キャビテーション・ピーニングによるステンレス鋼の 耐キャビテーション壊食性の向上

Improvement of Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steel by Cavitation Peening

正 祖山 均 (東北大)   ○ 山崎 悠樹 (東北大[院])

Hitoshi SOYAMA, Tohoku University, Aoba 6-6-01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579

Yuki YAMAZAKI, Tohoku University

Key Words: Cavitation, Erosion, Residual Stress, Peening

1. 結 言

キャビテーションは、流速の増大に伴って液体の圧力が低下した時に気泡が発生する現象であり、その気泡が崩壊する時に高衝撃圧を発生する。流体機器の小型・高速化に伴い、キャビテーションが発生して、性能低下や振動・騒音、壊食を生じる⁽¹⁾⁽²⁾。なかでも壊食は、流体機器に致命的損傷をもたらすので、キャビテーション壊食における耐壊食性の向上が望まれている。現在、大強度陽子加速器計画 J-PARC に建設中の中性子源では、水銀に陽子を打ち込み、核破砕によって生じる中性子を利用するので、水銀に陽子を打ち込むごとに水銀の容器内に圧力波が生じてキャビテーション気泡が発生して壊食が生じることが明らかになっている⁽³⁾⁽⁴⁾。この壊食が容器寿命の重要な支配因子の一つであるので、耐壊食性の向上が重要とされている。これまでに、ショット・ピーニングを施した面の耐壊食性が向上することが報告されている⁽⁵⁾。一方では、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を、ショット・ピーニングのごとく金属表面の表面改質に有効利用するキャビテーション・ピーニング(CP)が提案されている⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。キャビテーション壊食と材料特性の相関が十分にわかっていない現状では、耐壊食性は実際にキャビテーションを材料表面で発生・崩壊させて材料の質量損失量 Δm を測定して求める必要がある。

よって本報では、ASTM に準拠した⁽¹¹⁾キャビテーション噴流式材料試験装置を用いて、CP を試験片に施し、さらに壊食試験を行い、キャビテーション壊食における CP による耐壊食性の向上を検証した。また耐壊食性に及ぼす残留応力 σ_r 、硬さ H_v 、表面粗さ R_a の影響を明らかにした。

2. 実験方法

実験に用いた材料には、上記の中性子源容器の候補材料であるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を用いた。試験片表面は、研削仕上げ、エメリ紙(#1500)仕上げとした。 σ_r 、 H_v 、 R_a について、X 線回折、マイクロビッカース硬さ試験、触針式粗さ測定により求めた。硬さ試験では、試験荷重を 490.3 mN とした。CP の条件は、上流側圧力 $p_1 = 30$ MPa、下流側圧力 $p_2 = 0.42$ MPa、キャビテーション数 $\sigma = 0.014$ 、スタンドオフ距離 $s = 19$ mm の条件で行った。CP 処理用の試験片表面はエメリ紙仕上げとし、CP の処理時間 t_p は、20 s から 80 s まで 20 s 毎に 4 種類とした。CP で処理した試験片ならびに CP で処理していない研削仕上げの試験片、エメリ紙仕上げのみの試験片の計 6 種類の試験片について、水中キャビテーション噴流を用いて壊食試験を行い、 Δm を測定した。壊食試験の条件は、 $p_1 = 12$ MPa、 $p_2 = 0.168$ MPa、 $\sigma = 0.014$ 、 $s = 19$ mm で行った。

3. 実験結果

Fig. 1 には、壊食試験における壊食時間 t_e と Δm の関係を示す。キャビテーション壊食の発達過程は t_e とともに変化し、 $t_e = 360$ min までに壊食量の時間変化率が一定となった。 $t_e = 360$ min で Δm は、研削仕上げの試験片が最も多く $\Delta m = 13.5$ mg で、次いで $t_p = 80$ s における試験片は $\Delta m = 12.5$ mg であり、 $t_p = 0, 20$ s、40 s の Δm はほぼ等しく、最も Δm が少なかったのは、 $t_p = 60$ s の試験片で、 $\Delta m = 10.1$ mg であった。 t_p によっては、 Δm が CP をしていない試験片と比較して多くなる場合と少なくなる場合が存在することがわかった。CP をしてもいずれ壊食量の時間変化率が一定となる理由は、CP した領域がキャビテーションにより壊食され、壊食が未処理の領域にまで達しているためと考えられる。

Fig. 2 には、 t_p と潜伏期 t_i の関係を示す。ここで定義した t_i は、Fig. 1 で壊食量の時間変化率が一定となる時の直線を外挿して $\Delta m = 0$ との交点を t_i とした。 t_i が大なるほど耐壊食性が良いことを示す。Fig. 2 では、 $t_p \leq 60$ s までは t_i も増大し、最も t_i が大きいのは $t_p = 60$ s の場合で $t_i = 121$ min であった。 $t_p = 80$ s まで処理すると t_i は低下してしまうことがわかった。また、研削仕上げの試験片の t_i が最も小さく $t_i = 73$ min であった。

Fig. 3 には、 t_p と σ_r の関係を示す。研削仕上げの試験片には $\sigma_r = 286$ MPa の引張り残留応力があり、 $t_p = 0$ のエメリ紙仕上げの試験片は、 $\sigma_r = 50$ MPa の圧縮残留応力が存在していた。このエメリ紙仕上げの試験片は、 $t_p = 60$ s において $\sigma_r = -710$ MPa になっていることがわかった。また、 $t_p = 40$ s においても $\sigma_r = -720$ MPa と高い圧縮残留応力が導入されていた。唯一、引張り残留応力が存在している研削仕上げの試験片は最も t_i が小さいことから、引張り残留応力が存在すると耐壊食性

Fig. 1 Mass loss versus erosion time

Fig. 2 Incubation time versus peening time

Fig. 3 Residual stress versus peening time

Fig. 4 Vickers hardness versus peening time

Fig. 5 Surface roughness versus peening time

が低下すると考えられる。一方、 $t_p = 40$ s, 60 s で σ_r が圧縮側で最大に近い値を示し、 $t_p = 80$ s となると、 σ_r は減少した。これにより、 σ_r が圧縮となることにより t_i が増大したと考えられる。しかし、 $t_p = 80$ s で t_i が小さいのは σ_r 以外のパラメータが原因で t_i が小さくなったと考えられる。

Fig. 4 には、 t_p とビッカース硬さ H_v の関係を示す。研削仕上げの試験片において $H_v = 496$ であり、エメリ紙仕上げの試験片では、 $t_p = 0$ において $H_v = 489$ であり、 $t_p \leq 60$ s までは H_v は増加し、 H_v が最大となる $t_p = 60$ s では、 $H_v = 644$ であった。一方、 $t_p = 80$ s では $H_v = 563$ と減少した。 H_v が大きくなると t_i も増大する傾向にあると考えられる。これは、一般に硬い材料ほど耐壊食性が大である傾向と一致する⁽¹⁾。

Fig. 5 には、 t_p と表面粗さ R_a について示す。研削仕上げの試験片において $R_a = 0.668 \mu\text{m}$ であり、エメリ紙仕上げの試験片では $t_p = 0$ において $R_a = 0.045 \mu\text{m}$ であり、 $t_p = 80$ s まで R_a がほぼ線形に増加した。 R_a が最大となる $t_p = 80$ s では、 $R_a = 0.857 \mu\text{m}$ であり、 R_a が t_i を低下させる要因となっていると考えられる。

4. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼のキャビテーション壊食における耐キャビテーション壊食性の向上を目指して、研削仕上げの試験片と、エメリ紙仕上げの試験片に CP を施した試験片について壊食試験を行い、 Δm を測定した。CP を施すと t_i は増大し、 $t_p = 60$ s で t_i は最大となった。しかし、 $t_p = 80$ s になると、 t_i は CP をしていない試験片と比べても小となることがわかった。 t_i が最も小さい研削仕上げの試験片に対して、最も大となる $t_p = 60$ s の t_i は約 1.7 倍になることがわかった。

初期状態においては、 σ_r が圧縮で大きい場合と、 H_v が大なる場合には t_i は大となり耐壊食性が良くなる。一方、 R_a が大きくなり試験片表面が粗くなると t_i は短くなる傾向にある。耐壊食性には、これらのパラメータが深く関わっていることがわかった。

参考文献

- (1) 加藤洋治：新版キャビテーション—最近の基礎と発展—，(1999)，横書店。
- (2) 祖山均，伊藤幸雄，市岡丈彦，浦西和夫，加藤洋治，大場利三郎，ターボ機械，**18**，(1990) 691。
- (3) M. Futakawa, H. Kogawa, R. Hino, H. Date and H. Takahashi : Inter. J. Impact Eng., **28**, 2 (2003) 123。
- (4) B. Riemer et al. : Int. Workshop, Spal. Mats. Tech. 5, Charleston, South Carolina (2002)。
- (5) W. J. Tomlinson, R. T. Moule and G. N. Blount, Wear, **118** (1987) 233。
- (6) 祖山均・山内由章・井小萩利明・大場利三郎・佐藤一教・進藤文典・大島亮一郎，噴流工学，**13**，1 (1996) 25。
- (7) H. Soyama, T. Kusaka and M. Saka, J. Mater. Sci. Lett., **20**, 13 (2001) 1263。
- (8) 祖山均・佐々木 圭，斎藤建一・坂 真澄，自動車技術会論文集，**34**，1 (2003) 101。
- (9) H. Soyama, K. Sasaki, D. Odiombo and M. Saka, JSME Inter.J., **46 A**, (2003) 398。
- (10) H. Soyama, K. Saito and M. Saka, ASME J. Eng. Mater. Technol., **124**, 2 (2002) 135。
- (11) ASTM Designation G134-95, **03.02** (1997) 537。