鋼管の内圧クリープ破断について*

篠田 暁** 玉田 公*** 井上 靖介**

Creep Rupture on the Tubular Specimens under Internal Pressure at High Temperature

by

Noboru SHINODA, Isao TAMADA and Yasusuke INOUE

(Research Department, Yawata Steel Tube Co., Ltd., Tokyo)

In the tube design of boilers and other high temperature and high pressure installations, most of the tubes under internal pressure are designed on the basis of creep or creep rupture strength of simple tension bar specimens. In practice, these are used under multiaxial stresses. It is required therefore that the most representative formula will be determined experimentally which is to be applied to the designing of tubes subject to internal pressure at high temperature.

In the present study, the creep tests on tubular specimens of 18-8Mo steel (thin-walled tube), $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo steel (thick-walled tube) and a low carbon steel (electric resistance welded tube) under internal pressure were carried out. The data of the stress rupture tests on tubular specimens were compared with those of simple tension bar specimens cut from the same tubes. The results are summarized as follows :

(1) A reasonable estimation of creep rupture life of the tube subject to internal pressure may be made from the uniaxial creep rupture data by using the Mean diameter formula. This agreement is independent of the steels, the size of the tubes, and of the temperature and time. The reason for this agreement is regarded as the redistribution and the levelling of circumferential stress that occurred in the creep stage over the tube wall.

(2) The creep rupture test on the welded tube of a low carbon steel under internal pressure was carried out. The tube was the stretch reduced at 800°C after welding. In this test, the welded tube showed almost equivalent creep rupture strength as compared with the seamless tube.

(3) From this result, the welded tube can be used in high temperature service by giving proper treatment to eliminate the weld structure.

(Received Oct. 27, 1964)

1 緒 言

ボイラ用鋼管や化学プラント等高温で内圧をかけて使用される装置の設計には、従来棒状試験片を用いて一軸引張応力の下で試験されたクリープ強度あるいはクリープ破断強度が適用されてきたが、実際の使用中の応力状態は多軸応力状態でありこれがクリープ変形の進行と共に変化する。このような実際の応力状態におけるクリープ破断強度を求めようとして筆者らはさきに薄肉鋼管の内圧クリープ破断特性について研究を行なつてきた。ここではオーステナイト系18—8Mo鋼薄肉鋼管、 $2\frac{1}{4}$ Cr—1 Mo鋼厚肉鋼管、低炭素鋼薄肉電縫鋼管の内圧クリープ破断の結果につき報告する。

ここで電縫鋼管を取り上げたのは管の軸方向に溶接継目が存在するため普通の方法ではそのクリープ破断強度を求められないことおよび鋼管製造法の進歩により経済的な意味でボイラ用鋼管として関心を集めているためである。

2 供 試 材

この試験に用いた材料は 18—8Mo鋼 (継目無鋼管)、 $2\frac{1}{4}$ Cr—1 Mo鋼 (継目無鋼管) および低炭素鋼 (電気抵抗溶接鋼管) でその化学成分を Table I に示す。電縫鋼管と比較するため前に試験した低炭素鋼 (継目無鋼管) の化学成分も同時に示してある。今回用いた供試鋼管は機械加工を行なわない製管のままのものである。その試験片の形状および棒状試験片の形状寸法を Fig.1 に示す。Table II には鋼管試験片の寸法および熱処理を示す。棒状試験片は鋼管の軸方向から切

* 原稿受理 昭和39年10月27日

** 八幡鋼管(株)研究部 東京都板橋区舟渡町三丁目2848

*** 正会員 " " "

Table I. Chemical composition.

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
18-8 Mo steel	0.07	0.49	1.70	0.026	0.012	17.11	12.07	2.50
Low carbon steel (Elec. resi. weld, tube)	0.12	0.28	0.48	0.013	0.024	—	—	—
Low carbon steel (Seamless tube)	0.13	0.25	0.50	0.013	0.021	—	—	—
2¼ Cr-1 Mo steel	0.11	0.23	0.48	0.010	0.008	2.18	—	0.90

Fig. 1. Test specimen.

Table II. Size and heat treatment of specimens.

Material	Size (mm)	Heat treatment
18-8 Mo steel	$D_0=30.0$ $t=2.2$ $D_1=25.6$	$1100^\circ\text{C} \times 1/2\text{hr} \rightarrow \text{WQ}$
Low carbon steel (Elec. resi. weld, tube)	$D_0=27.2$ $t=3.0$ $D_1=21.2$	(I) Elec. resi. $\rightarrow 800^\circ\text{C}$ stretch weld reduce (II) E.R.W $\rightarrow 800^\circ\text{C}$ $\rightarrow 900^\circ\text{C}$ No- S.R. $\rightarrow$ normalize
2¼ Cr-1 Mo steel	$D_0=33.7$ $t=5.85$ $D_1=22.0$	100°C/hr $900^\circ\text{C} \times 1\text{hr} \rightarrow 600^\circ\text{C} \rightarrow \text{A.C}$

り出したものである。低炭素鋼電縫鋼管はSiキルド鋼で、低周波電気抵抗溶接により製管後 800°C にて絞り圧延を行ない(Ⅰ) 絞り圧延のまま、(Ⅱ) 絞り圧延後 900°C にて焼準したものの2種類について試験を行った。この電縫ボイラ用鋼管は初期の試作品の一つで、現在の立場からみれば鋼種、溶接法等必ずしも最良とは考えられないが、管軸方向に溶接継目のある電縫鋼管のクリープ破断強度を求めること、および溶接後高温において絞り圧延を行なうことによる熱処理効果を知るためである。

3 試験装置および試験方法

試験装置は前報に述べたものと同じで、水圧ポンプにより試験片に高圧水を封入し、試験片は堅型電気炉で加熱している。試験片の中には中子を入れて温度変動によって起こる圧力の変動および破断時の爆発力を少なくしている。試験可能温度範囲は $300 \sim 800^\circ\text{C}$ 、精度は $\pm 3 \sim 4^\circ\text{C}$ 、圧力範囲は $0 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ 、精度

は設定値の約1%前後である。圧力調節はリザーバの水温を加減することにより行なっている。

鋼管の内圧クリープ破断強度と一軸引張クリープ破断強度の関連性を比較検討するために、内圧クリープ破断試験の結果は下記のような三つの設計基準式を用いて整理した。

$$\text{Barlow の式} \quad \sigma = \frac{P}{2} \frac{D}{t}$$

$$\text{平均径の式} \quad \sigma = P \left[\frac{1}{2} \frac{D}{t} - 0.5 \right]$$

$$\text{ASME の式} \quad \sigma = P \left[\frac{1}{2} \frac{D}{t} - y \right]$$

(y は鋼種と温度によるパラメータで $0.4 \sim 0.7$ の値をとる。 σ : 応力 P : 内圧 D : 管の外径 t : 管の内厚)

高温における鋼管の内圧クリープ破断試験においてこれらの式により与えられる応力値はある時間で鋼管が破壊する応力で、同じ材料の一軸クリープにおいて同じ時間に破断する応力に最も近いものが最も信頼し得る式ということになる。

試験片は試験にさきだち約20時間所定温度に保持した後圧力を負荷した。

4 試験結果

Fig. 2は18—8Mo鋼継目無鋼管の内圧クリープ破断

Fig. 2. Comparison of creep rupture data on thin-walled tubular and bar specimens of 18-8 Mo steel.

Fig. 3. Comparison of creep rupture data on thick-walled and thin-walled tubular specimens of 2¼ Cr-1 Mo steel. (Stress calculated by Mean diameter formula.)

線図である。一軸クリープ破断の結果と比較してみると大体平均径の式がよい一致を示している。

Fig.3 は600℃における $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼厚肉鋼管の内圧クリープ破断試験の結果で、同一材による一軸クリープ破断および薄肉鋼管の内圧クリープ破断の結果も同時に示している。ここでは薄肉、厚肉共に平均径の式を用いて整理したものが比較的良好に一軸の結果と一致しているようである。今後オーステナイト系厚肉鋼管についても実験を予定しているが、これらは文献によると $2\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼以上に平均径の式による整理がよく合うようである。

Fig.4 は低炭素鋼電縫鋼管の内圧クリープ破断線図である。この場合、試験は400℃、450℃、500℃の各温度で行ない、参考のため載せた継目無鋼管とは別々の charge である。この結果をみると、450℃以下では電縫鋼管のクリープ破断強度は継目無鋼管に充分匹敵する。また破断位置も溶接部にかかわりなく、at-random などところで起こっている。試験温度が500℃の場合には、(I)の絞り圧延のままのものは溶接部で破断するものが増える傾向にあるが、(II)の絞り圧延後焼準した材料は全部母材部で破断している。しかし、この温度で両者の間には強度的に全く差がない。このような傾向は、溶接法、脱酸法等の改良により充分除きうるものであるが、その原因となる因子については現在検討中である。いずれにしても、低炭素鋼ボイラ管は450℃以下で用いられることから、充分実用性があると考えられる。

Fig.4. Stress rupture data on welded tubular specimens of low carbon steel. (Stress culculated by Mean diameter formulla).

鋼管の内圧クリープ破断試験の破断状況の一例として Fig.5 に低炭素鋼電縫鋼管の場合を示す。比較的短時間で破断したものが大きく口を開いている。この破断部を拡大してみると短時間で破断したものと比較的長時間で破断したものではその様子が相当異なっている。Fig.6 は 18-8 Mo 鋼の破断部である。破断部では内外面とも多数のクラックが発生し、その一つから破断が起こっている。Fig.7, Fig.8 は電縫鋼管の破断

Fig.5. Rupture specimens of welded tube of a low carbon steel.

Outside appearance of rupture ×4

Inside appearance of rupture ×4

Fig.6. Appearance of ruptured specimen of 18-8 Mo steel. Temp. 650℃, Stress 16.5kg/mm², Time 873.2 hr.

Outside appearance of rupture $\times 4$ Inside appearance of rupture $\times 4$

Fig.7. Appearance of ruptured specimen of welded tube I. Temp. 400°C, Stress 24kg/mm², Rupture time 1604.3hr., Rupture location (Base metal)

Temp. 400°C, Stress 24kg/mm², Rupture time 1604.3hr., Rupture location (Base metal) Temp. 450°C, Stress 14kg/mm², Rupture time 1336.7hr., Rupture location (Base metal) Outside appearance of rupture $\times 4$ Inside appearance of rupture $\times 4$

Fig.8. Appearance of ruptured specimen of welded tube I. Temp. 500°C, Stress 11kg/mm², Time 237.0hr., Rupture location (Weld part.)

Temp. 500°C, Stress 11kg/mm², Rupture time 237.0hr., Rupture location (Weld metal)
 $\times 500$

Fig.9. Micro structure ruptured area of welded tube I.

部の拡大写真である。Fig.7 は母材部で破断したもの。Fig.8 は溶接部で破断したものである。

破断部の顕微鏡組織は継目無鋼管については大体一軸クリープ破断試験後のものと大差はないので、ここでは電縫鋼管のクリープ破断後の組織をいくつか示す。Fig.9は800°C絞り圧延材の破断部の組織である。絞りの際の加熱により溶接部は焼きもどされ、母材部と溶接部は光学顕微鏡では区別できない。組織は細かいフェライトとパーライトからなっており、破断部にはボイドが多く見られる。Fig.10は絞り圧延後 900 °Cで焼準した(Ⅱ)の材料で母材部、溶接部とも典型的なフェ

Ruptured area (Base metal)
Temp. 450°C, Stress 14.8kg/mm², Rupture time 1 348.3hr.

Welded area
×500

Fig.10. Micro structure of welded tube II.

ライトとパーライト組織である。破断伸びについては両者とも同じ程度である。

5 考 察

今までいくつかの設計基準式を用いて鋼管の内圧クリープ破断応力と一軸引張応力状態におけるクリープ破断応力とを比較した結果、平均径の式から計算した破断応力によって整理すると、薄肉、厚肉によらず鋼管の内圧クリープ破断応力は一軸クリープ破断応力と比較的良好に一致する。このような高温における鋼管の内圧クリープ破断は軸方向に割れ目が生じて破壊し、これは内圧によって発生する切線方向応力によるものである。この切線方向応力について平、小寺沢、大谷氏は厚肉鋼管の内圧クリープについての報告^{4,5)}の中で、この応力が負荷直後の弾性的な応力分布から比較的短時間の間に管壁にわたって平均化され、この状態はわずかな変化をもって10万時間以上持続すること、そして管壁にわたって平均化された切線応力の下でクリープが進行すると発表されている。Fig.11はこの報告の中での応力分布の変化についての図を転載したものである。したがって、内圧クリープ破断についても同様の経過でクリープ過程中に管壁にわたって切線方向応力が平均化されて、この状態で長時間にわたってクリープが進行し、遂には破断に至るものであろう。このような厳密なクリープ理論によって求められた切線方

Fig.11. Stress distribution in thick-walled tubes under elastic and creep condition.
(by S. Taira.⁶⁾)

向応力あるいは相当応力と平均径の式による応力との関係等については現在検討中であり次の機会に譲る。

このような鋼管の内圧クリープ破断応力を一軸クリープ破断応力と一致させるような設計式を求める試みは、最近英国において10 000時間以上^{2,8)}にわたる大規模な実験が行なわれ、その中間報告がなされている。その結果によると、温度、応力、鋼種、管の方法等によらず平均径の式が最も適合性があると結論づけられ、高温内圧円筒の設計基準 (BS) の改訂の基礎となっている。

6 結 び

(1) 平均径の式によって求めた鋼管の内圧クリープ破断応力は薄肉、厚肉にかかわらず一軸引張クリープ破断応力と良好な一致を示す。

(2) 一軸クリープ破断試験によっては求められない不均質部が存在する鋼管たとえば電縫鋼管や鋼管の溶接継手等のクリープ破断強度が内圧クリープ試験により容易に求められる。

(3) この試験に用いた電縫鋼管は初期の試作品であるので製鋼法、溶接法等ボイラ用として必ずしも最良のものとは考えられないが、継目無鋼管に比べてあまり遜色のないクリープ破断強度を示した。したがって、電縫鋼管はボイラ用として充分実用に供し得るものと思われる。

(昭和39年9月8日 第7回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 篠田 暲, 倉貫好雄, 玉田 公, 材料, **13**, 157 (1964).
- 2) Carlson, W.B., and D. Duval, Rept. Birt. Elec. and Applied Ind. Research Assoc., **J T 182** p.1 (1962).
- 3) Chitty, A., and D. Duval, Proc. Joint Int. Conf. on Creep, p. 4-1 (1963) New York.
- 4) 平 修二, 小寺沢良一, 大谷隆一, 材料, **13**, 163 (1964).
- 5) 平 修二, 第9回「材料の強度と疲労シンポジウム」予稿, p.1 (1964).