ばねの疲労特性に及ぼす温間ショットピーニングの効果*

丹下 彰**, 小山 博**, 辻 博人**

Effect of Warm Shot Peening on Fatigue Strength of Spring

Akira TANGE, Hiroshi KOYAMA and Hiroto TSUJI

Warm Shot Peening is well-known as the shot peening process within warm temperature range. however, the effect of warm shot peening to fatigue strength was not certain and no substantial study has been made.

The requirements of coil spring with higher fatigue strength and sag resistance have been increasing to obtain the mass saving of vehicle. While several new spring materials have been developed in recent years, the essence of those developments were to make the strength of spring higher, so-called high strengthened spring. As for high strengthened spring, the shot peening process becomes further essential to relieve the increased notch sensitivity due to higher strength. However, for the shot peening process to high strengthened spring, the shot with higher hardness is also required. This can decrease the life of both shot and shot peening equipments.

Warm shot peening under the tempering temperature may become one solution to those problems, because the hardness of spring can be temporarily reduced only during the shot peening process. In this paper, the following experimental results concerned with the effect of warm shot peening, are summarized.

- 1) The effect of warm shot peening on fatigue life is larger for high strengthened spring. It is especially more effective when the spring hardness is over the shot hardness.
- 2) The appropriate temperature of warm shot peening is from 473 to 598K.
- 3) The main reasons why the warm shot peening is effective to the improvement of fatigue life, are both the increase of compressive residual stress distribution and higher coverage, which can be caused by more effective deformation under warm temperature. The increase of surface hardness by warm shot peening could be another reason for the improvement of fatigue life.

Key Words : Warm shot peening, Fatigue strength, Spring, Higher hardness.

1. はじめに

温間ピーニングは、温間温度域でショットピーニング(以下 SP)を行うことで、コットレル効果による材料強化を期待し、疲労強度を向上させる SP 方法として、1965 年に五弓より特許出願¹⁾されているように比較的古くより知られていた技術である。しかし温間 SP は当時の追試では顕著な効果も認められず、著者らの知る限りその後の研究報告もほとんどなされていない。

一方、オイルショック以来、ばねの軽量化が強く求められる、ばねは、より高い疲労強度と耐へたり性が求められる

ようになった。この要請に新しいばね用鋼の開発²⁾⁻⁴⁾が盛んとなったが、いずれもばね硬さを高くするものとなっている。

ばね硬さを高くすることは、へたりには極めて効果的であり、一般に疲労強度も向上するとされている。しかし、材料の切欠き感受性が増大することから欠陥の管理が厳しくなること、さらに、ばね硬さがショット硬さを上回るような場合では SP 加工が困難になる結果から、疲労強度の確保が難しくなるという重大な課題を生み出すことになる。SP 加工を容易にするために、ショットを硬くするという手

段があるが、硬いショットは寿命が短いという本質的な欠点があり、経済性の面からは優れたものと思われない。

そこで、焼戻温度以下の温間での SP 加工であれば、加工時のみ、ばねの変形抵抗を下げる事が可能で、十分な SP 加工が達成され、かつばねの硬さを下げることがないことが期待される。このような背景から、改めて温間 SP が注目された。ここでは、①温間 SP 温度を一定としてばね硬さと疲労寿命の関係、②ばね硬さを一定として SP 温度と疲労寿命の関係をそれぞれ研究した。さらに、ばね鋼の温間変形抵抗の温度依存性、残留応力分布、カバレッジおよび温間加工による材料強化の観点から疲労へおよぼす温間 SP の効果について考察した。

2. 実験条件

2.1 ばね

実験に用いたばね材料は、ばね鋼 JIS SUP7 相当であり、化学組成は重量比で、C；0.59%，Mn；0.85%，Si；2.05%，Cr；0.15%のものである。ばねの仕様は、線径； ϕ 9.0，コイル平均径； ϕ 84.9，有効巻数；5.5，ばね定数；19.1N/mm である。ばね硬さと疲労寿命の関係を調べる実験では、焼入温度を 920℃ とし、焼戻温度を 300℃ から 450℃ まで種々変えることにより、ばね硬さを HV510，550，600 および 650 とした。ここで、HV600 および HV650 の場合はショットの硬さ HV520～570 を上回る硬さとなっている。また、SP 温度と疲労寿命の関係を調べる実験では、焼戻しを温度 350℃，加熱時間 60 分としてばね硬さを HV600 一定とした。

2.2 ショットピーニング方法

温間 SP 処理は、熱風循環炉を用い、ばねを 200℃～400℃ の雰囲気中にそれぞれ 20 分放置し、ばねをほぼ雰囲気温度まで加熱した後、直ちに SP を行うこととした。また、比較として、ばねを加熱せず、室温で SP を行う条件も加えた（以下、室温 SP）。SP 条件は、ショット径 ϕ 0.87，硬さ HV520～570 のカットワイヤ材を用い、投射速度 66m/s，アークハイト 0.42mmA とした。

3. 実験結果と考察

3.1 ばね硬さと疲労寿命の関係

室温 SP および SP 温度 300℃ の温間 SP したばねのそれぞれのばね硬さと疲労寿命の関係を Fig. 1 に示す。室温 SP を行ったばねは、硬さの上昇に対し平均寿命は若干増加するものの、下限寿命は変わらず、ばらつきが増し、切欠き感受性が増大する傾向を示している。これに対し、温間 SP したばねは硬さの低い HV500 および HV550 の場合では室温 SP したものより若干良い程度であるが、ショット硬さを上回る HV600 と HV650 の場合では硬さの増加と共に寿命が顕著に向上している。すなわち、温間 SP は硬いばねほどその効果が大きいことがわかる。この結果から過去において温間 SP の顕著な効果が認められなかった理由として、当時の実験に用いられたばねの硬さが比較的低かった

Fig. 1 Relation between spring hardness and fatigue life Stress condition ; 637±539MPa

ためと推定される。

Fig. 2 に HV600 のばねの室温 SP したばねと温間 SP したばねの疲労起点の近傍のそれぞれの破面とばねの表面を示す。疲労起点はいずれも表面であるが、際だった違いは、ばね表面に残されたショットによる圧痕の大きさとカバレッジである。室温 SP したばねは圧痕も不明瞭でカバレッジも不十分であるのに対し、温間 SP したばねはショットの圧痕も明瞭で、カバレッジも充分であることがわかる。したがって、ばね硬さの高い場合の室温 SP したばねと温間 SP したばねの疲労寿命の差異はショットによる加工が前者は不十分であり、後者は充分に行われたことも大きな理由と考えられる。この温間 SP したばねが硬いばねほど効果が大きいことは、温間 SP が耐へたり性と疲労強度の向上を両立させる SP 法として極めて有効な技術となり得ることを示唆している。

(A) SP at R.T (B) Warm SP at 300°C

Fig. 2 Comparison of fatigue fractured surface and outside surface between (A) SP at R.T and (B) Warm SP at 300°C for HV600

3.2 ショットピーニング温度と疲労寿命の関係

Fig. 3 に、硬さを HV600 としたばねの、SP 時のばねの温度と疲労寿命の関係を示す。また同図には SP 後のばねの最大表面粗さについても示してある。温間 SP したばねの平均疲労寿命は SP 温度 200℃ から 350℃ のすべての温度範囲で室温 SP したばねの寿命を上回っている。また、最も疲労寿命の大きい温度範囲は 250～325℃ にあり、それ以下の 200℃ およびそれ以上の 350℃ では寿命が下がる傾向が認められる。最大表面粗さは室温 SP したばねの約 10 μ m から 350℃ の場合の 14 μ m まで単調に増加している。この

Fig. 3 Relation between SP temperature, surface roughness and fatigue life Stress condition ; 637 ± 539 MPa Hardness ; HV600

表面粗さの増加は SP を受けるばねの温度が高くなるほどばねの変形抵抗が下がるため、ばねにおよぼすショットの加工度が大きくなる結果と判断される。そこで SUP7 を HV600 の硬さに熱処理した引張試験片（直径 $\phi 5$ ，有効部長さ 50）を用いて室温から 400℃ の温度でひずみ速度 10/min と比較的早い速度で引張試験を行い、0.2% 耐力の温度依存性を調べた。Fig. 4 にその結果を示す。室温での 0.2% 耐力が約 1920 MPa であるのに対し、200℃、と 350℃ ではそれぞれ 1650 MPa そして 1350 MPa と顕著に 0.2% 耐力の低下を示していることがわかる。この結果は温間温度域での SP 加工によって、ショット硬さより硬いばねであっても十分な SP 加工を施すことが可能であることを裏付けている。

ただし、SP 加工時の加熱によってばね硬さを低下させてはならない制約がある。したがって、温間 SP はばねの焼戻温度より低い温度で SP を行わなくてはならない。

Fig. 4 Relation between temperature and 0.2% proof stress for SUP7 HV600

Fig. 5 Relation between SP temperature and residual stress distribution

Fig. 5 に室温 SP と 200℃、325℃ および 350℃ での温間 SP で得られたばねのそれぞれの外側軸線方向の残留応力分布を示す。室温 SP と比較し、温間で SP を行ったものは、表面残留応力値、ピーク値のいずれも大きく、またピークの位置およびクロッシングポイントも深いことがわかる。疲労強度に最も関係する表面からピークにかけての残留応力分布について詳細に比較すると、その差は小さいものの 325℃ の場合が最も大きな残留応力分布を示し、次に 350℃ そして 200℃ の場合の順となっている。この表面からピークにかけての残留応力分布が疲労き裂伝ば寿命に最も大きな影響を与える⁵⁾ ことを考慮すれば 325℃ の場合が最も疲労強度が高い説明になる。また、350℃ の場合は表面粗さは最も大きい。また、温間 SP では SP による残留応力の付与と加熱による残留応力の開放が同時に進行しているものと思われる。そこで、Fig. 6 に大野ら⁶⁾ の加熱による残留応力の開放の結果を引用すると、300℃ までは圧縮残留応力の低下は小さいもののそれを越えると圧縮残留応力の開放が盛んになってくることが示されている。本実験では 325℃ の場合が最も圧縮残留応力が大きく、大野らの結果と矛盾するが、SP 機投入後インペラーによってばねは急冷されるであろうことを考慮すれば、325℃ は 350℃ に比べ残留応力の開放が小さいものと推定される。この残留応力の開放の観点からも 350℃ 以上の加熱は疲労寿命を低下させるものと考えられる。

Fig. 6 Relation between temperature and relief of residual stress

3.3 温間加工の材料強化

温間 SP したばねの疲労寿命の向上について、温間加工によるカバレッジの向上と表面粗さそして残留応力分布によって説明を行ったが、さらに温間加工が材料強度に及ぼす影響についても調査した。Fig. 7 は HV380, 450, 500 および 580 とした SUP6 の板 (6t) に室温, 100℃, 200℃, 300℃ および 350℃ の各温度で SP を行い表面近傍の硬さ分布をコード法⁷⁾により詳細に調査した結果である。HV380 と HV580 の分布に注目すると、室温, 100℃ および 200℃ の場合の硬さ分布は表面がわずかに上昇を示している程度であるが、300℃ および 350℃ の場合では SP 加工による加工層深さと推定される表面から約 0.25mm にかけて硬さが大きく増加している。その増加の程度は表面硬さで硬さの低い HV380 の場合が約 HV50 であるのに対し、硬い HV580 の場合では約 HV150 と顕著な増加を示している。中間の硬さの HV450 および HV500 もこの傾向と同様で、かつ硬さの増加も中間である。この硬さの増加は五弓の主張するコットレル効果、すなわち温間 SP 中に導入された転位へのフリーC, N の固着による動的ひずみ時効の効果と考えられる⁸⁾。また硬い材料ほど大きく硬化する理由として、硬い材料ほど焼戻温度が低いためフェライト中に過飽和に固溶していた C および N の量が多いため柔らかい材料よりひずみ時効が盛んになったと推定される。

温間 SP したばねの疲労寿命が向上する理由としてこの温間加工による硬さの増加も大きく寄与しているものと思われる。この寄与は実験結果から、より高温側の温間 SP、すなわち 300℃ 以上で大きい。

4. まとめ

- (1) 温間 SP の疲労強度向上の効果は硬いばねほど大きい。特に、ばね硬さがショット硬さを上回る場合に有効である。
- (2) 温間 SP 加工の温度は 250~325℃ でその効果は大きい。
- (3) 温間 SP は耐へたり性と疲労強度の向上を両立させる SP 技術となりうる。
- (4) 温間 SP の疲労強度向上の理由は、温間加工により SP の加工が容易になりばね表面に大きく深い残留応力場が形成されることと、カバレッジの向上、さらに温間加工による表面層の強度上昇であることがわかった。

参考文献

- 1) 五弓 勇雄, 特許 第 725630 号 1974 年
- 2) 阿久津忠良, 丹下 彰, 佐藤保夫, 新井康夫, 飯久保知人, 伊藤幸夫, ばね技術研究会 昭和 62 年度 春季講演会前刷集, 1-4.
- 3) Abe, M., Taniguchi, T., Kuriki, T., Saitoh, K. and Takamura, N., SAE Technical Paper Series 890220.
- 4) 中野 修, 安田 茂, 水野邦明, 自動車技術会論文集, Vol. 24, No. 3, July (1993), 61.
- 5) 丹下 彰, 阿久津忠良, 高村典利, ばね論文集, 36号 (1991), 47.
- 6) 大野 明, 材料試験5, 35 (1956), 476.
- 7) Gassner, R. H., METAL PROGRESS, March (1978), 59.
- 8) 田村今男, “鉄鋼材料強度学”, (1969), p. 271, 日刊工業新聞社.

Fig. 7 Hardness distributions around the surface, for SUP6 plates with the hardness of HV380, HV450, HV500 and HV580, shot peened at R. T, 100℃, 200℃, 300℃ and 350℃