

鋼材と溶接

— 高温用低合金鋼と溶接 —

高温高圧下で操業されるボイラー、リアクターなどの製作には、高温用低合金鋼が使用される。これらの鋼材には高温に起因する材質変化によって、いろいろなぜい化、損傷が起こる。従って、これらの現象を十分把握したうえで、設備の設計、鋼材の選択、溶接施工を行わなければ重大な設備破壊事故を起こす懸念がある。

本稿では、高温用低合金鋼とその溶接部において、主として操業過程で発生する材料特性の劣化と損傷についてその原因と防止対策の観点から記述する。



高温用低合金鋼

E - 1

種類

現在主として使用されている高温用低合金鋼の種類と規格、使用温度を第1表に示す。

操業条件が高温高圧の場合、あるいは耐酸化性、耐水素性が要求される場合には、Cr, Mo含有量の多い鋼材が使用される。なお、各種合金元素の役割、不純物元素の影響については、その都度記述する。

高温強度

温度上昇にともなう2種類のCr-Mo鋼の強度変化を第1図に示す。

温度上昇とともに、全体としては強度は低下するが、引張り強さの場合には、200~450℃の範囲で、あまり変化しない領域がある。この現象を青熱ぜい性と呼んでいる。しかし耐力の場合には、この現象がはっきりと現れない場合が多い。

クリープ

①クリープ現象

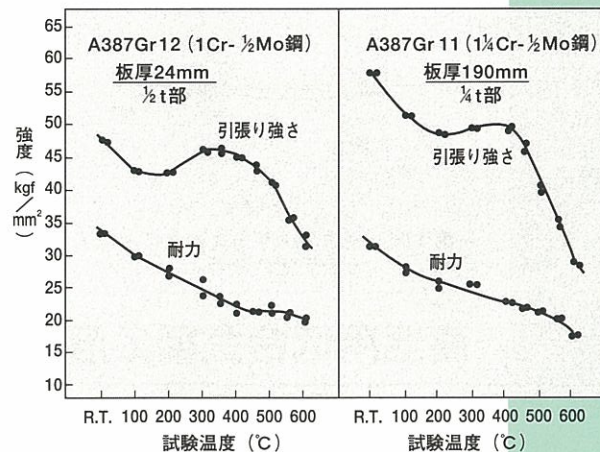
金属材料に応力を付加すると、それぞれの応力に対応したひずみが生じる。低温~常温の範囲内では、時間が経過してもひずみ量はそのままの状態に留まっているが、高温の場合には、時間の経過とともにひずみ量は増大し、ついには破断に至る。この現象をクリープという。

②クリープ試験

クリープは通常、定荷重型のクリープ試験機によって測定される。そしてクリープ特性値は一定温度のもとで一定時間に規定のクリープひずみを生じる応力(例えば10³時間で0.1%のひずみを生ずる応力)、または一定時間でクリープ破断を生じるときの応力(例えば10⁴時間で破断する応力)で

第1表 各種高温用低合金鋼の種類と使用温度範囲

成分系	熱処理	規格		標準使用温度範囲(°C)
		ASTM	JIS	
Siキルド鋼	N	A515	SB	350~450
1/2Mo鋼	N	A204	SB-M	400~500
1Cr-1/2Mo鋼	NT	A387Gr12	SCMV2	450~550
1 1/4Cr-1/2Mo鋼	NT	A387Gr11	SCMV3	550~600
2 1/4Cr-1Mo鋼	NT	A387Gr22	SCMV4	550~600
	QT	A542		< 350
3Cr-1Mo鋼	NT	A387Gr21	SCMV5	200~600
5Cr-1/2Mo鋼	NT	A387Gr 5	SCMV6	200~600
9Cr-1Mo鋼	NT	A387Gr 9		450~600



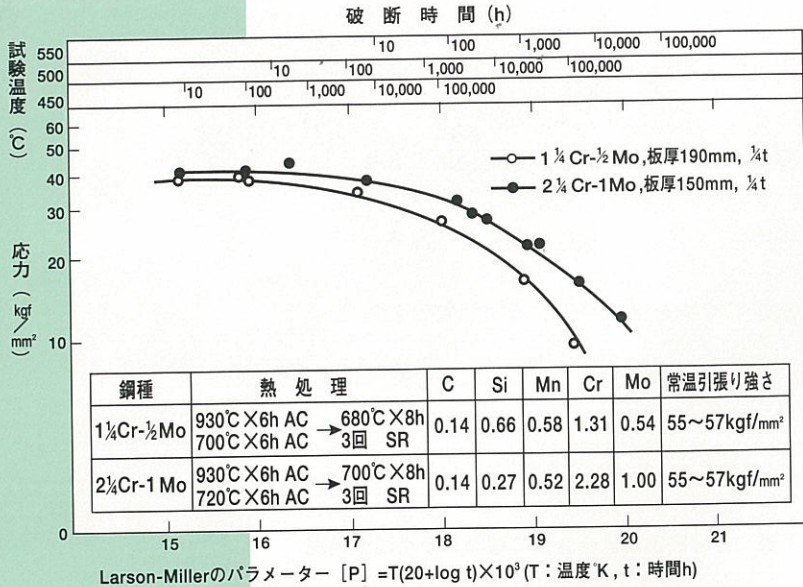
第1図 2種類のCr-Mo鋼鋼板の高温引張試験結果

示される。前者をクリープ強さ、後者をクリープ破断強さと呼んでいる。

③クリープマスター曲線

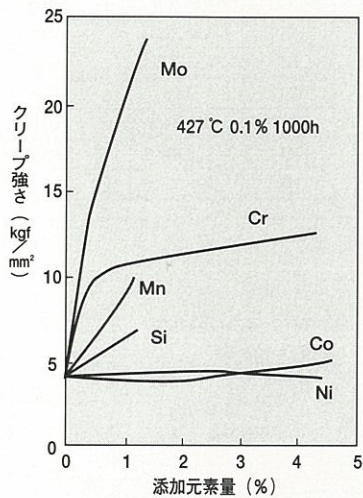
クリープは高温の応力下で、原子あるいは転位が熱揺動することによって起こる現象であるために、データは速度論的に整理することができる。すなわち温度と時間の項を含むLarson-Millerのパラメーターを用いることによって、クリープ特性値は一つの曲線によって表すことができる。

1) 牧岡ほか：神戸製鋼技報
Vol.22(1972), No.2, p.
54

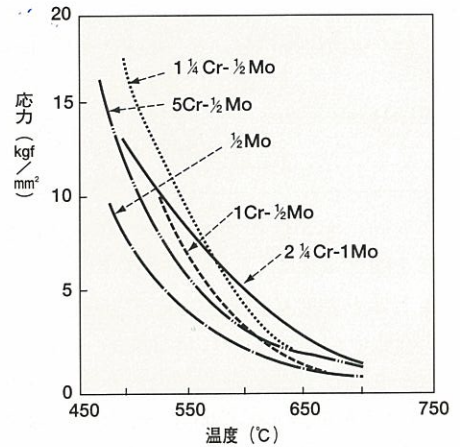


第2図 2種類のCr-Mo鋼鋼板のクリープ破断強度

2) 鉄鋼便覧: Vol.4(1981), p.196



第3図 純鉄のクリープ強さに及ぼす合金元素の影響



第4図 各種Cr-Moの10⁴時間クリープ破断強さ (ASTM-ASME)

E-2

高温用低合金鋼の溶接

溶接開先形状

高温用低合金鋼の溶接には、手溶接、半自動溶接、自動溶接など、ほとんどの溶接法の適用が可能である。圧力容器の場合、極厚の厚板や鋳鍛鋼が用いられるが、板厚が50mmを超える場合には、溶接能率向上の見地から、X型開先よりも開先面積の小さいU型開先が用いられる。

溶接部の予熱と後熱

これらの鋼は多量のCr, Moなどを含有してい

第2図は2種類のCr-Mo鋼の温度-応力-クリープ破断強さの関係をこのパラメータによって図示したものである¹⁾。この曲線をクリープ破断マスター曲線(Master Creep Rupture Curve)と呼んでいる。同様に、温度-応力-クリープ強さの関係も1本の曲線で表すことができ、この曲線をクリープ強さマスター曲線と呼んでいる。これらのクリープマスター曲線は、高温高圧設備の設計において非常に重要なものである。

4) クリープにおよぼす合金元素の影響

鋼のクリープは化学成分、熱処理法、結晶粒度などの影響を受けるが、化学成分の影響がもっとも大きい。第3図は純鉄のクリープ強さに及ぼす合金元素の影響を示しており²⁾、Moの改善効果ももっとも大きいことが分かる。Crは1%までは有効であるが、それ以上では効果がほとんど認められない。第4図は各種Cr-Mo鋼の温度とクリープ破断強さとの関係を示す。約575°Cまでは1 1/4 Cr-1/2 Mo鋼が、約575°C以上では2 1/4 Cr-1 Mo鋼が優れた値を示すことが分かる。

るために炭素当量(Ceq)が非常に高いので、溶接低温われが発生しやすい。従って、われ防止のためには溶接時の予熱が必要不可欠となる。

また、溶接終了後は(i)溶接残留応力の除去 (ii)溶接中に侵入したHの除去 (iii)溶接部組織の安定化のために後熱と称する応力除去焼なましSR(Stress Relief Annealing)処理が行われる。第2表に各種高温用低合金鋼の推奨予熱、SR温度を示す。

再熱われ

1) 再熱われの特徴

Cr-Mo鋼あるいはHT-760級高張力鋼などの溶

接部にSR処理を施すと、溶接金属の止端部で溶接熱影響部(HAZ)の粗粒化部に沿って写真1に示すような粒界われが発生することがある。とくに圧力容器のノズルやスカートの溶接取り付け部など、形状が不連続部の応力集中を起こしやすい場所に発生しやすい。このわれを再熱われまたはSRわれと呼んでいる。



写真1 再熱われの顕微鏡写真

②再熱われの防止対策

再熱われを防止するには、まず第一に応力集中を起こしやすい形状不連続部の回避あるいは修正が必要である。そのためには、(イ)すみ肉溶接から突合わせ溶接への溶接設計の変更 (ロ)アンダーカット、オーバーラップ、過大余盛などの形状不

第2表 各種Cr-Mo鋼の推奨予熱、SR温度

鋼種	推奨される予熱温度℃	SR処理温度(℃)		
		ISO TC/II	ASME Sec.VIII	HPI
1/2Cr-1/2Mo	150~200	620~660	≥ 593	≥ 590
1Cr-1/2Mo	150~300	620~660	≥ 593	≥ 620/≥ 590
1 1/4Cr-1/2Mo	200~350	620~660	≥ 593	≥ 620/≥ 590
2 1/4Cr-1Mo	200~350	625~750	≥ 677	≥ 675/≥ 650
3Cr-1Mo	250~350	—	≥ 677	≥ 675/≥ 650
5Cr-1/2Mo	250~350	670~740	≥ 677	≥ 675/≥ 650

良部の修正、除去などの対策が有効である。つぎに止端部HAZの粗粒化の回避あるいは修正が必要である。

そのためには(ハ)この部位で過大入熱の溶接を避ける、さらには(ニ)止端部にテンパビードと呼ばれる小入熱の溶接ビードを置いて、粗大化した部分を再溶融し細粒化を図る、などの対策が必要である。なお、このテンパビードは止端部の形状不良の修正と残留応力の緩和にも有効であり、一石三鳥の効果がある方法である。

設備稼働中のぜい化損傷

焼もどしぜい性

①焼もどしぜい性の特徴

設備を350~500℃で長期間運転すると、鋼材の元のオーステナイト粒界に鋼中不純物であるP, Sb, Snなどが拡散して偏析する。そのため粒界がぜい化し、粒界破壊を起こす懸念がでてくる。この現象を焼もどしぜい性、あるいは長時間加熱ぜい性と呼んでいる。写真2は、粒界破壊を起こした2 1/4Cr-1Mo鋼のシャルピー試験片の破面SEM写真を示したものである。

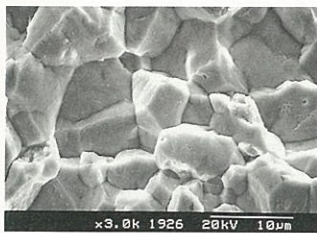


写真2 粒界破壊したシャルピー試験片破面のSEM写真

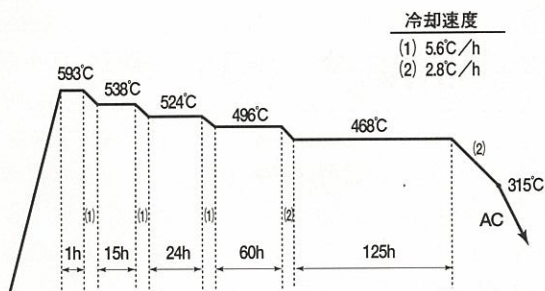
なお、このぜい性は上記温度よりも低くても高くても起こりにくくなる。これは不純物の鋼中へ

の溶解度と拡散速度が温度によって変化する現象によるものである。

②焼もどしぜい性の評価

(1)ステップ・クーリング法

鋼材の焼もどしぜい性の感受性を、実際の設備稼働条件で評価するにはきわめて長期間を要するので、比較的短時間で評価する方法として、ステップ・クーリング法が用いられている。この熱処理



第5図 ステップ・クーリング(SOCAL)線図の一例

法の一例を第5図に示すが、鋼材の加熱温度と保持時間を順次変えて、鋼材のぜい化を促進させる方法である。

(2)焼もどしぜい化感受性指数

鋼中元素のぜい化感受性を評価する方法として、つぎのようなぜい化推定式が提案されている。

- 3) 宮野樺太男：圧力技術，
Vol.12(1974)No.3, p.135
4) R. Bruscato : Welding J.,
(1970), April, p.148-S
5) 勝亦ほか：圧力技術，
Vol.19, No.3, p.8

(イ) J-Factor

$$J = (Si + Mn)(P + Sn) \times 10^4 (\text{wt}\%)^3$$

(ロ) R. Bruscatoの係数

$$\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^{-2} (\text{ppm})^4$$

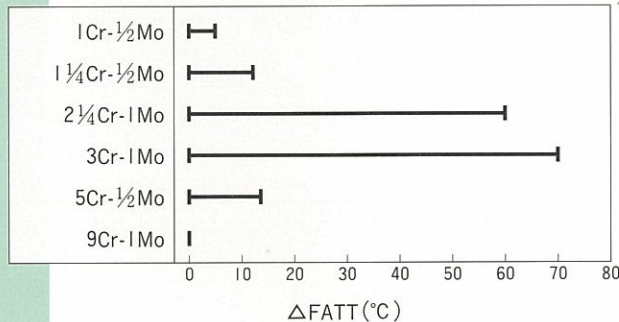
(ハ) $K_1 = (2Si + Mn)\bar{X} \times 10^4 (\text{wt}\%)^5$

焼もどしぜい性をとくに重要視する場合には、鋼材に対してこれらの値を購入仕様として制限を設けられることがある。

(3) 焼もどしぜい化に及ぼす合金元素の影響

第6図は各種Cr-Mo鋼をステップ・クーリング法によって処理した試験材について、2Vシャルピー試験を実施したときの破面遷移温度の上昇量 ΔFATT を示したものである。これらの鋼の中では $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼と $3\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼がもっともぜい化しやすいことが分かる。

しかし、Cr, Mn, Siなどの合金元素は直接的に粒界ぜい化を起こすということではなく、P, Sb, Snなどの粒界偏析を促進する元素として考えられている。



第6図 各種Cr-Mo鋼の焼もどしぜい化感受性の比較

(4) 焼もどしぜい化に及ぼす材質の影響

鋼材のマイクロ組織の影響としてはフェライト・パーライト組織がもっとも感受性が低く、ベイナイト、マルテンサイトとの順に感受性が増加する。また同一組織では高強度になるほど感受性は高くなる。従って、感受性を小さくするには後熱処理を行って組織を安定化させることが重要である。

また鋼材の結晶粒の影響としては、細粒になるほど粒界面積が大きくなるので感受性は低くなる。従って、Ti, Nb, Vなどを添加して結晶粒の微細化を図ることが有効である。

水素によるぜい化、損傷

① 水素侵食

(1) 水素侵食の特徴

水素添加装置など、高温高压下の水素環境下で使用される容器では、鋼中に侵入した水素(H)と鋼中の炭素(C)が反応して、 CH_4 ガスを発生し、鋼中に

気泡や微小われを生成させることがある。この現象を水素侵食(Hydrogen Attack)と呼んでおり、とくに炭素鋼や $\frac{1}{2}\text{Mo}$ 鋼に発生しやすい。

(2) 水素侵食の防止法

水素侵食はCr量の高い鋼材ほど発生しがたくなる。また、Ti, Nb, Vなどの炭化物を生成しやすい元素を添加した鋼も水素侵食の防止に有効である。API(American Petroleum Institute)では水素雰囲気中で使用される鋼材について、使用温度と水素圧力に対する侵食限界曲線を実用例をもとにして作成しており、この図をネルソン(Nelson)線図と呼んでいる。紙面の都合上割愛するが、この図は高温高压下で水素を使用する設備の設計にきわめて重要である。

② ステンレス肉盛溶接部の剥離われ

(1) 剥離われの特徴

反応容器の内壁には、耐食性向上のためのオーステナイトステンレス鋼を肉盛溶接することがある。そして、この設備の運転停止の際の降温時にボンド近傍の肉盛溶接金属側に剥離われが発生することがある。設備運転時には容器内のHがまず肉盛溶接金属部へ侵入し、順次本体のフェライト系鋼へと侵入・拡散し、最後に壁外へ逸散する。そして各相のH量は定常状態ではそれぞれバランスがとれているが、運転停止の降温時にはこのバランスが崩れ、フェライト相のHが肉盛金属のオーステナイト相へ逆に拡散して、ここでHの異常集積が起こり剥離われが発生する。また、降温時の冷却速度が高くなるほど発生の傾向は大きくなる。

これは母材のフェライト相と肉盛層のオーステナイト相でHの溶解度、拡散速度および拡散速度の温度依存性に差があることに起因して起こる現象である。

(2) 剥離われの防止法

このわれを防止するためには運転停止時の冷却速度をできるだけ遅くすることが肝要である。ついで、オーステナイトステンレス相の粒界ぜい化を少なくするために、低炭素の溶接材料の使用、また結晶粒の粗大化を防ぐために、過大な入熱での溶接を避けるなどの対策が必要となる。

高温高压下で使用される高温用低合金鋼に起こるクリープ、焼もどしぜい化および水素によるぜい化損傷について記述した。紙面の都合上、寸足らずになったことは否めないが、その概要は理解いただけたと思う。

鋼材と溶接というメインテーマで2年間、4回にわたって連載した解説記事を通読していただき、厚く感謝する次第である。(前顧問 笠松 裕)