

Fig. 4. Effect of tempering temperature and cooling rate on Charpy impact value at -196°C .

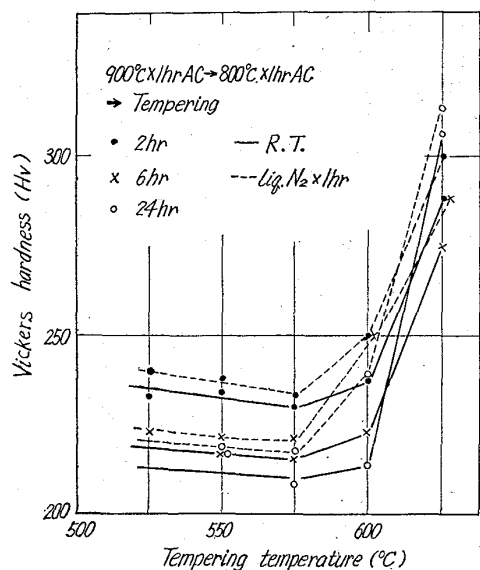


Fig. 5. Effect of tempering temperature and time on Vickers hardness of D-7 Ni steel at room temperature and -196°C .

増加にしたがつて低下すること，すなわち -196°C においても安定な残留オーステナイト量に対応すると考えられる。

次に硬度測定はオーステナイトの定量を行なった試料を用いて行なった。荷重 20kg で測定した。ピッカース硬度の結果のうち D-8 の試料の例を Fig. 5 に示す。他の試料についても同様な結果が得られた。すなわち焼戻し時間の増加とともに硬度は低下し，その傾向は試料を液体 N_2 中に保持したものでも同様である。conventional Ac_1 点より $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 低い焼戻し温度（この場合 600°C ）のあたりから硬度は上昇しはじめ，焼戻し時間の長いものほどそれを liq N_2 中に冷却した場合の硬度上昇は大である。更に焼戻し温度の高い場合，焼戻し

時間の長いほど硬度の低くなるこれまでの傾向は破られて，24 hr 焼戻しのものでは最高の硬度を示すようになる。これらの現象は先に述べた残留オーステナイトの量およびその安定性の関係と一致した結果を示している。

IV. 結 言

低温用鋼の一種である 9%Ni 鋼において，その焼戻し温度において生ずるオーステナイトの量，およびそれを室温あるいは液体窒素の温度まで冷却した際の安定性，すなわち残留量が，この鋼の低温靱性に大きく影響することは最近になって問題とされてきているが，その機構は明らかでない。そこでこの点を解明する第一歩として，Ni 含有量を 7~12% まで変化させたものに対して，その残留オーステナイトの量と安定性が，焼戻し温度に対して，どのように影響するかまたそれらの硬度や衝撃吸収エネルギーとの関係はどうかについて検討した。

その結果，7%Ni 程度では残留オーステナイトの安定範囲もせまく，発生量も少ないが，9%以上の場合，その安定範囲もひろがると同時に，焼戻し温度および時間による感受性も極めて大となり，それらが硬度や衝撃吸収エネルギーとの間に有する関係もかなり密接なものがあることがみとめられた。

文 献

- 1) G. R. BROPHY and A. J. MILLER: Trans. Amer. Soc. Metals, 41 (1949), p. 1185
- 2) A. R. TROIANO: Private communication
- 3) D. HARDWICK: J. Iron and Steel, 34 (1961) p. 10
- 4) 瀬川, 長島, 関野, 島田: 鉄と鋼, 49 (1963) 6, p. 914
- 5) B. L. AVERBACH and M. COHEN: Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng., 176 (1948), p. 401

66914-462:620.1942
(143) 鋼管の応力腐食割れについて

八幡鋼管

工博 向江協公雄・○川内 信行
 佐藤 次男・宇次 安平

Study on Stress Corrosion Cracking of Steel Tubes.

Kimio MUKAEWAKI, Nobuyuki KAWAUCHI,
 Tsuguo SATO and Yasuhira UTSUGI

I. 緒 言

鋼管は使用環境により種々の腐食を受けるが，その内応力腐食は全面腐食と異なり思わぬ災害を引き起し，多大の損害を蒙ることがしばしば経験されている。応力腐食割れの機構については各種の理論が提出され，論議されているが，塩化物と引張り応力の存在は不可欠の因子で応力としては冷間加工および溶接によるものが最も悪質である。著者らは冷管引抜継目無炭素鋼鋼管，低合金鋼鋼管，ステンレス鋼鋼管および市販の炭素鋼，ステンレス鋼の溶接鋼管の応力腐食感受性について炭素鋼，低合金鋼鋼管には沸とう硝酸カルシューム+硝酸アンモニ

ユウム溶液, ステンレス鋼鋼管には沸とう 42% 塩化マグネシウム溶液を用いて検討を行なった結果を報告する。

II. 供 試 材

供試材の化学成分を Fig. 1 に示す。上記成分の継目無炭素鋼および低合金鋼鋼管はほぼ 20%, ステンレス鋼鋼管はほぼ 14% の断面減少率で冷間引抜き (空抜き) を行ない 500mm に切断し各種の熱処理を行ない 30mm に切断し腐食試験片とした。残りを機械試験および残留応力測定用試験片とした。溶接鋼管はメーカーの異なる市販の製品で上記方法に準じて各種試験片を作製した。したがって溶接鋼管素材の溶接条件および鋼の履歴は不明である。

III. 試 験 方 法

- 1) 機械試験……………抗張力, 伸び, 硬度の変化を測定した。
- 2) 残留応力測定……………残留応力は立ち割り法を採用して精密法により円周方向残留応力 (S_c) と管軸方向残留応力 (S_L) を求めた。溶接鋼管の場合は溶接部から 180° の位置を切断し S_c を, 溶接部を切り出して S_L を測定した。
- 3) 応力腐食試験……………炭素鋼, 低合金鋼の応力腐食試験液としては $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 500g + NH_4NO_3 50g + H_2O 160ml の組成の沸騰溶液を使用した。ステンレス鋼鋼管の応力腐食試験液としては 42% 沸騰塩化マグネシウム溶液を使用した。上記組成の溶液 300ml を逆流冷却器付丸底フラスコ中に入れて加熱し, 煮沸し

始めたら試験片を入れて加熱を続け, 試験片は 0.5~2 時間毎に取り出し, 割れの状況を調査し最終煮沸時間は 240 時間とした。

IV. 試験結果および考察

1) 残留応力と応力腐食割れについて

残留応力と応力腐食割れの関係を Fig. 1, Fig. 2 に示す。炭素鋼および低合金鋼鋼管は各鋼種において若干異なるが割れは残留応力の増加と共に急激に起り, 低炭素鋼では応力が相当に小さくても割れが発生する可能性があり, S_c 方向の残留応力の影響が S_L 方向の残留応力に比較して大きく, 割れの状況が縦方向であった。またこの実験では S_c, S_L が $10kg/mm^2$ 以上になると割れが発生したが熱処理で水冷を行なった場合は残留応力が小さくても割れが発生した。炭素鋼鋼管は炭素含有量の増加と共に割れ発生度が減少し, KD 50 では残留応力が S_c $55kg/mm^2, S_L$ $68kg/mm^2$ でも割れが発生せず, 一方低炭素鋼では $20kg/mm^2$ でも割れが発生した。また, クロミウム, アルミニウムの含有量が増すと応力腐食割れが発生しにくくなることがわかった。ステンレス鋼鋼管は Fig. 2 に示すごとく残留応力 $10kg/mm^2$ 以下では割れは発生しなかつたが, 残留応力の増加とともに割れは急激に起り, 残留応力 $50\sim 60kg/mm^2$ となると 2~3 hr で割れを生じた。また, ステンレス鋼鋼管の場合は実験した範囲での化学成分の相違による耐応力腐食の差は認められなかつた。

2) 硬度と応力腐食割れについて

炭素鋼および合金鋼の場合硬度と応力腐食の関係は認

Table 1. Chemical compositions of specimens.

Type of steels		Chemical compositions (%)												
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Alsol	N		
Seamless tube	Carbon steel	RD10	0.10	0.01	0.45	0.030	0.025	—	—	—	—	0.009	0.005	
		KD12	0.11	0.23	0.48	0.025	0.030	—	—	—	—	0.008	0.006	
		KD15	0.18	0.22	0.46	0.020	0.023	—	—	—	—	0.012	0.005	
		KD20	0.22	0.24	0.50	0.022	0.015	—	—	—	—	0.018	0.006	
		KD30	0.33	0.22	0.48	0.025	0.020	—	—	—	—	0.008	0.009	
		KD40	0.42	0.20	0.67	0.027	0.017	—	—	—	—	0.009	0.007	
		KD50	0.50	0.25	0.60	0.021	0.020	—	—	—	—	0.018	0.009	
		Low alloy steel	MoA	0.12	0.21	0.47	0.022	0.015	—	—	0.16	—	0.028	0.011
	CM1A		0.12	0.23	0.48	0.020	0.018	—	0.98	0.35	—	0.020	0.010	
	CM2.25		0.13	0.25	0.50	0.018	0.012	—	2.15	0.90	—	0.017	0.009	
	CM5		0.12	0.22	0.45	0.017	0.015	—	5.10	0.50	—	0.015	0.016	
	Stainless steel	AISI Type 304	0.050	0.38	1.64	0.027	0.004	10.79	18.60	—	—	—	—	
		AISI Type 304L	0.024	0.58	1.64	0.014	0.015	11.83	18.61	—	—	—	—	
		AISI Type 316	0.048	0.58	1.95	0.025	0.004	13.32	17.20	2.53	—	—	—	
		AISI Type 316L	0.026	0.47	1.72	0.027	0.006	14.89	16.70	2.63	—	—	—	
		AISI Type 321	0.044	0.74	1.60	0.035	0.009	10.42	18.35	—	0.30	—	—	
		AISI Type 347	0.054	0.53	1.84	0.017	0.018	11.52	18.62	—	—	—	—	
	Welding tube	Carbon steel	RD No. 1	0.04	0.01	0.31	0.013	0.023	—	—	—	—	0.004	0.003
			RD No. 2	0.04	0.01	0.32	0.043	0.014	—	—	—	—	0.004	0.005
RD No. 3			0.07	0.01	0.38	0.015	0.030	—	—	—	—	0.006	0.003	
RD No. 4			0.04	0.01	0.24	0.011	0.014	—	—	—	—	—	—	
Stainless steel		No. 1	0.058	0.72	1.17	0.024	0.008	9.70	20.32	—	—	—	—	
		No. 2	0.058	0.47	1.29	0.020	0.014	10.14	20.21	—	—	—	—	
		No. 3	0.053	0.056	1.14	0.037	0.006	9.19	20.32	—	—	—	—	

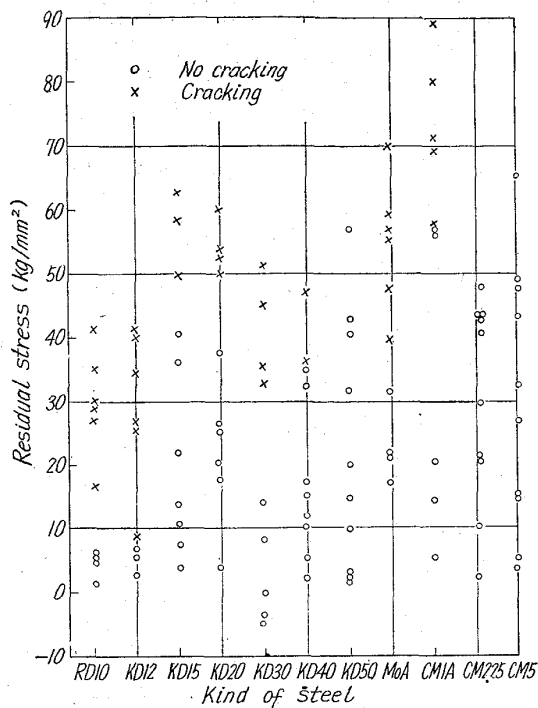


Fig. 1. Relation between residual stress and stress corrosion cracking of carbon and low alloy steel tubes.

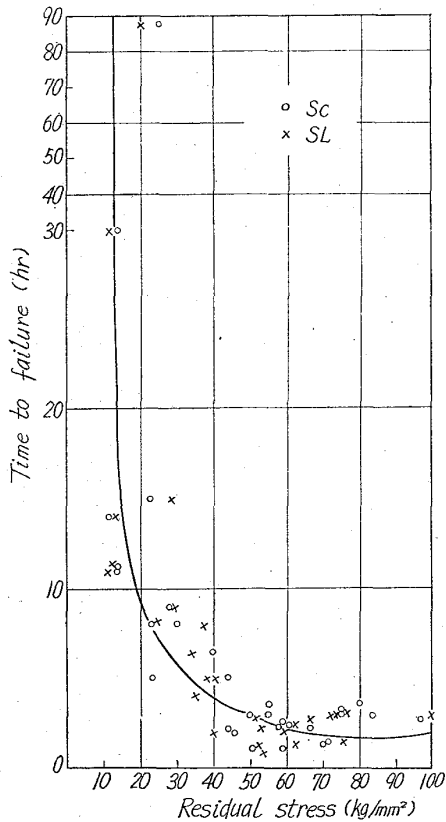


Fig. 2. Relation between residual stress and time to failure of stainless steel tubes.

められなかつた。ステンレス鋼の硬度と応力腐食の関係は Fig. 3 に示すように空冷の場合硬度 H_RB 90 以下

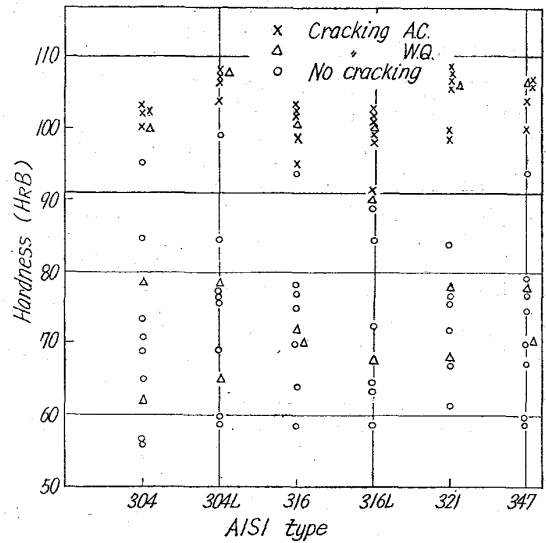


Fig. 3. Relation between hardness and stress corrosion cracking of stainless steel tubes.

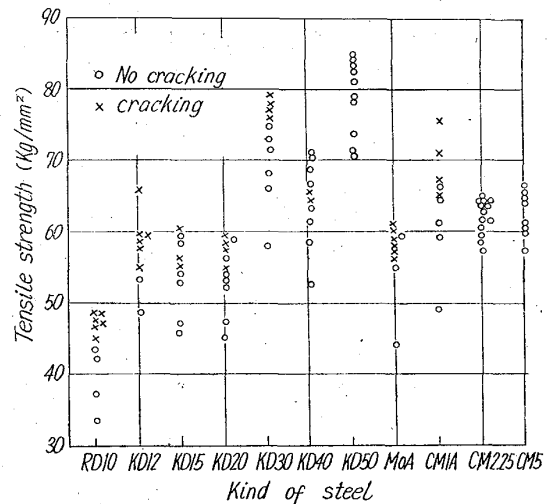


Fig. 4. Relation between tensile strength and stress corrosion cracking of carbon and low alloy steel tubes.

では割れは発生しなかつたが水冷の場合には硬度に無関係に割れが発生した。

3) 抗張力と応力腐食割れについて

炭素鋼および低合金鋼の場合抗張力と応力腐食割れの関係は認められないが、鋼種間では抗張力が大きくなればなる程割れ発生の可能性が強いことがわかつた。炭素鋼、低合金鋼の抗張力と応力腐食割れの間を Fig. 4 に示す。またステンレス鋼の場合は抗張力と応力腐食割れは空冷の場合 65 kg/mm² 以上では割れの発生する可能性があるがそれ以下では割れは認められなかつた。しかし、水冷した場合は 65 kg/mm² 以下でも割れが発生した。

4) 伸びと応力腐食割れについて

炭素鋼および低合金鋼の場合伸びと応力腐食割れの間は認められなかつた。ステンレス鋼の伸びと応力腐食割れの間は Fig. 5 に示すように空冷の場合伸び 50% 以上では割れは発生しなかつたが、水冷を行なうと伸び

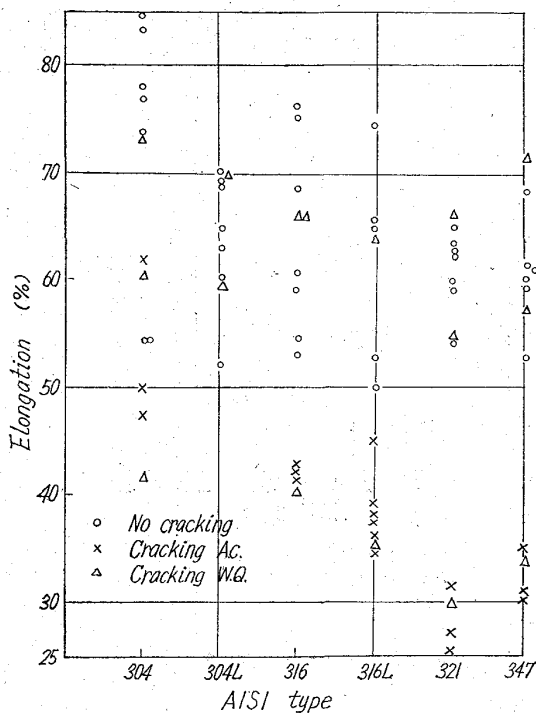


Fig. 5. Relation between elongation and stress corrosion cracking of stainless steel tubes.

70%以上でも割れが発生した。

5) 溶接鋼管の応力腐食割れについて

溶接鋼管は成形、溶接および熱処理による残留応力が存在し、したがって使用環境によっては当然応力腐食割れが発生することが考えられるので市販の溶接鋼管の応力腐食感受性について検討を行なった。炭素鋼溶接管は造管のままであると応力腐食割れを起す可能性があった。しかし、残留応力と応力腐食割れとの相関関係は認められなかったがメーカー、鋼種間には差が認められ耐応力腐食性のよい鋼種は何れも炭素含有量が少ないのが特色で低炭素になる程割れの発生が減少する傾向が認められた。ステンレス溶接管も市販の状態のままでは応力腐食割れを起す可能性が強く、熱処理で水冷を行なったものでは継目無鋼管と同様応力腐食割れを防止することは不可能であることがわかった。また、 $900^{\circ}\text{C} \times 30\text{min AC}$ 、 $1100^{\circ}\text{C} \times 30\text{min AC}$ の熱処理をほどこしたものは何れも240 hr 加熱しても割れは発生しなかった。

6) 熱処理と応力腐食割れについて

炭素鋼および低合金鋼の場合 550°C 以上で熱処理を行なえば残留応力はほとんど除去され、割れは発生しなかった。また、ステンレス鋼の場合残留応力は 850°C 以上ではほぼ除去されこの温度以上で熱処理を行なえば応力腐食割れは発生しないことがわかった。しかし、熱処理の際水冷を行なうことは焼入応力による応力腐食割れを起す可能性が多いことがわかった。また、炭素含有量およびアルミニウム含有量の少ない鋼種ほど熱処理温度は高くする必要がある。

この結果炭素鋼、低合金鋼鋼管は 550°C 以上空冷の熱処理により、ステンレス鋼鋼管の場合は $1050^{\circ}\text{C} \sim 1100^{\circ}\text{C}$ より水冷したのち $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 空冷の熱処理を

行なえば粒界腐食も応力腐食も防止できることがわかった。

V. 結 言

各種鋼管の応力腐食割れについて検討を行ないつぎの結果をえた。

継目無炭素鋼および低合金鋼鋼管については

(1) 炭素含有量の増加とともに割れ発生度が減少し逆に炭素含有量が 0.03% 近くになると割れ発生の可能性が減少する傾向がみられた。また、アルミニウム含有量が多く、窒素含有量が少ない鋼ほど耐応力腐食性がよかつた。低合金鋼では同一炭素含有量の下ではクロミウム含有量の増加にしたがつて耐応力腐食性がよかつた。

(2) 熱処理による応力除去は 550°C AC の処理で応力腐食割れは発生しなかった。

(3) 機械的性質と応力腐食との明確な関係は認められなかった。

(4) 割れの状態は検鏡の結果何れも粒界割れであつた。

継目無ステンレス鋼管については

(1) 残留応力 $10\text{kg}/\text{mm}^2$ 以下では割れは発生しなかったが熱処理の際水冷を行なえば残留応力が小さくても割れが発生した。

(2) 抗張力 $65\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上、硬度 $\text{H}_{\text{RB}} 90$ 以下、伸び 50% 以上で割れが発生しなかったが水冷の熱処理では何れの場合でも割れが発生した。

(3) 調査したステンレス鋼鋼管の間では鋼種、化学成分による顕著な耐応力腐食の差は認められず、 $1050 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ 水冷処理後 $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 空冷の応力除去処理を行なえば応力腐食割れを防止することができ、この処理によれば粒界腐食も生じないことがわかった。

(4) 割れは粒内割れであつた。

溶接鋼管については

(1) 市販の溶接鋼管は何れも応力腐食を起す可能性があり応力除去焼鈍が必要であると思われる。

(2) 耐応力腐食性は炭素鋼の場合メーカー鋼種間に差が認められ、炭素含有量が少ない程よかつた。

(3) 割れの状況は炭素鋼鋼管は粒界割れで、ステンレス鋼鋼管は粒内割れであつた。また溶接部にも割れが発生したものもあつた。

文 献

- 1) 今井 宏: 鉄と鋼, 42 (1956), 1, p. 23, 2, p. 99
- 2) 下平三郎: 金属学会誌, 24 (1960), A191, A207, A223