公害防止のための研削油剤を用いない CBN 冷風研削技術の研究*

本 間 宏 之** 横 川 和 彦*** 横 川 宗 彦†

Study of Environment Conscious CBN Cooling Air Grinding Technology

Hiroyuki HONMA, Kazuhiko YOKOGAWA and Munehiko YOKOGAWA

In cutting and grinding operations, cutting and grinding fluids are generally used for cooling and lubricating workpieces at the point of cutting. These fluids often contain sulfur, phosphorus, chlorine or other such extreme-pressure additive to improve the lubricating performance. These chemicals present health hazards; they are introduced from the running machine into the workplace atmosphere in the form of liquid splash. Furthermore, treatment of the waste liquid costs high, and the treatment itself is a source of air pollution due to the fact that the process involves extremely high temperatures, and particularly so when the waste liquid contains chlorine. This paper describes the results of a study of a new grinding method (Cooling Air Grinding System). It eliminates the need for hazardous conventional grinding fluids, yet provides a better grinding performance than the conventional technology. The method consists of a CBN wheel, well known for its low heat emission during grinding, and a supply of cooling air to the grinding point. The CBN wheel has been treated previously with a solid lubricant or an extremely small amount of vegetable oil was supplied at a rate of 10 ml/h in addition to the cooling air supply. The test results indicate that the combination of CBN wheel and air supply maintains a clean workplace and suppress heat emission into the atmosphere.

Key words: grinding, Cubic Boron Nitride, grinding fluid, grinding performance, residual stress, environment consciousness

1. 結 論

一般に切削および研削作業においては、切削油剤および研削油剤が使用されているが、その使用は加工時における冷却と潤滑がその目的である。とくにその潤滑作用を向上させるために、油剤には硫黄(S)、りん(P)、塩素(Cl)などの極圧添加剤が含まれており、作業中にこれらの添加剤を含んだミストが飛び散り、作業環境を悪化させている。使用した油剤の廃油処理にあたって膨大な費用がかかるのみならず、とくに塩素を含んだ研削油剤の廃棄は炉をいためるほどの高温処理が必要であり、環境を悪化させる要因になっている。

これに対し、CBN ホイールは研削時の発熱が小さい¹⁾ことを利用し、固体潤滑処理を施した CBN ホイールを用いて冷風を研削点に供給しながら研削する方法、あるいは 10 ml/h という極微量の割合で、微粒子状にした人体に無害の植物油 (Accu-Lube) を冷風とともに CBN ホイール作業面に供給し、潤滑作用をさせて研削する方法を開発した。研削油剤を使用しない、人にやさしい、きれいな雰囲気での研削する本加工法は、研削油剤を使用した場合以上の高い研削性能を得られることが確認できた。

2. 実 験 方 法

2.1 冷風研削加工システム

研削油剤の代わりに冷風を研削点に供給して研削を行い、研削点の下方から切りくずを吸引回収する冷風研削加工システムを考案した。

図 1 に示すように、コンプレッサで生成された圧縮空気をミストセパレータで微粒子を除き、エアドライヤで露点を十分に下げる。それを液体窒素を用いた熱交換器（後で述べるように現在は冷凍機を用いている）で冷却して、研削点に供給し研削を行う。研削点の下方からフィルタを介して真空ポンプで切りくずおよび冷気を吸引する。切りくずはフィルタで収集・回収できる。この実験を行った試作システムでは、冷凍機を資金的に準備できなかったことから液体窒素熱交換器を用いたが、現在は冷凍機を用いて実験を行っている。

2.2 冷風の供給方法

冷風を研削点に供給する方法として、研削点上方のみから供給する方法（図 2 (a)）、これと同じ流量を 3 分割して、上方向ならびに左右方向の計 3 方向から供給する方法（図 2 (b)）について検討した。

2.3 研削中の工作物表面温度の測定方法

研削中の工作物表面温度は、図 3 に示すように研削点の

Fig. 1 Cooling air CBN grinding system

* 原稿受付 平成 8 年 3 月 21 日

** 学生会員 明治大学理工学部（現、旭ダイヤモンド工業(株)；市原市田尾 287）

*** 名誉会員 明治大学理工学部（川崎市多摩区東三田 1-1）

† 正 会 員 工学院大学工学部（八王子市中野町 2661-1）

(a) Supply from the above (b) Supply from three directions

Fig. 2 Supply method of cooling air

Fig. 3 In-process surface temperature measurement during cylindrical grinding operation

Table 1 Grinding and dressing condition

Grinding condition	
Wheel : CBN(Type D)80/100 W ₁ 200 VN 4	Wheel speed : 1 800 m/min
Workpiece : SCM 435 H (HRC 50)	Work speed : 23.5 m/min
Stock removal rate : 90 mm ² /min	Spark out : 20 rev
Condition of cooling air : -35°C, 350 Nl/min, 0.25 MPa supply from the above, lubricant ; Accu-Lube (10 ml/h)	
Dressing condition	
Dresser : Prismatic diamond dresser	Lead : 0.1 mm/rev
Dresser speed : 25.4 m/min	Depth of cut : $\phi 5 \mu\text{m} \times 2$

180° 反対側で、表面温度測定器によって測定した。

2.4 研削加工実験条件

表 1 に、本研削加工実験の条件を示す。本文、図中にとくに断らない限り、この条件を使用した。

3. 実験結果

3.1 供風圧力、供風流量が研削特性に及ぼす影響

CBN(Type D)120/140 K 175 MGHPS 潤滑処理ホイールを用い、供風圧力、流量を変化させて、冷風(約 -120°C)のみを 3 方向から供給して研削を行い、研削特性を求めた。

表 2 に示すように、供風圧力 0.21 MPa、供風流量 370 Nl/min で冷風を供給して研削した場合、接線研削抵抗は 2.47 N/mm、研削中の工作物表面の温度上昇は 7°C に対し、供風圧力 0.39 MPa、供風流量 500 Nl/min では、2.36 N/mm、5°C であった。供風圧力、供風流量が大きくなると、接線研削抵抗、研削中の工作物表面の温度上昇は小さくなっている。すなわち、空気でも研削点を十分冷却すれば、研削温度上昇が小さくなるのがわかる。

Table 2 Temperature elevation of ground surface under cooling air

Temp. °C	Cooling air		Tangential grinding force N/mm	Ground surface roughness μmRz	Temp. elevation of ground surface °C
	Pressure MPa	Quantity Nl/min			
-121.3	0.21	370	2.47	2.1	7
-120.2	0.39	500	2.36	2.1	5

Wheel: CBN(Type D)120/140 K 175 MGHPS, Wheel speed: 1 800 m/min, Workpiece: SCM 435 H (HRC 50), Work speed: 18 m/min, Stock removal rate: 90 mm²/min, Supply method of cooling air: Three directions, Lubricant: None

3.2 冷風研削におけるホイールの固体潤滑処理の効果

研削点に潤滑を与える目的でメタルボンドに固体潤滑剤を含有させた CBN(Type D)120/140 K 175 MGHPS 潤滑処理 CBN ホイールと、潤滑処理を施していない通常のビトリファイド CBN ホイール CBN(Type D)80/100 W₁ 200 VN 4 とを用い、冷風温度、供風流量を同一にして 3 方向から冷風のみを供給して研削した場合の研削特性を比較し、ホイールの潤滑処理の効果を調べた。両者のホイールは、粒径が大きいものはコンセントレーションを高くし、粒径が小さいものはコンセントレーションを低くして、固体潤滑処理をしていないホイールのそのものの性能をできるだけ等しくなるように考慮した。

表 3 に示すように、潤滑処理を施していない CBN ホイールの接線研削抵抗は 2.88 N/mm、工作物研削表面の温度上昇は 15°C に対し、固体潤滑処理 CBN ホイールでは、接線研削抵抗は 2.45 N/mm、工作物表面上昇温度は 8°C と低い。3.1 節、3.2 節から、冷却作用と潤滑作用の両方が研削性能に影響することがわかる。

3.3 冷風温度が研削中の工作物表面温度上昇に及ぼす影響

人体に無害の植物性油 (Accu-Lube) を微粒子状にして冷風中に極微量 (10 ml/h) 混入させ、潤滑処理を施していない CBN(Type D) 80/100 W₁ 200 VN 4 ホイールの作業面に供給し、極微量の植物性油による潤滑効果を与えた研削を行った。

単位時間当たり研削代断面積を 360 mm²/min とし、工作物 SCM 435 H(HRC 50) を、供給圧 0.25 MPa、供給量 430 Nl/min と一定のもとで、冷風温度を -34.1, -52.0, -71.0, -103.0°C と変化させて、冷風研削を行ったときの研削中の工作物表面の温度上昇を測定した。表 4 に示すように、冷風温度が低くなるに従い研削中の工作物表面の温度上昇は小さくなるのがわかる。

3.4 冷風と研削油剤を用いた場合の工作物表面温度

潤滑処理を施していない CBN(Type D)80/100 W₁ 200 VN 4 ホイールを用いて、高能率研削である単位時間当たり研削代断

Table 3 Comparison of grinding performance on a solid lubricating treated wheel with an untreated wheel

Wheel	Cooling air			Tangential grinding force N/mm	Ground surface roughness μmRz	Temp. elevation of ground surface °C
	Temp. °C	Pressure MPa	Quantity Nl/min			
CBN(Type D) 80/100 W ₁ 200 VN 4 (untreated wheel)	-80.2	0.28	330	2.88	2.2	15
CBN(Type D) 120/140 K 175 MGHPS (treated wheel)	-79.9	0.28	320	2.45	2.1	8

Workpiece: SCM 435 H (HRC 50), Work speed: 18 m/min, Wheel speed: 1 800 m/min, Stock removal rate: 90 mm²/min, Supply method of cooling air: Three directions, Lubricant: None

Table 4 Temperature elevation of ground surface under cooling air

Temperature of cooling air °C	Temperature elevation of ground surface °C
-34.1	10.8
-52.0	6.0
-71.0	5.0
-103.0	3.8

Stock removal rate: 360 mm²/min
Condition of cooling air: -103 - -34°C,
430 Nl/min

Fig. 4 Temperature of ground surface (Stock removal rate : 900 mm²/min)

面積 900 mm²/minで、工作物 SCM 435 H (HRC50) を、植物性油 (Accu-Lube) を 10 ml/h の割合で供給した冷風 (-91°C) 研削とエマルジョンタイプ研削油剤 (MGF-3) を用いて研削した場合の研削中における工作物の表面温度を図 4 に示す。工作物表面の温度上昇は、研削油剤を使用した研削では 2°C に対し、冷風研削では 5.5°C と少し高く、温度変化の少ない研削油剤の方がよい。

しかし、研削油剤を用いて研削する場合は、研削熱で研削油剤の温度が研削するにつれて上昇し、それに伴い研削盤および工作物の熱膨張状態も変化する。このため、1 日の研削中に寸法補正を時々行わなければならない。一方、冷風研削では、常に一定温度の冷風を研削点に供給して研削するので、研削された工作物表面温度は 1 日中研削しても常に一定である。以上のように、冷風研削では工作物の寸法管理がしやすいといえる。

3.5 冷風および研削油剤を用いて研削した工作物の残留応力分布

単位時間当たり研削代断面積 90 mm²/min において、潤滑処理を施していないCBN (Type I) 80/100 W₁ 200 VN 4 ホイールを用いて、植物性油を噴霧しない冷風のみを、上方向からのみと 3 方向から供給して研削したとき、また著者らの今までの研削実験で研削性能が最も高く、圧縮残留応力も最も高く現れたエマルジョンタイプ研削油剤 MGF-3²⁾ を用いて研削したときの工作物 SCM 435 H (HRC 50) に創成される残留応力を測定した。

図 5 に示すように、工作物表面における圧縮残留応力は研削油剤を用いた研削の場合がわずかに大きい。しかし、冷風を 3 方向から、また上方向のみから供給して研削した方が、表面から内部にわたっての圧縮残留応力の作用深さが研削油剤を用いた研削の場合に対して 2 倍、3 倍と深くなり、疲れ強さの大きい工作物となる。これは研削点における冷却が内部の圧縮残留応力の創成に影響を与えるものと考えられる。

ここで 3 方向から研削点へ供給する供風量は、上方向の供風量を 1/3 に分割して供風されているため、上方向供給より圧縮残留応力領域が小さくなったと考えられる。これらの実験か

Fig. 5 Residual stress distribution of ground surface under cooling air and grinding fluid

Fig. 6 Residual stress distribution of ground surface under cooling air

ら、以後上方向のみから冷風を供給することとした。

3.6 単位時間当たり研削代断面積に対する工作物残留応力

潤滑処理を施していないCBN (Type I) 80/100 W₁ 200 VN 4 ホイール表面に、植物性油 (Accu-Lube) を 10 ml/h の割合で微粒子状で供給し、潤滑作用をさせ、研削点に上方向より冷風を供給し、単位時間当たり研削代断面積を 360, 540, 900 mm²/min と変化させて、SCM 435 H (HRC 50) を研削した場合、工作物に創成される残留応力を図 6 に示す。すべての単位時間当たり研削代断面積において、圧縮残留応力が創成され、工作物表面の圧縮残留応力ならびに表面から深さ方向の圧縮残留応力も、図 7 に示す研削油剤を用いた場合よりも大きく、冷風研削は、著者の過去の実験で水溶性研削油剤の中で最高性能を示したエマルジョンタイプ MGF-3 を用いた研削より優れていることがわかる。

3.7 冷風温度が工作物の残留応力分布に及ぼす影響

冷風温度が工作物の残留応力分布に及ぼす影響を調べるため、単位時間当たり研削代断面積 90 mm²/min のもとに、冷風温度を -32.6, -52.6, -100.2°C と変化させて研削したときに、工作物研削表面下に創成される残留応力分布を求めた。このときホイールには潤滑処理を施していないCBN (Type I) 80/100 W₁ 200 VN 4 を用いて、微粒子状にした植物性油 (Accu-Lube) を 10 ml/h の割合で、研削点の上方向から冷風とともに供給して研削を行った。

図 8 に示すように、実験した冷風温度範囲では、研削表面の圧縮残留応力分布は冷風温度の影響はほとんどない。よって、工作物に創成される残留応力分布だけを考えると、冷風温度は -30°C 程度あれば十分と考えられる。

Fig. 7 Residual stress distribution of ground surface under grinding fluid

Fig. 8 Effect of temperature of cooling air on residual stress distribution of ground surface

3.8 冷風研削における工作物表面から内部方向の硬さ分布
植物性油 (Accu-Lube) 10 ml/h の供給で冷風を上方向から研削点に供給し、潤滑処理を施していないCBN (Type I) 80/100 W₁ 200 VN 4 ホイールで、単位時間当たり研削代断面積 900 mm²/min で研削した工作物 SCM 435 H (HRC 50) の研削表面から深さ方向のマイクロビッカース硬さを図 9 に示す。研削熱によって軟化することなく表面から内部にわたって一様な硬さを示しており、冷風研削した工作物は、研削油剤を用いた場合と同様に耐摩耗性も大きい。

3.9 冷風研削および研削油剤を用いた研削による工作物の真円度

単位時間当たり研削代断面積 900 mm²/min にて、潤滑処理を施していないCBN (Type I) 80/100 W₁ 200 VN 4 ホイールで、植物性油 (Accu-Lube) 10 ml/h 供給の冷風を用いて研削した工作物の真円度を図 10 (a) に、研削油剤を用いて研削した工作物の真円度を図 10 (b) に示す。それぞれ 1.54 μm, 1.71 μm で冷風研削の方が多少よい。しかし、工作物の真円度はセンタ穴の形状に影響されるのを考えると、冷風研削も研削油剤を使用した研削も真円度にはあまり差がないと思われる。

3.10 冷風および研削油剤を用いた研削による切りくず

単位時間当たり研削代断面積 900 mm²/min で植物性油 (Accu-Lube) を使用せず、単なる冷風のみ (冷却効果のみを調べるため) を上方向から供給して研削した切りくずと研削油剤 MGF-3 を用いて研削した切りくずの SEM 写真を図 11 に示す。いずれの場合も流れ形切りくずであり、潤滑を与えていない冷風だけでも切れ味よく研削されていることがわかる。と

Fig. 9 Hardness of a workpiece ground by cooling air

Fig. 10 Roundness of ground workpiece under cooling air and grinding fluid (Stock removal rate : 900 mm²/min)

Fig. 11 Grinding chips

くに、熔融型切りくずがないことから、研削温度が低く研削が行われていることがわかる。

3.11 冷風および研削油剤供給によるホイール回転動力損失

CBN 研削はその研削性能を向上させるため、ホイール周速度を高め将来は 18 000 m/min までの超高速度で回転させようと計画されている。ここではそれに比べては低い、ホイール周速度を 1 800, 2 700, 3 600 m/min と変化させ、25 l/min の研削油剤を外径 305 mm, 幅 15 mm の CBN (Type I) 80/100

Wheel : CBN(Typel)80/100W₁200VN4 (φ305 x B15 x H127)
Grinding fluid : Emulsion type (1:20), Flow rate : 25 l/min
Condition of cooling air : -35°C, 350 NI/min
Lubricant : Accu-Lube (10ml/h)

Fig. 12 Power consumption of spindle motor

W₁ 200 VN 4 ホイールに供給した場合の砥石軸の負荷動力の変化を図 12 に示す。

研削油剤の供給による動力増加は、ホイール周速度 1 800 m/min では 24 W の増加であったが、2 700 m/min では 206 W、3 600 m/min では 450 W であった。18 000 m/min で使用すると、研削以外の無負荷動力だけでも莫大なものとなり、研削抵抗が低くなる超高速研削のメリットがなくなる。これに対して 350 Nl/min の冷風を供給した場合はホイール周速度に関係なく、動力の増加は認められない。したがって高速研削における無負荷時の動力増加の問題は、冷風研削によって防げると考えられる。

3. 12 連続研削時の研削性能

潤滑処理を施していない CBN (Type I) 80/100 W₁ 200 VN 4 ホイールを用いて、植物性油 (Accu-Lube) を 10 ml/h の割合で微粒子状で供給し、潤滑作用をさせ、研削点に上方より冷

Grinding condition

Wheel : CBN(Typel)80/100W₁200VN4 Wheel speed : 1800 m/min
Workpiece : SCM435H (HRC50) Work speed : 23.5 m/min
Stock removal rate : 90 mm²/min Spark out : 20 rev
Condition of cooling air : -30 ~ -35 °C, 350 NI/min, 0.25 MPa
supply from the above,
lubricant ; Accu-Lube (10 ml/h)

Dressing condition

Dresser : Prismatic diamond dresser Lead : 0.1 mm/rev
Dresser speed : 25.4 m/min Depth of cut : φ 5 μm x 2

Fig. 13 Grinding performance of vitrified bonded CBN wheel under cooling air

風 (-30~-35°C) を供給し、単位時間当たり研削代断面積 90 mm²/min で研削した結果を図 13 に示す。ホイール単位円周長さ当たり研削代断面積 152 mm²/mm まで研削しても接線研削抵抗は 1.5 N/mm、研削面粗さ 3 μmRz であり、研削比 71 800 で研削油剤を使用した研削性能³⁾より 2 倍優れている。

3. 13 冷風研削による環境対策

研削油剤を用いた従来の研削では Cl, S, P などの極圧添加剤を含む噴霧が工作機械の周囲に立ちこめ、環境問題となる。また実際の研削加工している所は見えず、単に研削しているだけで、研削状況は把握できない。それに対し、冷風研削は研削の基礎である研削加工点を観察しながら行うことができ、きれいな雰囲気中で人に優しい加工作業が行える。

4. 結 論

従来の研削油剤を用いた研削に対し、冷風研削は、

- (1) 研削作業時、塩素、硫黄、りんなどの極圧添加剤等の噴霧による悪環境による公害を防止できる。
- (2) 研削油剤購入費の節約。
- (3) 研削油剤ならびに切りくずの廃棄処理費が不必要。
- (4) 地球温暖化を防止し、環境に優しい作業となる。
- (5) 研削油剤を用いた場合より工作物表面の圧縮残留応力が高く、材料の疲れ強さが強くなる。
- (6) 研削油剤使用では研削経過に対して油温が高くなり、工作物の膨張に対する寸法補正が必要であるが、冷風研削では一定温度の冷風を供給しているので寸法補正が不要。
- (7) 冷風研削では研削状態が監視できるので、五感による熟練作業条件が取り入れられる。
- (8) 冷風 CBN 研削は研削比が高いうえ、油剤を用いたように、切りくずに極圧添加剤などの付着物がないので、材料の再生も容易なため、切りくずが売却できる。
- (9) CBN 研削は超高速化に進むが、研削油剤を使用する

と、これに対する負荷動力が大きくなるが、冷風供給だけでは負荷の増加は非常に小さく問題にならない。

- (10) 研削油剤を使用した研削作業では油剤が飛散するのを防ぐためカバーで機械を覆い、工作物取付け取外し時カバーを開閉する時間が必要である。冷風研削ではカバーをなくし機械原価を下げ、かつ開閉の無駄時間をなくして生産性を高めることができる。

などの利点がある。

このように地球環境に優しい ISO 14000 環境管理・監査を満足する加工を実現できる冷風研削法を開発できた。

参 考 文 献

- 1) 横川和彦ほか：CBN ホイールと在来砥石による研削温度，1994 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1994) 95。
- 2) 横川和彦ほか：CBN ホイール研削における研削油剤と残留応力に関する研究，1993 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1993) 555。
- 3) 横川宗彦，横川和彦：単結晶及び微細結晶体 BOR-AZON CBN ホイールの研削性能，精密工学会誌，52, 10 (1986) 1781。