回転矯正および温間引張り矯正を用いた極細線の高真直化

占部 元彦*・浅川 基男*²・梶野 智史*³・吉田 将大*²

Improvement of Straightener in Tension Annealing and Rotational Blade Straightener for Superfine Wire

Motohiko URABE, Motoo ASAKAWA, Satoshi KAJINO and Masahiro YOSHIDA

Synopsis : Higher straightness of superfine wires of 0.1 mm or less in diameter is in demand for recent development of electronic devices.

A rotational blade straightener is effective for straightening superfine wires. It is particularly effective for straightening coiled wires because the straightener can bend wires along the longitudinal and circumferential directions. We found that a higher rotational speed of blades, lower feeding velocity, and gradual decrease in curvature ratio during straightening were very effective in producing excellent straightness in rotational blade straightening.

Tension annealing is also one of the popular methods to straighten superfine wires. The tension annealing has a higher level of straightening effect without surface damage. The phosphor bronze and the tungsten superfine wires are used in this study. We observe that the initial radius of curvature, roundness and work hardening exponent are very important factors to make excellent straightness in tension annealing.

Key words: straightening; fine wire; tension annealing; rotational blade straightener.

1. 緒言

近年、電子機器分野・医療分野の発達にともない、その部品であるガイドワイヤ・ばね材などに用いられる極細線の需要が増加している。また製品の高性能化・軽量化・小型化が進むにつれて、極細線の一層の高真直化が望まれている。極細線の用途としてFig. 1に示すような携帯電話テスター用のプローブピンなどの電子機器やFig. 2に示すような放電加工用ワイヤーなどさまざまな精密機器分野に展開している。一般的に引抜き工程などの塑性加工を経た線材は部品として成形加工される前にコイル状に巻き取られ

るため、一定の曲率を有している。そのため最終製品として用いるには真直に矯正する必要がある。極細線の矯正方法として加熱して引張りを加える「温間引張り矯正」やブレードなどで機械的に繰返し回転曲げを与える「回転矯正」がある。しかし基礎的な検討や、数値シミュレーションの解明が不十分であり、現場技術者の経験に依存しているのが現状である¹⁻³⁾。以上の背景から極細線を高真直化するために理論的、実験的な研究を試みることにした。

Probe pin

Fig. 1. Fine wire for electronic tester.

Fig. 2. Fine wire for electro spark machining.

平成21年3月11日受付 平成21年4月24日受理 (Received on Mar. 11, 2009; Accepted on Apr. 24, 2009)

* 早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 機械科学専攻 (Major in Applied Mechanics, Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Oookubo Shinjuku-ku Tokyo 169-8555)

*² 早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科 (Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University)

*³ 産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industry Science and Technology)

Fig. 3. Rotational blade straightening.

Fig. 4. Layout and photograph of tension annealing.

2. 極細線矯正方法

2.1 回転矯正

Fig. 3に回転矯正機の外観を示す。2つの独立したブレード内で繰り返し曲げを与え、両ブレードを相互に逆回転させながら矯正する方法である。各ブレード内に設置されているコマの押し込み量 h の調整により、線材に必要な曲率 κ を付与する。このような機械式的回転矯正で高い真直度は得られるが、コマと材料間の接触回転により細線にスパイラル状の疵がつく場合がある。

2.2 温間引張り矯正

線材を非接触で高真直化する方法のひとつに温間引張り矯正がある。Fig. 4に温間引張り矯正機¹⁻⁵⁾を示す。線材を管状加熱炉で加熱し、送りベルトで引き出しながら同時にPulley 1でバックテンションをかけ、温間で引張りながら矯正をする。同時に炉内で線材が酸化するのを防ぐため、出口側から窒素ガスを封入する。加熱温度を上げると真直度は向上する。しかし再結晶温度付近まで上げると線材の引張強さが低下するため、一定の温度以下に設定する必要がある。

3. 供試材

本研究では材料の異なる2種類の線材を使用した。線径0.070 mmのタンゲステン線材⁵⁾および、線径0.089 mmのりん青銅線材である。真直度はFig. 5に示すように、タンゲステンは線材30 mmあたり、りん青銅は15 mmあたりの2次元たわみ量 ψ で評価した。評価する線材の長さを分けて考えた理由は部品として用いられるさいに必要な長さに違いがあるためである。また初期曲率半径をFig. 6のように定義した。

Fig. 5. Measuring method of straightening.

Fig. 6. Calculating radius of curvature.

Fig. 7. Relationship between moment M and curvature ratio κ .

4. 各矯正法による真直度

4.1 回転矯正

まずタンゲステン極細線を用いて、回転矯正^{6,7)}による真直度を実験的に検討した。走行中の線材に付与される曲げの回数を多くするためにブレードの回転数 r を大きく、

Fig. 8. Definition of dowel intermesh h .

Fig. 9. Photograph of wire during blade straightening.

Fig. 10. Wire bending shape measured by photo.

Fig. 11. Relationship between curvature ratio κ and dowel intermesh h during straightening.

線材の送り速度 v は小さくなるように、 $r=4000$ rpm、 $v=520$ mm/min に設定した。機械矯正におけるモーメント M -曲率 κ 線図を Fig. 7 に示す。真直度向上は各コマの押し込みによって与えられる曲率 κ を通減していく過程といえる。Fig. 8 に示すように各ブレードにおける偶数コマの押し込み量を変化させる。

矯正中に各コマで与えられる曲率 κ を測定するために回転数 $r=0$ rpm、送り速度 $v=520$ mm/min で写真撮影を行い、Fig. 9 のような画像を得た。またブレード回転数 $r=3600$ rpm、送り速度 $v=520$ mm/min の画像をストロボ同期方法により測定し、回転数 $r=0$ rpm のときと回転数 $r=3600$ rpm のときのパスラインと比較し、Fig. 10 に示す。線材の曲率形状は両者とも一致した。したがって回転数

Fig. 12. Gradual decrease of curvature ratio κ . Fig. 13. Gradual decrease of intermesh h .

Fig. 14. Straightening of rotational blade straightening.

$r=0$ rpm、送り速度 $v=520$ mm/min の画像をもとに No. 2 コマの先端部を拡大し、コマの中心接点、およびその両側で等距離 (0.75 mm) に 1 点ずつとり、3 点を円弧近似して曲率半径を求めた。線材曲率の測定結果を Fig. 11 に示す。同じ押し込み量でも No. 4 コマで与えられる曲率が No. 2 および No. 6 コマで与えられる曲率よりも大きくなっていることが観察される。この結果を考慮して、「曲率通減矯正」となるように各コマの押し込み量 h を再設定した。コマの押し込み量 h と線材に与えられる曲率の関係を Fig. 12 に示す。また比較のために押し込み量 h を No. 2 から 0.4 mm ずつ通減させた「押し込み量通減矯正」を Fig. 13 に示す。このことから押し込み量 h mm の通減は必ずしも曲率 κ の通減とは一致しないことが確認される。

Fig. 12 に示す曲率通減の矯正条件で得られた真直度および Fig. 13 で得られた押し込み量 h の通減条件で得られた真直度を Fig. 14 に示す。この結果、タングステン線材の回転矯正において、曲率通減による真直度は 0.025 mm となり、

Table 1. Initial curvature ρ_0 and roundness Δd of wire samples.

Wire Sample	Initial curvature ρ_0	Roundness Δd
Sample 1	Large	Small
Sample 2	Middle	Normal
Sample 3	Small	Small
Sample 4	Small	Large

Fig. 15. Effect of initial curvature ρ_0 on straightness of phosphor bronze superfine wires. Fig. 16. Effect of initial roundness Δd on straightness of phosphor bronze superfine wires.

押し込み量減矯正よりも高い真直度が得られた。しかし真直度0を達成することはできなかった。

4・2 温間引張り矯正

りん青銅極細線を用いて、温間引張り矯正による真直度を実験的に検討し、初期曲率半径 ρ_0 および偏径差 Δd が真直度に与える影響を究明した。ここで線材の断面図において最大径 $d_{\max}$ と最小径 $d_{\min}$ の差を偏径差 Δd と定義した。Table 1に初期曲率半径 ρ_0 、偏径差 Δd が異なる4つのワイヤーのsampleを示す。sample 1は初期真直度、真円度がよい線材を示しており、sample 4は初期真直度、真円度が悪い線材を示している。Fig.15に示すように、 ρ_0 が大きい線材は矯正後の真直度もより向上している。またFig.16に示すように素線の偏径差の小さい線材(sample 3)は矯正後の真直度も良好なことが観察される。Fig.17に偏径差 Δd の大きい線材の断面図とFig.18に Δd の小さい線材の断面図

Maximum diameter $d_{\max}$	88.99 μm
Minimum diameter $d_{\min}$	91.12 μm
Roundness $\Delta d = d_{\max} - d_{\min}$	1.13 μm

Fig. 17. Roundness Δd of sample 4.

Maximum diameter $d_{\max}$	90.14 μm
Minimum diameter $d_{\min}$	90.46 μm
Roundness $\Delta d = d_{\max} - d_{\min}$	0.32 μm

Fig. 18. Roundness Δd of sample 1.

Fig. 19. Straightness of phosphor bronze superfine wire by tension annealing.

を示す。また各線材の最大径 $d_{\max}$ 、最小径 $d_{\min}$ などのデータをあわせて示す。このことから初期曲率半径 ρ_0 が大きく、偏径差 Δd の小さい線材が真直度向上につながると考えられる。

真直度向上に効果的であった初期曲率半径 ρ_0 が大きい線材かつ偏径差 Δd が小さい線材を供試材として、りん青銅極細線の温間引張り矯正を行った。Fig.19に実験結果を示す。加熱温度は再結晶温度付近の573Kを設定した。加熱温度が573K、矯正時間10s、張力を室温の破断強さ σ_B の50%の張力 σ_t かけたとき、15mmあたりの2次元たわみ量 $\psi=0\text{mm}$ 、つまり真直度0を達成した。一方張力が小さい場合は矯正時間を30s、60sと長くしても真直度0を達成しなかった。加熱時間10sとしても操業では時間がかかり、高コストと考えられるので、炉を長くし、送り速度を早くし、生産効率を上げる工夫が必要だと考えられる。

つぎに再結晶温度が高いタングステン線材を用い同様な

Fig. 20. Relationship between heated temperature and tensile strength.

Fig. 21. Relationship between plastic strain and straightness at low temperature.

Fig. 22. Relationship between plastic strain and straightness at high temperature.

温間引張り矯正を試みた。温間引張り矯正後の引張強さは品質上矯正前の90%以上の強度を保つことが条件となる。Fig.20に矯正後の引張強さと温間引張り矯正での加熱温度の関係を示す。その結果温度設定は1073K未満とした。

室温および加熱温度が573K以下のときの真直度 ψ と塑性ひずみ ε_p の関係をFig.21に示す。ここでは塑性ひずみ ε_p とは温間引張りによって与えられるひずみ量と定義する。与えられる塑性ひずみ ε_p が0.3%以上で、真直度が一定値0.19 mm/30 mmになる状況が観察される。Fig.22に加熱温度が773K以上では、低温の場合よりも真直度がやや向上し、30 mmあたりの2次元たわみ量 $\psi=0.08$ mm/30 mmを達成した。しかし、いずれも真直度の限界が生じ、タングス

Fig. 23. Shape of wire (bent by No. 4 dowel).

Fig. 24. Shape of wire (bent by No. 2 dowel).

Fig. 25. Stress-strain state before straightening.

テン線材は温間引張り矯正のみでは真直度0を達成できなかった。

5. 考察

回転矯正機において、同じ押し込み量でもNo. 4コマで与えられる曲率がNo. 2およびNo. 6コマで与えられる曲率よりも大きくなった原因は前後のコマにおける拘束の違いが原因であると考えられる。Fig.23のようにNo. 4コマを押込んだ場合、前後2箇所拘束があるため曲率は大きくなる。一方、Fig.24のようにNo. 2コマを押込んだ場合、前1箇所拘束しかないため曲率が小さくなったと考えられる。このことから漸減矯正を実現させるさいに、コマの押し込み量を漸減させるのではなく曲率が漸減するようにコマの押し込み量を調整することが必須の条件である。

つぎに温間引張り矯正においてりん青銅は真直度0を達成したが、タングステンでは真直度0を達成できなかった理由を考察する。供試材は初期曲率半径 ρ_0 を持っているため、線材上部と線材下部に分けて応力-ひずみ状態を考える¹⁾。Fig.25(a)は矯正前の状態である。Fig.25(b)に示すように線材には応力もひずみも付与されていない。Fig.26(a)は弾性域内で線材を真直な状態になるように引張を与えた状態である。線材上部は圧縮ひずみ $-\varepsilon_0$ が導入され、線材下部には引張ひずみ $+\varepsilon_0$ が導入される。Fig.26(b)に示すよ

Fig. 26. Stress-strain state straighten by bending moment within elastic limit.

Fig. 27. Stress-strain state of wire given ε_1 strain.

Fig. 28. Stress-strain state of wire of tension free.

うに応力-ひずみ線図上で、原点に対して、点対称の引張りひずみ $+\varepsilon_0$ 、圧縮ひずみ $-\varepsilon_0$ が生じる。Fig.27(a)はFig.26(a)の状態から線材上部・下部ともに等しいひずみ ε_1 を導入した場合である。線材上部には ε_C のひずみ、線材下部には ε_B のひずみが導入される。Fig.27(b)に示すように線材上部、線材下部で与えられるひずみが異なる。Fig.28(a)は矯正後の状態である。線材上部・線材下部それぞれのスプリングバック量を考える。Fig.28(b)に示すように、線材上部・線材下部とでスプリングバックの量に差があることが観察される。この線材上部と線材下部のスプリングバック量の差 ε_G を小さくすることが真直化向上につながると考えられる。スプリングバック量の差に関して影響を与える因子として n 値がある。Fig.29に示すように、 n 値が0の場合スプリングバック量の差 ε_G がなくなる。一方Fig.30のように n 値が大きい場合はスプリングバック量の差 ε_G が残留すると考えられる。以上より温間引張り矯正において n 値を小さくすることは高真直化のための重要な要

Fig. 29. Stress-strain state when work hardening exponent n is 0.

Fig. 30. Stress-strain state when work hardening exponent n is large.

Fig. 31. Relationship between stress and strain of testing wires.

素だと考えられる。

また、タングステン線材およびりん青銅線材の温間引張り矯正における n 値を Fig.31 に示した。タングステン線材において 0.7% 引張りひずみ付近の n 値は、室温 (293K) では 0.35 で、773K では 0.32 と、やや低下傾向を見せるものの、ほとんど差が無いことが確認された。この n 値の低下が高温でも生じなかったため真直度限界が生じたと考えられる。一方真直度 0 を達成したりん青銅の温間引張り矯正は最も真直度が出たときの 0.8% の引張りひずみを与え、加熱温度 573K のとき $n=0$ となった。このためりん青銅では真直度 0 の達成につながったと考えられる。

6. 回転と温間の組合せ矯正

極細線の矯正において極限を狙った真直度向上のために 2 つ実験装置を組み合わせた矯正を考える。温間引張り矯正の実験から真直度を向上させるためには、初期真直度の

Fig. 32. Combination concept of rotational blade straightener and tension annealing.

良好な素線を用いることが重要である。そのためには回転矯正であらかじめ初期真直度を限りなく高くしておき、その後温間引張り矯正で真直度0とする必要がある。Fig.32に示すように温間引張り矯正の張力の影響が回転矯正に影響しないように2つの矯正機の間にはループを設定し、連続化する配置による更なる高真直化を今後の課題としたい。

7. 結言

線径0.089 mmのりん青銅極細線の温間引張り矯正、線径0.07 mmのタングステン線材の温間引張り矯正および回転ブレード矯正を実験的に検討した結果以下の知見を得た。

(1) 回転ブレード矯正においては真直度向上を達成す

るには、コマ押込み量の通減ではなく、曲率の通減となるよう押し込み量を設定する必要がある。

(2) タングステンの回転型ブレード矯正において曲率通減矯正を用いることで、30 mmあたりの2次元たわみ量0.025 mmという目標値以上の真直度を達成した。

(3) 温間引張り矯正においては n 値が小さく、初期曲率半径 ρ_0 が大きく、偏径差 Δd が小さい線材ほど、真直度が向上する。

(4) りん青銅の温間引張り矯正において加熱温度573K、矯正時間10 s、張力を室温破断強さ σ_B の50%の張力 σ_t をかけたとき、15 mmあたりの2次元たわみ量 $\psi=0$ mm、つまり真直度0を達成した。

文 献

- 1) H.Tokunaga: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **5** (1964), 439.
- 2) M.Nishihata: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **14** (1973), 130.
- 3) 日本塑性加工学会編：矯正加工，コロナ社，(1992)，156.
- 4) M. Urabe, F. Yoshida, K. Tanita, T. Kajihara: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998), 82.
- 5) H.Seto: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998), 349.
- 6) M.Asakawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998-4), 338.
- 7) 柏山 大，浅川基男，関谷 傑，前田綾子，沖野晃久：第54回塑加連講論，(2003)，41.