

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-64184

(P2010-64184A)

(43) 公開日 平成22年3月25日 (2010.3.25)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
B 2 3 B 1/00 (2006.01)	B 2 3 B 1/00	3 C 0 1 1
B 2 3 Q 11/10 (2006.01)	B 2 3 Q 11/10	3 C 0 4 5

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2008-232178 (P2008-232178) (22) 出願日 平成20年9月10日 (2008.9.10)	(71) 出願人 503359821 独立行政法人理化学研究所 埼玉県和光市広沢2番1号
特許法第30条第1項適用申請有り 平成20年5月1日 社団法人砥粒加工学会発行の「砥粒加工学会誌 2008年第52巻第5号」に発表	(74) 代理人 100097515 弁理士 堀田 実
	(74) 代理人 100136548 弁理士 仲宗根 康晴
	(74) 代理人 100136700 弁理士 野村 俊博
	(72) 発明者 稲田 明弘 埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人 理化学研究所内
	(72) 発明者 大森 整 埼玉県和光市広沢2番1号 独立行政法人 理化学研究所内

最終頁に続く

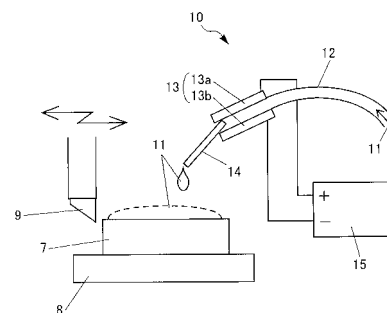
(54) 【発明の名称】 鉄系被削材の切削方法及び切削液供給装置

(57) 【要約】

【課題】複雑なアクチュエータや制御など用いることなくダイヤモンド切削工具を用いて鉄系材料を切削する。

【解決手段】ナノカーボンを含む水溶性切削液11を電解させ、電解した水溶性切削液11を、ダイヤモンド切削工具9と鉄系被削材（ワーク）7との切削点に供給しながら、ダイヤモンド切削工具9により鉄系被削材7を切削する。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ナノカーボンを含む水溶性切削液を電解させ、電解した水溶性切削液を、ダイヤモンド切削工具と鉄系被削材との切削点に供給しながら、ダイヤモンド切削工具により鉄系被削材を切削する、ことを特徴とする鉄系被削材の切削方法。

【請求項 2】

電解させた前記水溶性切削液は、鉄系材料に対して腐食作用がある物質を含む請求項 1 記載の鉄系被削材の切削方法。

【請求項 3】

鉄系材料に対して腐食作用がある物質は塩素イオンである請求項 2 記載の鉄系被削材の切削方法。 10

【請求項 4】

ナノカーボンを含む水溶性切削液をダイヤモンド切削工具と鉄系被削材との切削点に供給する切削液供給装置であって、

前記水溶性切削液を電解させる電解手段を備えることを特徴とする切削液供給装置。

【請求項 5】

電解させた前記水溶性切削液は、鉄系材料に対して腐食作用がある物質を含む請求項 4 記載の切削液供給装置。

【請求項 6】

鉄系材料に対して腐食作用がある物質は塩素イオンである請求項 5 記載の切削液供給装置。 20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ダイヤモンド切削工具により鉄系被削材を切削する鉄系被削材の切削方法、及びダイヤモンド切削工具と鉄系被削材との切削点に切削液を供給するための切削液供給装置に関する。

【背景技術】

【0002】

光学素子用や先端医療分野での各種試験基板用金型に対応するための精密微細加工の研究開発が盛んであるが、ダイヤモンド切削工具は一般的には採用されない。その理由は、鋼材等の鉄系材料を超精密加工用のダイヤモンド切削工具で切削した場合、ダイヤモンド工具と鉄系材料とが常時接触することになり、その際、ダイヤモンド工具（炭素）は鉄系材料と化学的親和性が高いためにダイヤモンド工具が非常に摩耗し易くなって、高い形状精度や鏡面を得る超精密切削加工ができないということにある。 30

【0003】

しかし、機械加工技術は近年の産業技術の発展に伴って更なる高度化が望まれており、ダイヤモンド切削工具を用いた鉄系材料の切削の実現が強く要望されている。このような要求に鑑み、楕円振動切削法と呼ばれる新しい切削加工技術が提案されている（例えば、下記特許文献 1 を参照）。 40

【0004】

楕円振動切削法は、図 19 に示すように、圧電素子などにより切削工具 1 の切刃 1A に切削方向と切り屑流出方向の振動を重畳して与えて、切刃 1A を楕円状の振動軌道 2 に運動させ、その状態で切刃 1A を被削材 3 に押し当てて切削を行う技術である。この切刃 1A の楕円振動により、切り屑 4 を引き上げながら加工を行うため、切削力を減少させて高精度の加工を可能にする。

【0005】

上述した楕円振動切削法によれば、刃先に水平方向（切削方向）の振動のみならず垂直方向（切りくず排出方向）の振動を付与して被削材を切削し、ダイヤモンド工具と被削材との連続接触時間の低減、切りくずとの摩擦力の低減、切削抵抗の減少、切削油剤の浸透 50

効果向上などによりダイヤモンド工具の摩耗を抑制することができる。

【0006】

【特許文献1】特開2000-52101号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、上述した楕円振動切削法では、圧電素子などの振動発生機構が必要であるためアクチュエータが複雑で高価となるし、所望の加工精度を得るための振動周波数の適正化や制御が困難である。このため、複雑なアクチュエータや制御などを不要とし、よりシンプルにダイヤモンド切削工具を用いた鉄系材料の切削を実現できる技術が要望されている。

10

【0008】

本発明は、上記の問題に鑑みてなされたものであり、複雑なアクチュエータや制御などを用いることなくダイヤモンド切削工具を用いて鉄系材料を切削することができる鉄系被削材の切削方法及び切削液供給装置を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記の課題を解決するため、本発明の鉄系被削材の切削方法及び切削液供給装置は、以下の技術的手段を採用する。

(1) 本発明の鉄系被削材の切削方法は、ナノカーボンを含む水溶性切削液を電解させ、電解した水溶性切削液を、ダイヤモンド切削工具と鉄系被削材との切削点に供給しながら、ダイヤモンド切削工具により鉄系被削材を切削する、ことを特徴とする。

20

【0010】

(2) また、上記(1)の鉄系被削材の切削方法において、電解させた前記水溶性切削液は、鉄系材料に対して腐食作用がある。

【0011】

(3) また、上記(2)の鉄系被削材の切削方法において、鉄系材料に対して腐食作用がある物質は塩素イオンである。

【0012】

(4) 本発明は、ナノカーボンを含む水溶性切削液をダイヤモンド切削工具と鉄系被削材との切削点に供給する切削液供給装置であって、前記水溶性切削液を電解させる電解手段を備えることを特徴とする。

30

【0013】

(5) また、上記(4)の切削液供給装置において、電解させた前記水溶性切削液は、鉄系材料に対して腐食作用がある物質を含む。

【0014】

(6) また、上記(5)の切削液供給装置において、鉄系材料に対して腐食作用がある物質は塩素イオンである。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、水溶性切削液に含まれるナノカーボン（ナノオーダーサイズの炭素粒子）がダイヤモンド切削工具の切刃に付着して被覆層を形成し、このナノカーボンからなる被覆層が固体潤滑剤として機能することにより切刃表面が摩擦係数を下げることで高い潤滑効果が得られるので、切りくずのダイヤモンド切削工具への付着を防止あるいは抑制することができる。また、被覆層が保護層として機能するので、ダイヤモンド切削工具の摩耗を防止あるいは低減することができる。

40

【0016】

また、水溶性切削液を電解させることで、切削液中に含まれる鉄系被削材に対して腐食作用がある物質（塩素イオンなど）により、鉄系被削材の表面を改質させ構造を脆くするので、切削性能を向上させることができる。

50

【0017】

さらに、水溶性切削液を電解させる他の作用として、切削中の切りくずは静電力によって被削材上に溜まった切削液の端部（周縁部）に移動することにより、切りくずは切削点と加工面から効果的に排出される。これにより、切りくずの巻込みによる加工欠陥の発生を効果的に防止することができる。

【0018】

したがって、本発明によれば、複雑なアクチュエータや制御など用いることなくダイヤモンド切削工具を用いて鉄系材料を切削することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

10

以下、本発明の好ましい実施形態を添付図面に基づいて詳細に説明する。なお、各図において共通する部分には同一の符号を付し、重複した説明を省略する。

【0020】

図1は、本発明の実施形態に係る切削液供給装置10の概略構成を示す図である。図1において、鉄系被削材（鋼材）であるワーク7がテーブル上に載置されており、図示しない工具駆動機構によってダイヤモンド切削工具9が工具送り方向（この図で左右方向）に移動することでワーク7の切削加工が行われる。ワーク7と切削工具9との切削点に切削液（クーラント）11を供給するため、切削液供給装置10が設けられている。

【0021】

切削液供給装置10は、切削液11の流路を形成するクーラントチューブ12と、クーラントチューブ12の先端部に設けられた電解用電極13と、電解用電極13の先端に取り付けられた補助供給管14と、電解用電極13に電解電圧を与える電解電源15とを備えている。

20

【0022】

上記の切削液11は、ナノカーボンを含む水溶性切削液であり、電解することで鉄系被削材に対して腐食作用があるイオン（塩素イオン、硫酸イオン、硝酸イオン、炭酸イオンなど）を生成する物質を含んでいる。電解することで鉄系被削材に対して腐食作用があるイオンを生成する物質としては、塩素（Cl）、硫酸ナトリウム（ Na_2SO_4 ）などがある。ナノカーボン濃度は、0.0001wt%～0.1wt%の濃度範囲であるのがよい。

30

【0023】

電解用電極13と電解電源15は、本発明における「水溶性切削液を電解させる電解手段」を構成している。

【0024】

電解用電極13は、切削液11の流路を挟む形で互いに対向して配置された第1電極13aと第2電極13bからなる。電解用電極13の材質は、金属などの導電性材料であれば特に限定されないが、耐食性にすぐれた材質であるのが好ましく、例えば、カーボン電極であるのが好ましい。

【0025】

電解電源15が発生する電解用電圧は、直流パルス電圧であるのが好ましいが、直流一定電圧や交流電圧であってもよい。この電解電源15によって第1電極13aと第2電極13bの間に電解用電圧が印加されると、切削液11が第1電極13aと第2電極13bの間を流れる過程で電解される。これにより切削液11中の成分が電解し、水素イオン、水酸化物イオン、塩素イオンなどが生成される。

40

【0026】

補助供給管14は、ワーク7上の切削点に切削液11が供給されるように配置されている。これにより、電解した切削液11はワーク7とダイヤモンド切削工具9との切削点に供給され、図1のようにワーク7上で液溜まりを形成する。

【0027】

本発明の鉄系被削材の切削方法は、上記のように構成された切削液供給装置10を用い

50

て実施することができる。すわなち、本発明の鉄系被削材の切削方法は、ナノカーボンを含む水溶性切削液 11 を電解させ、電解した水溶性切削液 11 を、ダイヤモンド切削工具 9 と鉄系被削材 7 との切削点に供給しながら、ダイヤモンド切削工具 9 により鉄系被削材 7 を切削する、というものである。

【0028】

なお、切削速度を速めることで切削工具の摩耗量が減少し長寿命化できることが後述する実験（図 7）により明らかとなった。したがって、切削速度は、 150 mm/min より早くするのがよく、たとえば、 200 mm/min 以上、 1000 mm/min 以上、あるいは 3000 mm/min 以上とするのがよい。

【0029】

図 2 の模式図を参照し、本発明の作用及び効果を説明する。

上述した本発明の装置及び方法によれば、水溶性切削液 11 に含まれるナノカーボンがダイヤモンド切削工具 9 の切刃表面に付着してカーボンの被覆層 17 を形成する。このナノカーボンからなる被覆層 17 が固体潤滑剤として機能することにより切刃表面が摩擦係数を下げることで高い潤滑効果が得られ、切りくず 16 のダイヤモンド切削工具 9 への付着を防止あるいは抑制することができる。また、被覆層 17 が保護層として機能するので、ダイヤモンド切削工具 9 の摩耗を防止あるいは低減することができる。

【0030】

また、水溶性切削液 11 を電解させることで、切削液 11 中に含まれる鉄系被削材 7 に対して腐食作用がある物質（塩素イオンなど）により、鉄系被削材 7 の表面を改質させ結晶構造を脆くするので、切削性能を向上させることができる。

【0031】

さらに、水溶性切削液 11 を電解させる他の作用として、切削中の切りくず 16 は静電力によって被削材上に溜まった切削液 11 の端部（周縁部）に移動することにより、切りくず 16 は切削点と加工面から効果的に排出される。これにより、切りくず 16 の巻込みによる加工欠陥を効果的に防止することができる。

【0032】

したがって、本発明によれば、複雑なアクチュエータや制御など用いることなくダイヤモンド切削工具を用いて鉄系材料を切削することができる。

【実施例】

【0033】

本発明の効果を確認するため、以下のような実験を行った。以下、この実験結果を本発明の実施例として説明する。

【0034】

1. 実験条件

供試材として、クーラント（切削液）の効果を明らかにするため単結晶ダイヤモンドと親和性が高く、焼入れが可能な高炭素クロム鋼（Hv800 以上）を使用した。クーラントとしては、以下の 4 種を用いた。

（1）ケロシンミスト（レファレンス用）

（2）ケミカルソリューションタイプのクーラント（ここでは E L I D 研削液を採用）

（3）上記（2）のクーラントにナノカーボンを含有させたナノカーボン含有クーラント

（4）上記（3）を電解させたナノカーボン電解クーラント

【0035】

ここで使用したナノカーボン含有クーラントとナノカーボン電解クーラントは、カーボンプラックの平均粒子サイズが約 100 nm からなる東海カーボン株式会社製ナノカーボン水溶液 A q u a - B l a c k 1 6 2（ナノカーボン濃度 $20\text{ wt\%}$ 、 $\text{PH}=7$ ）をケミカルソリューションタイプの E L I D 研削液（希釈倍率 50 倍）で希釈しナノカーボン濃度の調整を行っている。

【0036】

クーラントに電解作用を付与させる実験装置は、上述した本発明の切削液供給装置（図

10

20

30

40

50

1)と同様の構成を有し、電解電源をつないだ電極間にナノカーボン含有クーラントを流入させ、電解作用を付与したクーラント液滴を加工点に供給し、切削部分をクーラントで浸してしまうものである。

【0037】

電解条件は、解放電圧15V、ピーク電流1.7A、パルスタイミングはオンタイム1 μ s、オフタイム1 μ s、カーボン電極寸法は15 $\times$ 35 $\times$ 8mm、電極間ギャップは1.2mmである。実験装置は、空気静圧軸受とリニアモータで構成されたX軸、Y軸、Z軸と、B軸、C軸の回転2軸からなる株式会社製ソディック製ナノマシンNano-100を用い、下記の表1に示す実験条件をレファレンス条件とするプレーナー切削加工を採用している。

【0038】

【表1】

供試材	高炭素クロム鋼 (Hv800 以上)
実験装置	(株)ソディック製 Nano-100
工具	単結晶ダイヤモンド R バイト, R=800 μ m
切削条件	切削速度 150mm/min
クーラント	ケロシンミスト(ミストクーラント), 供給量(微量)

【0039】

なお、ナノカーボン濃度は、被削材に無酸素銅を用いた先行確認の結果より0.0001wt%~0.001wt%の濃度範囲を採用している。切削力測定はKistler製の多成分小型動力計9256Cを用いた。

【0040】

2. 実験結果

2.1 加工面粗さの比較結果

図3(A)に、クーラントにケロシンミストを用い、表1の条件で加工した切削溝の拡大写真と表面形状を示す。また、図3(B)に、ナノカーボン濃度0.001%のナノカーボン電解クーラントによる切削溝の拡大写真と表面形状を示す。評価機器には、前者がキーエンス製のデジタルマイクロコープVHX-500、後者がZygo製のNew View 5000を用いている。

【0041】

表面形状データの比較では、図3(A)の加工面には局所的にPV値で1018nmの凹部を含むうねり状の乱れが見られる。一方、図3(B)の加工面には、切削入口部の加工域に540nmの形状変化があるが、ケロシンミスト加工面に見られるような大きなうねりを持つ凹状乱れは見られない。なお、両者の切削溝幅は入口部分でそれぞれ192 μ m、149 μ mである。この溝幅差から、切削入口部における切込み深さはそれぞれ5.66 μ m、3.52 μ mとなり、前者が後者よりも2.14 μ mほど深く切削されていることになるが、後者の場合は、加工溝の溝幅が192 μ mになる加工域においても顕著な凹状の形状乱れが生じていないことから、ナノカーボン電解クーラントを用いることで切削性が向上していることが分かる。

【0042】

図4は、表1と同一条件でピックフィード5 μ mとして幅1mmを加工した部分の拡大写真である。図4(A)において、右半分がケロシンミストによる加工面であり、左半分がナノカーボン電解クーラントによる加工面である。右側のケロシンミストの加工面は50 μ m程度の幅をもつ切削幅が断続的に乱れているが、左側のナノカーボン電解クーラントの加工面では加工溝がほとんど乱れることなく形成されている。両者の切削深さは加工

入口側の2.2 μm から抜け側で4.0 μm 、後者も同様に2.8 μm から5.0 μm であり、前者の溝が0.6 μm ～1.0 μm の差でわずかに浅いが、同一深さの領域の比較からも加工面状態の違いは明らかといえる。

【0043】

また、図4の詳細観察から、切削溝の乱れの箇所は、供試材表面に当初からあった研削条痕のなかでも大きなスクラッチの延長線と一致する箇所（図4（A）の破線）や結晶粒界の位置と一致しているように見える（図4（A）、（B））。

【0044】

図4（B）はメタノール85ml、硝酸5ml、塩酸10mlからなるエッチング液を用いてオーバーエッチング気味に表面処理したケロシンミスト加工面の拡大図である。写真の中央に結晶粒界（波線部分）があり、この結晶粒界の左側の上下で切削条痕（図では、実線を切削条痕の位置よりわずかにずらした位置に配置しており、矢印の位置が切削条痕の位置である）が不連続になっていることが確認できる。以上の観察結果より、ナノカーボン電解クーラントによる加工では、被削材の最表面に残留するスクラッチなどの加工欠陥や結晶粒ごとの方位の違いにより生じる結晶構造の異方性の影響が小さくなっていることが分かる。

【0045】

2.2 工具状態

図5は、ケロシンミストとナノカーボン電解クーラントを用いた加工実験（図4）後における単結晶ダイヤモンドバイトの逃げ面摩耗部の拡大写真である。前者の逃げ面摩耗部には凝着物の存在が認められたが、後者には凝着物の存在は認められず非常にきれいな状態であった。また、加工中の観察結果からも、前者では工具のすくい面側に切りくずが凝着し脱落しない状況がたびたび観察されたが、後者の加工時には切りくずが容易に刃先から脱落する状態が認められた。このような結果から、ナノカーボン粒子を含有させることで単結晶ダイヤモンドバイトと鉄系切りくずとの凝着を抑制できることが分かる。

【0046】

図6は、4種のクーラントによる切削主分力の測定結果を示している。切込み深さは切削溝幅の実測より約600nm、切削対抗面積は約 $1.6 \times 10^8 \text{ nm}^2$ である。左端のケロシンミスト（試料A）による加工を最初に行い、ケミカルソリューションタイプのELID研削液（試料D）、ナノカーボン含有クーラント（試料C）、ナノカーボン電解クーラント（試料B）の順に実験を行った。試料A、B、Cの間では切削主分力の値に大きな違いは見られないが、試料Dの切削主分力は約13%増大している。この違いは、ELIDクーラントの乏しい潤滑性や切りくず凝着などが関係しているものと推察されるが、明らかではない。

【0047】

試料A、B、Cの比較では、3種のすべてのクーラントで最小値0.26N、最大値0.43Nともほとんど違いがないが、切削過程における切削主分力の変動幅の大きさに違いがあることがわかる。この変動幅の変化度合を切削主分力の平均値に対する比率で表現すると、ナノカーボン電解クーラント：11.9%＜ナノカーボン含有クーラント：18.6%＜ケロシンミスト：33.9%となっている。図3のそれぞれの加工溝のPV値の比較ではケロシンミストのPV値変動率は53.0%、一方、図6の対応する試料A、Bの切削主分力の変動比率は35.1%となり、この2つの変動比率に大きな差がないことから、切削主分力の計測による定量比較の結果からもナノカーボン含有効果および電解作用付与効果が得られていることが分かる。なお、切削主分力が傾きを持ち増大している計測データは、被削材をジグに接着したときの傾きによるもので、供試材の幅9mmを150mm/minの切削速度（切削時間約2.5秒）で加工方向に進むにつれて切削対抗面積が増大していることによる。

【0048】

ナノカーボンにより工具逃げ面摩耗部における凝着抑制効果が確認されたことから、加工点とその近傍（バニッシュ加工領域、すくい面の切りくずしゅう動領域など）においても

10

20

30

40

50

クーラント中のナノカーボンによる凝着抑制効果により摩擦抵抗が小さくなりその結果として潤滑効果が働いていることが考えられる。このようなナノカーボンによる潤滑効果が、図6における試料B、Cの切削主分力変動幅の低減効果として現れたものと考えられる。

【0049】

図7は、ナノカーボン電解クーラントを用いた切削において切削速度を変化させた場合の工具寿命試験の結果を示す図である。この結果から、高い工具速度（1000mm/min、3000mm/min）において、より長い工具寿命が観察された。工具摩耗量は、3D-CAD容積計算ソフトを使用して計測した。除去率は、切削除去容積に対する刃先摩耗容積の比率として定義した。

10

【0050】

2. 3 切りくず形態

図8は、切りくずの形態を示す写真である。ナノカーボン電解クーラントによる切削では（A）のようにカール状の連続型切りくず形成された。一方、ケロシンミストによる切削では（B）のように亀裂型切りくずが形成された。連続した切りくずは、安定した切削と表面の改善を示している。また、ナノカーボン電解クーラントの成分調整によって、（C）のように、切りくずの壊れやすさの特徴が改善した。（C）は、幅1.5μm、長さ30μmの切りくずを示している。

【0051】

3. ナノカーボン電解クーラントによる効果

20

3. 1 ナノカーボン含有効果（図9-10）

ナノカーボン電解クーラントを用いて切削するとき、切削力は安定する。ナノオーダーサイズの炭素粒子は、非常に低い摩擦係数をもつグラファイト層のような固体潤滑剤として機能すると考えられる。それらは、保護層として機能し、典型的な拡散摩耗が防止される。図9は、ナノカーボン電解クーラントによる1時間の切削の後のダイヤモンドすくい面に形成された薄膜を示している。この薄膜の分析は、EPM A（Electron Probe Micro Analyzer）を用いて行った。薄膜物質のサンプリングを容易にするため針を用いて薄膜物質を採取した。

【0052】

図10は、EPM Aによる分析結果を示す。図10から、ダイヤモンドバイト表面にカーボン被膜が形成されていることがわかる。図10では、電極コーティング材からの銀とEPM Aのベースプレートからの銅も示されている。この分析結果より、ダイヤモンドバイト表面にナノカーボンの被膜層が形成され、この被膜層がグラファイト層あるいは典型的な固体潤滑剤の同様の構造の層と同様の機能を発揮することで、工具の摩擦係数は非常に低くなり安定な切削を可能とすることが分かる。

30

【0053】

3. 2 電解付与効果

3. 2. 1 表面改質効果（図11-16）

ナノカーボン電解クーラントは、ワーク表面の腐食の原因となる塩素イオンを含んでいる。塩素イオンは、鉄系被削材の表面の結晶粒界を貫通して欠陥を形成するため、結晶構造が弱くなる。切削中、ナノカーボン含有クーラントはpH9を示すが、ナノカーボン電解クーラントはpH10となった。このpH値が工具とワーク表面の化学反応に影響していることは明らかである。異なるpH値のもとでの複雑な化学反応を通じて異なるタイプの酸化層を形成するものと考えられる。pH10のナノカーボン電解クーラントが鉄系被削材の最表層をわずかでも溶融状態にしているとすると、この最表層はアモルファス構造化され、そのため切削過程において、この材料構造は等方的かつ同質的挙動を示すことが考えられる。

40

【0054】

図11は、ワークの微小硬さの計測結果であり、左側は元の材料、中央はナノカーボン含有クーラント（NCC）、右側はナノカーボン電解クーラント（NCEC）である。

50

図11に示すように、ナノカーボン含有クーラントを用いた切削ではワーク表面の微小硬さは増大したが、ナノカーボン電解クーラントでは減少した。電解なしの場合、切削中の表面におけるある化学反応が、より硬い表層（たとえば、 Fe_2O_3 ）を生成すると考えられる。クーラントが電解されるほど、クーラントのpH値が変化し、化学反応が促進されて最表層を溶融させ、軟化した最表層（たとえば、 FeCl_3 ）を生成するなどが考えられる。

【0055】

図12に示すように、改質された表層の厚さは約200nmであった。各表面の微小硬さの違いは、加工溝の形状の違いをもたらす。ナノカーボン電解クーラントを用いた切削によるワーク表面の溝端部のバリの高さは、ナノカーボン含有クーラントの1/3以下であった。このことは、ナノカーボン電解クーラントを用いることで、バリが少なく良い加工面品質が得られることを示している。

【0056】

図13は、電解作用を付与するための電解エネルギーの大きさと切削主分力の関係を示している。この結果から、電解エネルギーの大きさに応じて、切削主分力の平均値と変動量が変化することが分かる。高炭素クロム鋼の場合、電解エネルギーを与えることで、切削主分力の平均値と変動量が小さくなること、すなわち、切削性の向上作用が得られていることが分かる。

【0057】

図14は、ナノカーボン電解クーラントを用いた切削の場合の切削除去エリアの一部である掘り起こし領域の表面写真である。この観察より、結晶粒の内側と境界において孔食が生じていることがわかる。また、ナノカーボン電解クーラントのもとでの微小切りくずの観察から、切削方向に対して垂直な方向のナノメータサイズの皺がみつかった（図15）。このようなナノサイズの皺は、一般的にアモルファス構造の物質から生成される層状チップ構造と似ている。図15において矢印で示される距離は1μmである。したがって、ナノカーボン電解クーラントを用いた切削のもとでの化学的プロセスは、被削材表面を脆くし、結晶異方性の影響を弱める。これは、クーラント中の塩素イオンに起因するものと考えられる。ワーク表面において塩素イオンによって孔食が作られると、これは粒界と結晶構造を脆くする。また、化学反応が結晶構造を変化させアモルファス層に変化させたと考えられる。これは、CMPプロセスにおけるスラリーの役割と似ている。

【0058】

ナノサイズの皺と塩素イオンとの関係を理解するため、ナノカーボン電解クーラントとして塩素イオンを含まない電解液を使用し、切りくずの形態を比較した。この場合、濃度0.5mol/リットルの硫酸ナトリウム（ Na_2SO_4 ）溶液を選択し、ナノカーボンと電解エネルギーを付与した。図16は、硫酸ナトリウム溶液の条件のもとでの切りくずの形態を示している。図16に示した切りくずは、カール形状ではなく、まっすぐな形の幅20μm、長さ430μmの皺のない形態である。この実験結果より、ナノカーボン電解クーラントに含まれた塩素イオンは、切りくず形態と切りくずの壊れやすさにおいて大きな影響があることがわかる。

【0059】

3.2.2 切りくず排出効果（図17～18）

図17に示すように、ナノカーボン電解クーラントを用いた切削の場合（左側の写真）、切削中、微小切りくずはワーク端部（クーラント端部）に移送される。画像は詳細を示していないが、ナノカーボン電解クーラントを用いた切削による微小切りくずは、クーラント端部に付着し整列している。一方、ナノカーボン含有クーラントの場合（右側の写真）、微細な切りくずの付着は確認できなかった。このことから、電解作用により微細切りくずがクーラント端部に付着することで加工面上に切りくずが残留せず、その結果、30ml/min程度の微量なクーラント供給量でも切りくず排出作用が得られたと考えられる。

【0060】

電解作用による切りくずの排出作用を検証するため、鉄粉を用いた実験を行った。図 18 において、(A) はナノカーボン電解クーラントに鉄粉を散布した直後の状態、(B) はナノカーボン含有クーラントに鉄粉を散布した直後の状態である。この結果より、ナノカーボン電解クーラントでは鉄粉がクーラント外周部で付着することが確認された。一方、ナノカーボン含有クーラントでは、このような現象は確認できなかった。

【0061】

4. 結論

以上の実験より、ナノカーボンを含む水溶性切削液を電解したナノカーボン電解クーラントを、高炭素クロム鋼と単結晶ダイヤモンド工具との間の切削点に供給することで、以下のような効果が得られることが分かった。

(1) ナノカーボン含有効果として、切刃表面の摩擦係数を下げて高い潤滑効果が得られるので、ダイヤモンド工具と鉄系被削材の付着を防止できる。

(2) 電解付与効果として、電解反応によって生じた活性な塩素イオン、活性な水酸化物イオン、水素イオンは、鉄系被削材に対し孔食を伴う腐食改質面を生成する。この改質表面は結晶粒界の構造強度を弱め、そのため、切削過程において、結晶粒界の影響が減少したと考えられる。この化学反応により、鉄系被削材の最表層がもろい材料特性に変質し、切削特性の向上とバリ高さの低減作用が得られている。

(3) 電解付与効果として、静電力によって微小切りくずを効果的に排出することができる。

【0062】

なお、上記において、本発明の実施形態について説明を行ったが、上記に開示された本発明の実施の形態は、あくまで例示であって、本発明の範囲はこれら発明の実施の形態に限定されない。本発明の範囲は、特許請求の範囲の記載によって示され、さらに特許請求の範囲の記載と均等の意味および範囲内でのすべての変更を含むものである。

【図面の簡単な説明】

【0063】

【図 1】本発明の実施形態に係る切削液供給装置 10 の概略構成を示す図である。

【図 2】本発明の作用及び効果を説明する模式図である。

【図 3】ケロシンミストを用いて加工した切削溝の拡大写真と表面形状を示す図である。

【図 4】ナノカーボン電解クーラントを用いて加工した切削溝の拡大写真と表面形状を示す図である。

【図 5】図 4 の加工実験後における単結晶ダイヤモンドバイトの逃げ面摩耗部の拡大写真である。

【図 6】4 種のクーラントによる切削主分力の測定結果を示している。

【図 7】ナノカーボン電解クーラントを用いた切削において切削速度を変化させた場合の工具寿命試験の結果を示す図である。

【図 8】切りくずの形態を示す写真である。

【図 9】ナノカーボン電解クーラントによる 1 時間の切削の後のダイヤモンドすくい面に形成された薄膜を示している。

【図 10】E P M A による分析結果を示している。

【図 11】ワークの微小硬さの計測結果を示している。

【図 12】改質された表層の厚さを示している。

【図 13】電解作用を付与するための電解エネルギーの大きさと切削主分力の関係を示している。

【図 14】ナノカーボン電解クーラントを用いた切削の場合の切削除去エリアの表面写真である。

【図 15】ナノカーボン電解クーラントのもとでの微小切りくずの写真である。

【図 16】硫酸ナトリウム溶液の条件のもとでの切りくずの形態を示している。

【図 17】ナノカーボン電解クーラントを用いた切削の場合とナノカーボン含有クーラントを用いた切削の場合のクーラント端部の様子を示している。

10

20

30

40

50

【図 1 8】 電解作用による切りくずの排出作用を検証するための実験の様子を示している。

【図 1 9】 従来技術として、楕円振動切削法を説明する図である。

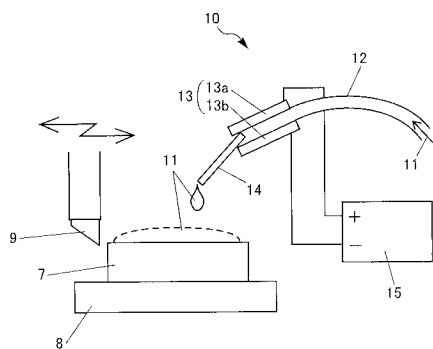
【符号の説明】

【 0 0 6 4 】

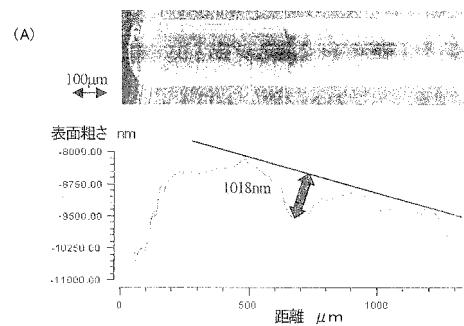
- 7 鉄系被削材（ワーク）
- 8 テーブル
- 9 ダイヤモンド切削工具
- 10 切削液供給装置
- 11 水溶性切削液（クーラント）
- 12 クーラントチューブ
- 13 電解用電極
- 14 補助供給管
- 15 電解電源
- 16 切りくず
- 17 ナノカーボンの被膜層

10

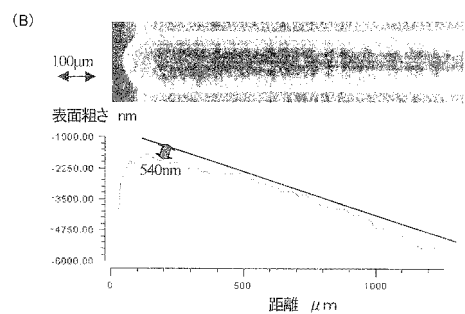
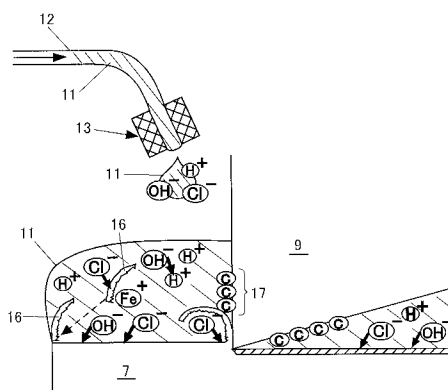
【図 1】



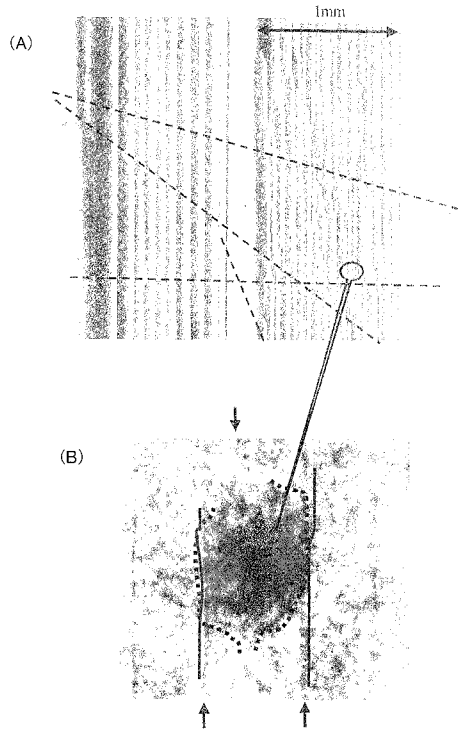
【図 3】



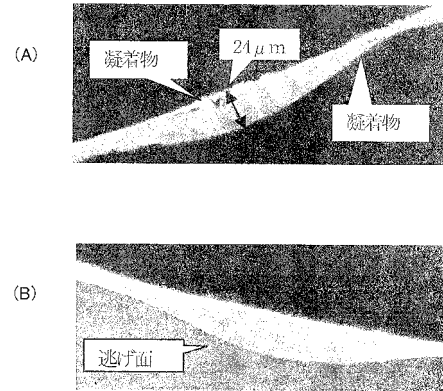
【図 2】



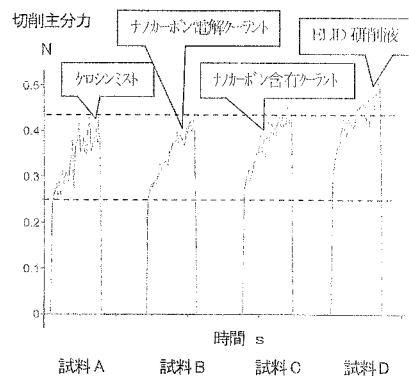
【図 4】



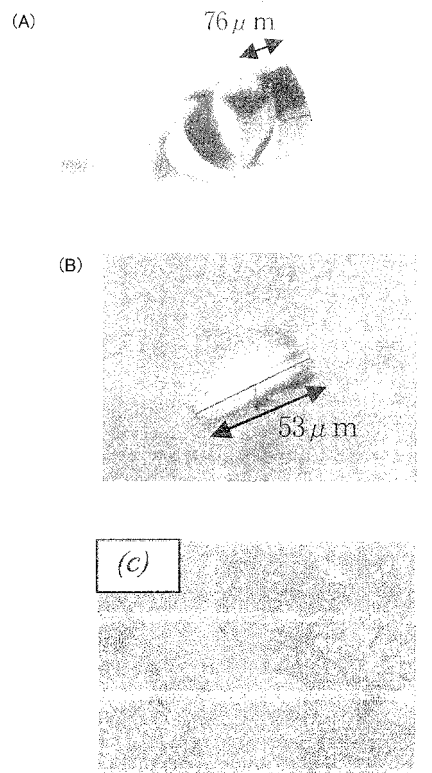
【図 5】



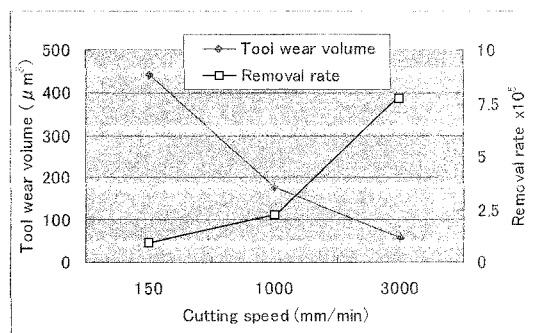
【図 6】



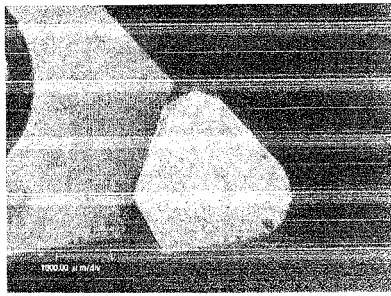
【図 8】



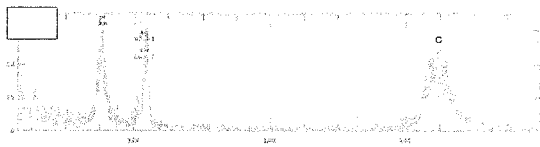
【図 7】



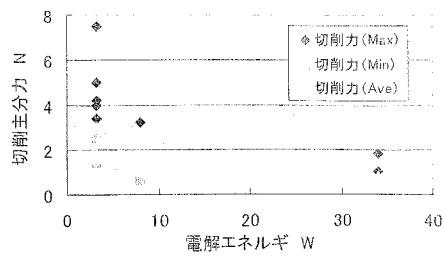
【図 9】



【図 10】



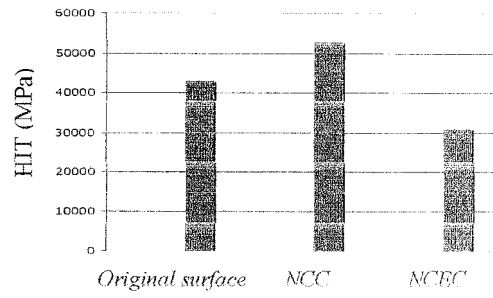
【図 13】



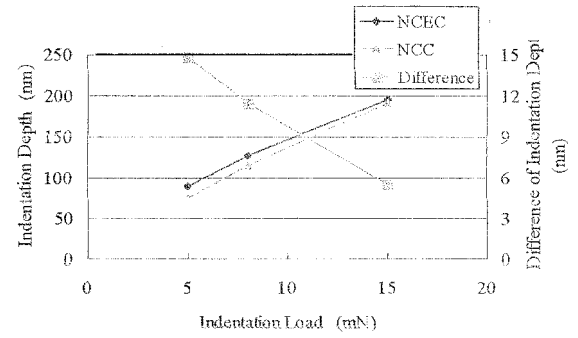
【図 14】



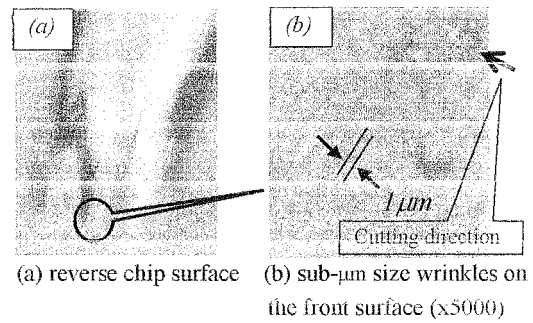
【図 11】



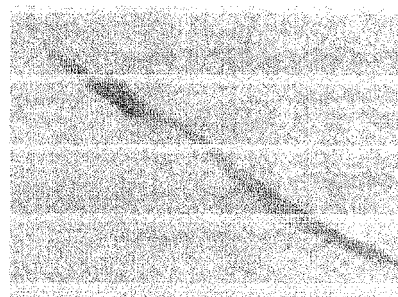
【図 12】



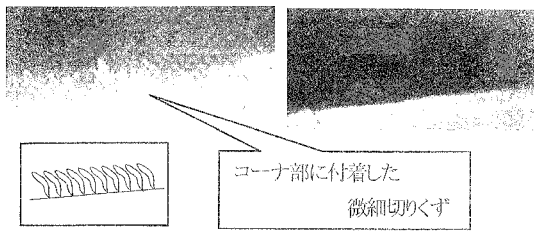
【図 15】



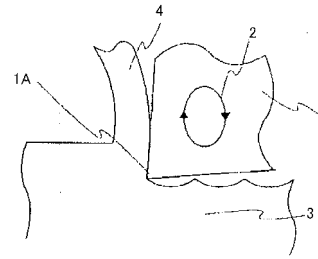
【図 16】



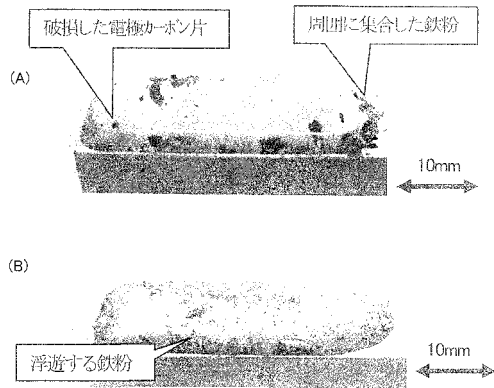
【図 17】



【図 19】



【図 18】



フロントページの続き

Fターム(参考) 3C011 EE08
3C045 AA10