小径ステンレス鋼管内面の電解砥粒鏡面仕上げ

清 宮 紘 一*

(受理1997年1月28日, 掲載決定1997年4月5日)

Electroabrasive Mirror Finishing of the Inner Surfaces of
Stainless Steel Pipes of Small Diameter

Koichi SEIMIYA

(Mechanical Engineering Laboratory, Namiki 1-2, Tsukuba, Ibaraki 305)

(Received January 28, 1997, Accepted April 5, 1997)

Electroabrasive polishing is applied to the inner surfaces of SUS316L pipes of about 4 mm in diameter and 35 mm in length. The surface roughness of the drawn BA pipes is improved from about $3\text{ }\mu\text{m}$ R_{max} before polishing to $0.05\text{ }\mu\text{m}$ R_{max} . In the rough, intermediate and final stages of polishing, the tool electrode with #500 and #3000 nylon fabric sheets and a urethane sheet, respectively, was used, each with working times of 2 minutes at a current density of $0.2\sim 0.3\text{ A/cm}^2$. The surface roughness obtained through this process is one-tenth or less than that by the electropolishing process currently used for long stainless steel pipes of 4 meters in length. The tool electrode is not only rotated at 23 rps but also reciprocated at 7 Hz with an amplitude of 8 mm in order to obtain an abrasive grain crossing angle sufficient to avoid circular scratches. Characteristics of the electroabrasive polishing process are compared between machined pipes and drawn BA pipes. The removal rate for the former is approximately twice that of the latter at 0.3 A/cm^2 . The upper limit of current density for a mirror-finished surface is much higher in the former. These experimental findings can be attributed to the existence of the hardened surface layer formed by a bright annealing process. A trial electroabrasive polishing machine for long pipes 1 m in length is produced, and experiments are carried out to obtain useful data for putting the machine into practical use.

1. はじめに

清浄, 高純度流体を循環使用する半導体工業などの先端技術分野では, 微細粉塵の付着やアウトガスの量を抑制する目的で, 内面を高度に平滑化, 鏡面仕上げした小径のステンレス鋼管を必要としており, こうした小径管は通常, 配管や継手類の形で使用されている。

このような小径管は従来, 管の中心軸に沿って細線の電極工具を挿入する電解研磨法や砥粒を含む粘性物質を高圧で押出す流動研磨法 (Abrasive Flow Machining) などにより量産加工されている。しかし, 前者の場合には管の材質成分の僅かな違いや電解液の老化が仕上げ面に大きな影響を及ぼすため工程管理が難しい, 取りしろ

が大きい肉厚の減少による強度や精度の低下を招く, 強酸, 強アルカリ性加工液の廃液処理設備が必要であるなどの問題がある。また, 後者には短管にしか適用できない, 塑性流動によりミクロ凸部を凹部へ埋め込む方式の加工であるため表面層直下に空孔や剥離しやすい弱化層が形成される危険性が大きく, アウトガス特性, 耐久性を悪くするという欠点がある。

一方, 電解砥粒研磨^{1,2)}は, パフ研磨の代替を当初の目的として研究開発された鏡面仕上げ用の研磨法である。基礎研究における実験結果³⁾から得られた「遊離砥粒方式の鏡面仕上げには 1 A/cm^2 未満の低電流密度で十分である」という認識を立脚点として, 手送り式電解砥粒研磨機, それを自動化した XY テーブル型研磨装置, さらに建材用定尺鏡面板の量産を目的としたライン型連続鏡面研磨装置が開発, 実用化された。木本ら⁴⁾の

* 機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2)

電解複合研磨とは電解液の供給方法およびそれに伴う押付圧、電流密度などの加工条件に差違があり、一連の特許⁵⁾が電解複合研磨とは独立に取得されている。

本報では、この電解砥粒研磨法をステンレス鋼小径管内面の鏡面仕上げに適用して、下地面粗さ $2 \sim 3 \mu\text{m}$ R_{max} の引抜き光輝焼鈍 (Bright Annealed: BA) 管内面を粗・中・鏡面仕上げの3工程各2分で仕上げ面粗さ数 $10 \text{ nm } R_{\text{max}}$ レベルの超平滑面にまで鏡面仕上げした実験結果についてまず述べる。つぎに#3000ナイロン不織布による切削加工管との加工特性実験結果に基づいて引抜きBA管ととの違いを比較検討し、最後に、1 m 用長尺管内面研磨装置の試作について述べる。

2. 電解砥粒研磨の加工原理

電解砥粒研磨では通常、20 wt% 程度の硝酸ナトリウム水溶液 (中性で作業者に無害) を電解液として使用する。この電解液におけるオーステナイト系とマルテンサイト系の代表的なステンレス鋼である SUS304 と SUS403 の定常状態における電流効率—電流密度特性 (電解のみの場合) を Fig. 1 に示す。本加工法で用いられる 1 A/cm^2 未満の低い電流密度では、アノード電流のほとんどが不働態酸化皮膜の形成や気体発生に消費され、工作物金属のイオン化による電解溶出の形で加工に寄与する割合が極めて低いため、電流効率はほぼゼロに近い値になる。

本加工法の場合には、マイクロ凸部の不働態皮膜が砥粒擦過により選択的に除去され、その部分の皮膜厚さが減少したり素地金属が露出したりする結果、凸部においてのみ電解溶出が生じてかなり大きい電流効率の値が得られ、平滑化が急速に進行する。固定砥粒方式のナイロン不織布の場合には、Fig. 2 に示すように砥粒径ごとに切り込み深さが大きく異なる結果、電流効率は数10% (#600) から数% (#2500) まで大きく変化する。一方、

Fig. 1 Effect of current density on current efficiency in a steady-state electrolytic process.

ウレタン材による遊離砥粒方式の場合には、切込み深さが小さい代わりに、砥粒の通過頻度が桁違いに大きくなる結果、一定厚さの不働態皮膜が安定的に形成され、20%前後の電流効率が維持される⁶⁾。

3. 小径管内面研磨に関する理論的検討

3.1 小径管内面研磨における問題点

平面の電解砥粒研磨では、回転円板形の電極工具に加工送りを与えれば自然に砥粒軌跡が交差して、平均した砥粒通過確率をもつ良好な加工面が得られる。円筒内面でも大径の場合には平面と同様の方式による加工が可能であるが、小径管になると全く事情が異なる。

この場合には、工作物の小径管よりも細い芯電極を粘弾性研磨材で被覆した電極工具を使用するが、加工送りの速度が工具回転周速に比較して桁違いに小さいため、砥粒通過軌跡はほぼ真円になり、粒径の大きい砥粒による周期的なリング状の条痕を生じる。本研究ではこの問題に対処するため、加振機構を付加して軸方向に高速の往復運動を与えて砥粒軌跡がらせん状になる方式を採用する。この方式の場合、工作物加振方式なら振幅が小さくても砥粒と加工物間の相対運動は得られるが、軸方向の運動が芯電極から粘弾性研磨材を経由して砥粒に伝達される工具加振方式では mm オーダーの大きな振幅が必要になると考えられる。

3.2 砥粒の運動軌跡

電極工具に往復運動を付加する場合について、円筒内面に接触して加工に寄与する砥粒の運動軌跡を検討する。工具は管の上方から挿入されるものとして中心軸の Z 軸を下方向にとる。モーターの回転 (周波数 f) をリンク機構により振幅が $2A$ の軸方向振動に変換する方式の場合、砥粒の Z 方向運動は次式により表わされる。

$$Z = A(1 - \cos 2\pi ft) \quad (1)$$

ここでは、工作物管の上端を $Z=0$ とし、粘弾性研磨材に起因する砥粒の半径方向運動は無視している。本報の実験条件、 $A=4 \text{ mm}$, $f=7 \text{ Hz}$ の場合について、 $t=0$ で $Z=0$ の初期条件での砥粒の軌跡を Fig. 3 に示す。

つぎに、Z 方向の速度 U は

$$U = dz/dt = 2\pi f A \sin 2\pi f t \quad (2)$$

と表わされる。

一方、平均速度 U_{av} は、 $2\pi ft = x$ の変換により次式で計算される。

Fig. 2 Schematic view of relationship between oxide film and abrasive grains.

$$U_{av} = (2\pi fA/\pi) \int_0^\pi \sin x dx = 4fA \quad (3)$$

3.3 砥粒の平均交差角

円筒内面研磨の場合、砥粒のらせん運動によって形成される擦過条痕同志の交差角は、加工能率と仕上げ面粗さに重大な影響を及ぼす加工因子であり、ホーニング加工ではクロスハッチアングルと呼ばれている。本研究においても、この因子が R_{max} の改善における重要な因子と考えられるので、これらについての検討を行う。

砥粒の運動ベクトルが水平方向（半径方向）と成す角度を θ とすると $\tan \theta$ は、

$$\tan \theta = \frac{U}{V} \quad (4)$$

で与えられ、砥粒交差角は 2θ となる。Z 方向速度の代表値として平均速度 U_{av} をとると、(3) 式より

$$\tan \theta_{av} = \frac{4fA}{V} \quad (5)$$

となる。(5) による平均砥粒交差角 $2\theta_{av}$ の計算結果を往復運動の平均速度をパラメーターとして Fig. 4 に示す。

Fig. 3 Spiral movement of an abrasive grain on the inner surface of a pipe.

Fig. 4 Effects of tool speed of rotation and reciprocation on mean crossing angle.

図中の○印は後述する本報の実験条件における値を示す。

4. 実験装置および方法

Fig. 5 は電極工具（粗・中仕上げ用）の構成を示す。外径 2 mm の SUS 管を芯電極とし、まず芯電極との密着性の良いウレタン材を巻いて滑り止めした上にナイロン不織布をらせん状に巻いてから両端を接着して電極工具が出来上がる。最終鏡面仕上げ用工具の場合には、ナイロン不織布の代りにウレタン材をさらに巻いて工具を製作する。

小径管内面の研磨では工具が工作物に挿入されて工具外径が工作物内径にまで圧縮されることにより押付圧が生じ、この押付圧が重要な影響因子となる。押付圧を直接的に測定する方法が未だないため、工具の製作精度が加工結果に大きな影響を及ぼす。工具外径は工作物内径より約 1 mm 大きい程度が目安になる。

Fig. 6 は小径管内面電解砥粒研磨の概要を示す。研磨装置は小型卓上ボール盤を改造して加工槽を付加したものである。電極工具は主轴に取付けられ、23 rps の回転と同時に 7 Hz 振幅 8 mm の軸方向往復運動（モーター

Fig. 5 Fabrication of tool electrode.

Fig. 6 Equipment used for electroabrasive polishing of the inner surface of a small pipe.

の回転をリンク機構により変換)が付加される。これにより大きな砥粒交差角が生じ、リング状の条痕発生が防止されるとともに工具作製の局所的バラツキに起因する軸方向の加工ムラも低減される。

本加工実験の場合、工作物管内の電解液は加圧されていないため、ナイロン不織布あるいはウレタン材を通して加工域内から外部へ流出する電解液の流量はほとんどゼロに近い。このため、加工域内の電解液を更新する目的で、30秒ごとに加工槽を降下させて工具を工作物へ出す操作(約12秒間)を行った。なお、電解液としては NaNO_3 20 wt% 水溶液を使用し、Rank Taylor Hobson 社製タリサーフ 5 型触針式粗さ計により表面粗さ測定を行った。

5. 実験結果および考察

5.1 引抜き BA 管の鏡面仕上げ

試験片として使用した引抜き BA 管には、引抜き加工に伴う軸方向の条痕のほか光輝焼鈍(Bright Annealing)に起因する多数の微小なビットが点在している。表面粗さの測定では軸方向にダイヤモンド触針を掃引する関係上、このビットが下地面の表面粗さ $R_{\max}$ を支配する。このため、研磨実験に使用した試験片はすべて下地面粗さを測定した後、粗さレベルごとにグループ分けして、一連の実験には同グループのものをを用いた。

Fig. 7 Change of surface roughness with time for polishing with #500 fabric sheet without electrolysis.

Fig. 8 Changes of surface roughness in rough and intermediate polishing stages with electrolysis.

Fig. 7は#500ナイロン不織布による粗工程における粗さ改善特性(電解なしの場合、矢印は各8測定点での最大、最小値)を示し、約10分で表面粗さはほぼ下限に到達している。電解を付加する際は、ビット発生により仕上げ面粗さが急増大する臨界電流密度の存在³⁾があり、予備実験で 0.5 A/cm^2 において部分的にこの現象が認められたため以下の実験では安全上 0.3 A/cm^2 を選択した。

Fig. 8は#500, #3000ナイロン不織布を用いた加工時間各2分間の粗・中仕上げ工程における表面粗さ改善特性を示す。電極工具は各実験ごとに新品を使用しているが、試験片は同一であり、#500による仕上げ面が次の#3000工程の下地面になる。各工程における仕上げ面の断面曲線(縦2万倍、横100倍の倍率で測定)をFig. 9に示す。加工面には多数の擦過砥粒線(クロスハッチング)が存在し、この砥粒線の深いもの、あるいは残存する下地面の深いビットのいずれかが仕上げ面粗さ $R_{\max}$ を支配する。

Fig. 10はウレタン電極工具による最終鏡面仕上げ工程における断面曲線(縦5万倍、横100倍の倍率で測定)の時間変化を示す。 $R_{\max}$ はこの曲線に基づいて測定基準長さ 0.25 mm で計算される。電解液中には平均粒径 $0.7 \mu\text{m}$ のアルミナ砥粒が1 wt%混入されている。表面粗さ $R_{\max}$ は約2分でほぼ下限の値である $0.05 \mu\text{m}$ $R_{\max}$ に到達している。

Fig. 11は本加工法により鏡面仕上げした後に二つ割

Fig. 9 Profile curves after #500 and #3000 electroabrasive polishing stages.

Fig. 10 Change of profile curve in mirror-polishing stage.

Fig. 11 A small mirror-finished pipe cut into two in which letters on a pencil are mirrored.

Fig. 12 Comparison of changes of surface roughness with time between drilled and drawn pipes.

りした試験片内面に鉛筆表面の文字がひずみなく鮮明に映っている状況を示す。試験片を割って目視による評価を加える場合には、粗さ測定において何千回、何万回かに1回程度しか計測にかからないほどの僅少なキズも顕在化する結果、 R_{max} の値が同じでも目視評価において差を生じることもありうる。粗工程に十分な時間をかければこの問題は避けられるが、コストとの兼ねあいを考えれば、3工程各2~3分で仕上げ面粗さ $0.05\mu\text{m}$ R_{max} の鏡面を得るのが実用的な方法と考えられる。

以上述べた短い小径管内面の鏡面仕上げ方法は、半導体工業関連のSUS316L継手類に対して適用可能であり、生産現場への導入に際しては粗・中・鏡面仕上げ用の3台の研磨装置でラインを構成する形が一般的と考えられる。この場合、工作物の管は切削加工により穴あけされるので、下地面粗さのレベルや切削加工に伴うキズのひん度によっては、粗工程の時間を多くとりそれに応じて研磨装置の台数を増やすことになる。切削加工管と引抜きBA管との加工特性の差異は次節において、検討する。

5.2 引抜き管と切削管の電解砥粒研磨特性の差異

試験片として、前加工工程の異なる2種類のSUS316L管を用意した。切削管は外径6mmの丸棒にドリル加工とリーマ加工で内径4mmの穿孔を行って製

Fig. 13 Comparison of effects of current density on surface roughness between drilled and drawn pipes.

Fig. 14 Difference in metal removal between drilled and drawn pipes.

作したものである。引抜きBA管と電解砥粒研磨装置および工具の回転と往復運動などの条件は前節と同じである。しかし、切削管は内径が4mmであることから、挿入可能な#500ナイロン不織布工具の作製は困難となり、#3000のみについて研磨実験を行い、加工速度と仕上げ面粗さに関する加工特性についての比較検討を行った。

Fig. 12は電流密度 0.3 A/cm^2 における加工時間2分間の表面粗さ改善特性を示す。切削管の方が下地面粗さは大きい、約30秒で同程度になり2分後の表面粗さは引抜き管の約半分の値にまで低減されている。Fig. 13は加工時間2分での仕上げ面粗さに及ぼす電流密度の影響を示す。引抜き管の場合には 0.3 A/cm^2 以上の電流密度において表面粗さ R_{max} が急増大するのに対し、切削管での値は 0.7 A/cm^2 程度であり、より高い電流密度での加工が可能になる。なお、Fig. 12, Fig. 13での粗さ測定の基準長さは 0.25 mm である。

Fig. 14はFig. 12の場合における加工量の時間変化を示す。加工量は、加工前後の質量をメトラー電子天秤（最小読取量 0.1 mg ）を用いて測定し、その質量差と工作物管の内表面積に基づいて計算した値である。切削管、引抜き管とも直線的に加工深さが増大しているが、切削管の方が2倍かそれ以上の値になっている。Fig.

Fig. 15 Comparison of effects of current density on removal rate between drilled and drawn pipes.

15は Fig. 13の場合における加工速度に及ぼす電流密度の影響を示す。切削管の場合には電流密度とともにほぼ直線的に加工速度が増大する傾向にある。一方、引抜き管の場合には0.3 A/cm²以上の電流密度において加工速度が急増大するが、それ以下の低電流密度では電解溶出の加工速度増大への寄与はごく僅かである。

以上の実験結果により明らかにされた切削管と引抜きBA管における電解砥粒研磨特性の差違は、主としてBA管のBA処理に起因すると考えられる。すなわちこの処理においては、高温の水素あるいは窒素雰囲気中に長時間さらされた表面からこれらの気体が侵入して硬化層を形成する。電解なし条件における切削管と引抜き管の加工速度の差は硬化層の硬さの影響を示すものと考えられ、0.3 A/cm²以下の低電流密度条件における加工速度の差は、切削管では素地金属が露出しているのに対しBA管では硬化層の存在により#3000の砥粒が素地金属にまで切り込めないことから、イオン化による電解溶出量があまり大きくないためと推測される。またピット発生により仕上げ面粗さが急増大する電流密度のしきい値の差異は、切削管における素地金属とBA管における硬化層の電気化学的特性の違いに起因すると考えられる。

6. 長尺管内面研磨装置

クリーンルームなどの配管に使用される長尺管は引抜き管内面を電解研磨して鏡面化したものが用いられている。電解砥粒研磨法をmオーダーの長尺管（実用には4mが定尺）に適用する目的で、まず1m用の研磨

実験装置（たて型）を試作した。この装置では工作物に軸方向往復運動を付加し、工具には下から上への定速抜き送りを与える方式をとっている。電極工具の加工部の長さは約100 mmである。

工具と工作物の平均対向時間が短管での実験の場合と同程度になるように1m管を20分で加工する実験を行い問題点を把握した。長尺管では工具回転を与える主軸のチャック部と先部の加工部までの距離が大きくなるため、工作物外にある回転軸が振動する問題があり、3箇所には振れ止め治具を配置して対処した。4m用の研磨装置においては工具回転方式ではさらに困難が増大するため、工作物回転方式による装置の試作を検討している。

7. ま と め

内径約4 mmのSUS316L引抜きBA管内面に電解砥粒研磨法を適用し、3 μm R_{max}前後の下地面をナイロン不織布#500、#3000の粗・中仕上げ（電流密度0.3 A/cm²）、ウレタン工具の鏡面仕上げ（電流密度0.3 A/cm²）の各2分計3工程により0.05 μm R_{max}（電解研磨法の1/10）レベルの平滑面にまで鏡面仕上げした。つぎに、#3000工具を用いて切削加工管と引抜きBA管の電解砥粒研磨特性の比較実験を行い、BA管内表面の硬化層の影響によりBA管における加工速度、最適電流密度が、切削管よりも低く、仕上げ面粗さが悪いことを見出した。また、長尺管への適用を目的として1m用研磨実験を試作して小径長尺管研磨における問題点を把握した。

最後に本研究にご協力頂いた(株)ミラクル中上健治、三菱マテリアルシリコン(株)浅川慶一郎、林精器製造(株)渡部隆司の各氏に感謝の意を表します。

【文 献】

- 1) 清宮紘一：砥粒加工学会誌，37（1993）219.
- 2) 清宮紘一：光技術コンタクト，32（1994）214.
- 3) 清宮紘一：昭58精機学会春季大会講演論文集（1993）265.
- 4) 木本康夫，田宮勝恒，本田昭一，安藤利明，州崎友彦：電気加工学会誌，23（1978）1.
- 5) 清宮紘一，中上健治：特許1727813. 1746918～1746920（1993）.
- 6) 清宮紘一，中上一平：精密工学会春季大会講演論文集（1994）525.