金属の疲労強度に及ぼす Shot-peening の影響 (第 4 報)*

腐蝕疲労に対する効果について

竹 内 榮** 本 間 恒 夫**

Sakae Takeuchi and Tsuneo Honma : The Influence of Shot-peening on the Fatigue Strength of Metals (4th Report). On its Effect on Corrosion Fatigue. It has been shown in our previous report that the surface stressing by shot-peening has a remarkable effect on the fatigue strength of steels and other metals having various types of surface weakness under non-corrosive atmosphere. In this paper, we examined the effect of shot-peening on the fatigue of Si-Mn steels under the corrosive atmosphere of distilled water and dilute H_2SO_4 solution. (1) The fatigue strength reduced under the atmosphere of distilled water was recovered considerably by shot-peening. For example, the fatigue limit at 10^7 cycles was increased from 36 kg/mm^2 in the polished condition to 57 kg/mm^2 in the shot-peened specimen, or about 58 % in percentage. (2) In a dilute H_2SO_4 solution, the effect of shot-peening was reduced gradually in accordance with the increase of fatigue duration and of H_2SO_4 concentration, but it was still remarkable at short-time testing. (3) It was found from microscopic observation of the corrosion fatigued specimens that the propagation of fatigue cracks was prevented or delayed due to surface stressing, although the number of cracks in shot-peened specimens was much larger than in polished ones. Consequently, it is considered that the surface stressing by shot-peening is always effective in the view of prevention of fatigue failure under practical service condition which is usually accompanied by a somewhat corrosive atmosphere.

(Received September 28, 1957)

I. 結 言

ショット・ピーニングによる金属材料の疲労強度の改善に関するいままでの実験結果⁽¹⁾よりすれば、材料の表面部に脱炭層や切欠などの欠陥が存在する場合には著しく有効であるが、エメリー紙 05 研磨試片の如く表面部に欠陥の少ない場合には、その疲労限の増加の程度は数～十数 % 前後に止まるようであつて、欠陥のある場合に比べてピーニングの効果はそれほど顕著ではないことが判つた。

ところが一般に機械部品の使用中に実際疲労破壊が問題になる場合には、繰返し応力と同時に何等かの腐蝕作用が伴う場合が多い。このような場合にはいわゆる腐蝕疲労によつて材料の強度は著しく低下してしまうことは衆知のことである⁽²⁾。従つて本報告では実用上最も問題になるものの一つと思われるところの、腐蝕疲労強度に及ぼすショット・ピーニングの効果を検討する目的で、通常の大気中の疲労試験では数 % 程度しか相違の認められなかつた研磨試験片を対象に採り、蒸溜水および稀硫酸による腐蝕疲労試験を行つたのでその結果を述べ、ショット・ピーニングの効果について検討を加える。

II. 実 験 方 法

1. 試料および腐蝕疲労試験

試料は JIS ばね鋼第 6 種の Si-Mn ばね鋼でその化学成分熱処理および静的機械的性質はすでに報告せる脱炭層および切欠の影響を検討せる場合と全く同じである⁽¹⁾。

疲労試験は小野式回転曲げ疲労試験機を用い、1 台の試験機で一貫して比較の便を計つた。試験片の寸法および腐蝕疲労試験の方法は Fig. 1 に示す如くであり、試験片はすべてエメリー紙 05 まで研磨仕上げせるもの、およびこれにショット・ピーニングを施せるものである。腐蝕液は蒸溜水およびこれに化学用純硫酸を混ぜて調製せる

Fig. 1 Shape and dimension of fatigue specimen and conditions of corrosion fatigue.

** 東北大学金属材料研究所

* 1957 年 4 月本会東京大会に発表

(1) 竹内, 本間: 本誌, 22(1953), 14, 18; 55 (第 1 報より第 3 報)。

(2) 例えば, D. T. McAdam: Trans. AIMME, 99 (1932), 282.

0.001 N, 0.01 N, 0.1 N の 3 種類の濃度の稀硫酸とである。試験片は予め平行部をベンゼン、アセトンにて充分脱脂後試験機にとりつけ、これに対して腐蝕液は Fig. 1 に示す如く、巾約 1 cm のガーゼを通して回転して試験片に滴下せしめたが、ガーゼと試験片の間隔を 0.5~1 mm 位にとることにより、毛細現象によつて腐蝕液は回転している試料表面をガーゼの巾だけ覆い、腐蝕液が飛散するようなことはほとんどなかった。従つてまたガーゼが回転している試料表面に直接接触することによる影響の出るような恐れも全くない。腐蝕液の流量は一定時間ごとに補集した腐蝕液を計量して、毎分 2~3 cc になるようにニードルバルブを調節した。

腐蝕疲労試験にあつては試験速度および温度が重要な影響を与えることが知られている⁽²⁾⁽³⁾。本実験では試験速度は 1850 rpm ではば一定に保つことが出来たが、試験温度の方は恒温槽の設備がないため常温で行い試験中の温度の変化は最高最低寒暖計により各試験中ごとに測定した。これによれば全試験期間を通じて 1~12° であり、ほとんどは 2~7° の温度範囲内で行われた。

2. ショット・ピーニングの方法

空気噴射型の実用機を使用し試験片に 10 rpm の回転を与えながら、所定のショットの噴流のもとで、表面を均一に加工したものでその際の使用ショットの寸法、噴射圧その他は第 1 報以来全く同様である⁽¹⁾。なおピーニング加工の強さの目安としては板の場合には普通アルメンゲージの弧高による場合が多いが、本実験の場合の如く丸棒を回転させながらピーニングする場合は板の場合とはショットの当り方が違うため、アルメンゲージの弧高を測定することは、その意味するところは少しく異なるが、それでもまずピーニングの条件を規定する有力な目安を与えること、および数十本の試験片の各々がほぼ同様の加工条件の下にあるかどうかを検討するためには甚だ有効である。

III. 疲 労 試 験 結 果

疲労試験はエメリー紙 05 まで研磨仕上げせるもの、およびこれにさらにショット・ピーニング加工を施せるを試験片とし、(1) 大気中において、(2) 蒸溜水滴下の状態において、(3) 0.001 N, 0.01 N および 0.1 N の各濃度の稀硫酸滴下の状態において行われ、各種の腐蝕条件下における疲労強度の低下の様子を測定した。これらの結果は Fig. 2 の S-N 曲線図に示される通りである。

まず大気中の通常の疲労試験ではエメリー紙 05 研磨試験片に対してはショット・ピーニング加工により 10^7 回疲労限は 3% 程度の増加を示すに過ぎない。しかし蒸溜水とか稀硫酸の如き腐蝕性雰囲気に対してはピーニング加工の効果は極めて著しいことが認められる。Fig. 2 において蒸溜水による腐蝕疲労曲線は B_1, B_2 で示されるが、 10^7 回約 90 hrs の疲労限で比較すると研磨仕上で $36 \text{ kg/mm}^2 (B_1)$

のものがショット・ピーニング加工により $57 \text{ kg/mm}^2 (B_2)$ と約 58% の上昇を示し、同一応力に対する破断ま

Fig. 2 Effect of shot-peening on the corrosion fatigue S-N diagram of Si-Mn spring steel under distilled water and dilute H_2SO_4 solutions of various concentrations.

での繰返数で比較するとピーニング加工の効果はさらに著しいことを知るであろう。また次に述べる稀硫酸腐蝕疲労の場合と著しい相違を示すことは、 10^7 回繰返荷重の前後より S-N 曲線の傾斜が次第に緩やかとなつて水平部を有するが如き傾向、すなわち一定の疲労限を示す如き傾向を有することである。しかしピーニング加工によりこの傾向が助長されていることに注意すべきである。なおショット・ピーニング曲線 B_2 では 10^3 回以下では大気中疲労曲線 A_1, A_2 の上方にあり、研磨仕上曲線 B_1 においても 10^5 回以下に外挿すると大気中の A_1 曲線の上方に来ることが予想される。すなわち 10^5 回とか 10^6 回以下の短時間側では大気中におけるものよりも疲労破断応力はある程度高いことを意味する。これは恐らく蒸溜水であるため、その水冷効果によるものであろう。

稀硫酸 0.001 N, 0.01 N および 0.1 N の腐蝕疲労は Fig. 2 においてそれぞれ C_1, C_2, D_1, D_2 および E_1, E_2 曲線で示す如くである。これらの曲線から判るように 0.001 N の稀硫酸の場合でも疲労に対する腐蝕の影響は極めて著しく、蒸溜水の場合とは異なつて繰返数の増加と共に疲労破断強度は急激に低下して行き、疲労限の存在は全く認め難

(3) A. J. Gould : Engg., 141(1936), 495.

い、ピーニングの効果は短時間側では確かに著しいが、繰返数が増し長時間運転に及ぶに従い、その効果は薄れて行き、遂に研磨試験片とピーニング試験片との疲労破断強度の差は消失するに至る。もちろん、腐蝕液の濃度の異なるものほど、両者の破断強度が一致する時間は短い。例えば 0.001 N 稀硫酸の場合では 10^7 回、約 90 hrs の疲労限で比較すると、研磨仕上げの場合の $14 \text{ kg/mm}^2 (C_1)$ に対してピーニング加工の場合は $19.5 \text{ kg/mm}^2 (C_2)$ となり、なお 39 % 程度の上昇率を示しているが、両曲線 C_1 , C_2 を外挿すると $2 \sim 3 \times 10^7$ 回、約 180~240 hrs で殆んど一致する傾向を示している。この点は蒸溜水の場合とは全く様相を異にしている。しかし 10^6 回約 9 hrs 程度では疲労破断強度はピーニング加工の方が研磨仕上げの場合に対して 2 倍以上高く、また同一応力に対して 10^6 回繰返数の前後における破断までの寿命は前者が数倍大きい故、ショット・ピーニングの効果は極めて著しい。

0.01 N, 0.1 N と濃度が高くなるに従いピーニング加工

Fig. 3 Effect of shot-peening on the fatigue limit at 10^6 and 10^7 cycles under various conditions.

と研磨仕上げとの相違は次第に減少し、かつ両者の相違が消失する時間は短時間側に移動する。例えば 0.1 N の場合では 10^7 回、約 90 hrs で両者の破断強度の差は消失する。

上記の各種の S-N

線で示した曲線は 10^6 回、実線は 10^7 回における疲労限を示す。なおこれに関する詳細なデータは Table 1 に掲げた。

IV. 実験結果の考察

大気中における疲労破断強度に対する応力繰返数の関係を示す S-N 曲線は一般に Fig. 2 における A_1 , A_2 曲線の如き形状をもつが、腐蝕性雰囲気下における S-N 曲線はこれとは大部様相を異にしており、実験条件によりもちろん変つて来るが、傾向として大体 Fig. 4 に示した如き曲線を与える場合も多い⁽⁴⁾。すなわち繰返数の少い短時間側では大気中における S-N 曲線と略々類似の傾向を示し、腐

Fig. 4 Schematic relation between the S-N curve of air fatigue and corrosion fatigue.

蝕の作用は顕著にあらわれないが、繰返数が増し運転時間がある程度以上に長くなると、腐蝕作用の影響があらわれて S-N 曲線は急激に低下する。本実験においても大気中以外は短時間側の測定は行わ

なかつたが、短時間高応力側では Fig. 4 の如き傾向を示すものと予想される。本研究の目的は腐蝕疲労が顕著にあらわれて来る範囲、すなわち大気中における疲労限以下の応力範囲においてショット・ピーニング加工の影響が如何様

にあらわれるかを検討するにある故、測定はこの範囲に限定したのである。

前節で述べた如く蒸溜水と稀硫酸とは疲労曲線に著しい相違を与えている。疲労破断は試験片表面に発生した微小クラックの進展によつて起るもの故、上記腐蝕液の相違

による疲労曲線の相違は、まず試験片表面のクラックの発生或いは進展状況を顕微鏡下で観察することによつてある程度の見透しが得られると思われる。そこで腐蝕疲労により破断した試験片の表面を顕微鏡的に検討して見た。これらの結果は Photo. 1 の (a) から (c) に示す如くである。すなわち一般に研磨試片に比べてショット・ピーニング試片の方が表面に発生

Table 1 Summary of fatigue testing results.

Atmosphere	Specimen	at 10^6 cycles (about 9 hrs)		at 10^7 cycles (about 90 hrs)	
		Fatigue limit ($\pm \text{kg/mm}^2$)	Increase by shot-peening (%)	Fatigue limit ($\pm \text{kg/mm}^2$)	Increase by shot-peening (%)
Air	polished	60		59	
	shot-peened	62	3	61	3
Distilled water	polished	41		36	
	shot-peened	63	53	57	58
0.001 N H_2SO_4	polished	27.5		14	
	shot-peened	(60)	118	19.5	39
0.01 N H_2SO_4	polished	23		11	
	shot-peened	44	91	13	18
0.1 N H_2SO_4	polished	16.5		8	
	shot-peened	24	51	8	0

曲線より 10^6 回および 10^7 回における疲労強度を各種の腐蝕条件に対して図示すると Fig. 3 の如くなる。図中の破

(4) 例えば Battelle Memorial Institute: *Prevention of Fatigue of Metals*, (1941), 69.

して疲労割れの数はいかに多いが、いずれも割れの先端が細かく分岐しているに反して、研磨試片の場合は疲労割れ数は少いが深く鋭い。例えば Photo.1 (a) は蒸留水で

(a) Shot-peened specimen under distilled water, $\pm 57 \text{ kg/mm}^2$
 185950×10^3 cycles broken.

(b) polished specimen under 0.001 N- $\text{H}_2\text{SO}_4 \pm 29.8 \text{ kg/mm}^2$
 7590×10^3 cycles broken.

(c) Shot-peened specimen under 0.001 N- $\text{H}_2\text{SO}_4 \pm 29.8 \text{ kg/mm}^2$
 49220×10^3 cycles broken

Photo.1 Microstructure of fatigue cracks under corrosive atmosphere.

所から急激に割れは進行し破断までに至るものと思われる。Photo.1 (b) および(c)は繰返応力 29.8 kg/mm^2 における研磨仕上とピーニング試片に対する 0.001 N 稀硫酸による腐蝕疲労割れを示し、疲労破断までの寿命は 7.6×10^5 回に対し 4.8×10^6 回と約6倍も異なる場合を比較したものである。これより判る通り疲労割れの発生およびその進展の状況は研磨仕上とピーニング加工との間では著しく異

なっており、これが大気中の疲労曲線ではわずかな相違しか示さないのに対し、腐蝕疲労では大きな差異を生じた原因と思われる。

一般にピーニングの効果は表面部の加工硬化および表面の展延に伴う残留圧縮応力の2因子が共同してよい結果を与えるものと思われる。しかし本報告におけるが如く、抗張力で $140 \sim 150 \text{ kg/mm}^2$ に熱処理されたばね鋼にあつては、ピーニング加工により表面部の加工硬化量は高々ビッカース硬度 Hv 5 kg で 30 前後であつて、軟い材料の場合に比して遥かに少く、従つてピーニングの効果はこの場合には残留圧縮応力の方が強く影響を与えているものと思われる。すなわち前述の検鏡結果からしても認められる如くショット・ピーニングにより表面の凹凸が増すため発生している腐蝕疲労割れ数は研磨試片に比して著しく多いが、それらのいずれも進展を阻止、遅滞化されている。従つて Fig.2 に見られた如く、研磨仕上とピーニング加工の場合における腐蝕疲労による破断までの寿命の相違は主として残留圧縮応力によるものと考えられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。この残留応力の腐蝕および腐蝕疲労破壊に及ぼす影響に関しては、すでに Evansら⁽⁶⁾が可成りの実験を行つており、ショット・ピーニングの効果についてもピーニングの方法、腐蝕疲労試験の方法などに可成りの相違があるにも拘らず 0.005 N 稀硫酸の場合、長時間側でピーニングの効果が薄れて行くこと、従つてピーニング試片の方が曲線の傾斜が急なことなど、定性的には吾々の実験とほぼ同様の結果を得ている。

次に注目される点は蒸留水と稀硫酸とによる場合の S-N 曲線の形状の相違についてである。すなわち前者では繰返数と共に曲線の傾斜が次第に緩やかになり、あたかも通常の大気中の試験におけるが如く水平部を有するかの如き傾向を示して来るに反して、稀硫酸の場合は曲線の傾斜が一般に急で繰返数と共に強度は低下し一定の疲労限を示さない。蒸留水の場合には試料表面に難溶性の黄褐色の錆を発生し $\text{Fe}(\text{OH})_2 = (\text{FeO}, \text{H}_2\text{O}) \xrightarrow{\text{酸化}} \text{Fe}_2\text{O}_3$ なる反応により酸化物の皮膜が形成され、実際 10^7 回前後で試験片の直径は $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$ の増加を示すのである。かかる皮膜がそれ以上の酸化の進展を阻止するため、腐蝕疲労割れの進展を遅滞化せしめ、ある応力以下では殆んど進展し得なくなるが如き状態に達するため、疲労曲線に水平部が現われて来るように思われる。従つてかかる腐蝕条件下にあつてはピーニングの効果は著しくかつ長時間側においても可成り安定なものと考えられる。これに反して稀硫酸の場合の如く可溶性の金属化合物を生じて、いわゆる表面から溶け去て行く場合には腐蝕が時間と共に進行して行くため、蒸留水の場合とは異なり S-N 曲線は単調にかつ急激に低下して行くものと考えられる。稀硫酸による場合には腐蝕疲労試験中の試験片の直径の変化は、 0.001 N の場合には 10^7 回前後で $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$ 程度であるが、 0.01 N および 0.1 N の場合には $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ にも達する。かような腐蝕条件の下では、ピーニング加工による残留圧縮応力層は $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 程度⁽⁷⁾である故、比較的短時間側で

(5) M. T. Simnad, U. R. Evans : J. Iron Steel Inst., 156(1947), 531.

(6) A. J. Gould, U. R. Evans : J. Iron Steel Inst., 160(1948), 164.

(7) 大野, 宮川 : 材料試験, 6(1957), 23.

は割れの進展を阻止，遅延せしむるのに役立ち，破断までの寿命を伸ばす効果を与えるが，比較的長時間側では 0.001 N の場合は疲労割れが残留圧縮応力層を貫通し，0.1 N の場合には，残留圧縮応力層を溶かし去るために，もはやその効果を失い，研磨仕上とピーニング加工の場合の強度は次第に一致して行くものと思われる。

V. 総 括

通常の大気中の疲労試験ではショット・ピーニングの効果は表面に欠陥のある場合は著しいが，エメリー紙 05 研磨試片に対しては比較的僅少である。

よつて本報告では抗張力 $140\sim 150\text{ kg/mm}^2$ に熱処理せる Si-Mn ばね鋼について，ピーニングの効果が僅少な研磨試片を対象として，回転曲げにより蒸溜水および稀硫酸による腐蝕疲労試験の結果，

(1) 蒸溜水による腐蝕疲労に対してはピーニングの効果は保護皮膜の形成によつて最も顕著であり，かつ長時間側でも安定で 10^7 回約 90 hrs の疲労限で 36 kg/mm^2 から

57 kg/mm^2 と約 58 % の増加を示す。

(2) 稀硫酸による場合は腐蝕作用が強くなり長時間側になるに従い，ピーニングの効果は次第に薄れて行くが，比較的短時間側での時間疲労限および破断までの寿命を比較した場合にはその効果はやはり著しい。

(3) 検鏡試験よりその原因を検討するに，ピーニング試片では発生せる腐蝕疲労割れの数は甚だ多いが，その進展が阻止或いは遅滞化されており，これは表面層に残留してゐる圧縮応力によるものと思われ，これが腐蝕疲労強度の改善の原因と推察される。

従つて必ず腐蝕作用が何等かの形で附随する実際の疲労破壊に対しては単にばね鋼に限らず，一般の金属材料に対してもショット・ピーニング加工は甚だ有効であることが予想される。

終りに臨み本研究の一部は昭和 27 年度文部省科学試験研究費の補助を受けたことおよびショット・ピーニング加工に際し御協力載いた日本発条株式会社に謝意を表する。