研 究

ガラスビーズによる液体ホーニングの ピーニング効果について*

山 田 至 朗**

On the Peening Effects in Liquid Honing with Glass Beads

Shiro YAMADA

The experiments are made for a soft mild steel rod (S25C) and a steel plate (SPC-1) under the constant blasting condition, viz. blasting pressure, 3 kg/cm^2 (the bead speed measured at the middle point on the nozzle centerline about 100 m/s): blasting distance, 100 mm : weight-mixing ratio of water with glass beads, $1/1.8$ (glass beads of 158μ in mean shot diameter). The fatigue strength under the rotatory bending and the residual stress calculated from the variation of camber on the etching are inspected.

Comparing the experimental data with those of the usual shot peening, main results obtained are as follows:

- 1) The endurance limit ratio is greater than or equal to that in shot peening, and the influence of "over peening" is very little.
- 2) The residual stress zone is decreased by about one-fifth, and the maximum value of residual stress exists in a nearer part to the blasted surface. These results mean that the fatigue strength becomes to be high.
- 3) The obtained surface is smooth and glossy satin or matte.

1. ま え が き

液体ホーニングのピーニング効果は従来第2義的な効果とされていてその特性についてじゅうぶんな報告はない。しかし最近噴射粒子としてガラスビーズが利用されるようになり、この効果も重要になってきた。そこで著者らは噴射加工に関する研究^{1), 2)}の一環としてガラスビーズを噴射粒子とする液体ホーニングを軟鋼丸棒 (S25C) および軟鋼板 (SPC1) に施し、その疲れ強さの変動および表面層のかたさ、残留圧縮応力などについて測定し、その結果を従来のショットピーニングのピーニング

効果と比較検討し、その差異の因果関係について考察した。

2. 実験方法

液体ホーニング加工装置は市販の小型 (不二精機 K・K 製, F-4 型) を用い、ガラスビーズはホッパー内にためられ (ビーズ量, 10 kg) で循環噴射される (図1参照)。ガラスビーズは粒度 No. 12 (平均直径, 158μ)、比重 2.35 で水との重量混合比 1 対 1.8 で用いた。

噴射条件は噴射距離 100 mm 、噴射角度 90° 、コンプレッサの指示圧力 3 kg/cm^2 である。

図1 液体ホーニング用加工装置

材質: S25C, 熱処理: $860 \sim 913^\circ \text{C}$ 焼ならし

図2 疲れ試験用テストピース

*原稿受付 昭和46年5月10日。昭和43年度精機学会秋期大会学術講演会 (昭和43年11月1日) にて発表。

**正会員 東海大学工学部 (平塚市北金目 1117)

被加工物は疲れ試験用として軟鋼丸棒 (S25C), 860 ~ 910°C 焼ならし材 (寸法を図2に示す) を用い, 残留応力測定用としては板厚 0.6 mm の軟鋼板 (SPC1) を $60 \times 10 \text{ mm}^2$ の寸法に切断して用いた。

疲れ試験用の試料は両センタにより支持し, 試料一端に固定したプーリによって 88 rpm の回転が与えられる。試料の平行部 25 mm に様な加工が施されることが望ましいが, 実験の都合により平行部の中心を中央に軸上左右に 8.5 mm 間隔の2カ所で噴射を行なってほぼ様な加工が施されるようにした。この噴射ノズルの間隔は噴射粒子の運動のエネルギーに比例したものが衝突の際試料に残留するものと考え, ガラスビーズの噴射速度および密度のノズル中心線からの拡がり距離に対する分布 (図3参照) の測定から運動のエネルギーを求め, 2カ所噴射の時のエネルギーが試料平行部でなるべく一樣になるよう計算した。なお以下に述べる加工時間とは1カ所での噴射時間を示す。疲れ強さは小野式回転曲げ疲れ試験機により 4300 rpm の回転で破断に至るまで連続運転で求めた。

ピーニングによる残留応力の測定は試料中央に加工を施し, 試料に加工によるキャンパを与えた後, 加工面を6% 硝酸アルコールで腐食し, 腐食の深さは電気式堅型コンパレータ (黒田精工製, EL-1 精度 1μ) で, キャンパの変化はダイヤルゲージでそれぞれ測定し, 両者の関係より残留応力を計算した。

加工後の表面あらさは小坂式仕上面検査器 (SD4型)

ガラス・ビーズ: No. 12 (平均径 $\bar{D}=158 \mu$)
噴射条件 圧力: 3 kg/cra^2 , 距離: 100 mm
重量混合比 ビーズ/水=1/1.8
(以下の実験はすべて同一条件で行なった)

図3 ノズル中心線からの拡がり距離に対するガラス・ビーズ噴射速度および噴射密度

により縦 1000 倍, 横 100 倍の倍率で断面曲線を求め, 試料の直径の減少はマイクロメータを用い, 加工量は指示天秤 (島津製作所製, ミクロ天秤, 感度 0.1 mg) を用いた。加工による試料表面層の硬化現象は試料を斜めに切断し, 切断面をばふ研磨の後微小硬度計によりかたさを求めた。なお研磨の際, 試料端の研磨による「だれ」を防ぐために試料はクローム鍍金し, さらにこれを試料埋込用樹脂に固定した。また加工表面の状態については電子顕微鏡 (日本電子 K・K 製, JEM-30 型) を用い, レプリカ法により観察を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 液体ホーニング時間と疲れ限度との関係

本液体ホーニングによる加工時間の疲れ限度におよぼす影響を図4のS-N曲線に示す。

図より, 30秒加工では疲れ限度は加工前の 27.5 kg/mm^2 より 39 kg/mm^2 と大きく増加しているが, 1分ないし2分加工となると30秒加工に比べてわずかずつ減少の傾向を示しており, さらに加工を続けて3分に至ると疲れ限度は 36 kg/mm^2 となり低下が明らかになる。なお30秒以内の加工では加工のむらが著しく, 疲れ限度の値は大きく「ばらつき」, またあまり高い値は得られなかった。

液体ホーニング加工前後の疲れ限度の比, σ_{II}/σ_I (σ_I : 加工前の破断疲れ限度, σ_{II} : 加工後の破断疲れ限度) を

図4 ガラス・ビーズによる液体ホーニング加工有無の影響を示すS-N曲線

表 1

液体ホーニング 加工時間	疲れ限度比 (σ_{II}/σ_I)
30 秒	1.43
1 分	1.40
2 分	1.37
3 分	1.32

表1に示す。

表より、従来のショットピーニングにおける疲れ限度比1.3前後^{3),4)}に比べて本加工法がいくぶんすぐれていることがわかる。

加工時間の増加につれて加工初期では疲れ限度比は上昇するが一定時間を超えて加工を続けると疲れ限度比が低下するという現象はショットピーニングと同一傾向であるが、なお詳細に加工条件との関係を比較してみると、ショットピーニングではショット径と疲れ限度比の間にはショット径の小さいほど疲れ限度比が上昇するという結果³⁾が得られている。そこでこの結果に本実験結果を外挿したところ、本実験結果の疲れ限度比が上回っていることがわかった。また従来ショットの速度には最適値があり、これを超えるとオーバーピーニングとなり疲れ限度比が低下するが本実験ではこの最適値の倍以上の速度にもかかわらず疲れ限度比は1.32~1.43と高い値を示している。

そこでこれらガラスビーズによる液体ホーニングの示す特徴について、加工面の残留圧縮応力および顕微鏡による観察などについて調べた結果について以下にのべる。

3.2 残留圧縮応力について

アークハイト測定用の試料としてはアルメングージA, C 2種が定められているが本実験ではA片の板厚では薄すぎてピーニング層以外に加工によるわん曲のための曲げひずみが残る、C片では厚すぎてアークハイトが小さい。そこで板厚0.6 mmのSPC1材を用い、ホーニング用ガン・試料ともに固定し中央に加工を行なった。

初めに、加工時間に対する試料のキャンパ高さ（アー

図5 加工時間と加工量およびアークハイトの関係

クハイト)の関係を図5に示す。

キャンパの高さは加工時間30秒で約0.75 mm, 1分では約0.85 mmと加工の初めにいちぢるしく増大するが、その後の変化は少なく、4分で約1 mmとほぼ飽和に達している。加工によって生じたキャンパは内部応力による曲げモーメントあるいは内部応力の値に比例するものと考えられているので、図より1分以内の加工で試料表面の残留応力は急激に増加、飽和するものと考えられる。

そこでつぎに、キャンパを求めた試料について腐食法により、加工表面層に残留する内部圧縮応力を求めた。

残留圧縮応力はキャンパを有する試料の加工面を腐食除去し、腐食深さとこれに伴うキャンパの減少との関係よりD.G. Richards⁴⁾の式を使って求めた。すなわち

長手方向の伸縮のみ考えると

$$\sigma_1 = \frac{1}{h} \int_h^{h_0} \sigma dh \quad (1)$$

屈曲自在とすると

$$\sigma_2 = \frac{Eh}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (2)$$

a だけ除去した時の表面の応力

$$\sigma_a = \frac{Eh^2 d(1/\rho)}{6dh} \quad (3)$$

ここに E =ヤング率 ($2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$), h_0 =腐食前の板厚 (0.6 mm), h =腐食後の板厚, ρ_0 =腐食前の曲率半径, ρ =腐食後の曲率半径。

$$\therefore \sigma = -\frac{Eh^2}{6} \frac{d(1/\rho)}{dh} - \frac{Eh}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) - \frac{1}{h} \int_h^{h_0} \sigma dh \quad (4)$$

表面近くでは(4)式の第3項は他の2項に比べて小さいので無視する。

一方、曲率半径 ρ はキャンパ δ より

$$\rho = \frac{l^2}{8\delta} + \frac{\delta}{2}$$

ここに、試料の長さ l は 60 mm, ゆえに上式は

$$\rho = \frac{450}{\delta} + \frac{\delta}{2}$$

曲率の変化を $dh = 5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ごとに取ると(4)式は、

$$\sigma = -1.05 \times 10^4 h \left\{ \frac{h}{15} d \left(\frac{1}{\rho} \right) \times 10^3 + \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \right\} \quad (5)$$

したがって、腐食量とアークハイトの関係(図略)より 5μ 腐食ごとの曲率半径 ρ を求めて(5)式に代入し、各層の残留圧縮応力 σ を求めた。

なお、腐食深さは電気式型型コンパレータ (精度 1μ) で、キャンパの高さはダイヤルゲージ (精度 10μ) で測

図 6 液体ホーニング加工による残留圧縮応力の分布

図 7 液体ホーニング加工とショットピーニング加工の一例との残留圧縮応力分布の比較

定した。

加工時間の変化による残留圧縮応力の分布の変動を図 6 に示す。

図より、残留応力の最大値は加工初期には加工時間の増加とともに増大し、1分加工では 72 kg/mm^2 に達するが、1分を超えるとほぼ飽和する。残留圧縮応力の最大値の表面からの位置は、1分加工後も増加の割合は減少するがわずかつづ増している。表面の残留圧縮応力については、15秒加工では約 40 kg/mm^2 であるが加工時間の増加につれて低下し1分加工では約 20 kg/mm^2 まで減少するが、その後は飽和状態に達していることがわかる。

本実験結果と従来のショットピーニングの一例⁴⁾との

比較を図 7 に示す。

図より、表面の残留応力値はほぼ等しいが、残留応力の最大値は約 40% 本実験結果のほうが大きく、その表面からの位置は約 30% 浅い。また、残留応力の存在する層の厚さも従来のショットピーニングの 1/5 以下であることがわかる。

このように、従来のショットピーニングに比べて表面近くに高い残留圧縮応力の存在することが前章に述べた疲れ限度比を向上させている原因である。

また、残留応力層の浅いことは、従来ピーニング効果により寸法の変化（伸び）が激しく、使用できなかった薄い機素に対しても寸法の変化なしに疲れ強さの向上が期待できることを意味している。

残留応力の最大値が従来のショットピーニングに比して表面近くに存在する理由としてつぎのごとく考える。

本実験におけるガラスビーズの衝突こん径 ($2a$) はほぼ 0.05 mm と実測され、この値を Hertz によって認められているこん径と最大せん断応力の位置 (Y) との関係 $Y=0.6a$ に代入すると Y は 0.015 mm となり、加工初期において実測された残留応力の最大値の位置にほぼ一致する。これに比べて図示されたショットピーニングではショット径も大きく、したがってこん径も大きいものと考えられるので本実験結果より深い位置となる。

つぎに表面層に残留する応力の積分値について考えると、本実験では従来のショットピーニングの数分の1であることが図 7 よりわかる。この理由として、喷射粒子の運動のエネルギーを考えると、単一ショットでは $0.5 \text{ mm}\phi$ の鉄製ショット（密度 7.8, 速度 50 m/s ）の場合と本実験（密度 2.35, 速度 100 m/s ）の場合のその比は約 25 対 1 と計算される。一方、衝突こん径はガラスビーズの 50μ に対し鉄製ショットでは約 250μ と測定され、フルカバレッジの場合の面積当りのエネルギーはほぼ両者等しくなるが、ガラスビーズは鉄製ショットに比し反発係数も大きく、また水の緩衝作用も考えられるので残留する応力の量は少なくなり、したがって残留応力層も浅くなるものと考えられる。

3.3 かたさの測定および顕微鏡による観察

疲れ試験用の一部の試料について断面のかたさを測定した。その結果を図 8 に示す。

図より、表面層はピーニング効果により硬化し、硬化層は一定深さまでは加工時間の増加とともに増すが、加工時間 2 分で硬化層は約 60μ となり、その後は飽和の傾向を示し、さらに加工を続け 3 分加工に至ると試料表層部は極端なピーニング効果を受け、ぜい弱化し、かたさは低下してオーバピーニングの状態を示している。

図 8 液体ホーニング加工面のかたさの分布

図 9 加工面の電子顕微鏡写真

このことは加工面の電子顕微鏡による観察(図9)からもわかる。すなわち、加工時間30秒では微視的表面はなめらかであるが、加工時間の増加につれて荒れが目立ち、加工時間3分ではボールベアリングなどに見られるフレーキング(freaking)の状態に類似した様相を示し、表面の繰返し圧縮によるものと見られるはく離がうかがわれ、著しく表面の機械的性質を劣化せしめていることが推察される。このことが過度な加工の際の疲れ限度の低下を進める主因と考えられる。また、疲れ強さが高い値を示す30秒および1分加工(アークハイトが飽和値に達する少し前)では上述のごとくなめらかな球面で表面がおおわれていることから、しゅう動面として用いられた場合油膜の保持も良いものと考えられる。

従来ショットピーニングにおいてショットの破碎により疲れ限度の低下することが認められている⁴⁾。そこで1000 CCのメスシリンダに約7.5時間使用したガラスビーズを取り、これをよく振ってかく拌し、自然沈降させると上層に破碎ビーズ、下層に球形ビーズとほぼ2層に分離され、層の厚さより破碎ビーズの容積含有率は約4.8%であることが識別された。分離されたガラスビーズの写真を図10に示す。

つぎに下層の球形ビーズ250筒について顕微鏡により直径を測定し、未使用のガラスビーズと比較した結果、7.5時間使用後もその径に差異の認められないことがわかった。

破碎ビーズは加工の際、試料表面に傷を残し、ここに応力が集中し、疲れ限度を低下させるものと考えられこ

図 10 使用によるガラス・ビーズの変化

の傾向は加工時間の増加に伴って破碎ビーズの試料表面への衝突回数が増加することにより増大する。したがってこれらの破碎ビーズを除くことにより、疲れ限度の低下を防ぐと同時に、ビーズの径を一定に保つことができる。

つぎに疲れ試験で破断した試料を軸方向に切断し、顕微鏡により破断部より 5 mm の間に存在する一断面におけるクラックの数および長さを観測し、つぎのような結果が得られた。

1. 加工時間および応力の増加によりクラックは 1, 2 本から数 10 本までに増加する。
2. 本加工を処した試料に発生するクラックはオーバーピーニングとなる 3 分加工を除き 0.1 及至 0.2 mm 程度の微小クラックであるが、本加工を処さない試料では 0.5 mm を超えるクラックが応力の増加とともに発生する。

1 分および 2 分加工のほうが本加工を処さない試料に比べてクラックが多いにもかかわらず疲れ限度の高いことはこれらの微小クラックの大部分は停留クラックと考えられる。これに比べ 0.5 mm 以上のクラックは破壊にまで成長し、疲れ限度に影響するものと考えられる。これらクラックの顕微鏡写真を図 11 に示す。これら写真よりいずれのクラックも破碎ビーズの衝撃による表面の傷と見られる部分より発生し、粒内クラックから粒界クラックへと変化していることがわかる。

3.4 面仕上げ能力、試料寸法および重量の変化

図 11 回転曲げ疲れ試験により発生したクラックの顕微鏡写真

図 12 加工時間と面あらさ、加工量および直径の減寸の関係

疲れ試験に用いられた丸棒試料の本加工法による面あらさ直径の変化 (6 mmφ, 25 mm 平行部はほぼ一様に減少している) および加工量を図 12 に示す。

液体ホーニング加工前の面あらさ R_{max} 1.5 μ は加工により増大し、30 秒加工で R_{max} 5 μ となるが、その後面あらさの増加が鈍り、2 分ないし 3 分加工では R_{max} 7 μ とほとんど変化なく飽和状態となっている。つぎに単位時間当りの直径の減少および加工量は加工時間 30 秒まで漸次増加するが、その後は直径、加工量ともに一定となっている。また、オーバーピーニングの状態である 3 分加工においても直径の減少は 40 μ 程度、加工量は 120 mg 程度と従来のショットピーニングに比べて 1 桁強小さい。

上述のごとく、面あらさの値が小さく、直径の減少の少ないことは精密小型部品の加工に有利な点といえよう。また、前述のごとくガラスビーズは加工中に一部は破碎され、この破碎ビーズが疲れ限度の低下に影響をおよぼしていることがわかったが、同時に破碎ビーズは切削作用を行ない寸法の変化を大ならしめ、加工量を増大せしめている。この影響は加工時間の増加とともに増大するので、この点からも破碎ビーズの除去は看過できない。

4. ま と め

ガラスビーズをメディアとして一定条件のもとで軟鋼材に液体ホーニングを行ない、ビーズ噴射によるピーニング効果について残留圧縮応力と疲れ限度を求め、これを従来のショットピーニングと比較検討することによりつぎの結論を得た。

- (1) 小野式回転曲げ疲れ試験機による軟鋼丸棒(S25C)の疲れ強さは、加工時間30秒で疲れ限度比1.43と従来のショットピーニングに比べ高く、電子顕微鏡による加工面の観察よりオーバピーニングとみなせる3分加工においても疲れ限度比は1.30と比較的高い値を示し、オーバピーニングによる疲れ限度への負の効果は小さい。
- (2) 腐食法によるキャンパの変化から求めた軟鋼板(SPC1)の残留応力層の厚さは従来のショットピーニングの1/5程度で、その残留圧縮応力の最高値は同程度である。このことは本加工法が従来のショットピーニングに比べて表面に近い層に高い残留圧縮応力の存在することを示しており、この事実が材料の疲れに対する強さの向上に起因している。
- (3) ガラスビーズの破碎は7.5時間の使用で容積比で約5%に達するが、残りの約95%についてはその形状および径ともに未使用のものと差異は認められな

い。破碎ビーズは自然沈降により容易に分離され、これらを除去することにより疲れ強さの低下を防ぐとともにビーズ径を一定に保つことができる。

- (4) 面あらさは約 $R_{\max} 7 \mu$, 6 mm ϕ 材の加工による直径の減少率は約 $15 \mu/\text{min}$ でそれぞれ飽和し、従来のショットピーニングと比べていずれも小さい。

以上の結論より本加工法は精密小型部品に特に有用であるといえよう。

なお、これらの結果は一条件のもとで加工時間を変化させた実験についてであるが、従来のショットピーニングにおける諸条件の影響より本加工法での他の条件についても定性的な類推はできるものと考えられる。

終りに本研究を推進するにあたり終始ご指導いただきました故中央大学教授柳島鈺仁夫博士に深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) 山田, 柳島: 噴射加工における砥粒の破碎について, 精密機械, **33**, 12 (1967) 795.
- 2) 山田, 柳島: 加工条件が砥粒の破碎におよぼす影響—噴射加工における砥粒の破碎について (第2報)—, 精密機械, **36**, 12 (1969) 814.
- 3) 日本機械学会: 金属材料疲れ強さの設計資料 II, (1965) 83, 76.
- 4) 広瀬正吉: ショットピーニング, 誠文堂新光社, (1955) 182, 117, 164, 151.