機械構造用鋼の被削性におよぼす微量元素低減の影響*

北川 亮 三^{*1}, 今井 達 也^{*2}, 赤澤 正 久^{*3}

The Effect of Reduced Amounts of Inclusions on the Machinability of Engineering Steels

Ryozo KITAGAWA, Tatsuya IMAI, and Tadahisa AKASAWA

The effect of a decreased content of impurities in steel on machinability was studied by means of turning tests using cemented carbide tools. Low-carbon boron steels and medium-carbon steels were used as the work materials. The machined surfaces were examined by the use of a scanning electron microscope and an electron probe micro analyzer. The results of the investigation show that imperfections such as voids on the surface layer are produced even when workpieces are machined at high speeds without built-up edges. It is shown that the void formation is associated with inclusions and the occurrence of voids is reduced with a decreased content of inclusions. It is found that the surface damage decreased during the machining of calcium deoxidized free-machining steels owing to the formation of a nonmetallic layer on the tool flank.

Key Words: Inclusion, Machinability, Machined Surface, Calcium-Deoxidized Steel

1. 緒 言

最近の製鋼段階での取鍋精練技術の進歩⁽¹⁾によって各種の冶金操作が行われ、鋼中の微量元素や介在物を著しく低減した高純度な鋼の製造が可能になってきた。例えば、冷間鍛造用の鋼では硫黄 S が 0.01~0.005 % 程度だったものが、その含有量は 0.001 % 程度まで低減することが可能になっている。

しかし、鋼の冷間鍛造性やその他の使用性能向上のため高純度の鋼を製造しても、機械部品の製造工程では何らかの切削加工を施される場合も多く、その被削性の良否は部品加工の生産性に大きく影響するものと考えられる。

硫黄快削鋼の被削性については詳しい研究⁽²⁾が行われたが、0.01 % 以下に S を下げることが被削性に対してどのような影響をおよぼすかについての研究は少ない。また、切削後の被削材(鋼)の表面性状についても研究^{(3)~(6)}がなされているが、鋼の高純度化で減少する介在物が切削加工時の被削材の表面性状とどのよう

な関係を持つかについて研究されていない。

そこで、この研究では焼戻しマルテンサイト一相組織の鋼として低炭素ボロン鋼、フェライトとパーライトの二相組織の鋼として炭素鋼 S45C を溶製して実験に用いた。これらの切削実験と走査形電子顕微鏡(SEM)による観察などをもとに、鋼中に含まれる微量元素や介在物の低減が鋼の被削性にどのような影響をおよぼすかについて検討した結果を報告する。

2. 実験方法

この実験に用いた被削材は低炭素ボロン鋼(ボロン鋼)と炭素鋼(S45C)を溶製した。ボロン鋼の化学成分、酸化物系介在物組成、硬さなどを表 1 に示した。

被削材 LD は転炉で溶製し、肉厚 10 mm の継目なし鋼管に加工したのち、1173K から焼入れし、823K で焼戻しを行い、焼戻しマルテンサイトの一相組織とした。表 1 に示した被削材 A, B, C, D は 300 kg 容量の真空炉でそれぞれ溶製し、LD と同様に肉厚 10 mm の継目なし鋼管に加工した。これらの被削材の熱処理条件は LD と同じで、その金属組織も同様である。

表 1 に示した被削材 A は酸素含有量 O が低いほかは LD と同じ組織である。被削材 B はカルシウム Ca が若干添加されていて、A より窒素含有量 N が若干

* 昭和 63 年 7 月 13 日 九州支部鹿児島地方講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 11 月 26 日。

^{*1} 正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台 2557)。

^{*2} 新日鐵(株)第 2 技術研究所(〒229 相模原市淵野辺 5-10-1)。

^{*3} 日鐵超硬(株)(〒101 東京都千代田区鍛冶町 1-4-3)。

高い。被削材 C はリン P, 硫黄 S 含有量が A よりも低い。被削材 D は A と比べて P, S 含有量低く, N 含有量が高い。

旋削後の仕上面性状の評価は走査形電子顕微鏡による表面の観察により行い, 欠陥部の分析は X 線マイクロアナライザ (EPMA) で行った。

この実験による評価の目的は切れ刃りょうが仕上面に正確に転写されているか否かであり, 切りくずと被削材との分離が正確に切れ刃りょうで起こらなかった場合に, それが被削材中の介在物といかなる関係にあるかを検討した。

つぎに, フェライトとパーライトの二相組織をもつ S45C について, 鋼中の微量元素の調整による工具寿命および表面性状への影響を調べた。

表 2 は工具寿命への S の影響を調べた S45C 転炉溶製材の化学成分である。この S45C は 1143K で焼ならしたフェライトとパーライトの二相組織であり, 直径 100 mm, 長さ 500 mm の形状である。S45C-OS と S45C-LS の成分を見ると, S 含有量以外ではほとんど化学成分に差はない。

表 3 は表面性状への影響を調べた S45C の化学成分を示す。S45C は通常のものであり, S45C・S1 は S 含有量を高めたほかは通常の成分である。S45C・Pb は鉛快削鋼, S45C・ZS はカルシウム脱酸調整快削鋼 (Ca

快削鋼) である。これらの被削材には表 2 の材料と同一の焼ならし処理を行い, その金属組織はフェライトとパーライトの二相組織である。

切削実験はすべて旋盤による丸棒の外周削りであり, 高速度鋼工具のときは水溶性油剤を用いたが, 超硬工具のときはすべて乾式旋削である。なお, 切削条件は, 実験結果を示した図や写真に併記した。

3. 実験結果

超硬工具 P10 を用いて切削速度 150 m/min でボロン鋼を旋削した。この実験で得られた切削時間と工具逃げ面摩耗 VB の変化の関係を図 1 に示した。この実験から真空溶解した被削材 A, B, C, D と比べ, 転炉溶解後大気中で造塊した LD の工具摩耗は大きい。一方, Ca 脱酸の B は最も小さい工具摩耗を示し, P と S の最も低い被削材 C が続いている。

つぎに, このボロン鋼の切削仕上面の性状におよぼす微量元素低減の影響を調べる旋削実験を行った。その切削速度は 80 m/min と 150 m/min の 2 速度で, 被削材 A~D を乾式旋削した。そして, それぞれの被削材の表面性状を調べるため, SEM による仕上面の観察と EPMA による介在物の分析を行った。

図 2 は被削材 A, C について切削速度 80, 150 m/min で旋削したときの仕上面を示す SEM 写真であ

表 1 表面性状におよぼす微量成分の影響を調べたボロン鋼

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	B	Ca	N	O	HV
A	0.14	0.29	1.28	0.012	0.0096	0.027	0.024	0.0021	-	0.0023	0.0013	240
B	0.13	0.30	1.32	0.013	0.0060	0.033	0.029	0.0023	0.001	0.0045	0.0010	238
C	0.13	0.25	1.30	0.0001	0.0008	0.027	0.020	0.0020	-	0.0020	0.0014	237
D	0.13	0.28	1.42	0.0004	0.0014	0.032	0.026	0.0021	-	0.0059	0.0013	236
LD	0.13	0.27	1.33	0.016	0.0090	0.020	0.019	0.0018	-	0.0028	0.0055	243

表 2 工具寿命におよぼす S 含有量の影響を調べた S45C

Steel	C	Si	Mn	P	S	O	N	SiO ₂	Al ₂ O ₃
S45C-OS	0.42	0.27	0.77	0.021	0.024	0.003	0.0045	0.001	0.002
S45C-LS	0.42	0.23	0.77	0.018	0.006	0.002	0.0046	0.001	0.003

表 3 表面性状におよぼす S, P, Ca の影響を調べた S45C 相当鋼

Steel	C	Si	Mn	P	S	Al	Pb	Ca
S45C	0.43	0.25	0.78	0.020	0.024	0.031	-	-
S45C S1	0.42	0.23	0.96	0.013	0.046	0.027	-	-
S45C Pb	0.46	0.27	0.76	0.010	0.016	0.025	0.17	-
S45C ZS	0.46	0.26	0.82	0.018	0.042	0.003	-	0.003

る。図2から、PとS含有量の多い被削材Aでは、80 m/minで送りマークの間の工具切れ刃りょうが転写されるべき部分に微小なボイドが多く見られる。このボイドは切れ刃りょう通過面の下の被削材回転軸方向へのくぼみであり、くぼみの底面より上方にあった被削材がはく離した跡であることを示している。被削材Aのボイド数は切削速度が高くなってもほとんど減少していない。一方、PとS含有量の少ない被削材Cでは切削速度80, 150 m/minともボイドはほとんど見られない。

図3は、被削材Aとほとんど同じ化学成分をもち、Ca脱酸調整された被削材Bを切削速度150 m/minで旋削したときのSEM写真である。被削材Aのそれ

よりもはるかに少なかったが、被削材Bではボイド発生頻度は被削材Cよりは多かった。

ボイドをSEMで観察したところ、ボイドの底部には切れ刃の移動方向に沿った摩耗こんが見られなかった。このことから、これらのボイドは被削材の表面はく離が切れ刃の運動方向前方の表面層内で起こった跡と推定された。そこで、ボイドの底をEPMAで表面分析を行った。

S含有量の多い被削材A, Bでは図4のようにボイド底部にMnSが検出された。被削材CのP, S, O含有量は極めて少なく、このような高純度の鋼ではボイドの発生頻度は小さかった。しかし、図5のように被削材Cでも数少ないボイドの底にはアルミナ系介在物が検出された。被削材Dのボイドには図6のように、TiとNが同一箇所検出された。

つぎに、表2に示した被削材を用いて超硬工具および高速度鋼工具による旋削加工の工具寿命に与える炭素鋼S45C中のS含有量低減の影響を調べた。

図7は超硬工具P20を用いた寿命試験の結果であり、図8は高速度鋼工具SKH9を用いた寿命試験の

図1 ボロン鋼の微量元素と工具摩耗の関係

図2 ボロン鋼の微量元素と表面性状の関係
(切削条件は切込み0.8 mm, 送り0.1 mm/rev, 乾式旋削。被削材A, CのSEM写真を示す)

図3 ボロン鋼Bの表面性状を示すSEM写真
(切削速度150 m/min, 切込み0.8 mm)

図4 ボロン鋼Bで見られたMnS介在物

図5 ボロン鋼Cで見られた Al_2O_3 介在物

結果である。いずれの工具を用いた場合でも S 含有量が 0.024 % から 0.005 % へと減少すると、逃げ面摩耗幅 $VB=200\text{ }\mu\text{m}$ を寿命基準とした工具寿命は短くなっていることが認められた。

表 3 に示したフェライト-パーライトの二相組織をもつ S45C 相当鋼を超硬工具 P10 で高速旋削し、快削

成分が仕上面性状にどのような影響を与えるかについて SEM を用いて観察した。

図 9 は S45C の各被削材を切削速度 150 m/min で旋削したときに生じた仕上面の SEM 写真である。

S45C, S45C-S1, S45C-Pb では、構成刃先の生成領域を越えたこのような切削速度であっても、仕上面には多数の送りマーク以外の凹凸など表面の乱れが認められた。しかし、刃先に付着物⁽⁷⁾が生成する Ca 快削鋼 S45C-ZS ではボイドの発生がほとんど認められない。表面に見える白点は小さな鉄片が付着したもので表面欠陥ではない。

4. 考 察

ボロン鋼を大気溶解と真空溶解で溶製し、超低硫黄低酸素による被削性への影響を調べた実験⁽⁸⁾で、S の少ない鋼でも工具表面に Mn, Al の酸化物などの保護作用で工具摩耗が抑制されることが指摘されている。本研究でも Ca 脱酸の被削材 B は最も良い工具寿命を示し、次に P, S の少ない被削材 C が良い工具寿命を示した。被削材 LD の工具摩耗速度が大きかったのは、

Steel D, P10, dry cutting, f: 0.1 mm/rev, d: 0.8 mm

図 6 ボロン鋼 D で見られた TiN 介在物

Tool : P20(-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8)
Feed : 0.25 mm/rev
Depth of cut : 2.5 mm
Dry cutting

図 7 S45C 中の S 含有量と工具寿命の関係 (超硬工具を用いた場合)

Tool : SKH9(-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.8)
Feed : 0.1 mm/rev
Depth of cut : 1 mm
Wet cutting(JIS W1-2) 2 l/min

図 8 S45C 中の S 含有量と工具寿命の関係 (高速度鋼工具を用いた場合)

切削速度 150 m/min, 切込み 0.8 mm
送り 0.1 mm/rev, 超硬材種 P10
工具形状 (-6, -6, 6, 6, 15, 15, 0.4)
チャンファ幅 すくい面上 15 μm

図 9 S45C 相当鋼の仕上面 SEM 写真

大気溶解のため、表1の化学組成よりわかるように、超硬工具に対してアブレイブな作用をする Al_2O_3 系介在物が真空溶解と比べて多いためである⁽⁸⁾。

Gillibrand⁽⁶⁾は図4~6に示したような表面欠陥は、フェライト-パーライトのような二相組織内の相境界で起こり、純鉄のようなフェライトだけの一相組織の金属では起こらないと述べている。しかし、本研究のボロン鋼のように、焼戻しマルテンサイトの一相組織の鋼であっても鋼中の微量元素含有量の高低は介在物の量と分布に影響し、旋削後の表面性状に大きく影響することがわかった。工業的な鋼では、介在物を絶滅することは不可能であり、このような介在物に基づく欠陥を零にすることは極めて困難である。

したがって、一相組織の鋼⁽⁶⁾でも、介在物という第2相が存在し、それが原因となって仕上面にボイドが生成する。しかし、鋼を高純度化して微量元素を低減して介在物を減少させれば、ボイドの発生は少なくなることが本研究で示された。また、Ca快削鋼では鋼中の介在物が工具逃げ面で軟化して潤滑作用⁽⁷⁾をもつので、ボイドの発生を低減できる。ボロン鋼のうち、被削材Bの溶製時にはCaが添加されていて、その低融点介在物が鋼中に残留しており、これが逃げ面で潤滑剤として作用し、S含有量が比較的高いにもかかわらず、ボイドの発生は少なかった。

切削仕上面におよぼす鋼の組織の影響について実験したボロン鋼は焼戻しマルテンサイトの一相組織である。実用鋼には非金属介在物、析出物などが若干含有されているので、ここで用いた一相組織とは、Gillibrandの定義⁽⁶⁾による。切削時には工具逃げ面による圧縮、せん断変形、解放のプロセスが被削材の表面層内で起こる。その際、その層内に変形能に差のある層が混在し、相界面の接着強度がせん断変形に耐えられなければ、相界面でき裂が発生する可能性がある。類似の現象をSuhら⁽⁹⁾もスライディング摩耗について指摘しているが、き裂の発生する箇所として硬さの大きい粒子としている。き裂の発生は、本実験で示されたように、必ずしも硬い介在物の周辺で起こるのではなく、周辺組織よりも柔らかいMnS⁽¹⁰⁾の周囲でも起こっている。単に硬さだけでなく、各相間の接着強度などの要因が影響していると推察される。

Bailey⁽³⁾⁽⁵⁾やWallbank⁽⁴⁾は旋削による被削材の表面性状を工具の逃げ面摩耗と関連させ、後者⁽⁴⁾は被削材にも影響されると述べているが、被削材の微量成分との関係は検討されていない。前述したGillibrand⁽⁶⁾は0.35% Cの炭素鋼と純鉄について実験し、表面性状は第2相組織(パーライト)の存在に影響されると述べている。構成刃先の生成しない切削条件下で二相組織をもつS45Cを旋削すると図9のように表面性状は悪くなる。しかし、S45C・ZSのように逃げ面で一種の潤滑状態であれば図9のSEM写真のようにボイドは生成されず、Gillibrand⁽⁶⁾の指摘した現象は起こっていない。切削条件を選定し、ベラーク生成領域⁽⁷⁾で旋削すれば、表面性状は改善されることがわかった。

5. 結 言

ボロン鋼、S45Cを被削材として被削性におよぼす鋼中の微量元素低減の影響を調べた結果、つぎのことが明らかになった。

(1) 構成刃先を生成しない高速切削で仕上面に生成する微細なボイドはいわゆる一相組織であっても鋼中の介在物が原因となって発生する。鋼中の微量元素を低減させて介在物や析出物を減少させれば、ボイドの発生は減少し、旋削後の表面性状は良くなる。

(2) フェライト-パーライトの二相組織の鋼を高速切削すると相境界などで破壊が起こり、微細なボイドを生成するが、Ca脱酸鋼では工具刃先面に生成する付着物のため、ボイドの生成は少なくなる。

(3) 鋼中のS含有量を低減させると、超硬工具や高速度鋼工具の工具寿命は若干短縮される。

文 献

- (1) 飯田、鉄と鋼、67-2 (昭56)、230.
- (2) 白井、機械試験所報告、43 (昭36)、1.
- (3) Bailey, J. A., *Wear*, 27 (1974), 161.
- (4) Wallbank, J., *Wear*, 56 (1979), 391.
- (5) Bailey, J. A., *Wear*, 42 (1977), 277.
- (6) Gillibrand, D., *Precis. Eng.*, 1-2 (1979), 89.
- (7) 切削性専門委員会、精密機械、37-5 (昭46)、331.
- (8) 赤瀬・ほか2名、鉄と鋼、'80-S1262 (昭55).
- (9) Jahanmir, S. and Suh, N. P., *Wear*, 44 (1977), 17.
- (10) Chao, H. C., Van Vlack, L. H., Oberin, F. and Thomas, L., *Trans. ASM*, 57 (1964), 885.

討 論

〔質問〕 末 吉 秀 一〔鹿児島大学工学部〕

仕上面性状におよぼす微量元素の影響について検討しておられるが、実際にはそれらの元素は主に介在物として鋼中に存在している。この場合、介在物の成分だけでなく硬さも影響すると思われるがいかがか。

〔回答〕 鋼を高純度化して微量元素を低減させれば、本研究で示したように鋼中の介在物は減少する。このため、仕上面性状に影響するボイドの発生は少なくなる。一方、切削加工時に鋼の表面層は工具逃げ面

より圧縮、せん断変形、解放などのプロセスを受ける。この過程で層内にある変形能に差がある層が混在しているので、相界面でき裂の発生する可能性も考えられる。Suh⁽⁹⁾によれば、き裂の発生箇所は硬さの大きい粒子としている。しかし、本研究ではこのき裂発生は必ずしも硬い介在物の周辺で起こっているのではなく、周辺組織よりも柔らかいMnSの周辺で起こっている。このことから、仕上面性状に影響を与える介存物は単に硬さのみでなく、各相間の接着強度などの要因があると推察している。