各種ステンレス鋼の高温回転曲げ疲労特性に関する研究*

森 本 精 洋^{*1}Study on Rotating Bending Fatigue Characteristic of
Several Stainless Steels at High TemperatureAkihiro MORIMOTO^{*2}^{*2} Department of Mechanical Engineering, Kinki University,
3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka-shi, Osaka, 577-8502 Japan

The rotating bending fatigue tests were carried out at room temperature, 200°C, 400°C, 600°C and 800°C with a frequency of 1 200 cycles/min. using SUS 304 solution treatment material and SUS 304-1/2 H 10% cold working material, and were carried out at room temperature, 300°C and 600°C using SUS 430 and SUS 403. The cold working material showed higher strength at finite life and fatigue limit in every temperature than the other materials did, although the difference of fatigue limit above 400°C between the cold working material and the other materials were a little. The relationships between the fatigue limit σ_w and the tensile strength σ_B were obtained as $\sigma_w = 0.44\sigma_B$ for SUS 304 at every temperature and SUS 304-1/2 H over 200°C, and $\sigma_w = 0.58\sigma_B$ for SUS 430, SUS 403 at every temperature and SUS 304-1/2 H below 200°C. Besides, the relationship between the stress ratio $\sigma_a/\sigma_{wR.T.}$ and the parameter $P = (10 - \log N_f)/T$ was proposed to estimate the fatigue strength at finite life, where σ_a is the bending stress amplitude, $\sigma_{wR.T.}$ is the fatigue limit at room temperature, N_f is the cycles to failure and T is the absolute temperature.

Key Words: Fatigue, Rotating Bending Fatigue, Fatigue Limit, High Temperature, SUS 304, SUS 430, SUS 403

1. 結 言

ステンレス鋼は耐熱性、耐食性に優れているため、各種化学工業や原子炉関係に関わる高温での構造部材に使用されることが多い。550°Cまでは、フェライト系または、マルテンサイト系ステンレス鋼が、それ以上の温度では、オーステナイト系ステンレス鋼が使用されることが多い。

クロムが 13%以上含有するフェライト系やオーステナイト系は変態点を持たないので、熱処理しても硬化することはない。このため強度向上には塑性変形による加工硬化に依存せざるを得ず、冷間加工により粘りを低下させることなく、高強度を得ることができる。この加工の影響については、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 において、室温では加工度 10%までは疲労寿命は向上する⁽¹⁾。またショットピーニングや引張予加工を施すと、288°C程度では疲労寿命は向上するとの報告がある⁽²⁾⁽³⁾。一方、高温では疲労特性は室温と異なり、 10^7 回の繰返し数においても疲労

限度は認められず、それより高い繰返し数になる場合のあることも報告されているので⁽⁴⁾⁽⁵⁾、加工の有無や鋼種によりこれらの現象も複雑に変わるものと推察される。

本論文はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用い室温から 800°Cの温度範囲で、冷間加工が高温回転曲げ疲労特性に与える影響を調査するとともに、フェライト系ステンレス鋼 SUS430、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を用い、室温から 600°Cの温度範囲で、疲労限度の温度依存性および疲労限度と高温引張強さや高温ビッカース硬度との関連、および時間強度の評価方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料 材料は JIS 規格のオーステナイト系ステンレス鋼の冷間加工材 SUS304-1/2H とその固溶化熱処理材 (1,050°C水焼入れ) である。冷間加工材の加工度 (断面減少率) は 10%程度である。フェライト系ステンレス鋼は SUS430 で冷間加工材を焼なまし処理 (800°Cより空冷) した。マルテンサイト系ステンレス鋼は SUS403 で固溶化熱処理材 (980°C水焼入れ, 730°Cで焼戻し) である。供試材料の化学成分

* 原稿受付 2005 年 3 月 30 日。

^{*1} 正員、近畿大学理工学部 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)。

E-mail: morimoto@mech.kindai.ac.jp

を表 1, 機械的性質を表 2 に, その組織写真を図 1 に示す。なお SUS304-1/2H の断面内 (素材直径 13mm) の硬度分布は図 2 で, 後述する引張試験片 (直径 6mm) および疲労試験片 (直径 8mm) 採取位置ではほぼ同じ硬度分布であり, この範囲では均一に冷間加工が施されていたことが分る。

2.2 試験片形状 前述した引張試験に用いた試験片および疲労試験片の形状を図 3 に示す。いずれの試験片も, 圧延方向が試験片軸方向となるように採取した。

2.3 高温引張試験 引張試験は標点距離 30mm で, 0.2%耐力までは 0.3%/分, それ以後は約 7.5%/分のひずみ速度で試験した。

2.4 高温回転曲げ疲労試験 疲労試験は電気炉を有する小野式回転曲げ疲労試験機で行った。試験温度は SUS304-1/2H, SUS304 材では室温, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C の五温度条件で, 1200cycle/min の繰返し速度で試験した。SUS430 材と SUS403 材については, 室温, 300°C, 600°C の三温度条件で 1200 cycle/min の繰返し速度で試験した。

なお, SUS304-1/2H と SUS304 材の室温と 200°C での疲労限度近傍応力を除いた疲労寿命が約 10^5 回以下の部分では, 試験片の塑性変形が大きく, 発熱したため, 繰返し速度は 300cycle/min とした。

疲労試験では, 時間強度部分の応力は上下の応力比が 1.03~1.1 となるよう応力を低下させ疲労試験を行った。疲労限度は疲労試験を行った応力で破壊しなかった時の最大応力としたが, 10^8 回で破壊しなかった場合は S-N 曲線より, 10^8 回での応力振幅値を疲労限度とした。

3. 試験結果および考察

3.1 疲労試験結果 曲げ応力振幅 σ_a と破壊までの繰返し数 N_f の関係を図 4 に示す。これより以下のことが判明した。

(1) 冷間加工材 (SUS304-1/2H) はいずれの温度においても, 時間強度および疲労限度とも固溶化熱処理材 (SUS304) より高い強度を示す。

(2) しかし疲労限度においては, 400°C 以上では冷間加工材は固溶化熱処理材と大きな差は無くなっている。

(3) SUS304 は 800°C 以上, SUS304-1/2H と SUS430 ならびに SUS403 は 600°C 以上において, 10^8 回でも明瞭な疲労限度は認められなかった。

3.2 疲労限度の温度依存性 表 3 に疲労試験により求めた各温度での疲労限度のまとめおよび図 5 に疲労限度の温度依存性を示す。これよりいずれの温度においても SUS304-1/2H が高い疲労限度を示すがこの材

料の再結晶温度は, ほぼ 400°C 程度と考えられる⁽⁶⁾
(7), この温度以上では冷間加工の影響が薄れ, 両材

Table 1 Chemical compositions of materials (Wt.%).

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.07	0.25	1.75	0.036	0.023	8.82	18.71
SUS304-1/2H	0.04	0.18	0.27	0.035	0.007	—	18.18
SUS430	0.13	0.34	0.54	0.031	0.012	0.37	11.89

Table 2 Mechanical properties of materials.
(a)SUS304, SUS304-1/2H

Item	Temperature (°C)	SUS304	SUS304-1/2H
Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	R.T.	205	507
	200	132	426
	400	117	386
	600	91	333
	800	84	146
Tensile strength σ_B (MPa)	R.T.	589	705
	200	443	540
	400	435	526
	600	354	422
	800	163	202
True tensile strength σ_T (MPa)	R.T.	2069	2019
	200	1247	1239
	400	995	1040
	600	796	920
	800	418	391
Elongation δ (%)	R.T.	78.0	53.5
	200	52.7	28.8
	400	49.3	29.2
	600	49.0	29.3
	800	99.0	77
Reduction of area ψ (%)	R.T.	83.3	80.5
	200	79.0	73.3
	400	71.5	66
	600	71.6	71.6
	800	86.0	81
Vickers hardness HV	R.T.	189	274
	200	179	224
	400	171	200
	600	127	141
	800	54.5	67.2

(b)SUS430, SUS403

Item	Temp. (°C)	SUS430	SUS403
Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	R.T.	255	268
	300	175	232
	600	98	112
Tensile strength σ_B (MPa)	R.T.	440	538
	300	358	444
	600	168	200
True tensile strength σ_T (MPa)	R.T.	1173	1160
	300	945	951
	600	426	430
Elongation δ (%)	R.T.	41.4	34.5
	300	34.8	30.5
	600	69.2	60.9
Reduction of area ψ (%)	R.T.	81.3	73.4
	300	79.8	72.5
	600	91.5	88.9
Vickers hardness HV	R.T.	160	174
	300	128	142
	600	46.8	53.3

Fig.2 Hardness distribution of cold working material.

(a) Specimen of tensile test.

(b) Specimen of rotating bending fatigue test.

Fig.3 Configuration of specimens.

料の疲労限度が接近してくる。また、SUS430 と SUS403 は室温では疲労限度は高いが、温度による疲労限度の低下割合は大きい。

3.3 疲労限度と引張強さおよび硬度の関係 疲労限度と引張強さおよび硬度の関係を、他の研究者の結果も含め^{(4) (9)} 図6, 7に示す。これより以下のことが分る。

- (1) すべての温度での SUS304, 安全側となるが 200℃を超える SUS304-1/2H では、疲労限度 σ_w と引張強さ σ_B ならびにピッカース硬度 HV の関係は式 (1), (2) のように評価される。

$$\sigma_w = 0.44 \sigma_B \cdots (1)$$

$$\sigma_w = 1.25 HV \cdots (2)$$

- (2) すべての温度での SUS430, SUS403 ならびに安全側となるが 200℃以下での SUS304-1/2H では式 (3), (4) のように評価される。

$$\sigma_w = 0.58 \sigma_B \cdots (3)$$

$$\sigma_w = 1.63 HV \cdots (4)$$

3.4 時間強度の評価方法 疲労強度設計で寿命評価する場合、一般に累積損傷則に従い寿命を推定することが多い。この場合時間強度が計算の基準となるため疲労の時間強度の評価が重要となる。

高温回転曲げ疲労の時間強度について、室温でも行われているような応力比 σ_a / σ_B (応力振幅 / 引張強さ) を用いて整理した結果を図8に示す。これより、

(a) SUS304, SUS304-1/2H

(b) SUS430, SUS403

Fig 4 Result of rotating bending fatigue.

Table 3 Summary of test result

(a) SUS304, SUS304-1/2H

Item	Temperature(°C)	SUS304	SUS304-1/2H
Fatigue limit σ_w (MPa)	R.T.	254	418
	200	185	302
	400	185	234
	600	185	195(10^8 over)
	800	75(10^8 over)	85(10^8 over)

(b) SUS430, SUS403

Item	Temp.(°C)	SUS430	SUS403
Fatigue limit σ_w (MPa)	R.T.	263	294
	300	225	224
	600	78(10^8 over)	126(10^8 over)

Fig 5 Temperature dependence of fatigue limit.

Fig 6 Relationship between fatigue limit under rotating bending fatigue and tensile strength.

Fig 7 Relationship between fatigue limit under rotating bending fatigue and Vickers hardness.

温度ごとに別々の時間強度線図が得られるため、高温回転曲げ疲労の時間強度については、室温と同様な手法では、統一的な時間強度の整理は難しいことが判る。ここでは、時間強度の温度依存性を評価するため、クリーブ破断に対する温度・時間パラメーター法⁽⁸⁾を

温度・回数パラメーター表現する手法について検討した。一般に、クリーブ破断に対する Larson-Miller 型のパラメーター $P = \pi(\log t_r + C)$ において、クリーブ破断時間 t_r の代わりに疲労寿命 N_f を用い、疲労破断の温度依存性について検討している⁽¹⁰⁾、なお T は絶対温

(a) SUS304

(b) SUS430, SUS403

Fig.8 Relationship between stress ratio and cycles to failure.

度である。

既に示した図4より時間強度部分の勾配は高温になるほど小さくなり、図9の模式図で示した N_f^* にばらつきもあるが、SUS304では 10^9 回程度、SUS304-1/2Hでは 10^{11} 回程度、SUS430とSUS403は 10^{10} 回程度となっている。各材料の時間強度を比較するため、同じパラメーターを用いた方が比較が容易であるので、 $\log N_f^*$ の平均値を用いると、式(5)のパラメーター表現が考えられる。なお、 $\log N_f^*$ の材質依存性、各温度間でのばらつきはあるが、本パラメーターを用いると $\log N_f^*$ が多少変わっても実験結果を整理する上では、あまりこの数値の影響が顕微に現れないとが分かった。

$$P = \frac{\log N_f^* - \log N_f}{T} = \frac{10 - \log N_f}{T} \quad \dots \dots (5)$$

図10に本パラメーターによる高温回転曲げ疲労における時間強度部分の整理した結果を示す。各々の材料で時間強度の部分は一つの曲線で表されることが分る。また、疲労限度は式(1)(2)(3)(4)で計算される応力振幅値で推定されるため、図10で、各温度で用いる曲線の範囲は上記の応力振幅値以上の曲線部分で時間強度が推定される。なおこのパラメーターはクリープ破壊に対するManson-Hafner型のパラメーター $P = (\log t_r - \log t_a) / (T - T_a)$ のクリープ破断時間 t_r を疲労寿命 N_f に置き換えたものと類似している。

時間強度の材料強度依存性を正規化する方法として図11に、応力比 $\sigma_a / \sigma_{w,RT}$ (応力振幅 / 室温での疲労限度)と提案するパラメーターを用いて、実験結果を整理した。これより、図10に比べ若干ばらつきは大きくなるが、材料が変わっても、時間強度が統一的に評価されることが判る。なお、応力比の分母を室温での引張強さ σ_{BRT} とすると整理された結果にばらつきが大きくなっていることが認められた。図中には他の研究者の結果⁽⁴⁾も記載したが、提案したパラメータ

Fig.9 Schematic relationship between σ_a and N_f

Fig.10 Estimating method of fatigue strength at finite life using proposed parameter.

Fig.11 Normalizing method of fatigue strength at finite life using proposed parameter.

一で実験結果が良く整理されている。この評価式は、時効などにより、高温において疲労強度が室温より高くなる場合を除けば、有効と思われるが、提案したパラメーターの機構解明、ならびに各種材料への適用については今後の課題と考える。

3.5 冷間加工が疲労限度に与える影響 表4に引張強さ、降伏応力、疲労限度、硬度、絞りの冷間加工による変化状況（冷間加工材の数値/固溶化熱処理材の数値）を示す。これより 200℃以下では冷間加工により疲労限度の向上割合は 64%で、引張強さの向上割合 21%より大きい。それ以上の温度では両者の向上割合は同程度で 20%程度であった。なお、降伏応力はいずれの温度でも冷間加工により大幅に改善される。

Table 4 Comparison of mechanical properties between solution treatment material and cold working material.

Temperature	Fatigue limit $\frac{\sigma_w}{\sigma_B}$	Tensile strength $\frac{\sigma_B}{\sigma_B}$	Proof stress $\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.2}}$	Vickers hardness $\frac{HV}{HV}$	Reduction of area $\frac{\psi}{\psi}$
R.T.	1.65	1.20	2.47	1.45	0.97
200℃	1.63	1.22	3.23	1.25	0.93
400℃	1.26	1.21	3.30	1.17	0.92
600℃	1.05	1.19	3.66	1.11	1.00
800℃	1.13	1.24	1.74	1.23	0.94

4. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 とその冷間加工材 SUS304-1/2H を用い室温、200℃、400℃、600℃、800℃で回転曲げ疲労試験を行なった。またフェライト系ステンレス鋼 SUS430 およびマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS403 を用い、室温、300℃、600℃において回転曲げ疲労試験を行なった。これらの結果をもとに冷間加工が疲労強度に与える影響や疲労限度の温度依存性ならびに時間強度の統一的な評価方法について検討し、以下のような結果が得られた。

- (1) 冷間加工材 (SUS304-1/2H) はいずれの温度においても、時間強度および疲労限度とも固溶化熱処理材 (SUS304) より高い強度を示す。
- (2) SUS304 は 800℃以上、SUS304-1/2H と SUS430 ならびに SUS403 は 600℃以上において、 10^8 回でも明瞭な疲労限度は認められなかった。

(3) 疲労限度 σ_w と引張強さ σ_B ならびにビッカース硬度 HV の関係は以下のように評価される。

(a) SUS304, SUS304-1/2H (200℃超)

$$\sigma_w = 0.44 \sigma_B \quad \sigma_w = 1.25 HV$$

(b) SUS430, SUS403, SUS304-1/2H (200℃以下)

$$\sigma_w = 0.58 \sigma_B \quad \sigma_w = 1.63 HV$$

(4) 温度によらず材料毎で時間強度を評価する方法として、応力振幅 σ_a とパラメーターとして $P = (10 - \log N_f)/T$ による評価方法を提案した。なお T は絶対温度、 N_f は疲労寿命である。

(5) 材料および温度によらず、高温回転曲げ疲労の時間強度部分を統一的に表現する方法として、応力比 σ_a / σ_{wRT} とパラメーター $P = (10 - \log N_f)/T$ による評価方法を提案した。ここで σ_{wRT} は室温での疲労限度である。

参考文献

- (1) 日本材料学会, 疲労設計便覧, (1995), 46, 養賢堂。
- (2) 林眞琴・榎本邦夫, 材料, 45-10(1996), 1107-1112。
- (3) 加藤容三・高藤新三郎・桐山真紀, 材料, 45-1(1996), 43-47。
- (4) 金澤健二・吉田進, 材料, 22-234(1973), 257-264。
- (5) 金澤健二・山口弘二・佐藤守夫, 材料, 29-319 (1979), 400-405。
- (6) 特殊鋼ガイド編集委員会, 特殊鋼ガイド, (1982), 43 特殊鋼倶楽部。
- (7) 矢島悦次郎・市川理衛・古沢浩一, 若い技術者のための機械・金属材料, (1995), 62, 丸善。
- (8) 大谷隆一・駒井謙治郎, 環境・高温強度学, (1984), 187, オーム社。
- (9) 日本材料学会, 金属材料疲労データ集, (1992), 日本材料学会。
- (10) 山口弘二・小林一夫・西島敏, 金材技研材料強度データシート資料 11 「高温機器用材料の低サイクル疲労特性」, (1996)。