砥石軸の剛性が工作精度に及ぼす影響

角 田 馨* 津 村 喜代治*

The Effect of Rigidity of Grinding Wheel Spindle on Machining Accuracy

Kaoru KAKUDA, Kiyoji TSUMURA

The machining accuracy of the grinding machine is governed by the relative displacement of the grinding wheel spindle and the work, but said displacement is greatly affected by the rigidity of the grinding wheel spindle. In consideration thereof, the authors have devised a special apparatus, with which they have succeeded in their pursuit on the movements of spindle center and, further, have found, through experiments, the effects of the speed of feed and rigidity of the quill-type spindle relationship on machining accuracy.

1. The swing of an idling grinding wheel spindle center and its statical swing are about in unison and perform a circular movement, but will not coincide when the accuracy and rigidity of the spindle system decline.
2. When a load is caused by grinding resistance, the amount of swing will decrease, and with the increase of load, the amount of swing will again increase. This trend of increase is governed by the accuracy and rigidity of the spindle system.
3. The surface roughness, cylindrical error, and the out-of-roundness of the work is proportionally related with the feed speed of the main spindle and is also exceptionally greatly governed by the rigidity of the grinding wheel spindle.
4. There is a tendency of the deviation of the grinding resistance, occurring during one rotation of the work, being great when the rigidity of the grinding wheel spindle is low.

1. 序 論

近時の全自動内面研削盤では主軸台の送り込み速度が荒仕上げおよび仕上げに応じて自動的に移り変わる仕組みとなっており、これら送り込み速度の組み合わせが一つの研削サイクルを形成しているので、生産性を向上するには、これら送り込み速度を考慮した上での研削サイクル時間の短縮が必要である。然しこの時間を短縮すると工作精度上種々の問題が発生して来る。

内面研削盤における工作精度は砥石軸と工作物との相対変位に支配されるものである。従つて生産性を向上させ且つ工作精度を向上させるためには、研削抵抗と砥石軸心の動きの関係および送り込み速度と砥石軸の剛性との関係が工作精度におよぼす影響について求めることが重要となつてくる。

筆者は特殊装置を考案して軸心の動きを μ 単位で計測し且つ送り込み速度が砥石軸剛性によつて工作精度に如何に影響するか実験的に求めた。

2. 実験装置及びその方法

図1 測定の方法

砥石軸心の動きは図1の原理で観測した。図にてわかるように砥石の止めねじの先端をラッピングしてとがらし、光をあて、その動きをストロボスコープの同調を少しずらすことにより毎分数回転程度とし、肉眼で振れの状態を観測で

写真1 計測装置の視野

* 東洋工業株式会社 正会員

きるようにし、 μ 単位で Carl Zeiss 製スパイラルマイクロスコップで読みとつた。その視野の状態は写真 1 に示す。

砥石に対する荷重は図 2 に示すように行ない、研削片

図 2 負荷の方法

は長さ 25 mm × 幅 2 mm のクローム焼き入れ鋼を使用し砥石は WA 80 L 直径 32~33 ϕ のものを採用した。また砥石軸の回転速度は 13000 rpm のものを用いた。

内面研削盤のホイールヘッドの構造は種々あるが、ころがり軸受にて軸の両端を支持した構造のものが一番多く、本実験に使用したものは図 3 に示す。

玉軸受の形式 アンギュラコンタクト型
玉軸受の番号 No. 17207
玉軸受の寸法 (外径×内径×幅)
72×35×17 (mm)

使用個数 4 個

図 3 ホイールヘッドの構造

この構造のものは換軸型式に属するもので砥石軸を工作物内径に応じ取り換えのできるようにしてあり、テーパーおよびねじにより軸が接続できる。

また送り込み速度に関する一連の実験には東洋工業製精密内面研削盤を用い、試験片の取り代は直径にて 0.2 mm とし、主軸の送り込み速度および換軸をそれぞれかえて研削を行なつた。工作物の寸法定めは自動範測方式にて行ない、研削完了後砥石が目直しされて行程が完了する特別の仕組みとした。テーブルの往復運動は一定で研削条件を示すと表 1 のようになる。

砥石軸剛性により工作物に生ずる円筒度が相違するため主軸中心線とテーブル運動とは特に平行に定めその精

表 1

工作物回転速度	300r. p. m.	工作物材質	SK 3
ホイールヘッド型式	Q 187—100	工作物硬度	RC 58~60
砥石軸回転速度	14100r. p. m.	工作物寸法	55 ϕ ×40 35.2 ϕ
テーブル速度	3.88m/min	取りしる	0.2 ϕ
砥石目直し速度	1.20m/min	砥石寸法	31.0 ϕ ×25 ×10 ϕ
砥石種類	ミズホ WA 80 L	寸法定め	自動範測
補正量	0.04 ϕ		

度は水平面内で 180 mm で 2 μ とした。

3. 実験結果と考察

3.1 砥石軸先端中心の振れと軸受温度上昇の関係

スピンドルを支持するころがり軸受はハウジングに対して軸受の温度上昇に伴う熱膨張を考慮し、直径で 4 μ 程度のすき間を置いているのが普通である。

ハウジング並びにスピンドルところがり軸受との各部の直角度がよく組み合わされ、すき間が適当であれば、軸心の振れと温度上昇の関係は図 4 のように運転時間の

図 4 運転時間と上昇温度および換軸先端中心の振れとの関係

経過と軸心の振れの間に関係がないものであるが、内外輪とスピンドルとかハウジングのすき間過大のものにおいては初期の軸の振れは当然大きい。しかし運転時間の経過に伴って振れは図 5 のように低減するが、これは軸受の温度上昇によりすき間が減少するために生ずるものと思われる。

またクリープを発生する状態のものにおいては砥石軸の起動停止を繰り返すごとに運転中の軸心の振れの値が異なつて一定しなかつた。

3.2 砥石にかかる荷重と軸心の振動

図5 運転時間と軸受温度上昇および換軸先端中心の振れとの関係

高速回転をする砥石軸心の動きの精密な計測は色々な困難を伴うものである。

砥石軸の動きを支配する大きな要素は軸受の精度、軸の剛性および軸系のバランスである。これらの要素が砥石と工作物との研削中における相対位置を変化させ、工作精度に影響を与えるものと考えられる。そして研削抵抗と軸心の動きという問題に取りかかるには、まず軸受

図6 荷重と換軸先端中心の振れおよびたわみとの関係

の精度とか軸受系のつりあいを確認する必要がある。

図6のような動きを示すものは軸受系に精度上何等かの異状の存在するものと思われる。

すなわち荷重の増加に伴って静的回転精度が悪くなることは換軸のテーパが不完全な場合が多く、またころがり軸受とスピンドルの直角性に異状のある場合にも発生し、かかる場合動的精度は急激に悪くなるようである。

また後者の場合静的な回転精度と動的な無負荷回転精度の間に大きな差を生じ、荷重の増加に伴って振幅が急激に上昇することがあった。

3.2.1 砥石軸剛性の影響

スピンドルとそれを支持するころがり軸受が良好な精度に組み立てられている時には、砥石の静的回転精度と動的無負荷回転精度はほぼ同じ値をとることが、図7中の表から分かった。図7a, b, cに示すものは軸受系に異状を認めないものの砥石軸の動きと荷重の関係を示している。

図中の表でわかるように静的振れと無負荷動的振れは

図7a 荷重と動的な換軸先端中心の振れとの関係

図7b 荷重と動的な換軸先端中心の振れとの関係

図 7 c 荷重と動的な換軸先端中心の振れとの関係

ほぼ同一であり、いずれも振れの状態は円形であるが、砥石に荷重がかかると円より長円の動きにうつって行き荷重のある値を境として長円の長短両軸の値の差は増加の傾向を示す。つまり砥石軸にかかる接線研削抵抗と法線研削抵抗が軸心の動きを支配していると考えられる。

法線研削抵抗は片持ち軸である砥石軸の自由端に対し振れ止めの作用を行なっていることが図7より判断される。

この図によれば、負荷回転時の振れの値は0.3 kg 程度の法線負荷により最低値に達し、その低下する値は短軸方向でほぼ 1μ である。この値はホイールヘッドの軸受間隔、スピンドルの剛性に支配されるものと思われる。

いま図7の短軸の振幅の最小値と荷重1.4 kg の時の振幅との差を見出し、その値と軸の剛性との関係を示すと図8のようになる。この図は同一のホイールヘッドに対

図 8 換軸の剛性係数と換軸先端中心振れ増加の傾向との関係

し換軸の剛性を代表する値として L^3/I をパラメータとした値であり (I =慣性モーメント, L =長さ), 剛性係数が大となれば軸心の振れは増加の傾向にある。すなわち換軸の剛性が低下すると荷重(法線研削抵抗)の増加

に対し振幅が増加することを示すものである。

図7aの実験条件においてホイールヘッドの軸受間隔のみ1.44倍となつたものの荷重と軸端の振れの関係は図9に示すが動的振れは類似している。

図 9 荷重と換軸先端中心の振れおよびたわみとの関係

図9に示す縦軸の値すなわち荷重1.4 kg の振幅の値と振幅の最小値との差が 3μ となつているが、これは軸受間隔の増加によりスピンドルの剛性が低下したため換軸の剛性の低い図7cと同一になつたものと思われる。

すなわち本実験では軸心の振れは0.3 kg 程度の荷重の時に最低値があり、荷重が増加すると軸心の振れは増加するが、その傾向は軸系の剛性に支配されることがわかつた。

3.2.2 接線研削抵抗の増減と振動の状態

いま試験片の幅を5, 10 mmとした場合における荷重と軸心の動きの状態を図10a, bに示す。この場合の接

図10 a 荷重と動的な換軸先端中心の振れとの関係

図 10b 荷重と動的な換軸先端中心の振れとの関係

図 11 接線研削抵抗と法線研削抵抗との関係(電気抵抗法による測定)

図 12 荷重と静的な換軸とたわみとの関係

線研削抵抗は図 11 に示すように、試験片の幅が増加するとわずかに減少するが、大きな変化は見られない。

3.3 砥石軸のたわみ

内面研削における砥石軸は、一般に細いため研削抵抗により弾性的にたわみやすいが、荷重とたわみの関係は図 12 のようであった。

この図において換軸寸法 20×40 のもので、図 6 の実験結果の静的たわみと、本実験の軸受系が完全とおもわれるものの静的たわみを比較すると、不備なものは荷重の増加とともにたわみが、わずかに大となっている。

また図において 16×90 の換軸は荷重 1.4 kg でたわみ 18μ となっているが、この様にたわんだ状態で回転した場合には、その振れは 2×18μ 程度生ずるはずであるが図 7c においては 6.5μ となっている。これは砥石軸が曲つた状態で回転しているものと思われ、図 6～10 の実験においては写真 1 に示す尖端は、各荷重によりことなつた位置を示したことが観測された。

3.4 主軸台の送り込み速度がうねりに及ぼす影響

この実験に用いた砥石軸は外部より研削抵抗をうける

と図 6～10 に示したように長円の運動を行なっており、従つて砥石 1 回転について研削面に一つの山が生成されることになるはずである。図 13 は研削加工した穴をタリロンドで記録した例であり、円周上の小さなうねり、すなわち山と谷の半径方

図 13 研削面に生成するうねり

主軸台送り込み速度(mm/min): 0.05
換軸 型 式: 2090
工作物回転速度 (r.p.m): 300
1 目: 0.5μ

図 14 主軸台送り込み速度がうねりにおよぼす影響

向の寸法差は砥石軸の振幅に左右されると考えてよいだろう。

図 14 は送り込み速度とうねりとの関係を示したものである。

主軸の送り込み速度が増加すれば研削抵抗が増加し、砥石軸の振れが大きくなり、したがってうねりの値も増加している。

図 15 は砥石軸の剛性係数とうねりの関係を求めたも

図 15 剛性係数 (L^3/I) と うねり との関係

のであるが、図 8 の換軸の剛性係数の軸心の振れの増加の傾向の関係とよく類似している。

うねりの値は砥石軸の振幅に左右される外、砥石の性質、取りしるにも関係する。たとえば通常の研削サイクルでは仕上げ研削の前に毎回砥石の目直しが行なわれるが、スキップドレスのごとの数回に 1 回目直しをする研削では、1 回の目直しでの研削代がかなりの値となる。そのため砥石表面の変化²⁾あるいは研削抵抗の変化がうねりに影響を与えることがある。

うねりは図 13 の場合は砥石 1 回転に 1 山生成されているが、その波形は、高周波の不規則な振動をする外来振動等のため、幾何学的正法波に生成されず不規則になることが多い。

また工作物 1 回転中のうねりの大きさも異なっていることがあり、これは工作物 1 回転中の研削抵抗の変化、工作物の同心度、取り付け面に対する直角度、砥石のストローク、主軸の回転精度および外来振動（周囲に発振機械がある場合）に支配されると思われる。

うねりのピッチは砥石の回転速度と工作物の回転速度の商であるはずであるが、電圧変動等の関係により回転速度が一定せず商の端数の関係で明瞭に表われないことが多い。

3.5 主軸台の送り込み速度が内径真円度におよぼす影響

研削作業のタクトすなわち工作物を 1 個研削するに要する時間は仕上げ面精度、砥石の種類、周速および研削液等に影響されるが、それらが適切で一定な場合には砥石軸の剛性と主軸の送り込み速度によって決まる。

全自動研削サイクル³⁾は研削送り込み速度の一種の組み合わせであり、荒仕上げおよび仕上げ研削の各工程においての送り込み速度は自動的に移り変わる仕組みとなり、砥石軸方向の往復運動とプランジカットが同時に行なわれている訳である。従って研削サイクルは工作物の所定精度をかん案して砥石軸剛性と送り込み速度による精度との両面より設定すべき性質のものである。

図 16 は主軸台送り込み速度と真円度との関係を示

図 16 主軸台送り込み速度が真円度におよぼす影響

し、真円度の値は工作物中より任意に取り出した 3 個のタリロンドにより求めた測定値の平均値である。

実際には工作物の回転中心は何らかの形をしたひずみ円の運動をすることが多い。またひずみ円の運動をする砥石軸心の動きが加わるため、砥石軸と主軸の軸間距離は主軸 1 回転中にたえず変わることになり、工作物内周に幾何学的な円が生成されない。従って真円度をよくするには軸受の精度とか剛性を向上させることが大切である。

主軸の剛性を一定とすれば工作物の精度は砥石軸の剛性に支配されるもので、送り込み速度が増加すると、砥石軸の法線および接線方向にうける荷重が大となってくるはずである。

図 17 主軸台送り込み速度と接線研削抵抗との関係

法線研削抵抗と接線研削抵抗の比は2〜3:1といわれているが、図11の実験によれば2.8:1程度の割合となつている。いま接線研削抵抗を電気抵抗法により測定した結果は図17のようになっている。

送り込み速度が増加することは両研削抵抗が増加することを意味し、その増加の傾向は砥石軸の剛性によつても相違を示し、剛性の低いものは送り込み速度が大きくなると研削抵抗の増加の傾向が大きくなる。

図18は図16より真円度と剛性係数との関連性を求

図18 剛性係数 (L^3/I) と真円度との関係

めたものであるが、砥石軸の剛性係数が大となると真円度が悪化してくることがわかる。

砥石軸に対する研削抵抗が増加するに伴つて剛性の低いもの程、工作物1回転中に生ずる研削抵抗の変化が大きくなつて内径真円度が悪化して来ると思われるが、図19に示すものは研削中の記録式電流計の時間的経過を示

図19 研削中の研削負荷電流変化の状態

したもので、ほぼ同じ負荷電流に対し、砥石軸剛性の低い方が電流の変動が大きく、したがつて軸心の動きが大きいものと思われる。

内面研削において工作物の内径が小さく砥石軸の剛性の低い場合に、送り込み速度は荒研削、仕上げ研削共に低い値をとらなくては工作精度が出ないものは前記理由によつて裏付けされる。

3.6 主軸送り込み速度が表面あらさにおよぼす影響

仕上げ面のあらさについては種々発表されているが、いま最大あらさを工作物の軸方向についてタリサーフに

て測定した結果を図20に示し、最大あらさと砥石軸の剛性係数の値との関係は図21に示す。

図20 主軸台送り込み速度が最大あらさにおよぼす影響

図21 剛性係数 (L^3/I) と最大あらさとの関係

あらさは砥石の性質、目直し条件、取りしるの外テーブル速度などによつても影響されると思われる。自動研削サイクルを構成するに必要なものは送り込み速度の影響であり、図20, 21は前述の諸条件を普通の作業と等しくし一定としたものである。図20において0.4 mm/minは荒研削の速度であり、0.1 mm/min以下は仕上げ研削の速度に相当するものである。いずれも3〜4うねりの項で詳述した理由により送り込み速度が増加するに伴つてあらさが悪くなつている。

また砥石軸の剛性が低下すると図8のように、研削の場合砥石軸心の動きが大きくなることは、砥石を目直しする場合にもあてはまる誤であり、目直し後の砥石の真円度をみると図22のようになる。

砥石軸剛性の低下は砥石の真円度に影響を与えている誤であり、砥粒間隔⁹⁾が増大しあらさが二次的に悪くなる点は無視できないように思われる。

図23はタリサーフの記録の1例であるが、工作物内周の表面あらさは送り込み速度が非常に影響しており、特に研削内径が小さい場合にはサイクルタイムを多く取らなくてはならない。

3.7 送り込み速度が円筒度におよぼす影響

内面研削作業において研削面の円筒度を幾何学的に零にすることは困難なことである。主軸中心線とテーブル運動とを平行に近く設定した場合の送り込み速度と工作

図 22 目直し後の砥石の真円度

図 23 仕上げ面最大あらさ記録値

物の円筒度の関係は図 24, 25 のようである。

砥石軸剛性が低いとたわみが大きくなるが、たわんだ状態において研削が行なわれるため、砥石側の内径が大きくなるものと思われる。

円筒度の修正は通常主軸中心線とテーブル運動との平行度を狂わせたり、工作物に対し砥石の往復する前後距離を不均等に行なうことがあるが、後者の場合つづみ状となる場合があり、許容精度及び剛性と送り込み速度を考慮して設定する必要がある。

特に注意しなくてはならないことは自動範囲にて研削する場合、第1ゲージが入って後仕上げ研削に移り第2ゲージが入って研削が完了するが、第2ゲージと第1ゲ

ージの寸法差は直径で 20μ 程度であり荒研削で 20μ 以上発生した円筒度は仕上げ研削で取れない場合が生ずる。従つてサイクルタイムの設定は円筒度の許容精度より決定すべき性質のものである。

図 24 主軸台送り込み速度が円筒度におよぼす影響

図 25 剛性係数 (L^3/I) と円筒度との関係

4. スパークアウトの影響

内面研削作業で主軸台の送り込みを停止し砥石をテーブル運動に従つて工作物の軸方向に往復させた場合、これをスパークアウトといっているが、50秒程度の研削サイクルのタクトに対しスパークアウトに要する時間は生産性上無視できないし、またその効果について実験的な例をみない。

スパークアウトの影響をみるには現場にて採用している研削サイクルを用い、研削サイクルは(荒研削+第1ゲージ+目直し+仕上げ研削+第2ゲージ+スパークアウト)とした。すなわち自動範囲にて定寸に達した後スパークアウトを行なつた。スパークアウト時間は研削盤が往復回数で制御できるようになっている関係上1往復を1回として回数によつて求めた。

研削条件で表1と異なる点は表2の通りである。

表 2

工作物回転速度	350r. p. m.	荒仕上げテーブル速度	3.84m/min
工作物寸法	45φ×30×27φ	仕上げテーブル速度	3.20m/min
砥石寸法	24φ×20×10φ	荒仕上げ送り込み速度	0.4 m/min
研削代	0.25mm/径	仕上げ送り込み速度	0.05m/min
補正量	0.04mm/径	送り込み量荒仕上げ	0.23mm/径
目直しテーブル速度	1.16m/min	送り込み量仕上げ	0.02mm/径

4.1 スパークアウト回数が真円度・うねり・あらさにおよぼす影響

図 26 に示すものはスパークアウトの回数と諸精度を求めたものである。

図 26 スパークアウトが真円度および表面状態におよぼす影響

の減少につれて振れが増大する傾向にある。一方荷重が減少すれば砥石軸の弾性変形に基づく切り残しが少なくなる。よって研削抵抗が減少すれば砥石軸の弾性変形の減少と振れの増大とが同時に起こり、工作物の仕上げ精度に応じた最適条件が存在することになる。

特に注意しなくてはならないことは、砥石軸系にアンバランスなり、軸受精度上の欠陥が存在する場合には、砥石軸は無負荷に近くなるため振れ量が増大し、うねり、あらさがスパークアウト時間の増加につれて悪くなる現象が発生する。かかる場合はスパークアウトを行な

る。

スパークアウト回数0は仕上げ研削終了時の値であり、砥石が目直しされて仕上げ研削に移っているため砥石の荒れが少ないから、図14～18までの値より精度が当然ながら多少よくなっている。スパークアウトの回数が増加すれば砥石軸にかかる荷重は漸次減少し、図7に示したよう

にある程度以下の荷重になれば荷重

わぬ方がよい。

4.2 スパークアウトが工作物寸法精度に及ぼす影響

研削中砥石軸はたわんだ状態にあることは既に述べた通りであり、砥石軸の剛性により工作物に発生する円筒度も異なることを述べたが、スパークアウトによりそれらがいかに改善されるかについては図 27 A, B に示す

図 27 スパークアウトが円筒度および円径寸法におよぼす影響

通りである。

図 27-A において砥石軸剛性の低いもの程砥石軸の弾性変形に基づく切り残しが多いため円筒度を修正する効果はあるが、剛性の高いものには余り効果は認められない。

同じく図 27-B に工作物中央部の内径寸法の変化状態を示したが、スパークアウト研削中は砥石軸の弾性変形に基づく切り残しを研削するため寸法が増加し軸剛性の低いもの程その影響が大きい。

5. 結 言

高速回転する砥石軸軸心の動きと研削抵抗の関係および主軸台の送り込み速度と砥石軸剛性が工作精度に如何に影響するかを述べたが、筆者が行なつた実験範囲では、要約すると次のような結果が得られた。

1) 砥石軸端は無負荷運転中の振れと静的な振れとはほぼ一致して円運動を行なっているが、軸系の精度および剛性が低下すると一致しなかつた。

2) 研削抵抗が負荷されると初めは振れ量が少なくなり、負荷が増加するに伴って再び振れ量が増加するが、この傾向は軸系剛性と精度に支配される。

3) 研削抵抗が負荷されると砥石軸端の動きは長円の

運動に移り調和振動を行ない、この長円の長短軸の大きさは接線並びに法線の両研削抵抗に支配される。

4) 砥石軸は研削抵抗により弾性たわみを生じるが軸端はたわんだ状態で振動し、その振幅は換軸の剛性が低下すると増大する。

5) 精度の良好な軸のたわみと振れは無関係で、静的なたわみが増加しても静的な振れは増加しない。

6) 内周面のうねりの最大値およびあらかの最大値は、砥石軸の剛性が低下すると大となり、また送り込み速度が大となるとそれにつれて大きくなる。

7) 剛性が低いと工作物1回転中に生ずる研削抵抗の変化は大きくなる。

8) 内径真円度は研削抵抗が大きくなれば悪くなり、また砥石軸剛性が低下すると悪化してくる。

9) 内面の円筒度は主軸送り込み速度が大となれば悪化して来る、また砥石軸の剛性が低下すると同様に悪くなつて来る。

10) サイクルタイムの設定は荒仕上げ研削後の工作精度が仕上げ研削にまで影響を与えない限界に定めるべきである。

11) スパークアウトに関してはその回数の増加に伴つて工作精度は改善されるが、内径寸法が拡大される。

(1961, 2月21日 受付)

文 献

- 1) 小野, 長岡: ころがり軸受の精度がその特性に及ぼす影響, 機械の研究, 17, 6, p. 600.
- 2) P. Landberg: Experiment on Grinding, Microtecnic 11, 1, 1957, p. 18~26.
- 3) 樟本浄恵: 内面研削加工技術と研削盤の傾向機械の研究, 10, 9, 1958, p. 1102.
- 4) 佐藤健児: 精密工学講座, II, 研削加工 (上), 日刊工業新聞, 昭33, p. 21.
- 5) 小野浩二: 研削仕上げの研究 (仕上げ面のあらかさについて) (機械学会論文集, 18, 74(昭27), p. 21.