

## 爆発加工法による薄肉チタンライニング鋼管

武田 芳三\*・新見 政義\*\*

### 1. 緒 言

化学工業の発展とともに耐食性材料の需要が盛んであるが、熱交換器用管、配管、反応管などにおいて鋼管の内面に耐食材料をライニングした複合管を使用することも最近増加している。

一般に鋼管の内面、または外面に他金属材料を複合せせる場合、ダイスによる抽伸方法で製造するが、最近火薬を用いる爆発加工法の研究が行われてきた。

抽伸加工の場合は外径、肉厚によつてはダイスその他の制限により大口徑、肉厚の大なるものの製造は困難であるが、爆発加工法によれば大型のもののライニング加工が可能である。爆発加工法では使用する導爆線の火薬量、媒体その他によつてかなりの性能のバラッキを生ずると思われるが、適当な加工条件によつてかなり安定した製品を作ることができる。

この報告は爆発加工により鋼管内面に薄肉チタン管をライニングしたものについて、加工方法や各種の性能を測定した結果に関するものである。

### 2. 試料用素管

使用した鋼管は熱交換器用炭素鋼管第3種 STB-35、チタン管は薄肉チタン管である。

#### 2.1 素管組成

鋼管およびチタン管の化学成分は表1、表2に示した。

表1 鋼管化学成分

種類	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu
STB-35	Bal	0.08 ~0.18	0.10 ~0.35	0.30 ~0.60	<0.035	<0.035	<0.20

表2 チタン管化学成分

種類	Ti	H	O	N	Fe	備 考
TTH-1	Bal	<0.015	<0.20	<0.05	<0.20	JIS-H4631
	Bal	0.003	0.025	0.007	0.038	分析値

#### 2.2 素管の機械的性質

鋼管およびチタン管の機械的性質は表3に示した。

表3 素管の機械的性質

種 類	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び(従) (%)	(横) (%)
鋼 管	35 以上	18 以上	35 以上	30 以上
チタン管	35 以上	(26 以上)	27 以上	
0.3t(測定値)	43	30	32	

### 2.3 素管寸法

爆発加工に供した素管寸法は表4に示したものをを使用した。

表4 素管寸法

供 試 管	外 径 (mm)	肉 厚 (mm)	長 さ (mm)
1-1~5	鋼 管	28.6	1.3
	チタン管	25.4	0.3
2-1B-1,2	鋼 管	34	6.7 (SCH 160)
	チタン管	20	0.3
2-1B-3,4	チタン管	20	0.5
2-2B-1,2	鋼 管	60.5	8.7 (SCH 160)
	チタン管	40	0.3
2-2B-3,4	チタン管	40	0.5

### 3. 爆発加工

#### 3.1 加工方法

導爆線を用いて金属管に他の金属材料をライニングして複合管を製造することは従来から行なわれている。たとえばポリエチレン管の中心軸に導爆線を通しこれを複合せんとする管の内面に挿入して点下し、爆発力を利用して密着させる方法\*がある。本実験ではこの方法を用いて爆発加工を行なった。

製造手順は次の通りである。

鋼管内面およびチタン管外面は予めチューブクリーナーで清掃し、油分、塵埃などを充分除去することはもちろんである。チタン管と鋼管の間隙に存在する空気は真空ポンプで排気する。導爆線は全長にわたつて

\* 工業火薬協会誌 21, (昭35) p.375~379

昭和42年11月5日受理

\* 古河電気工業株式会社 特品事業部 千代田区九ノ内2-8

\*\* 旭硝子工業株式会社 企画部 千代田区有楽町1-2 (日比谷朝日生命館)

表 5 加工 内 容

供 試 管	鋼 管 (mm)		チタン管 (mm)		火 薬 量	媒 体	緩 衝 剤	備 考
	外 径	肉 厚	外 径	肉 厚				
1-1~5	28.6	1.3	25.4	0.3	標 準	空 気	ポリエチレン	割り型使用
2-1B-1	33.5	6.4	20.0	0.3	標 準	空 気	ポリエチレン	特殊加工
1B-2	33.5	6.4	20.0	0.3	2 倍	"	"	
1B-3	33.5	6.4	20.0	0.5	2 倍	"	"	
1B-4	33.5	6.4	20.0	0.5	特 殊	"	"	
2-2B-1	58.3	8.7	40.0	0.3	2 倍	空 気	ポリエチレン	
2B-2	58.3	8.7	40.0	0.3	標 準	水	"	
2B-3	58.3	8.7	40.0	0.5	3 倍	空 気	"	
2B-4	58.3	8.7	40.0	0.5	標 準	水	"	

ポリエチレン管の中心に装填し、中心線がチタン管の中心にほぼ一致するようにする。この場合のポリエチレンは導爆線の爆発によりチタン管内面が損傷するのを防止するのに役立つと同時に、爆発力の緩衝作用の役目をもっているものである。なお、供試管1については、鋼管の肉厚が薄い(1.3mm)ので外部より鉄製割り型保護器を使用し鋼管の変形、破損を防止した。実験内容は表5に示した。

3. 2 試作複合管

爆発加工により試作した供試管は表6に示した。

表 6 供 試 管 寸 法

供 試 管	外 径 (mm)	肉 厚 (mm)	鉄 厚	チタン厚
1-1~5	28.7	1.6	1.3	0.3
2-1B-1,2	33	6.7	6.4	0.3
1B-3,4	33	6.9	6.4	0.5
2-2B-1,2	58	8.9	8.6	0.3
2B-3,4	58	9.1	8.6	0.5

3. 3 供試管内面検査

複合管内面については全数 Bore-scope で検鏡したが、異常はなかつた。

4. 測定結果

爆発加工により製造したチタン・ライニング鋼管について各種の測定を行なつた。

4. 1 寸 法

各複合管の寸法を測定した結果を表7に示した。この結果供試管1の外径、肉厚とも小さい鋼管を使用したものは外径が僅かに増加しているが、これは外部より補強した割り型と鋼管のギャップによると考えられる。供試管2は鋼管の肉厚が厚いため爆成による寸

法の変化は全く認められない。肉厚の変化はいずれの場合も認められない。

表 7 寸 法 測 定 結 果

供 試 管	外 径 (mm)	鋼管内厚 (mm)	チタン管厚 (mm)		
1	1-1	28.73	1.61		
	1-2	28.75	1.62		
	1-3	28.74	1.67		
	1-4	28.70	1.68		
	1-5	28.71	1.65		
	裸 鋼 管	28.55	1.26	—	
	裸チタン管	25.05	—	0.3	
	外径増加率	0.6%			
	2	2-1B-1	33.4~33.6	6.45~6.47	0.29~0.32
		1B-2	33.4~33.6	6.43~6.47	0.29~0.31
1B-3		33.5~33.6	6.39~6.47	0.49~0.50	
1B-4		33.5~33.6	6.34~6.47	0.48~0.49	
裸 鋼 管		33.4~33.6	6.34~6.47	—	
外径増加率		0	—	—	
2-2B-1		58.1~58.4	8.60~8.90	0.31~0.33	
2B-2		58.2~58.4	8.70~8.90	0.31~0.33	
2B-3		58.1~58.3	8.60~8.80	0.48~0.51	
2B-4		58.1~58.3	8.60~8.90	0.48~0.49	
裸 鋼 管	58.1~58.4	8.60~8.90	—		
外径増加率	0	—	—		

4. 2 硬 さ

チタン・ライニング鋼管の断面硬度をマイクロピッカース硬度計(200g)にて測定した結果を表8に示した。

表 8 硬 さ 測 定 結 果

供 試 管	硬 さ $\mu\text{VH}$		供 試 管	硬 さ $\mu\text{VH}$		供 試 管	硬 さ $\mu\text{VH}$				
	鋼 管	チタン管		鋼 管	チタン管		鋼 管	チタン管			
加 工 前	155	150	加 工 前	141	150	加 工 前	138	150			
加 工 後	1-1	160	163	加	2-1B-1	146	149	加	2-2B-1	138	174
	1-2	160	167	工	1B-2	141	150	工	2B-2	145	151
	1-3	163	164	工	1B-3	141	149	工	2B-3	139	163
				後	1B-4	147	176	後	2B-4	138	150
平 均	161	165	平 均	144	156	平 均	140	160			
硬 さ 増 加 率	3.7%	8.9%	硬 さ 増 加 率	2.0%	3.8%	硬 さ 増 加 率	1.5%	6.3%			

この結果によると爆発加工したものは、内側チタン、外側鋼管のいずれも加工前よりも硬くなる。特に内面ライニング材の方が原則的に硬さ増加率が著しく、また鋼管肉厚の薄いもの（供試管1）が影響を受け易い。硬さの増加率は鋼管で約 1.5~4%，チタン管で 4~9% である。

4. 3 残 留 応 力

チタン・ライニング鋼管を切断したものに縦に切り目を入れると、鋼管は外方向に拡がり、チタン管は中心方向に収縮しようとする。爆成したものはこれらの応力が残留応力として蓄積されて釣合っている。残留応力測定を Sacks の方法により求めると、

$$S_a = \frac{Et}{\alpha} \left( \frac{1}{D_0} - \frac{1}{D} \right)$$

- ただし  $S_a$  : 残留応力 (kg/mm<sup>2</sup>)
- $E$  : ヤング率 (kg/mm<sup>2</sup>)
- $t$  : 肉 厚 (mm)
- $D, D_0$  : 切断前後の外径 (mm)
- $\alpha$  : 長さ  $l$  の変化率

測定結果を表9に示した。表9の数値で(+)は引張り方向、(-)は圧縮方向の応力である。

この結果、加工前の応力は(+)方向であり管の製造に起因している。爆発加工後のチタン管はいずれも(-)方向となり、瞬時に拡管されたため、残留応力は縮まる方向に残っているものと考えられる。

これらの爆成後の管を加熱すると応力は減少の傾向を示し特にチタン管の(-)方向の残留応力は著しく減少する。

これらの残留応力を抽伸加工法にて製造した複合管について測定すると、鋼管、チタン管ともに(+)方向、即ち引張方向の残留応力値をもっており、爆発加工法と根本的に相違する。これは管の径を外部より圧縮する方向の力が働いているため当然である。

表 9 残 留 応 力 測 定 結 果

供 試 管	残 留 応 力 (kg/mm <sup>2</sup> )		備 考
	チタン管	鋼 管	
加工前 1-1	+23.40	+4.98	
加工後 1-1	-10.74	-0.99	
加工後 2-1B-1	-17.1	+5.4	特殊加工
" 1B-3	-13.5	+5.4	
" 1B-4	- 8.1	0	
" 2-2B-1	-24.6	0	
" 2B-3	-20.5	0	
加工後加熱 (2B-3)			
500°C	- 0.6	0	
700°C	- 0.6	0	
加工後減圧加熱 (2B-3)			0.4 気圧
200°C	- 7.2	+5.4	
300°C	- 6.2	+5.4	
500°C	- 0.6	0	

4. 4 総括伝熱係数

複合管の伝熱を図1に示したように考え、熱の移動が温度  $t_1$  → 温度  $t_2$  に起こると考えると

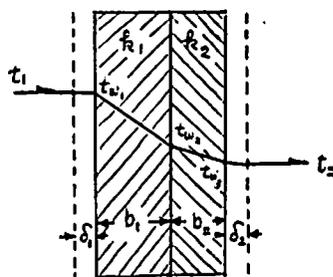


図 1 複 合 管 の 熱 の 移 動

$$t_1 - t_{w1} = \frac{\delta_1}{k_1} \cdot \frac{Q}{A}$$

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{b_1}{k_1} \cdot \frac{Q}{A}$$

$$t_{w2} - t_2 = \frac{b_2}{k_2} \cdot \frac{Q}{A}$$

$$t_{w1} - t_2 = \frac{\delta_2}{k_2} \cdot \frac{Q}{A}$$

$$\therefore t_1 - t_2$$

$$= \left( \frac{\delta_1}{k_1} + \frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2} + \frac{\delta_2}{k_2} \right) \cdot \frac{Q}{A}$$

$$= \left( \frac{1}{h_1} + \frac{b_1}{k_1} + \frac{b_2}{k_2} + \frac{1}{h_2} \right) \frac{Q}{A}$$

ただし  $h_1 = k_1/\delta_1$   $h_2 = k_2/\delta_2$

また  $1/U = 1/h_1 + b_1/k_1 + b_2/k_2 + 1/h_2$

とおけば

$$t_1 - t_2 = Q/A \cdot U$$

$$\therefore Q = AU(t_1 - t_2)$$

ただし  $U$  : 総括伝熱係数

$t_1, t_2$  : 高, 低温度側の温度

$h_1, h_2$  : 各境界伝熱係数

$k_1, k_2$  : 材料の熱伝導率

$b_1, b_2$  : 材料の厚さ

$Q$  : 単位時間, 器位面積当り流れる熱量

$A$  : 伝熱面積

### (1) 総括伝熱係数の測定

図2に装置の概要を示した。

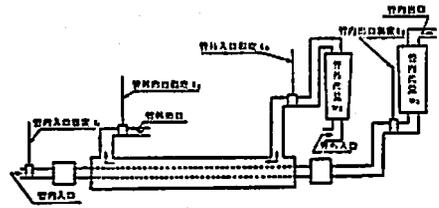


図2 総括伝熱係数測定装置

$$Q = W_i \Delta t_i C_{pi} \quad (i=1, 2)$$

ただし  $W$  : 流量,  $A$  : 伝熱面積

$\Delta t$  : 入口, 出口側の温度差

$\Delta T$  : セル側, チューブ側の対数平均温度差,

$C_p$  : 比熱

$$U = Q/(A \cdot \Delta T)$$

### (2) 測定結果

測定結果を表10に示した。この結果, ライニング鋼管の総括伝熱係数を裸鋼管のそれと比較すると約80~95%の値を示し, 特に鋼管内厚の厚いもの程低下する。

なおこの場合, ライニングしたチタン管の肉厚0.3~0.5mmは影響していない。これは外側の鋼管の影響の方が大きく利いているためである。

#### 4.5 座屈試験

チタン・ライニング鋼管を加熱もしくは減圧加熱により座屈の有無を測定した結果を表11に示したが, チ

表10 総括伝熱係数測定結果

供試管	外径 (mm)	肉厚 (mm)		測定長さ (mm)	管内流速 (m/sec)	管外流速 (m/sec)	総括伝熱係数 (kcal/m <sup>2</sup> ·h·°C)
		鋼管	チタン管				
1-1	28.6	1.3	0.3	1,000	1.66	0.2	1,080
1-2	28.6	1.3	0.3	1,000	1.66	0.2	1,070
1-3	28.6	1.3	0.3	1,000	1.66	0.2	1,100
平均	28.6	1.3	0.3	1,000	1.66	0.2	1,083 (96%)
鋼管	28.6	1.3	—	1,000	1.65	0.2	1,128 (100%)
2-1B-1	33.48	6.37	0.30	2,000	2.52	0.3	810
1B-2	33.50	6.38	0.30	2,000	2.50	0.3	800
2-1B-3	33.50	6.37	0.49	2,000	2.53	0.3	830
1B-4	33.58	6.37	0.49	2,000	2.52	0.3	803
平均	33.50	6.37	0.3/0.5	2,000	2.52	0.3	811 (81%)
鋼管	33.5	6.37	—	2,000	2.52	0.3	1,008 (100%)

タン管の内厚の薄いもの(0.3mm)は座屈するおそれがある。

(イ) 加熱試験

チタン管と鋼管の隙間を両端において完全密封し、加熱により隙間に存在する微量の空気の膨張圧力により内部チタン管が座屈するかどうかを試験した。両端は銀ロウ溶接、またはフランジ溶接加工にして漏洩を防止した。

表 11-1 加熱による座屈試験

供試管	外径 (mm)	肉厚(mm)		温度(°C)					
		鋼管	チタン管	100	300	500	600	700	
2-1B-1	33.48	6.37	0.30	OK	OK	OK	OK	OK	座屈
1B-3	33.50	6.37	0.49	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2-2B-1	58.40	8.70	0.31	OK	座屈 (290°C)	—	—	—	—
2B-3	58.40	8.70	0.50	OK	OK	OK	OK	OK	OK

(ロ) 減圧加熱試験

複合管内部を減圧するため管端の一端を完全密封し、他端はフランジ接合とし中央より減圧にした。管内気圧は加熱中 0.35~0.45 気圧(平均 0.4 気圧)に保持しながら加熱した。

表 11-2 減圧加熱による座屈試験

供試管	外径 (mm)	肉厚(mm)		温度(°C)		
		鋼管	チタン管	200	300	500
2-2B-3	58.40	8.70	0.50	OK	OK	OK

これらの結果ではライニング材としてのチタン管は、内厚の薄いものは、外径 1B のもので 700°C、2B のもので 290°C 加熱で座屈する。従って高温もしくは減圧加熱される場合、チタン管内厚については注意する必要があるが、熱変化の少ない範囲で、たとえば

1B サイズを熱交換器用材料として使用する場合は問題は起こらないと考えられる。また圧力配管用として使用する場合は、ライニング材としてのチタン管の内厚は 0.5mm 以上のものを用いることが望ましい。

5. 結論

爆発加工により薄肉チタン管を鋼管内面にライニング加工した複合管の各種性能を測定した結果、

- (1) 管の外径、肉厚の変化はない。
- (2) 硬さは内管チタン管が硬くなり硬さの増加率はチタンで約 4~9%、鋼管で 1~4% であつた。
- (3) 残留応力は加工前はチタン管、鋼管のいずれも引張り方向の応力であるが、加工後チタン管のみ圧縮応力に変化し、鋼管は引張応力が減少する。これは抽伸方法で加工した場合と異なっている。
- (4) 総括伝熱係数は裸鋼管 100% に対し 81~96% の値を示し若干低下する。なお鋼管の内厚の厚いもの程減少するのは当然である。
- (5) 座屈テストの結果、チタン管の内厚の薄いもの(0.3mm)では高温加熱により、また径の大きい場合は低温度(290°C)でも座屈する。

これらの結果、爆発加工によりチタン薄肉管ライニングした複合鋼管は、外径が小さく(1B サイズ)低温度(200°C 以下)減圧加熱されないような条件で使用する場合はチタン肉厚は 0.3mm でも使用可能である。しかし、圧力配管用として使用する場合はライニングチタン管の内厚は少なくとも 0.5mm 以上のものを使用することが望ましいといえる。

最後に本実験を行なうにあたり、爆成加工については旭精機工業(株)松沢、吉井、飯山の諸氏に、各種測定については古河電気工業(株)、大阪神鋼所 村上、西島、今井の諸氏に絶大なる協力を得たことを感謝する次第である。

Steel Pipe Lined with Titanium by Explosive Working

by Y. Takeda and M. Niimi

We measured, as properties of explosively thin-walled titanium lined steel pipes, hardness, residual stress, overall heat transfer coefficient, and dents caused on the pipes by heating and vacuum heating. Results of measurements are as follows;

- (1) Outer diameter and wall thickness of the pipe remained unchanged.
- (2) Hardness of titanium pipe rose by 4~9% and that of steel pipe by 1~4%.
- (3) The residual stress of explosion-fabricated titanium pipe had compression, while that of steel pipe had elongation.
- (4) The overall heat transfer coefficient of the pipe was 81~96% of that of bare steel pipe.
- (5) We measured dents caused on the pipe by heating and vacuum heating.