう。Fig. 9は、このような観点から残留応力分布を測定した例である。引抜加工材は、管の内面側で圧縮、外面側で引張の残留応力となる。ところが、ピルガー圧延材は、管の内面側で周方向の引張残留応力を生じている。軸方向応力の分布は加工度によってかなり異なるが、内面側では圧縮となるようである。環境破壊の点では引張残留応力を除くことが望まれるが、まだ有効な手段は見出されていない。今後の課題である。

5 抗井温度での時効

深井戸の温度は200~300℃に達することがある。オーステナイト系油井管をこの温度域に加熱すると機械的性質にわずかながら変化を生じる。Fig. 10は溶体化処理した合金の引張試験片に予歪を与えて除荷したものを異なる条件で時効し、時効処理後、再度引張試験を行なって時効による変形応力の増加量を測定した結果を示している。極く短時間の時効でも応力の増加、すなわち強度の上昇が認められ、応力の増加量は時間とともに徐々に増大するが、高温の時効では最大値に達した後減少している。また、予歪が大きいほど応力の増加量が大きくなる。このような実験結果から、時効による機械的性質の変化は、冷間加工によって導入された原子空孔と侵入形元素の再配列に起因する歪時効現象と考えられる。時効による強度の増加は、延性の低下をともなうが、品質上問題になるほど著しい劣化は起こらない。

6 結言

オーステナイト系高合金油井管は、耐食性に優れると同時に極めて高い強度を有する合金管である。この種の合金は冷間加工によって容易に強化することができ、強化にともなって延性は低下するが、1000MPa以上の強度でも油井管としての使用に耐える十分な延性を有している。いっぽう、冷間加工によって強化された合金管には、強度の異方性や残留応力の存在という欠点が内包されている。冷間加工によって得られるこれらの諸性質は加工条件に依存すると考えられるが、詳しい解析はまだほとんど行なわれていない。今後、様々な角度からより詳細な研究が行なわれることを期待している。

Reference 1) 島田他、鉄と鋼、70(1984)、S483

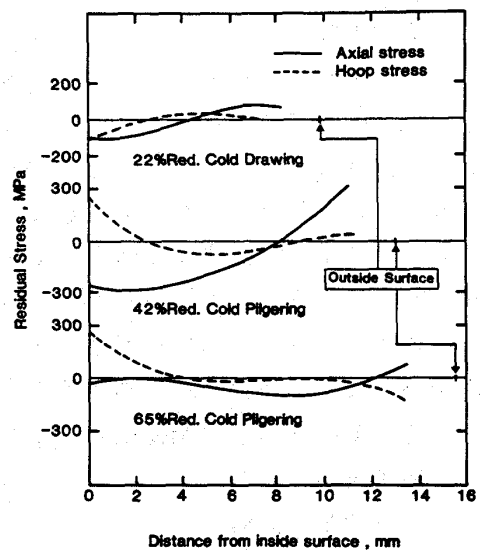


Fig. 9 Distribution of residual stress in cold reduced tubulars (alloy C).

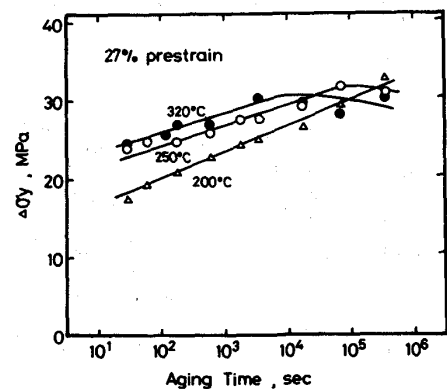


Fig. 10 Stress increase caused by strain aging for about 27% pre-strain. Alloy C.