日本金属学会誌 第 46 巻 第 6 号 (1982) 657-664

シルミン (AC3A) 乾式切削における超硬合金工具摩耗について*

財満 鎮雄** 高辻 雄三*** 山田 茂***

J. Japan Inst. Metals, Vol. 46, No. 6 (1982), pp. 657-664

Some Consideration on Carbide Tool Wear in Dry Cutting of Silumin

Shigeo Zaima**, Yuzo Takatsuji*** and Shigeru Yamada***

Carbide tool wear of P10 tool and K10 tool was studied from the view point of rake surface wear by means of EPMA in dry cutting (AC3A). The pulled up pits are recognized on the tool edge and rake surface of both tools, and it is observed that carbide particles fell off due to diffusion of Co, and the wear in the crater part progresses by scratch of hard fine silicon particles, etc. in work material. The concentration of Co remaining at the tool surface of K10 tool is higher than that of P10 tool. Therefore, it is obviously shown that the falling of binding strength of K10 tool is small compared with P10 tool and consequently progression of the tool wear of K10 tool is slow.

(Received February 20, 1982)

I. 緒 言

普通の鉄鋼系材料の切削にもみられないような激しい工具摩耗を伴う Al-Si 系鋳造合金の切削では切削抵抗の軽減、潤滑などによって、工具摩耗の減少の観点から、切削油剤を使用した湿式切削が試みられることも少なくない。しかしながら、切削油剤を使用して切削仕上げした場合、製品として塗装中、塗装後あるいは使用中に切削油剤がにじみ出したりすることがあるため、止むを得ず乾式切削をすることが多い。このような場合、工具摩耗が激しいこと、金属光沢を有する良好な切削面が得られにくいことなどのため、一般に Al-Si 系鋳造合金は難削材に属するといわれている。本報では、代表的な Al-Si 系鋳造合金として AC3A (いわゆるシルミン) について、超硬合金工具を使用した乾式切削における工具摩耗を EPMA によって検討した。さらに、この種合金に高速度鋼工具を使用した場合、乾式切削では三角形逃げ面摩耗を呈し、湿式切削では切込みに相当する部分に境界摩耗が発生することを示し⁽¹⁾⁽²⁾、引続き超硬合金工具を使用した湿式切削でも高速度鋼工具

の場合ほど激しくはないが、同様な境界摩耗が発生すること、超硬合金工具材種のうち P 種より K 種が耐摩耗性が良好なこと、およびこの場合の工具摩耗の発生機構についての EPMA による見解などについて報告した⁽³⁾。よって、超硬合金工具による乾式切削の場合も高速度鋼工具の乾式切削の場合と同様な摩耗形態を示すかどうか、超硬合金工具材種 (P 種, K 種) による耐摩耗性の差異などを明らかにすることなどを目的とした。

II. 実験要項

実験に供した試料は Table 1 に示す化学成分、機械的性質を有する前報⁽³⁾までのものと同一の AC3A 材である。刃先諸元 $0-\pi/18-\pi/30-\pi/30-\pi/30-0-0$ を有する 2 種類の超硬合金工具 (JIS 分類 P10 および K10) を使用し、昌運カブヌーブ旋盤 HB-500 型 (主軸回転数 40~3200 rpm ($0.6 \sim 53.3 \text{ s}^{-1}$)) によって切削試験を実施した。

切削条件は削り速度 $v=9 \text{ m/s}$, 切込み $t_1=1.0 \text{ mm}$, 送り $f=0.1 \text{ mm/rev}$ 一定とし、連続乾式切削時間を P10, K10 についてそれぞれ $t=420 \text{ s}$ (7 min), $t=720 \text{ s}$ (12 min)

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of specimen used.

Material	Chemical compositions					Mechanical properties			
	Si (%)	Fe (%)	Na (%)	Sn (%)	Al (%)	Tensile strength (MPa)	0.2% Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers hardness Hv
AC3A	12.8	0.2	0.02	0.41	bal	135	71	4.0	49.5

** 静岡大学工学部機械工学科 (Department of Mechanical Science, Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu)

*** 富山大学工学部生産機械工学科 (Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, Toyama University, Takaoka)

* 1980 年 10 月日本金属学会福岡大会に発表

とし、その時の工具摩耗状態をすくい面摩耗について検討した。この場合、逃げ面摩耗がすくい面摩耗に先行するが、工具の摩耗機構は切屑が擦過するすくい面側でその特色がはっきりするので、すくい面摩耗を対象とした。このとき逃げ面摩耗は定常状態になっており、逃げ面摩耗幅は P10, K10 工具でそれぞれ $160\mu\text{m}$, $45\mu\text{m}$ となり、すくい面のクレータ深さはそれぞれ $1.5\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$ となっており、やや少ないが特色は十分認められるようであった。この際、アルミニウムの大きな工具付着物は NaOH で除去して切刃を観察した。

III. P10 工具についての観察

Photo.1 左側は P10 工具におけるすくい面摩耗の全体像と拡大観察、元素面分析部分(図中の番号が後掲写真中の部位番号を示す)および線分析方向(A, B, Cで示す)を示した説明図である。写真にみるように切刃端より約 $400\mu\text{m}$

μm の領域幅で工具摩耗が進行し、その摩耗形態は後述 Photo.2 付図に示すように典型的なクレータの発生までには至っていないが、炭化物粒子の直径が $1\mu\text{m}$ 前後であることを考慮すれば、摩耗現象の把握には十分であると思われる。工具表面に多数付着している黒い付着物は炭素が主成分のようで、後述のように TiC 粒子の Ti が被削材中のアルミニウム中に拡散する際に遊離した炭素の集合体とみられ、この種の付着物は K 種工具では観察されなかった。

Photo.2 はすくい面摩耗部分のうち、切刃端近傍約 $300\mu\text{m}$ の領域幅の中で工具先端より切込みに相当する部分にかけての①, ②, ③部分、その中央付近の②より内部にはいった切刃端より $300\sim 600\mu\text{m}$ の部分④およびさらに内側の摩耗終端部とみられる約 $600\mu\text{m}$ 以上の部分⑤の拡大写真である。また、右下の付図は Photo.1 の B 方向の工具表面形状を表面あらさ計 (TALYSURF 4 型, 触針先端半径 $12.5\mu\text{m}$) によって測定した結果である。あらさ計から

AC3A, Dry Cutting

Photo.1 General views of tool wear of P10 and K10 tool.

Photo.2 Secondary electron micrographs of various parts on worn face of P10 tool.

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

読み取れるクレタの最大深さは約 $1.5\mu\text{m}$ であるが、これは平均的な深さであり、部分的には写真①～⑤にみるように触針のはいらない凹みが多数あり、その深さは $3\sim 5\mu\text{m}$ 程度である。このように①～③部分では局部的に掘り起された摩耗箇所が点在し、④部分では摩耗部分はやや少なく、⑤部分では表面的にはほとんど摩耗していないようにみられる。

ここで、①部分の一部を拡大した⑥部分 **Photo.3** をみれば、切刃端より約 $10\mu\text{m}$ の幅で摩耗によって角がだれ、その内側で全体として切屑擦過によって炭化物粒子がばらばらにえぐり取られた摩耗部分が多いのがわかる。とくに大きくえぐられたと思われる凹みに相当する部分で工具成分の W, Ti, とくに Co が少なくなっているのがわかり、このような部分には必ず C の付着が認められる。そして Si は切刃端に多く、逃げ面摩耗には Si が大きく作用していることがうかがえる。さらに、⑥部分の中央部を拡大してみれば **Photo.4** の⑪のようになり、炭化物粒子の脱落状態がよくわかる。前記②部分の切刃端中央⑦部分を拡大すれば **Photo.5** となる。⑥部分より摩耗部分はやや少なくなっているものの、各所に炭化物粒子の脱落痕が認められ、また③部分の一部切刃端中央部の拡大像⑧をみても同様な摩耗が認められる。ここで⑦、⑧部分のほぼ中央部をさらに拡大すれば **Photo.4** 中のそれぞれ⑫、⑬となり、いずれも⑪の場合と同様な炭化物粒子の脱落状態を示している。これら⑥、⑦、⑧部分で共通していることは Si が切刃端に付いていること、炭化物粒子の大きな脱落部分と思われるところで W, Ti とくに Co が少ないこと、および C が一様に付着していることである。この切刃端では **Photo.2** 付図に示される形状で摩耗しているので、切削中はこの部分に被削材が詰まり切刃端から約 $100\mu\text{m}$ の幅で切刃に沿ったプラトー部が形成され、この上を擦過した切屑がプラトー部後方から直接工具に接触してクレタを形成する。このためプラトー部では切削熱のため工具材質中の Co が堆積した被削材中へ拡散することが考えられ、このことは **Photo.3**, **Photo.5** にみられる凹み部分で Co が著しく減少している現象とよく一致している。この部分での

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.3 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of front part on edge side of P10 tool.

摩耗は被削材中の硬質粒子による引掻き作用ではなく、むしろプラトー部を形成している被削材中への Co の拡散が生じ、この部分の結合強度が低下し、やがて粒子個々の単位で脱落することで進行すると思われる。このことは **Photo.4** の⑪、⑫、⑬で炭化物粒子にくずれた粒子がなく1個、1個が丸味を帯び、その間にすきまが認められることより明らかとみてよい。

比較的摩耗部分が少なくなっている④部分のほぼ中央部⑨を拡大したものが **Photo.6** である。摩耗面には切屑の擦過痕があり、炭化物粒子が掘り起されたと思われる凹み

Photo.4 Various aspects of secondary electron micrograph on worn face of P10 tool.

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.5 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of center part on edge side of worn P10 tool.

部分に Si が多いこと、後述の未摩耗部分⑩に比べて Co が少ないことなど特徴的である。⑨の中央部をさらに拡大すれば Photo.4 中の⑭となり、炭化物粒子の境目がしだいはっきりし、やがて掘り起される様相がよくわかる。写真左側の平坦部分は被削材中の硬質粒子によって引掻き取られた様相を示し、右側部分では切刃端の摩耗と同じ傾向を示している。また、⑤部分のほぼ中央⑩部分を拡大すれば Photo.7 となり、工具研削時の条痕が明らかに残っており、研削による炭化物粒子の脱落痕と思われる部分以外で

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.6 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of terminal wear part of worn P10 tool.

は Co も比較的全面に分布している。その中央部⑩のさらに拡大した Photo.4 ⑮をみても、未摩耗部分の工具表面状況がよくわかる。切刃端から 100~400 μm のクレータ部分では主に引掻きによる摩耗が進行するが、この部分で局部的に工具粒子が掘り起されたり、あるいは工具研削条痕の凹みに切屑が流れこむと Co の拡散が生じ、写真⑭の右側にみられる摩耗が生ずるものと思われる。

一方、Photo.8 は生成された切屑裏面の拡大像で、切屑の流出方向は写真中右上りの対角線方向であるが、写真にみられる流れの間隔は Photo.6 にみられる炭化物粒子の大

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.7 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of overran part of crater of worn P10 tool.

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.8 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of cross section of chips in dry cutting with P10 tool.

きさにはほぼ一致しており、硬い珪素粒子などが TiC, WC の粒子をわずかに引掻き、その後を軟らかい活性なアルミニウムが擦過してメカノケミカル的に摩耗は進行するようである。また、TiC 粒子の Ti と Al は親和性が強いいため、TiC 粒子中の Ti が活性なアルミニウムと結合して持ち去られ、WC より TiC の方が硬いにも拘わらず摩耗が進行すると思われる。このため TiC 粒子の C が遊離され、Photo.1 などにみられるように工具すくい面に付着したとみられる。この現象は前報⁽⁴⁾で AC8A-T6 材を TiC を主成分とするサーメット工具で切削した場合の炭素の特性 X 線像において、工具と付着物の境界部分に炭素粒子の塊が観察されたことと一致すると思われる。なお、切屑裏面からは W, Ti, Co などの工具元素の検出はできなかった。

工具付着物について調べた結果を Fig.1 上段に示す。線分析方向は Photo.1 ⑩ 方向で、電子線径は約 1 μm である。図より Co は切刃端から約 300 μm までは少ないが、その後は除々に増大している。Ti と W は 150 μm 程度まではやや少ないが、それ以後はほぼ一定値を示し、ともに同じ傾向を示している。Si は切刃端に多く付着し 600 μm

Fig.1 Characteristic X-ray intensity in depth direction of crater at 470 μm from tool edge of P10 and K10 tool.

をすぎる付近からやや少なめになっているが、その後もずっと付着している。Al は切刃端に Si ほど多くは付いていないが、それ以外は Si の付着傾向と似ている。線分析は $800\mu\text{m}$ のところで止めてあるが、約 $850\mu\text{m}$ まで付着が認められた。なお、④、⑤の結果も⑧と似た傾向を示した。

IV. K10 工具についての観察

Photo.1 右側は P10 工具の場合と同様に K10 工具におけるすくい面摩耗の全体像と拡大観察、元素面分析部分お

よび線分析方向を示す説明図である。写真にみるように P10 工具に比べて工具面もきれいで、摩耗も比較的少ないことがわかる。P10 工具の場合と同様、切刃部 ①、②、③およびやや内部の ④、⑤部分の拡大写真を **Photo.9** に示す。掘り起された凹み部分は P10 工具よりも少なく、炭素の付着もないようである。右下に示す表面形状より、クレータ深さは約 $1\mu\text{m}$ と P10 工具に比べて小さく、クレータ幅も小さくなっている。しかし、摩耗量は少ないが表面形状は P10 工具とはほぼ同様であることから、摩耗形態も類似しているとみてよい。このうち①部分中とくに摩耗が

Photo.9 Secondary electron micrographs of various parts on worn face of K10 tool.

K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.10 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of worn tip of K10 tool.

激しい⑥部分の拡大像は **Photo.11** のようになり、P10 工具の場合より炭化物粒子が細かく脱落しているようで、とくに切刃端より約 $20\mu\text{m}$ の領域幅で摩耗が著しく、摩耗部分に Si, Al が多く付着し、この部分では Co が少なくなっている。⑥部分中摩耗の著しい個所をさらに拡大すれば **Photo.11** ⑩ のようになり、炭化物粒子が全体として細かく、その脱落も P10 工具の場合より極めて小さくなっている。この場合も切刃端に被削材によってプラトー部が形成され、その付着物中に切削熱によって Co の拡散が生じ、摩耗が進行するものと思われる。前記②部分の中央切

K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.11 Various aspects of secondary electron micrograph on worn K10 tool.

刃付近⑦を拡大した **Photo.12** をみても、切刃端より約 20 μm 程度の幅の領域で摩耗が甚だしく、その部分で Si, Al が多く、Co が少ない。それをさらに拡大した **Photo.11** 中の⑩をみても⑩の場合ほどではないが、炭化物粒子の脱落状態がよくわかる。この写真上半分では⑩と同様な Co の拡散による摩耗が進行しているが、下半分では P10 の場合の **Photo.4** ⑫の一部にみられた平坦部と同じ表面状態で、摩耗の初期段階と考えられる。

P10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.12 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of middle part on edge side of worn K10 tool.

K10-Tool, AC3A, Dry Cutting

Photo.13 Secondary electron and characteristic X-ray micrographs of overran part of crater of worn K10 tool.

工具摩耗が極めて少ないと思われる④部分の中央部⑧を拡大すれば **Photo.13** となり、写真中、上下方向に工具研削時の条痕と斜め左上方から右下方にかけての切屑擦過による条痕とが交叉して認められ、工具研削傷と思われる部分に Si が付着している。さらに、その中央部と思われる部分は **Photo.11** ⑫のようになり、斜めに走った切屑擦過痕と同写真中のほとんど摩耗していない部分⑬の中にみられる上下方向の研削条痕のちがいははっきり示している。すなわち⑫の場合の傷は比較的浅く、⑬では砥粒がかなり強く研削した跡がみられる。⑫では切屑が擦過して⑬にみられる条痕を徐々に削り取り、表面がいくぶんだれた状態で滑らかになり、P10 工具の場合と同様に主として硬い珪素粒子などによる引掻きと、軟らかいアルミニウムとの交互の接触によるメカノケミカル的な摩耗が進行すると思われる。この場合も擦過する切屑中への Co 拡散は考えられるが、引掻きによる作用の方が大きいと思われる。

工具付着物の線分析結果は Fig.1 下段のようになる。Co は 300 μm まで少しずつ減少した後増加して 400 μm 前後から再び減少し、600 μm を過ぎる付近からまた増加している。W は切刃端で少し減少しているようであるが、その後はほぼ一定の値を示している。Si は P10 工具の場合と同様に切刃端で多く、クレータ後方の 300~600 μm 付近にも比較的多くみられ、Al はほぼ 600 μm まで一様に付着しており、その後は少なくなっている。

V. 検 討

両工具とも、切刃端においては Co の拡散によると思われる炭化物粒子の脱落、クレータ部においては硬い珪素粒子などの引掻き作用による摩耗、そして部分的に掘り起された凹みでは切刃端と同様な形態で摩耗が進行すると思われる。このような摩耗は展伸材超々ジュラルミンの乾式切削⁽⁵⁾でも観察されたが、湿式切削⁽³⁾では観察されなかった。これは湿式切削では切削温度が高くないためで、乾式切削では 700~900 K と切削温度も高く、切屑も活性であるため Co の拡散が起ると考えられる。このため工具表面の Co 濃度の変化を知ることは摩耗機構を考える上で極めて重要である。いま、電子線径を約 70 μm と大きくして Fig.1 に示されたとはほぼ同じ場所を走査して **Fig.2** を得た(ビーム径が大きいため切刃端付近での分析精度は良くない)。P10 工具では Co 強度はほぼクレータの最も深いと思われる 300 μm すぎまで徐々に減少した後、クレータが完全に終る 500 μm までやや増加、クレータ後方の付着物の多いところで減少、付着量のピークをすぎて徐々に増加、その後付着物が全くなくなる 850 μm まで増加してほぼ一定値をとるようになる。すなわち、Co 強度は摩耗部分および付着物の付いた部分で減少していることがわかる。Co が減少することは焼結強度の低下であり、表面的にはほとんど摩耗していないクレータ後方でも強度が低下して

いることがわかる。W, Ti も切刃端からクレータにかけてやや減少しているものの、Co ほどではなく、クレータ後方の付着物領域での減少もわずかである。

Fig.2 Characteristic X-ray intensity by using bold electron beams in the same case of Fig.1.

K10 工具でも同様な傾向がみられるが、P10 工具よりも摩耗が少ないため、切刃端からクレータ底までの Co の減少は少なく、クレータ後方の付着物も少ないため、この部分における Co 量も P10 工具よりは相対的に多くなっている。前述の写真のように炭化物粒子の大きさは K10 工具の方が細かく、残存 Co 量も P10 工具よりも多くなることも K10 工具の耐摩耗性が良い原因の 1 つと考えられる。

VI. 結 言

以上、超硬合金工具 P10 および K10 によるシルミン (AC3A) の乾式切削において、すくい面摩耗の見地から EPMA によって工具摩耗を検討した。その結果、両工具とも切刃端およびすくい面上の掘り起された凹みでは Co の拡散による炭化物粒子の脱落が観察され、クレータ部では被削材中の硬い珪素微粒子などの引掻きによる摩耗の進行が観察された。工具表面に残存している Co 量は P10 工具より K10 工具の方が多く、このため K10 工具では工具摩耗の進行が遅いことがわかった。

本報の実施に当り、その費用の一部は(財)軽金属奨学会の研究資金により、試料入手には前田軽金属工業株式会社木村勝一氏に負うところが大きかった。付記して深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) 財満鎮雄, 鈴木康夫, 奥島裕樹, 山田 茂: 軽金属, **31**, 5 (1981), 341.
- (2) 財満鎮雄, 高辻雄三, 奥島裕樹, 山田 茂: 軽金属, **31**, 6 (1981), 378.
- (3) 財満鎮雄, 高辻雄三, 奥島裕樹, 山田 茂: 軽金属, **31**, 10 (1981), 660.
- (4) 財満鎮雄, 高辻雄三, 山田 茂: 日本金属学会誌, **46** (1982), 452.
- (5) 財満鎮雄, 高辻雄三, 山田 茂, 奥島裕樹: 日本金属学会誌, **46** (1982), 108.