欠陥のある材料の高温疲労強度*

大 内 田 久**

The Influence of Temperature on the Fatigue Strength of Steel Containing Thermal Cracks

by

Hisashi ŌUCHIDA

(Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

In order to evaluate the degree to which thermal cracks in a shaft produced from Ni-Cr-Mo steel would lower the fatigue strength, fatigue tests were carried out at room temperature, 300°C and 500°C under rotating bending.

We have obtained the following facts through the experiments:

(1) The strength reduction factor of thermal crack is about 3.5 at room temperature, 3.3 at 300°C and 2.1 at 500°C. As for the explanation of these results, it appears reasonable to assume that notch sensitivity decreases with the increase of temperature and material around the tip of thermal crack is strengthened through work hardening by repeated load and aging.

(2) The fatigue strength of specimens containing thermal cracks at 500°C could be improved by 50 per cent through shot-peening.

(Received June 23, 1960)

1. 緒 言

欠陥のある材料の疲労強度¹⁾については、日本材料試験協会疲労部門委員会²⁾の研究があり、筆者も前にゴースト部の疲労強度³⁾、人工き裂材の疲労強度および欠陥材の寸法効果について報告している。しかしこれらの結果はいずれも室温においての実験結果が多く、高温における欠陥材の疲労強度についての研究は従来ほとんど見当らない。タービン軸その他高温で使用される機械部品に、その材料の製造過程に生じた欠陥が発見され、この部品の高温疲労強度が問題となることがある。本報はこのような場合の判定資料を得る目的で、Ni-Cr-Mo 鋼材につき簡単な高温疲労試験を行なったので報告する。

2. 供試材料および試験方法

(I) 供試材料

Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCMI) で製造過程において内部欠陥が検出され廃却となった軸材用のものである。したがって最終的な充分な熱処理は行なわれていない。試験には直径 550 mm の軸の 1/4 等分した長さ (または厚さ 68 mm) のものを用い、その欠陥の分布状況を横断面で、硝酸液腐食後磁化し鉄粉によって調べた。Photo. 1 はその欠陥を示す。中心部径 370 mm の領域に欠陥があり、その性状は Photo. 2 に示すような

Photo. 1 Transverse section of shaft with magnetic discontinuities ($\times 1/3 \cdot 3$)

Photo. 2 Photo-micrograph of thermal crack ($\times 400$)

* 原稿受付 昭和35年6月23日, 当協会第9期総会講演会にて講演 (昭35.5)

** 正員 日立製作所日立研究所

白点き裂欠陥である。外周の健全部(S)と中心の欠陥部(D)における材料の諸性質は Table 1, Table 2 のように求まり、材質的にも内外層で異なっていることがわかる。

(II) 試験片および試験機

試験片は Fig. 1 に示すような平行部分の直径 8mm の寸法のもので、素材の外層部および中心部よりそれぞれ健全および欠陥試験片を採取した。後者からき裂欠陥が試験片の軸に直角方向で表面に露出したものを選び出し試験に供した。Photo. 3 に表面に 3~5 mm の長さの欠陥のある試験片の一例を示した。試験片はすべて旋削仕上げ後エメリ 04 紙仕上げとした。試験機は高温小野式 4 型 (島津製作所製) で、試験速度は 3 000 rpm である。

Table 1 Chemical Composition of materials

Symbol	Chemical composition (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
S	0.28	0.27	0.73	0.016	0.006	1.69	0.84	0.16	0.18
D	0.24	0.26	0.68	0.021	0.005	1.66	0.83	0.14	0.16

Table 2 Mechanical properties of materials

Symbol	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
S	55.3	71.2	27.8	58.6
D	—	54.1	7.5	7.4

Fig. 1 Form of specimen

Photo. 3 Fatigue specimens containing thermal cracks

試験温度は試験中常に試験片より 3 mm 上の位置で測定し、所定の試験強度に試験片がなるよう調節された。試験温度は室温, 300°C および 500°C とした。

(III) ショットピーニング

欠陥のある材料の疲労強度の増大にショットピーニングが有効であることは、Ni-Cr 鋼や C 0.34 % 鋼について 30~40 % 疲労強度が向上した実験によって報告した⁵⁾。ここでは高温においても欠陥材に有効であることを調べることにした。ショットピーニングの条件は下記のとおりである。

使用機械 バキュームプラスタ, ノズル式

ショット 鋳鉄製直径約 1 mm

吹付圧力 約 4 kg/cm², 時間 1 min

アークハイト (A ストリップ) 0.3 mm

3. 疲労試験結果および検討

健全部についての疲労試験結果は Fig. 2 の S-N 線図のように求まり、繰返数 10⁷ 回での疲労強度を求めると、室温 35 kg/mm², 300°C 33 kg/mm² で 300°C までの強度低下は小さいが 500°C では 25 kg/mm² と著しく低下することがわかる。Photo. 4 に破断しなかった試験片の各温度における組織を示す。高温になるにしたがい組織がいくぶん粗大化しているのがわかる。

欠陥部については Fig. 3 の S-N 線図のように求まり、室温および 300°C では 10 kg/mm² と欠陥のための疲労強度の低下が著しい。500°C では繰返数 10⁶ 回以下では室温のものより疲労強度は低いが、10⁶ 回以上 10⁷ 回では室温よりかえって強くなり 12 kg/mm² となる。この傾向は高温になるにしたがい疲労強度がしだいに低下した健全部の傾向と異なっている。

欠陥試験片にショットピーニング加工したもの 500°C における疲労試験結果は、Fig. 3 に示すように 10⁷ 回の疲労強度は 18 kg/mm² と求まり、ショットピーニング加工しないものに比べ、50% と著しく強度が増大し効果があることがわかる。これらの試験結果

Fig. 2 S-N curves for specimens containing no thermal cracks for conditions indicated

を整理して Table 3 に示す。ここで室温における健全部の疲労強度と各種試験片の疲労強度の比を疲労強度低減係数 β_1 、各温度における健全部の疲労強度と欠陥部の疲労強度の比を β_2 とする。疲労強度と試験温度、疲労強度低減係数と試験温度との関係を図示すれば、Fig. 4、Fig. 5 のようになる。これらの結果から欠陥の影響は 300°C 程度まではほとんど室温の場合と変わらないが、500°C になると著しく小さくなることから、安全には高温でも室温と同様に欠陥による強度の低下を見積っておけばよいであろう。

Fig. 3 S-N curves for specimens containing thermal cracks for conditions indicated

Table 3 Summary of fatigue test results

Symbol	Temperature (°C)	Length of crack (mm)	Shot- peening	Fatigue limit (kg/mm²)	Decrease of fatigue limit	
					β_1	β_2
S	Room temp.	non	non	35.0	1.00	1.00
	300	"	"	33.0	1.06	1.00
	500	"	"	25.0	1.40	1.00
D	Room temp.	3.0~5.5	"	10.0	3.50	3.50
	300	3.0~4.0	"	10.0	3.50	3.30
	500	5.5~6.0	"	12.0	2.91	2.08
	500	3.0~5.0	Shot-peening	18.0	1.95	1.39

Fig. 2 と Fig. 3 の 500°C における S-N 曲線を比較すると欠陥のある場合のほうが健全なものに比べ、時間強度曲線の傾斜がゆるやかであることがわかる。

また欠陥のある試験片の 500°C の S-N 曲線が室温や 300°C のものと交差している。これは応力が比較的高く繰返数が少なく破断する場合は、高温のほうが温度のための材料の疲労強度低下と欠陥のための低下が利くが、繰返数が多く応力が比較的低くなると長時間高温での荷重繰返しによって、欠陥の先端の応力集中部で塑性変形が起こり応力集中が緩和されるとともに、材質的にも時効効果によって改善され、その結果温度の低い場合よりもかえって疲労強度が高くなるものとする。疲労破壊はき裂欠陥の先端部より発生するから、この部の疲労によるかたさの変化や材質変

Fig. 4 Relationship between endurance limit and test temperatures

Fig. 5 Relationship between fatigue strength reduction factor and temperature

Photo. 4 Photo-micrograph of specimen tested at room and elevated temperatures (×400×5/6)

化を調べてみた。Photo. 5 は室温 ($\sigma=12 \text{ kg/mm}^2$, $N=4.2 \times 10^6$) と 500°C ($\sigma=13 \text{ kg/mm}^2$, $N=8.1 \times 10^6$) ではほぼ同じ程度の応力段階で試験した試験片の表面のき裂先端部でかたさを調べたものである。き裂より 0.02 mm はなれた先端のまわりで平均 H_V 値で 25 程度 500°C のほうがかたく、またき裂先端より円周方向にかたさ分布を測定した結果は、Fig. 6 のように求まり、やはり 500°C のほうが室温のものよりもかたさが大きくなっていることがわかる。また組織も Photo. 4, 5 (a) の室温の場合フェライトが比較的大きく出ていたものが 500°C で 50 hr 試験した (b) の場合では細かい組織に改善されていることがわかる。

このように高温疲労強度は欠陥のある場合、材料の

(a) Room temp.

(b) 500°C

Photo. 5 Photo-micrograph of the tip of thermal crack ($\times 300 \times 2/3$)

Fig. 6 Hardness distribution from the tip of crack

Fig. 7 Hardness distribution of specimens non shot-peened and shot-peened for conditions indicated

時効性や切欠感度に関係があると思われる。欠陥は一種の鋭い切欠ともみられるので、鋭い V 溝切欠試験片の高温疲労強度から、欠陥のある場合の材料の性質を推定することができる。すなわち Ni-Cr 鋼や Cr-Mo-V 鋼のような鋼種の鋭い切欠試験片の高温疲労試験結果でも、高温の場合と室温の場合の $S-N$ 曲線が交差し、高温の場合のほうがかえって室温の場合より疲労強度が増大する傾向があるので、この種の材料に欠陥がある場合の傾向も同様になるものと判断してよい。これらと逆に鋭い切欠のある場合、高温になるほど疲労強度の低下する材料では欠陥のための低下も高温になるにしたがい大きくなるものと考えるべきであろう。

500°C で 10^7 回の繰返しでも破損しなかったショットピーニングしたものとしいないものおよび室温で試験した両方の試験片につき、表面層近くのかたさ分布を調べた。その結果は Fig. 7 のように求まり、この程度の疲労試験時間では 500°C でもショットピーニングによる硬化がまだ残っており、残留応力も前の実験で確かめたようにいくぶん残っており、加工による時効の促進とあわせて欠陥試験片の疲労強度の増大に役立ったものと考えられる。しかし長年月の高温における繰返荷重に対しては、ついにショットピーニングの効果は消失するものとみななければならぬ。

4. 結 言

白点状き裂欠陥のある Ni-Cr-Mo 鋼につき、高温の疲労強度を求めた結果次のことがわかった。

(1) 健全部に対する欠陥部の疲労強度低減係数は、室温 3.5, 300°C 3.3 および 500°C 2.1 と高温になるにしたがい低下する。これは高温でのき裂感度の低下時効硬化および材質改善が原因と考えられ、材料によってこの傾向は異なるものとなる。

(2) この Ni-Cr-Mo 鋼のほかにも Ni-Cr 鋼、Cr-Mo-V 鋼など高温で似た性質を示す材料では、欠陥部の高温疲労強度は、室温の値で見積っておけば安全側になる。

(3) この種の欠陥材にショットピーニングすれば、高温疲労強度は 10^7 回で 50% と著しく増大することがわかった。ただし長年月の繰返荷重に対しては効果は期待できないであろう。

終りに本研究を行なうにあたり協力された日立製作所水戸工場渡辺準平氏、当所の久保木悦也君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 材料の欠陥と疲労強度特集号, 材料試験, 6, 48 (昭32)
- 2) 大内田, 日本機械学会誌, 58, 436, 375 (昭30)
- 3) 大内田, 日本機械学会論文集, 23, 135, 842 (昭32)
- 4) 大内田, 日本機械学会誌, 62, 484, 722 (昭34)
- 5) 大内田, 日立評論, 40, 5, 570 (昭33)