

論 文

UDC 620.194.2 : 620.193.23 : 620.193.24 : 620.193.28 :
669.141.24 : 669.15'26'28-194 : 669.14.018.8CO-CO₂-H₂O 雰囲気における鋼の応力腐食割れ

上門 正樹*・堺 邦益*・清重 正典*

Stress Corrosion Cracking of Steels in CO-CO₂-H₂O Environments

Masaki UEKADO, Kuniyasu SAKAI, and Masanori KIYOSHIGE

Synopsis :

The effects of gas composition, alloying elements, cold working and heat treatment on the susceptibility of stress corrosion cracking of mild steels, low alloy steels and austenitic stainless steel in CO-CO₂-H₂O environments have been investigated.

The results obtained are summarized as follows :

(1) The transgranular stress corrosion cracking occurred in CO-CO₂ environments which are consisted of both vapor and liquid phase. Stress corrosion cracks initiated from pits on the surface of specimens in liquid phase.

(2) The resistance of the killed SS41 steel to stress corrosion cracking is superior to the rimmed SS41 steel. The Cr-Mo steels containing Cr more than 9% did not suffer from stress corrosion cracking in CO-CO₂ environments.

(3) The susceptibility of these steels to stress corrosion cracking was increased with increase of hardness due to heat treatment.

(4) Mild steels are more susceptible to stress corrosion cracking at 5% cold working than at other cold working conditions.

1. 緒 言

CO-CO₂-H₂O 雰囲気における鋼の応力腐食割れは、我国においては CO-CO₂ 混合ガス容器が突然破壊するという事故が発生して以来注目され、これらに関する研究が開始された^{1)~6)}。一般的に CO-CO₂-H₂O 雰囲気における鋼の応力腐食割れは、粒内割れとされており、炭素鋼および低合金鋼にこれらが発生しやすいこと、またこの系の応力腐食割れは水分を含まない CO-CO₂ 乾性ガス雰囲気中では起こらないことが認められている^{1)~8)}。

しかし、これらの研究では比較的高圧下の CO-CO₂ 雰囲気で行われており、化学プラント装置等比較的低下下の CO, CO₂ 雰囲気下でも使用されることがあり、これらの雰囲気でも検討することが必要であると思われる。また、材料面においても実装置では冷間加工、熱処理、溶接等が不可欠であり、これらの加工の影響についても検討することが重要と思われる。

そこで、比較的低下下の CO-CO₂-H₂O 雰囲気における炭素鋼および低合金鋼の応力腐食割れについて、そ

れに影響する雰囲気因子および熱処理、冷間加工などを含ま材料因子を明らかにするための実験を行った。

また、この系の応力腐食割れ破面を走査型電子顕微鏡を用いて観察し、その破面の特徴について検討した。

2. 実験方法

供試材として市販のキルド鋼 SS 41, リムド鋼 SS 41, STBA24(2¹/₄Cr-1Mo 鋼), STBA25(5Cr-1/2Mo 鋼), STBA 26 (9Cr-1Mo 鋼) および SUS 304 (18-8 ステンレス鋼) を用いた。これらの鋼の化学組成および引張性質を Table 1, 2 に示す。

各鋼種とも受入材および再熱処理材 (受入材を再熱処理した材料), 冷間加工材を用いた。これらの鋼の熱処理条件を Table 3 に、これらのマイクロ組織を Photo. 1 に示す。冷間加工材は、インストロン型引張試験機により、おのおの (キルド鋼 SS 41, リムド鋼 SS 41) 5, 10, 30% の塑性ひずみを付与したものとした。

試験片の形状・寸法を Fig. 1 に示す。試験片として Fig. 1 (a) に示す定ひずみ 4 点支持曲げ平滑試験片を用いた。なお同図 (b) に示す定ひずみ 4 点支持曲げ切り欠

昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 7 月 7 日受付 (Received July, 7, 1980)

* 川崎重工業(株)技術研究所 (Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

Table 1. Chemical composition of steels used. (wt%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Rimmed SS 41	0.22	<0.01	0.46	0.019	0.010	0.022	—	—
Killed SS 41	0.14	0.18	0.70	0.020	0.007	0.020	—	—
STBA 24 (2 1/4 Cr-1Mo)	0.09	0.40	0.49	0.022	0.013	2.18	0.93	—
STBA 25 (5Cr-1/2 Mo)	0.10	0.38	0.45	0.022	0.004	4.87	0.54	—
STBA 26 (9Cr-1Mo)	0.11	0.56	0.47	0.025	0.003	8.10	0.96	—
SUS 304	0.07	0.62	1.61	0.027	0.008	18.26	—	9.16

Table 2. Tensile properties of steels used.

Steel	Tensile properties		
	σ_y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El (%)
Rimmed SS41	25.8	43.1	34.7
Killed SS41	26.5	44.1	33.9
STBA 24	30.6*	50.3	30.0
STBA 25	53.9*	65.5	19.2
STBA 26	40.4*	62.0	25.0
SUS 304	34.5*	68.2	65.5

* $\sigma_{0.2}$ 0.2% Proof stress

き付試験片は受入材の一部の試験条件のみ用いた。その切り欠きの形状係数は2.7である。これらの試験片のうち、キルド鋼 SS 41, リムド鋼 SS 41 および SUS 304 は、その長手方向が圧延方向と直角になるように採取した。STBA 24, STBA 25, STBA 26 は、各供試管の軸方向と試験片の長手方向が一致するように採取した。

負荷応力は、4点支持曲げホルダーを用い、それぞれ

の鋼の受入材の降伏強さ（または0.2%耐力）、およびその降伏強さの80, 60, 40%の応力を付加した。

試験環境は、CO, CO₂, N₂, CH₄を含む混合ガス環境であり、水分に関しては乾燥状態 (Dry), 湿潤状態 (Vapor), 液相状態 (Liquid) になるように調整した。

実験装置は Fig. 2 に示すようにオートクレーブ (SUS 304 製, 容量 10 l) を使用し、乾燥状態試験では、あらかじめオートクレーブをロータリポンプを用い真空にし、試験ガスを3回置換した後、試験圧力までガスを充てんした。湿潤状態試験では、オートクレーブの底部に蒸留水 (比抵抗 $\sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, pH7.0 \sim 7.1) を 200 cc 入れて、N₂ ガスを 30 min 間通じた後、ロータリポンプを用い真空にした。その後、試験ガスを3回置換し、試験圧力までガスを充てんした。液相状態試験では試験片が水中に浸漬するように蒸留水を入れ、前述の方法により試験ガスを充てんした。なお、これらの試験ガスをガスクロマトグラフを用いて所定の濃度になっているかどうかを確認した。試験圧力は 10, 18 kg/cm²・G とし、試験温度は 50°C 一定とした。これらの試験条件をまとめて Table 4 に示す。

Table 3. Heat treatment of steels used.

Steel	As received	Heat treatment			
		W. Q.	A. C.	F. C.	Q. T.
Rimmed SS41	Normalized	900°C × 30 min W. Q.	900°C × 30 min A. C.	900°C × 30 min F. C.	900°C × 30 min W. Q.
Killed SS41		600°C × 60 min W. Q.			
STBA 24	Annealed	930°C × 30 min W. Q.	930°C × 30 min A. C.	930°C × 30 min F. C.	930°C × 30 min W. Q.
STBA 25	Normalized and Tempered				725°C × 30 min W. Q.
STBA 26					
SUS 304	Solution treated (1 050°C × 30 min W. Q.)	—			

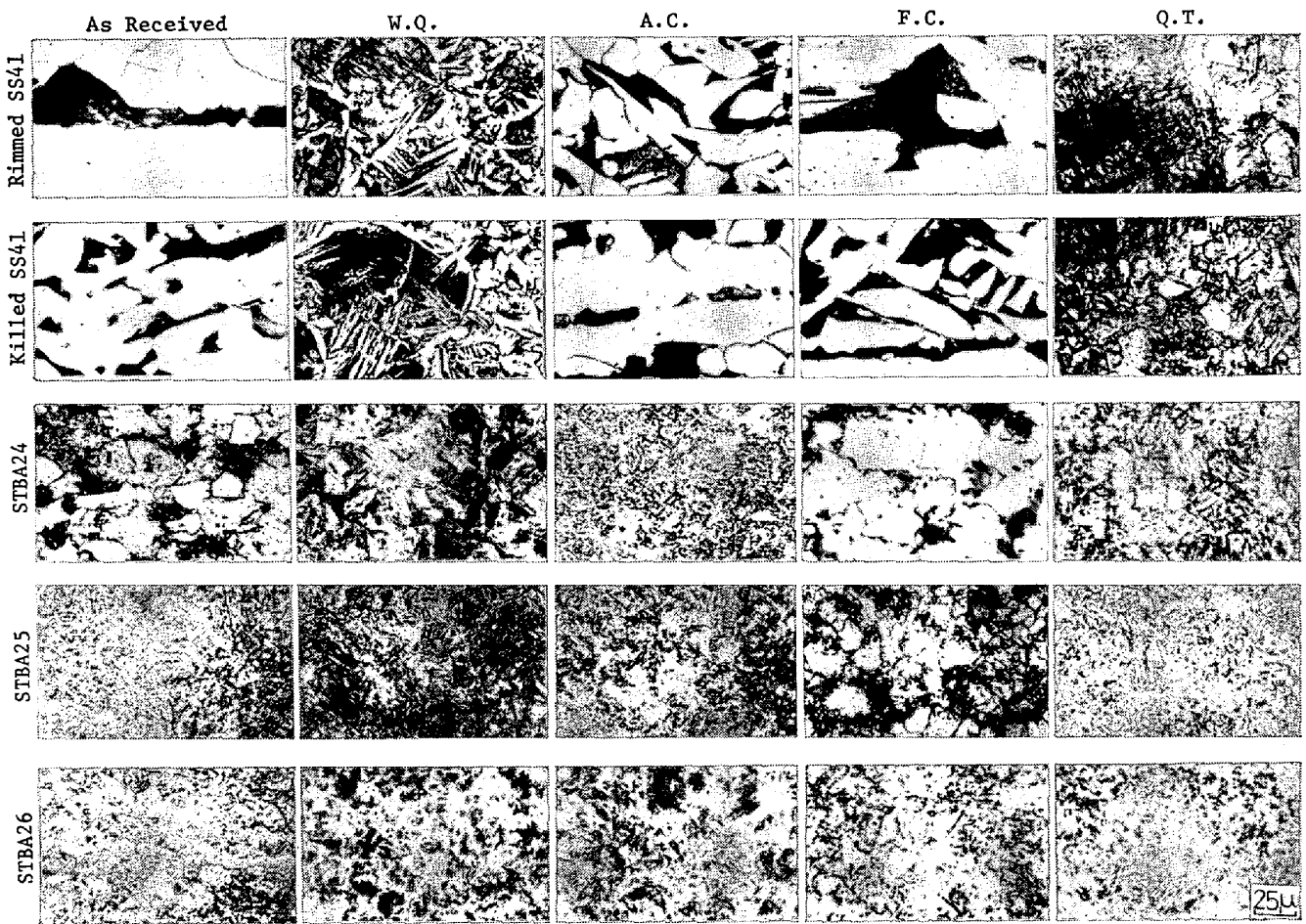


Photo. 1. Microstructures of steels used.

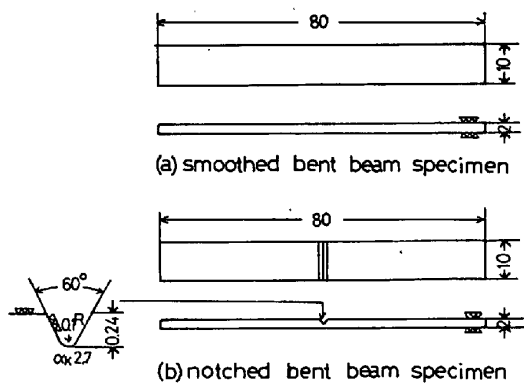


Fig. 1. Dimension of stress corrosion cracking specimen (mm).

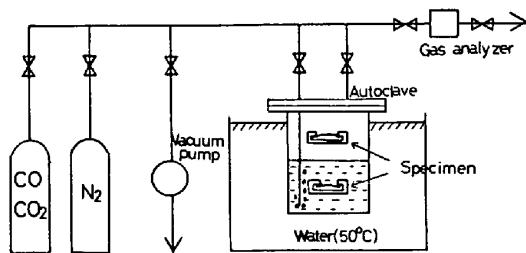


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 4. Experimental conditions.

Test condition		A	B	C	D	E
Gas Content (vol. %)	CO	40			Balance (80)	15
	CO ₂	10		25	20	45
	CH ₄	~0.1				
	N ₂	Balance			—	Balance
Phase (H ₂ O)	Dry Vapor		Liquid			
Total Pressure (kg/cm ² G)	10		18			
Temperature (°C)	50					
Period (h)	1 000					
Specimen	smooth			smooth, v-notch (as-received)		
Materials condition	as-received, cold work (5, 10, 30%)			as-received, cold work, heat treatment		

Table 5. Results of stress corrosion cracking tests.

Test		Condition	A	B	C	D	E
Gas Content		CO (%)	40	40	40	80	15
		CO ₂ (%)	10	10	25	20	45
		Balance	N ₂ , CH ₄ ~0.1%				
Total pressure (Kg/cm ² G)			10	18	18	18	18
Phase (H ₂ O)			Dry, Vapor, Liquid				
Rimmed SS41	As-received	Smooth	○△■	△□	△□	△□	△□
		V-notch	—	—	—	△■	△□
	Cold work (%)	5	○▲■	△□	△■	△□	△□
		10	○△□	△□	△□	△□	△□
		30	○△□	△□	△□	△□	△□
Heat treatment			—	—	—	△■	△□
Killed SS41	As-received	Smooth	○△□	△□	△□	△□	△□
		V-notch	—	—	—	△□	△□
	Cold work (%)	5	○△□	△□	△□	△□	△□
		10	○△□	△□	△□	△□	△□
		30	○△□	△□	△□	△□	△□
Heat treatment			—	—	—	△■	△□
STBA 24	As-received	Smooth	○△□	△□	△□	△■	△■
		V-notch	—	—	—	△■	△■
	Heat treatment			—	—	—	△□
STBA 25	As-received	Smooth	○△□	△□	△□	△□	△□
		V-notch	—	—	—	△□	△□
	Heat treatment			—	—	—	△□
STBA 26	As-received	Smooth	○△□	△□	△□	△□	△□
		V-notch	—	—	—	△□	△□
	Heat treatment			—	—	—	△□
SUS 304	As-received	Smooth	○△□	△□	△□	△□	△□
		V-notch	—	—	—	△□	△□

Crack No crack

Dry	●	○
Vapor	▲	△
Liquid	■	□

Applied stress of all specimens : Yield stress (0.2% proof stress) of each steel in as-received condition.

なお、試験時間は 1000 時間とし、試験終了後、割れの有無を試験片表面に関しては、拡大鏡 (×10) で、また試験片の中央部 (約 40 mm) の縦断面を光学顕微鏡 (×400) により調査した。その後、割れの破面を走査型電子顕微鏡により観察した。

3. 実験結果

3.1 ガス雰囲気の影響

CO, CO₂ の混合ガス組成の異なる雰囲気中で応力腐食

割れ試験を行った結果を Table 5 に示す。これらのガス雰囲気 5 条件中 4 条件に割れが認められた。これらのガス雰囲気中で割れが生じた試験片の負荷応力は、降伏応力 (または 0.2% 耐力) のみであり、降伏応力の 80%, 60%, 40% のいずれを負荷した試験片でも割れは認められなかった。そこで、以下に示す試験結果はいずれも降伏応力 (または 0.2% 耐力) を負荷したものの結果のみを示す。ガス雰囲気のうち水分量が応力腐食割れ感受性に大きく影響しているようであり、乾燥状態では試験条

Table 6. Effect of heat treatment on stress corrosion cracking in the CO/CO₂ atmosphere.

Test condition		D						E					
Gas Content (%)	CO	80						15					
	CO ₂	20						45					
	Balance	N ₂ , CH ₄ ~ 0.1											
Total pressure(kg/cm ² G)		18						18					
Phase	Steel	As received	Cold work	W.Q	A.C	F.C	Q.T	As received	Cold work	W.Q	A.C	F.C	Q.T
Vapor	Rimmed SS41	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	Killed SS41	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	STBA 24	△	—	△	△	△	△	△	—	△	△	△	△
	STBA 25	△	—	△	△	△	△	△	—	△	△	△	△
	STBA 26	△	—	△	△	△	△	△	—	△	△	△	△
	SUS 304	△	—	—	—	—	—	△	—	—	—	—	—
Liquid	Rimmed SS41	■	□	■	□	□	■	□	□	□	□	□	□
	Killed SS41	□	□	□	■	□	■	□	□	□	□	□	□
	STBA 24	■	—	□	□	□	□	■	—	■	■	□	■
	STBA 25	□	—	□	□	□	□	□	—	■	□	□	□
	STBA 26	□	—	□	□	□	□	□	—	□	□	□	□
	SUS 304	□	—	—	—	—	—	□	—	—	—	—	—

Crack ▲ ■ No crack △ □

Applied stress of all specimens: Yield stress (0.2% proof stress) of each steel in as-received condition.

件Aに示すように各鋼種とも割れが認められなかった。そして、湿潤状態では試験条件Aにおいてリムド鋼 SS 41 の 5% 冷間加工材にのみ割れが認められた。さらに液相状態では試験条件A, C, D, E の 4 条件に割れが認められた。

次に、ガス組成の影響については、Table 5 に示したように、液相状態試験の結果から比較すると、試験条件A, Cではリムド鋼 SS 41 のみ割れが認められたが、試験条件Dでは、リムド鋼 SS 41 以外に、再熱処理したキルド鋼 SS 41 および STBA 24 で割れが認められている。さらに、試験条件Eでは、STBA 24 および再熱処理した STBA 25 に割れが認められた。このことから、CO, CO₂ のガス組成により鋼種の応力腐食割れ感受性がかなり異なっていることが明らかとなった。

次にガス圧力の影響については、Table 5 の試験条件A, Bに示すように、同一 CO, CO₂ 組成でもリムド鋼 SS 41 は、圧力 10 kg/cm²・G の場合に割れが認められたのに対して、18 kg/cm²・G の場合には割れが認められず、必ずしも圧力が高いと割れやすい傾向にはならなかった。

3.2 鋼種、冷間加工および熱処理の影響

CO-CO₂-H₂O 雰囲気における応力腐食割れ感受性の

高い鋼種は、リムド鋼 SS 41, STBA 24 であり、キルド鋼 SS 41, STBA 25, STBA 26, SUS 304 では受入材に関しては、割れ感受性は比較的小さいと思われる。

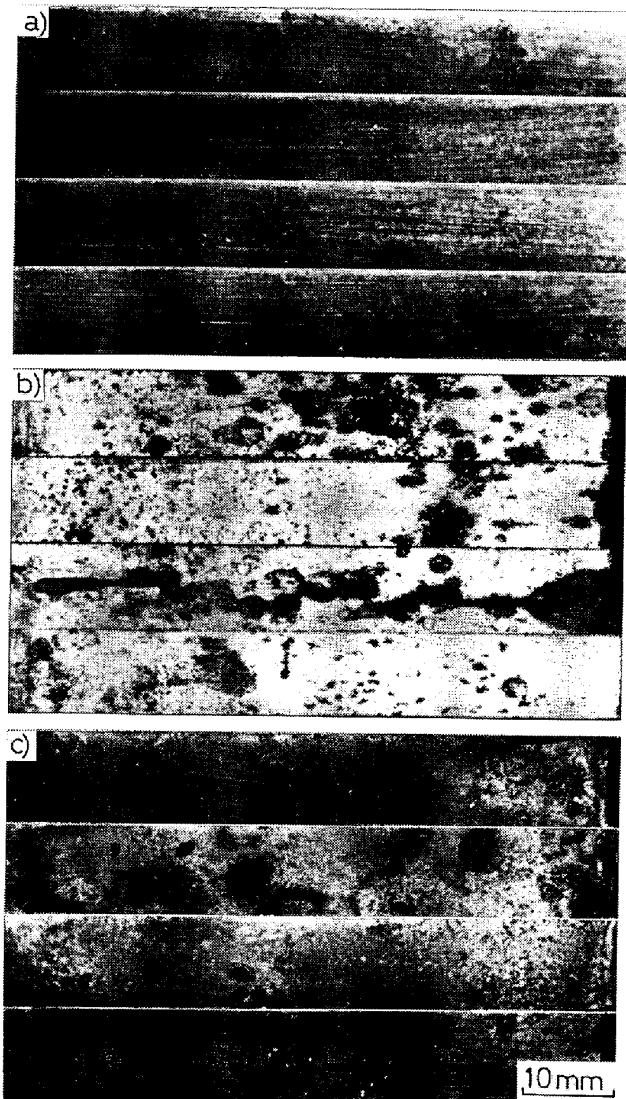
冷間加工の影響としては、5, 10, 30% の冷間加工率のうち5%の塑性ひずみを付与したリムド鋼 SS 41 のみ割れが認められた。そして、冷間加工したキルド鋼 SS 41 ではいずれも割れは認められなかった。

次に、応力腐食割れ感受性におよぼす各鋼種の熱処理による影響を調べるため、各受入材に Table 3 に示す再熱処理を施し、これらの材料について応力腐食割れ試験を行った。その結果を Table 6 に示す。

この結果、いずれの鋼種も試験条件D, Eの湿潤状態では割れが認められず、液相状態では試験条件Dにおいて、キルド鋼 SS 41 (空冷材, 焼入焼もどし材), リムド鋼 SS 41 (受入材 (切り欠き付), 水冷材, 焼入焼もどし材), STBA 24 (受入材 (平滑, 切り欠き付)) で割れが認められた。また、試験条件Eにおいては、STBA 24 (受入材 (平滑, 切り欠き付), 水冷材, 空冷材および焼入焼もどし材), STBA 25 (水冷材) に割れが認められた。

3.3 CO-CO₂-H₂O 雰囲気下における応力腐食割れ形態

試験条件Aの乾燥, 潤湿, 液相状態における試験終了



a) Dry phase, b) Vapor phase, c) Liquid phase

Photo. 2. Appearance of specimen surfaces of rimmed SS41 after stress corrosion cracking test. (Test condition : A, Test time : 1 000 h)

後のリムド鋼 SS 41 の試験片の外観を Photo. 2 に示す。乾燥状態では外観的に全く腐食されておらず、湿潤状態では局部的に腐食が進んでおり、液相状態では全面腐食形態を示している。

試験条件 A の湿潤状態においてリムド鋼 SS 41 の 5% 冷間加工材に生じた応力腐食割れの形態を Photo. 3 に示す。この割れは粒内割れで、フェライト部およびパーライト部を貫通している。この割れ発生部は、フェライト部、パーライト部いずれにも認められ、Photo. 3(b) に示すように割れはパーライト部で分岐しやすいようである。

この割れの破面を走査型電子顕微鏡で観察した結果を Photo. 4 に示す。この破面の特徴は、ひだ状模様（または fan-shaped pattern 扇状模様)^{9)~11)} と類似した破面

形態が認められることである。

リムド鋼 SS 41 の湿潤状態と液相状態における応力腐食割れ形態を Photo. 5 に示す。湿潤状態では、割れは試験片表面より発生しているが、液相状態では、試験片表面に多数の孔食が認められ、これらの孔食の先端部を起点として割れが発生している。

試験条件 E の液相状態において STBA 24 の受入材および再熱処理材（水冷材、空冷材、焼入焼もどし材）に生じた応力腐食割れ破面を Photo. 6 に示す。これらの破面形態にはひだ状模様と類似した破面形態が認められ、その形態は熱処理によりかなり異なっており、これらは金属組織の相異によるものとも考えられる。

4. 考 察

4.1 ガス雰囲気の影響

ガス雰囲気のうち水分量がこの系の応力腐食割れ感受性に大きく影響している。従来より知られているように乾燥状態では全く割れが認められておらず、湿潤状態および液相状態で割れが認められた。Photo. 2 に示した試験片の外観から考えて、湿潤状態では局部的に水溶液が付着しているものと推測され、水分が飽和水蒸気の状態にあれば、この系の応力腐食割れを生ずる可能性があるものと思われる。

CO, CO₂ ガス組成の応力腐食割れに対する影響については、CO, CO₂ ガスおのおの単体では割れを発生しない^{1)~8)}といわれており、CO, CO₂ ガスが混合してはじめて割れが発生するようである。また、CO, CO₂ の分圧が増すほど割れが生じやすい²⁾⁴⁾とされているが、本研究では鋼種によりこれらの雰囲気での割れ感受性が異なっており、これらのガス分圧の影響は明確に認められなかつた。

ガス圧力については、一般的に全圧力が高くなるほど応力腐食割れ感受性が大きくなる^{1)~3)}とされているが、本研究ではそのような傾向は認められなかつた。

4.2 鋼種、冷間加工および熱処理の影響

応力腐食割れの生じた鋼種は、ほとんどリムド鋼 SS 41 および STBA 24 であるが、再熱処理したキルド鋼 SS 41 および STBA 25 にも割れが認められた。同じ SS 41 でもリムド鋼とキルド鋼の応力腐食割れ感受性に差が認められ、リムド鋼の方がキルド鋼より応力腐食割れ感受性が大きいようであり、この場合化学組成の差 (C, Si 量など) や脱酸の程度が影響したのではないと思われる。また合金元素の Cr 量を 9% 以上含有する STBA 26 および SUS 304 は試験時間 1 000 時間まで全く割れが認められなかつた。従つて、この系の応力腐

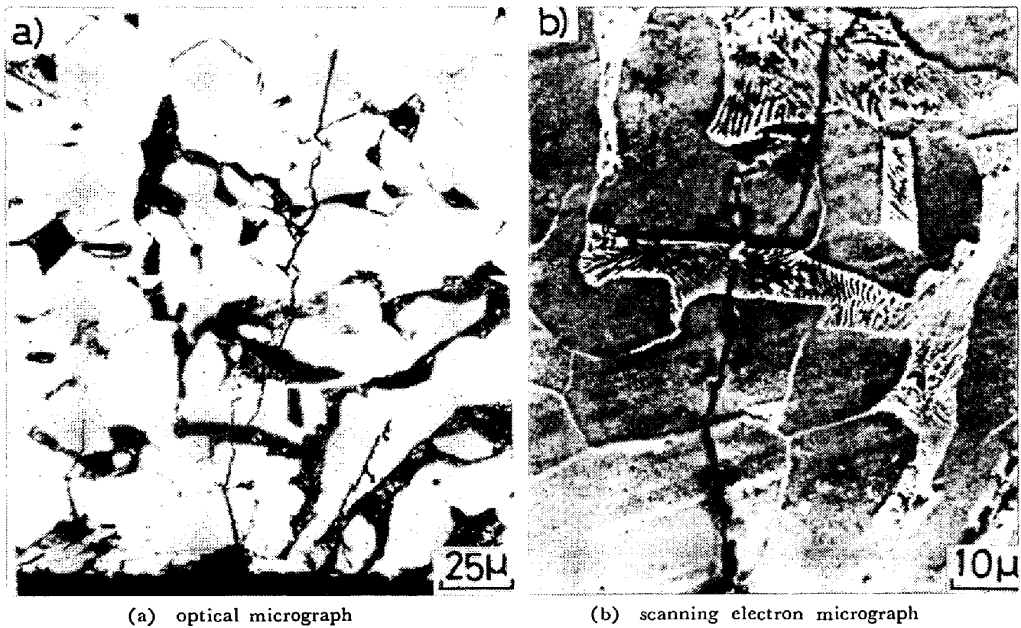


Photo. 3. Stress corrosion cracking of rimmed SS41 (cold work 5%) in the CO/CO_2 atmosphere. Applied stress : $25.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$, Test condition : A (vapor)

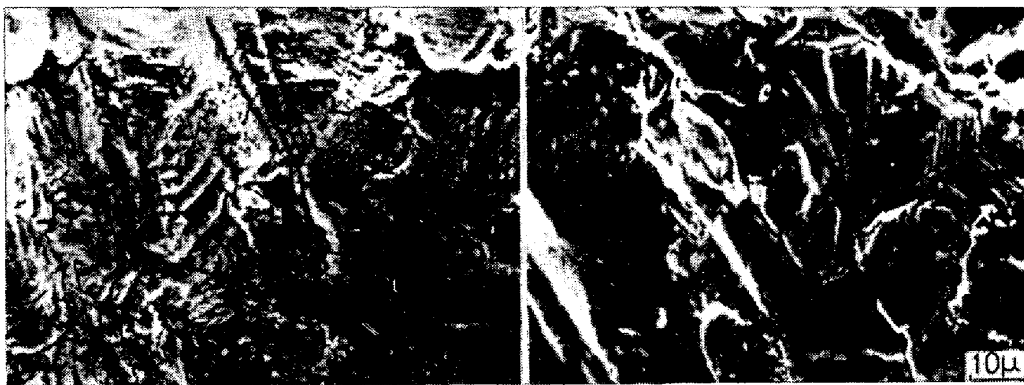


Photo. 4. Fractographs of stress corrosion cracking of rimmed SS41 (cold work 5%). Applied stress : $25.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$, Test condition : A (vapor)

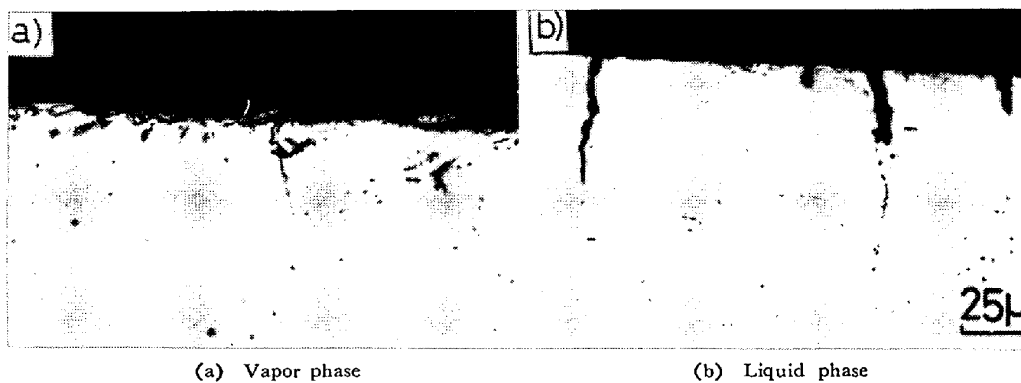
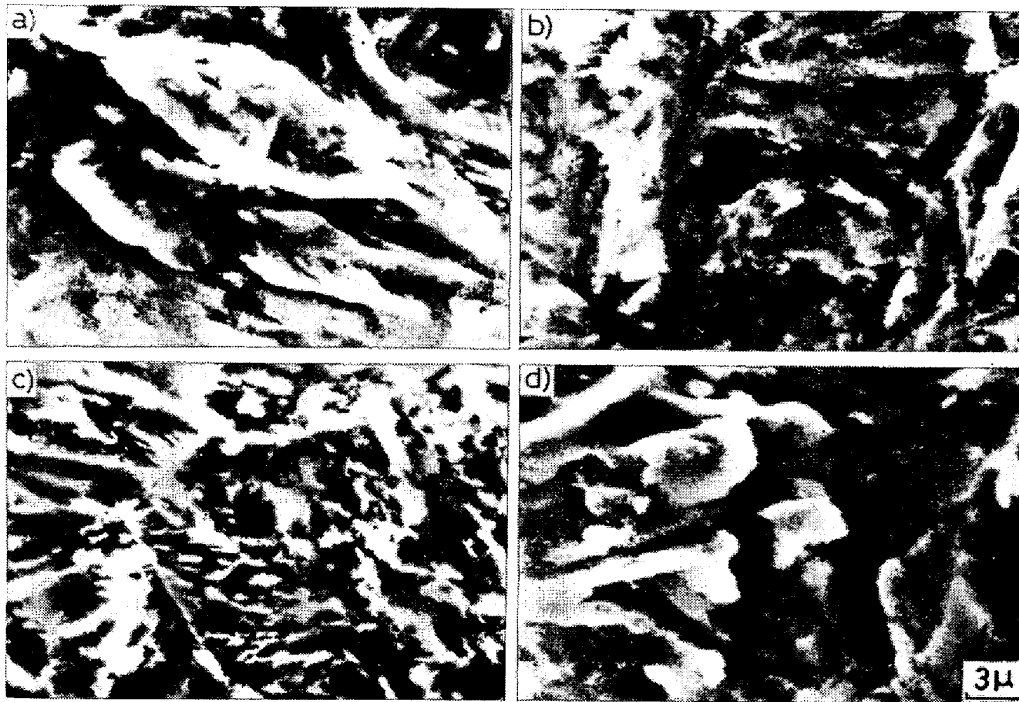


Photo. 5. Stress corrosion cracking of rimmed SS41 in the CO/CO_2 atmosphere. Applied stress : $25.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$, Test condition : A



a) as-received, b) quenched, c) normalized, d) quenched-tempered

Photo. 6. Effect of heat treatment on stress corrosion cracking of STBA 24 in the CO/CO₂ atmosphere. Applied stress : 30.6 kg/mm², Test condition : E

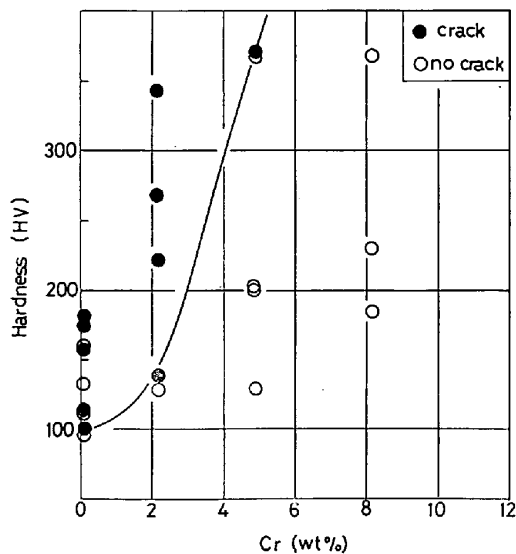


Fig. 3. Effects of Cr content and hardness on stress corrosion cracking.

食割れに合金元素 Cr 量が大きな抵抗性を示すものと思われる^{1)~3)}。

この系の応力腐食割れは、応力が降伏点付近でなければ割れを発生していないこと、また冷間加工による予ひずみ量が5%程度で割れが発生しやすいことから、試験片の表面に生じたすべり帯等の局部的なひずみがこの系の応力腐食割れ感受性を高めるものと思われる。

熱処理の影響としては、同一鋼種でも熱処理により割

れ感受性が異なっていることから、この系の応力腐食割れに大きく影響するものと思われる。つまり、熱処理により材料の強度および金属組織が同一鋼種でもかなり異なり、これらの因子が応力腐食割れ感受性にかなり影響するものと思われる。この系の応力腐食割れに及ぼす材料の硬さと Cr 量の関係を Fig. 3 に示す。同一鋼種については、いずれも硬さが大きいほど応力腐食割れが起こりやすくなっており、Cr 量が少なくなるほど応力腐食割れ感受性が大きくなっている。金属組織としてはマルテンサイト組織やベーナイト組織の方がフェライトとパーライトの混合組織よりも割れ感受性が大きいと考えられる。

4.3 CO-CO₂-H₂O 雰囲気下における応力腐食割れ形態

この系の応力腐食割れを発生させる腐食物質としては、水分中の CO₂ 溶解による炭酸イオンの存在あるいは蟻酸の生成¹⁾³⁾などが考えられており、これらの酸が応力腐食割れ発生に影響しているとも考えられる。またこの系の応力腐食割れは、CO₂ ガス単体中では割れを発生しない^{1)~3)}とされていることから、CO ガスが割れ発生に対して関与している可能性が考えられる。CO ガスの応力腐食割れに対する影響としては、CO が金属表面に吸着することが予想され、これがインヒビターとして作用し、これらの部分が電気化学的に貴となり、局部的

に活性な新生面があらわれると、その新生面が卑となり、局部的な腐食が進行するとされているが¹¹⁾、これらはまだ十分電気化学的にも明らかにされておらず、今後さらに検討する必要があると思われる。

この系の応力腐食割れ破面の特徴は、ひだ状模様に類似した破面形態が認められることで、このひだ状模様は、平行な結晶面が優先的に腐食溶解した跡と考えられており、陽極溶解型の応力腐食割れの特徴の1つと考えられている^{9)~12)}。従つて、この系の応力腐食割れは、これらの破面形態等から考え、またこの系の応力腐食割れは陰極防食が可能とされていることから^{1)~4)}、陽極溶解型の応力腐食割れの可能性を示すものと思われる。

5. 結 言

CO-CO₂-H₂O 雰囲気における炭素鋼、低合金鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れについて、定ひずみ4点支持曲げ応力腐食割れ試験を行った結果、次の結論を得た。

(1) リムド鋼 SS 41の方がキルド鋼 SS 41よりも応力腐食割れ感受性は大きく、これは化学組成(C, Si量など)や脱酸の程度が影響したものと思われる。

(2) 合金成分 Cr 量が少なく、硬さが大きくなるほど応力腐食割れを発生しやすい。Cr 量を9%以上含有する STBA 26 および SUS 304 では割れを発生しなかった。

(3) 冷間加工による塑性ひずみ量 5, 10, 30%のなかで、5%の冷間加工が最も応力腐食割れ感受性を高め

る。

(4) ガス雰囲気のうち、水分が応力腐食割れ感受性に大きく影響しており、湿潤および液相状態で割れが認められた。液相状態では試験片の表面に発生した孔食より割れが発生した。

(5) この系の応力腐食割れは粒内割れであり、その破面にはひだ状模様と類似した破面形態が認められる。

文 献

- 1) 小若正倫, 永田三郎: 防蝕技術, 21 (1972) 4, p. 165
- 2) M. KOWAKA and S. NAGATA: Corrosion, 32 (1976) 10, p. 395
- 3) 谷村昌幸, 西村隆行, 中沢利雄: 日本鋼管技報, (1975) 63, p. 21
- 4) 小若正倫: 圧力技術, 14 (1976) 4, p. 9
- 5) 日本高圧力技術協会: 圧力容器とその配管の応力腐食割れ講演会資料, (1979)
- 6) 伊藤伍郎: 高圧ガス, 14 (1977), p. 19
- 7) M. KOWAKA and S. NAGATA: Corrosion, 24 (1968) 12, p. 427
- 8) A. BROWN, J. T. HARRISON, and R. WILKINS: Corr. Sci, 10 (1970), p. 547
- 9) N. A. NIELSEN: Corrosion, 20 (1964) 3, p. 104t
- 10) J. D. HARSTON and J. C. SCULLY: Corrosion, 25 (1969) 12, p. 493
- 11) 岡田秀弥, 細井祐三, 阿部征三郎, 山本州一: 金属学会誌, 37 (1973) 2, p. 197
- 12) 大谷南海男, 伊庭暉邦: 金属学会誌, 33 (1969) 7, p. 781