高切込み円筒トラバース研削に関する研究 (第3報)*

—研削焼け発生形態とその一防止法—

久留須 誠** 安井 平司*** 中園 汎†

Studies on Cylindrical Traverse Grinding in High Depth of Cut (3rd Report)
—The Generated Process and a Preventive Measure of Grinding Burn—

Makoto KURUSU, Heiji YASUI and Hiroshi NAKAZONO

This paper deals with the generated process and a preventive measure of the burning in the cylindrical traverse grinding of the high depth of cut. The experiment was carried out to examine the surface layer, the hardness and the surface configuration at the burning position of the workpiece. And also, the change of wheel configuration and the loading in the grinding process were investigated. The main conclusions obtained are as follows: (1) The workpiece burn occurs darkly at the starting position of traverse grinding, but disappears as the grinding proceeds. The reason why burning occurs is considered that spark-out grinding can not be done due to the shrinkage of workpiece diameter which is expanded by the generated grinding heat. (2) The workpiece burn exerts a bad influence on the dimensional accuracy and the machining properties. However, careful attention should be paid to the thermal damage even when no visual burning is observed. (3) The loading closely relates to the occurrence of workpiece burn. (4) The wheel dressed to the stepped configuration with the same width as the traverse feed has a good grinding performance in high depth of cut grinding and prevents the workpiece burn.

Key words: Cylindrical traverse grinding, high depth of cut, workpiece burn, surface layer, thermal deformation, dimensional accuracy, loading, wear, grinding performance

1. はじめに

前報¹⁾²⁾までに高切込み円筒トラバース研削の各研削特性値には臨界工作物長さが重要な影響を及ぼすことを明らかにした。そして、その臨界工作物長さを長くするためには、砥石の損耗速度を遅くするような研削条件を選定する必要があること、すなわち、設定削除率を小さくしたり、結合度を高くすると良いことなどを示した。言い換えれば、砥粒の破壊や脱落による損耗を少なくする方向で砥石を選定すればよいことがわかった。しかし、そのために設定削除率を小さくしたり、結合度をあげると、工作物の切込み始め端近く

で研削焼けが発生し、この点からの問題点が考えられた。ところで、研削焼け発生の研削条件や加工変質層の生成条件に関してはこれまで2,3の報告³⁾⁴⁾が見られるが、そのほとんどはプランジ研削方式で行われ、トラバース研削の場合についてはあまり検討されていない。円筒トラバース研削では、砥石切込み端から砥石軸方向に、ある幅の砥石部分だけで主たる研削を行い、そこから砥石切込み終了端までの砥石部分ではスパークアウト研削を行うので、プランジカット研削での焼け発生形態とは異なることが考えられる。

このようなことから、本報では高切込み円筒トラバース研削における研削焼け発生形態とそれに伴う工作物表面性状の変化などについて調べ検討した。そして、焼け発生防止法についても言及した。

2. 実験条件および方法

本実験で使用した研削盤は、豊田工機製 RSS 15-50 形(砥石軸駆動用電動機 3.7 kW)である。表1に本実験に用いた主な研削条件を示す。また、図1に、以下

* 原稿受付 昭和62年3月25日、昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和58年10月15日)および昭和59年度精機学会九州支部佐賀地方講演会(昭和59年11月18日)にて発表

** 正会員 佐世保工業高等専門学校(佐世保市沖新町1-1)

*** 正会員 熊本大学工学部(熊本市黒髪2-39-1)

† 正会員 西日本工業大学(福岡県京都郡刈田町新津1633)

Table 1 Grinding conditions

Grinding wheel	Types; WA 46 K 8 V Dimensions; Original size 405×76×152.4 (Real width used $B_g=30$ mm)
Workpiece	Types; SCM 435 (HV=425) Dimensions; Diameter $d=72$ mm Length $L=55$ mm
Wheel speed	$V=37$ m/s (2 200 m/min)
Dressing	Feed; 0.2 mm/rev Depth of cut; 25 μ m×4
Workpiece speed	$v=0.24$ m/s (14.5 m/min) $n=1.07$ rps (64 rpm)
Depth of cut	$t_t=100$ μ m
Table speed	$f=0.0027$ m/s (0.16 m/min)
Feed rate	$s=f/n=2.5$ mm
Coolant	Types; Emulsion type Flux; 1 L/s

Fig. 1 Model of cylindrical traverse grinding in high depth of cut

の内容の理解を容易にするために後述の結果も含めて考えた高切込み円筒トラバース研削モデルを表1中の記号に照らして示す。なお、図中の研削長さ $l^{(2)}$ は $l=\pi \cdot d \cdot (L/(f/n))$ で表される。

3. 実験結果および考察

3.1 研削焼けの発生形態とその検討

図2にWA 46 K 砥石を用い、砥石切込み $t_t=100$ μ m、工作物周速度 $v=14.5$ m/min、工作物1回転当たりのテーブル送り量 $s=2.5$ mmで研削した場合の研削焼け発生例を示す。図よりわかるように、研削焼

Fig. 2 A typical example of workpiece burn in the cylindrical traverse grinding of high depth of cut

Fig. 3 Changes of affected metallurgical layer (White layer) with the position of the workpiece

けは砥石切込み始め端側のW.S.端から幅 $s(=2.5$ mm)離れるごとにその色を薄め、ある長さ以上離れると焼けが観察されなくなってしまう。

また、各工作物区間 s ごとでの焼けの程度をみると、焼けの濃さは、その幅全体で一様になるのではなく、その両端で薄く、あるいは焼けが観察されず、中央で濃くなっている。

図3に図2での切込み開始点付近から軸方向に1s, 2s, 3sの距離の位置に対応する工作物表層部の組織を調べた結果を示す。図より、各工作物区間の場合とも母材とは異なる白色の変質層が観察されるのがわかる。また、変質層の深さは焼けの程度と比例するような傾向を示し、焼けが最も深く観察される1sの中央部で最も深く40 μ m程度にもなり、2s, 3s区間と焼

Fig. 4 Variation of the surface hardness of workpiece with the position from the W. S. side

Fig. 5 Variation of hardness with the depth from the workpiece surface

けが薄くなるとともに順次浅くなっていく。図4は図2での軸方向位置と工作物表面硬度との関係を示したものである。図より、焼けが観察される工作物区間では母材の硬度よりも低下し、その低下は図2や図3の結果と対照すればわかるように、焼けが強くなるに従って大きくなる傾向を示す。

図5は図3の各工作物区間内の中央部での工作物表面からの深さ方向の硬度を調べたものである。図より、1s部分での硬度低下層は80 μm程度に及び相当大きな熱発生があったことをうかがわせる。これらの図3から図5までの結果を考えると、W. S. 端側で最も大きな発生熱があり、焼け発生の程度が薄くなるとともに表面の加工変質層も浅くなることがわかる。

図6は図2の場合での研削前後の軸方向の工作物表面形状を測定し、比較したものである。(a)図は研削前で、(b)図は砥石が工作物と接触し始めてから、工

Fig. 6 Surface configuration on the workpiece with burning surface

作物が約半回転した位置のもの、(c)図は砥石が工作物と接触し始めた位置のものである。なお、(b)、(c)両図には工作物軸方向位置((b)図の場合、1/2s, 3/2s, 5/2s, …, (c)図の場合、1s, 2s, 3s, …)と焼けの程度との関係を図2の結果を対照して模式的に示す。

図より、焼けが観察される部分は観察されない部分よりも、除去深さがより大きくなる傾向を示すのがわかる。すなわち、除去深さは焼けが最も濃い工作物端で最も大きくなり、工作物中央方向に向かって減少し、焼けが観察されなくなる付近の位置からはほぼ一定の除去深さとなる傾向を示す。最も濃い焼けが観察されるW. S. 端側と焼けが観察されなくなる部分との除去深さの差は、(b)図ではW. S. 端から1/2sまでの工作物区間での除去深さが次第に大きくなるため3 μm強にもなり、(c)図では1 μm強となる。また、仕上面粗さを見ると、この場合も、焼けが強くなると粗になる傾向を示し、W. S. 端が最も粗になる。そして、工作物中央方向になるに従って良くなり、焼けが観察されなくなる付近からは、図6(a)に示すように研削前のスパークアウトされた工作物表面粗さに近い一定の粗さになる傾向を示す。これらの図6の結果からすれば、焼けが発生するW. S. 端側では十分にスパークアウトされていないが、焼けが見られなくなる工作物中央側からW. F. 側では十分にスパークアウトされているこ

Fig. 7 Appearance of workpiece surface ground by the grinding wheel with the same width as the traverse feed rate

とが考えられる。

3.2 研削焼け発生過程の検討

図7は工作物1回転当たりの送り量 s と同じだけの砥石幅、すなわち、後続のスパークアウト砥石区間がない砥石幅にして研削した場合の工作物表面の観察結果を示す。図より、研削焼けはW. S. 端から軸方向にある長さまでしか発生しない。このようになるのは前報でも同様の現象を説明したように、研削が進行することにより、砥石が減耗してゆき、実砥石切込みが減少するためである。したがって、他の研削条件を同一とすれば研削焼けは実砥石切込みと関係し、ある実砥石切込み以上では、単位面積当たりの発生熱 q が過度になるため発生する⁴⁾と考えられる。次に、発生した工作物表面の焼けが、図2のようにスパークアウト過程で除去されない理由を検討してみる。この理由としては、まず、砥石の損耗や工作物の逃げなどが考えられる。しかし、前報でも示したように砥石の損耗はW. S. 端側よりもW. F. 端側に近づいた方が大きくなっているはずなので、その影響とは考え難い。また、工作物の逃げに関しても心押し側だけスパークアウトしにくいとは考え難い。そこで、別の要因を考える必要があるが、その一つとして図8に示すような研削時の熱膨張の影響が考えられる。すなわち、W. S. 端側付近では、砥石の損耗がそれほど小さくなく、I 端側の1S 砥石区間の実砥石切込みが大きくなるため、 q が大きくなる。この影響で工作物は研削焼けするとともに大きく熱膨張するため、中央凸形の過研削状態⁵⁾（図8(b)）となる。これに対して、工作物は1回転し、次の砥石区間で研削される前までに冷却され⁶⁾、収縮してしまう（図8(c)）。このため、後続の砥石区間への切残し量としては存在

Fig. 8 A model of the generated process of workpiece burn

しなくなる中央凹形になる。そして、後続の砥石区間では十分なスパークアウトを行うことができない粗な工作物表面粗さのままで残される（図8(d)）。このような熱膨張による過研削が生じるという考え方はS 45 Cを平面研削した場合の研削点での工作物の熱膨張が、本実験と同程度の接線研削抵抗で数 μm になるという報告⁷⁾や、板を平面プランジカット研削した場合に工作物の長手方向、幅方向とも中央が相当に凹むこと⁸⁾を考えれば、妥当なものと思われる。なお、このようなW. S. 端側付近での研削に対して、砥石のI 端が工作物中央方向に位置するようになるにつれて、砥石の損耗が増加するので、1S 砥石区間での実砥石切込みは減少してゆき、 q が小さくなると、熱膨張による過研削量も少なくなるので、研削焼けの発生もなくなる。また、後続の砥石区間へは切残しとして存在するようになるため、後続の砥石区間では小さな実砥石切込みのスパークアウト研削が行われ、仕上面粗さを向上させることができるようになる。

3.3 研削焼け発生に及ぼす砥石の損耗の影響

上述の結果からすると焼け発生の有無には砥石の損耗が大きく関係していると考えられる。焼けを考察し、防止するうえで重要な事項であるので検討してみた。

図9に図2と同じ条件で研削した場合の工作物位置と研削抵抗との関係を示す。図より、接線研削抵抗は

Fig. 9 Variation of grinding forces in grinding process

Fig. 10 Variation of wheel configuration in grinding process

W. S. 端から 1s まで急激に上昇したのち、7s 程度まで減少し、ある値になったのち W. F. 端側まではほぼ一定となる傾向を示す。前述のように研削焼けは W. S. 端側から 5s 程度まで観察されており、それまでの比較的高い接線研削抵抗が焼けに影響していることが考えられる。図 10 はこの場合の砥石損耗形状の変化である。図より、研削長 $l=0.5$ m (砥石の I 端が工作物の W. S. 端から 2s 区間終了位置まで移動した状態) では研削前と比較すると 1S 砥石区間ではわずかに $1\mu\text{m}$ 弱の半径減耗量で、 $l=1$ m (同じく、4s 区間終了位置に相当) になると 1S 砥石区間の半径減は $2\mu\text{m}$ 強になり、他の砥石区間と段差を形成している。さらに、 $l=3$ m では半径減は約 $10\mu\text{m}$ となり砥石の損耗速度が増加するとともに、後続の砥石区間への切残しが大きくなり始

Fig. 11 Variation in loading with grinding length

めている。このような 1S 砥石区間の実砥石切込みの変化過程は焼けの発生変化過程と同じ傾向を示している。

ところで、円筒トラバース研削方式では図 1 で示したように 1S 砥石区間での半径減がなく、かつ、砥粒切れ刃密度に変化がなければ切込み開始点から 1 回転以降の研削量はほぼ一定となるので研削抵抗も一定になるものと考えられる。しかし、図 9 で示したように研削抵抗がほぼ一定となる前までの工作物 5s 区間程度までの異常な増加には、別報でも述べたように目づまりの影響が考えられたので、調べてみたのが図 11 である。図より、 $l=1$ m 程度までは目づまりが 1S 砥石区間に顕著であり、 $l=3$ m になると 1S 砥石区間は少なくなり、2S 砥石区間以降にも見られるのがわかる。このようなことからすると、焼け発生には高切込み研削にしたことによる基本的な項、すなわち実砥石切込みの増加に加えて、実質的な切れ刃密度の増加である目づまりの項による発生熱の増加が影響していることが考えられる。

3.4 研削焼け発生の一防止法

以上述べてきた結果から考えると、高切込み円筒トラバース研削における焼けは、砥石の I 端側での実砥石切込みが大きくなるとともに、目づまりの発生が影

Fig. 12 Variation of the wheel dressed to the stepped configuration in grinding process

Fig. 13 Surface roughness of the workpiece ground with the stepped configuration

響していることが考えられた。このようなことを考えると高切込み研削で焼けを防止するためには、I 端側での実砥石切込みを少なくする方法、すなわち、図 12 に示すように I 端側から 1S 砥石区間に最初の目直し工程で段差（ここでは、図 3 の最大加工変質層深さに相当）をつける方法が考えられる。図 13 は図 12 の形にした砥石で研削した場合の工作物の軸方向の工作物表面形状を測定した結果である。図の結果は図 6 の結果とは異なり、W. S. 端側付近でも非常に良い仕上面粗さを示し、工作物中央部付近とほとんど差がないのがわかる。また、研削焼けの発生も観察されず、加工変質層も見られなかった。この結果より、上述の方法は高切込み円筒トラバース研削での焼け防止には有益であることがわかる。

4. おわりに

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 研削焼けの発生は、砥石切込み始め端側の工作物端で最も濃く、そこから主軸端側に向かって色を薄め、ある長さ以上になると焼けが観察されなくなる。
- (2) 研削焼けの発生は見かけだけでなく、工作物の寸法精度や機械的性質の劣化をまねき好ましくないことがわかった。さらに、肉眼で焼けが確認されなくても機械的性質が劣化している可能性もあるので、この点に留意する必要がある。
- (3) 焼けが発生するのは、焼け発生時に膨張し過研削された工作物表面が後続の砥石区間の研削時には冷却収縮し、スパークアウトが作用し得なくなるためと考えられる。
- (4) これらの焼け発生状況には砥石作業面の状態、すなわち目づまりの発生や砥石の損耗挙動と密接に関係していることがわかった。
- (5) 研削初期に発生する焼けの一防止法として、砥石切込み端側の 1S 砥石区間に工作物 1 回転当たりのテーブル送り量相当部分に段差を付けて研削を行うと、高切込み研削でも焼けの発生しない良好で安定した研削が行われることがわかった。

なお、本研究に対して御助言を頂きました佐世保工業高等専門学校宮原一郎教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 久留須 誠, 安井平司, 宮原一郎: 高切込み円筒トラバース研削に関する研究 (第 1 報) —— 研削過程における研削特性の変化, 精密機械, 49, 9 (1983) 1167.
- 2) 久留須 誠, 安井平司, 宮原一郎: 高切込み円筒トラバース研削に関する研究 (第 2 報) —— 砥石の損耗挙動, 精密機械, 50, 12 (1984) 1938.
- 3) 例えば, 小野浩二: 研削仕上, 横書店 (1962) 136.
- 4) 例えば, 河村末久, 西口重雄, 岩尾幸博: 研削焼けの基礎的研究 (第 1 報) —— 皮膜の成長過程と膜厚の計算, 精密機械, 43, 6 (1977) 702.
- 5) 中野嘉邦, 太田勝彦: 平面研削中の工作物の熱変形と研削後の形状誤差, 精密機械, 39, 2 (1973) 225.
- 6) N. R. DesRuisseaux and R. D. Zerkle: Temperature in Semi-Infinite and Cylindrical Bodies Subjected to Moving Heat Sources and Surface Cooling, Trans. ASME, Ser. C, 92, 3, (1970) 456.
- 7) 奥山繁樹, 河村末久: 研削における干渉領域内の温度分布と局部的熱変形, 精密機械, 45, 5 (1979) 536.