UDC 669.14.018.23:669.15'891-194.2:620.192.45

621.9.011-97

Ca 快削鋼中の酸化物系介在物融点と切削温度の 関係について*

伊藤 哲朗** 高橋 徹夫***

木村 篤良*** 山野 清市***

Relation between Cutting Temperature and Melting Point of Oxide Inclusion in Calcium Bearing Free-Machining Steels

Tetsurô Itô, Tetsuo Takahashi,

Atsuyoshi Kimura and Kiyoichi Yamano

Synopsis

Melting various kinds of calcium bearing free-machining steel whose oxide inclusions are different respectively, an investigation was made about the relation between the melting point of oxide inclusion and the cutting temperature that exerts P10 grade cemented carbide tool life.

1. The composition of oxide inclusion is affected by deoxidizer such as CaSi, Al, FeSi etc. and it gives influence to the melting point of oxide inclusion.
2. The tool life will be improved if the ratio between the melting point of oxide inclusion and the cutting temperature is adjusted to about 1.7. In this case, the "Belag" grows much.
3. Comparing HMn-S20C and S45C with S20C the cutting temperature is higher and accordingly the melting point of oxide inclusion is to be raised so as to meet the rising degree of the cutting temperature.

1. 緒 言

Ca 快削鋼は超硬工具、とくにTiCを含む超硬工具で切削したとき、工具寿命が長くなるという特徴をもっている。この原因として、Ca 快削鋼中の酸化物系介在物が切削時の温度、圧力により工具一切くず界面で軟化あるいは溶融して工具に付着し、この付着物層（ドイツ語で Belag と呼ぶ）が工具形成元素の切くず中への拡散を防ぎ工具摩耗を抑制すると考えられて

いる^{1)~8)}。

しかし Ca 快削鋼といっても脱酸に用いる Ca 合金の種類、使用法、他の脱酸剤との併用によって鋼中の介在物組成、形態は容易に変化するものであり、鋼種によっても大きく様子が異なってくる。そこで Belag 生成を最も望ましい状態にし最良の被削性を得るには、鋼中の酸化物系介在物を鋼種および切削条件に適合した組成に調整することが大切とされている⁴⁾。

本報では、Belag 生成に対して依存度の高い Ca 快削鋼中の酸化物系介在物融点と、切削時の平均切削温度との関係について C, Mn の異なった 3 鋼種について検討した。

昭和47年10月28日受付

*日本鉄鋼協会第84回講演大会(昭47年秋)で発表

**大同製鋼株式会社研究開発本部中央研究所, 工博

***大同製鋼株式会社研究開発本部中央研究所

2. 実験方法

2.1 供試材の製造方法と化学成分

供試材は、S20CとMn含有量を1.4%に高めた

HMn-S20CおよびS45Cを基本成分としたものを、2tアーク炉で溶解したのち、下注造塊で1.3t鋼塊にした。Table 1に供試材の脱酸方法、化学成分、焼ならしかたを示す。

Table 1. Chemical composition, hardness and conditions of heat treatment of steels tested.

Steel grade	Specimen No.	Deoxidation	Chemical composition (wt%)								Hardness (H _B)	Heat treatment
			C	Si	Mn	P	S	SAI	Ca	O		
S20C	A 1	FeSi+Al	0.19	0.25	0.70	0.022	0.022	0.023	<0.001	0.006	144	900°C ×2hr AC ^①
	A 2	CaSi+Al	0.19	0.25	0.61	0.016	0.028	0.004	0.002	0.011	145	
	A 3	CaSi+FeSi	0.19	0.24	0.62	0.020	0.030	0.003	0.002	0.010	146	
	A 4	CaSi+FeSi	0.20	0.27	0.58	0.018	0.015	0.002	0.002	0.010	146	
	A 5	CaSi+FeSi	0.20	0.17	0.61	0.012	0.017	0.001	0.001	0.011	147	
	A 6	CaSi+FeSi	0.21	0.27	0.69	0.019	0.018	<0.001	0.001	0.011	146	
HMn-S20C	B 1	FeSi+Al	0.17	0.34	1.41	0.015	0.018	0.022	<0.001	0.005	156	900°C ×2hr AC ^①
	B 2	CaSi+Al	0.18	0.33	1.42	0.025	0.024	0.008	0.001	0.006	158	
	B 3	CaSi+FeSi	0.19	0.28	1.44	0.021	0.029	0.004	0.002	0.009	160	
	B 4	CaSi+FeSi	0.19	0.31	1.35	0.020	0.028	0.002	0.002	0.008	154	
	B 5	CaSi+FeSi	0.20	0.32	1.48	0.020	0.026	0.001	0.002	0.011	160	
	B 6	CaSi+FeSi	0.17	0.29	1.35	0.023	0.026	0.001	0.001	0.009	157	
S45C	C 1	FeSi+Al	0.46	0.27	0.67	0.018	0.022	0.025	<0.001	0.004	192	850°C ×2hr AC ^①
	C 2	CaSi+Al	0.47	0.31	0.72	0.018	0.022	0.015	0.004	0.007	205	
	C 3	CaSi+Al	0.48	0.23	0.74	0.021	0.022	0.008	0.002	0.007	203	
	C 4	CaSi+FeSi	0.44	0.26	0.69	0.016	0.019	0.006	0.003	0.006	193	
	C 5	CaSi+FeSi	0.44	0.27	0.66	0.023	0.015	0.004	0.004	0.010	193	
	C 6	CaSi+FeSi	0.46	0.25	0.67	0.016	0.012	0.004	0.003	0.008	195	
	C 7	CaSi+FeSi	0.48	0.23	0.63	0.016	0.019	0.002	0.001	0.008	200	

A-1, B-1, C-1はFeSi(JIS2号)と金属Alで脱酸した基本鋼である。他のシリーズはCaSiにAlないしFeSiを適宜組み合わせて脱酸処理し、酸化物系介在物を高融点から低融点の種々異なる組成に調整した。

Ca快削鋼中に含まれるCa量は、鋼種によっても差が認められるが0.001~0.004%の範囲にあり、基本鋼は0.001%以下である。酸素量は基本鋼に比較し、Ca快削鋼は若干高くなっている。

試験材は、鋼塊を100φmmに熱間圧延したのちTable 1に示す条件で焼ならし処理した。

2.2 非金属介在物の測定

供試材中の酸化物系介在物組成を調べるため下記の方法で測定した。また同一試料で顕微鏡観察を行った。

(1) Br-メタノール法による介在物分析

S20CおよびHMn-S20CのCa快削鋼は、Br-メタノール法と呼ぶ抽出分離分析法により平均組成を求めた⁵⁾。

(2) EPMAによる介在物分析

Br-メタノール法による分析が困難なS45C系については、EPMA法によった。この分析法の場合に

は、同一試料内での介在物間の組成の差のバラツキがかなりあるため、測定数は少なくとも5点以上とし、著しくバラツキを示すものを除いてその平均値をとった。

2.3 酸化物系介在物の融点測定

Fig. 1 に示すごとく Ca 快削鋼中の酸化物系介在物を、S. Al で相関をとってみると鋼種間によって多少の差も認められるが、S. Al 0.006%以下になると、

SiO₂-Al₂O₃-CaO の3元系に MnO が入った4元系の複合酸化物となる。この SiO₂-Al₂O₃-CaO-MnO 系の4元系酸化物の融点は、現在公表されている3元系状態図から求めることがむずかしいため、試料中の酸化物系介在物平均組成と同一組成となるよう合成酸化物を配合し、20kg高周波誘導炉で溶融均一化したのち粉碎し、高温顕微鏡および三角錐法で融点を測定した。

Fig. 1. Relation between soluble Al% in steels and Al₂O₃, SiO₂ and MnO% in oxide inclusions.

2.4 超硬工具による切削試験

切削試験は無段変速機を内蔵した大隈鉄工製15HP旋盤で、長手旋削を行ない切削温度測定と工具寿命について試験した。切削条件は下記のとおりである。

工具材種：超硬工具 P10種（スローアウェイチップ）

工具形状：-5, -5, 5, 5, 30, 0, 0.4

切削速度：150, 200, 250m/min

送り：0.2mm/rev

切込み：2.0mm

切削油：乾切削

切削温度の測定は Fig. 2 に示すごとく、工具と被削

Fig. 2. Method of measuring cutting temperature with compensating circuit.

材の熱電対法を用い温度補償には、K. J. Trigger の補償回路法によった⁸⁾。この場合平均切削温度として測定される。

3. 実験結果および考察

3.1 非金属の介在物組成、形態および融点

Photo. 1 は、Leitz 高温顕微鏡によるA-4 試料の実測例を、Table 2 は Br-メタノール法および E P M A で求めた酸化物系介在物の平均組成と、合成

Room temperature (20°C)

Beginning of softening (1220°C)

Melting point (1310°C)

Oxide composition (A-4) %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO
48	23	17	12

Photo. 1. The measurement of melting point of oxide compounds with Leitz hot microscope.

酸化物で測定した融点を示す。

Photo. 1 の試料は直径 3 mm、高さ 3 mm の円柱

状にプレス成形したものを白金板台上に設置し、抵抗加熱炉で加熱した。加熱速度は毎分 3～4 °C である。

Table 2. Average of oxide composition in steels and melting point of compounded oxide.

Specimen No.	Average of oxide composition				M. P (°C)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	
A 1	7%	91%	2%	0%*	1950
A 2	47	30	15	8	1420
A 3	51	24	17	10	1350
A 4	48	23	17	12	1300
A 5	45	10	10	35	1160
A 6	46	6	6	42	1120

Specimen No.	Average of oxide composition				M. P (°C)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	
B 1	5%	95%	0%	0%*	2000
B 2	23	62	13	2	1760
B 3	45	35	11	9	1440
B 4	47	32	9	12	1400
B 5	42	17	19	22	1180
B 6	45	24	6	25	1230

Specimen No.	Average of oxide composition				M. P (°C)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	
C 1	2%	97%	1%	0%*	2000
C 2	6	77	17	0%*	1770
C 3	18	57	25	0	1630
C 4	22	52	24	2	1590
C 5	27	40	33	2	1470
C 6	28	39	32	1	1450
C 7	52	25	9	13	1360

1220°Cで軟化が始まり、1310°Cで完全に溶融したため融点とした。一方、同一試料をゼーゲルコンと比較試験し融点をチェックしたところ、両者はかなりよく一致した。なお※は、Alの高いCa快削鋼および基本鋼の高融点酸化物は、測定がむずかしかったので文献報告されている状態図を活用した⁸⁾。

FeSi と金属 Al で脱酸した基本鋼の酸化物融点は1950~2000°Cと高い。Ca 快削鋼の酸化物融点は、CaO 量の多少によって若干差があるものの、 Al_2O_3 の減少と SiO_2 および MnO の増加とともに低融点側に移行する。

Photo. 2 は、光学顕微鏡により観察した酸化物系

Photo. 2. Microphotographs of various types of oxide inclusions.

介在物の代表例である。Photo. 2 (a) は、FeSi+Al脱酸した基本鋼(A-1, B-1, C-1)でみられた Al_2O_3 リッチなストリング状のB系介在物である。Photo. 2 (b) はC系の介在物で鋼中のAl, Caが高い試料たとえば、B-2, C-2, C-3で多く認められた。この介在物は軟化開始点および融点が熱間圧延

温度より高いため変形しない。Photo. 2 (c) は熱間圧延でなめらかに変形した A_2 系介在物で、融点が1350°C以下の試料でみられた。Photo. 2 (d) は A_2 系介在物よりもやや融点が高い試料(たとえば、A-2, B-3など)でみられた介在物で、熱間圧延で変形するものの周辺にでこぼこのある A_2' 系介在物である。

3.2 切削温度の測定結果

Fig. 3 は3鋼種について、 H_B かたさと平均切削温

Fig. 3. Relation between hardness and mean cutting temp. in the S20C, HMn-S20C and S45C steels.

度との関係を切削速度200m/minについて示したもので、C含有量のみが異なるS20CとS45Cを直線で結ぶと、Mnの高いHMn-S20CはS20Cに比べ、 H_B かたさの上昇以上に切削温度が高くなった。これはMnを高めたことによる靱性の向上、パーライト組織の差などが原因として考えられる。

3.3 工具寿命試験結果

Fig. 4, 5 は、S20CおよびHMn-S20Cについて工具寿命判定基準をフランク摩耗幅(V_B) 0.20mmとしたときの工具寿命曲線を示す。ここで V_B を基準としたのは、Ca 快削鋼の場合すくい面にBelagが付着して摩耗の進行が抑制され、すくい面摩耗よりもフランク摩耗の方が、より速く進行するためである。

Fig. 4のS20Cについてみると、切削速度200m/minにおける工具寿命は基本鋼のA-1に比較し

Fig. 4. Tool life curves with cemented carbide tool of S20C.

Fig. 5. Tool life curves with cemented carbide tool of HMn-S20C.

て、A-2、A-3、A-4のCa快削鋼のように酸化物系介在物融点を $1300 \sim 1420^\circ\text{C}$ に調整することにより、5～10倍工具寿命が向上する。しかもV-T曲線の傾斜角が小さいため、低速になるほど基本鋼との寿命差は大きくなる。一方介在物融点を著しく低めたA-5、A-6試験材は、基本鋼並みの工具寿命にとどまった。この理由については後述する。

Fig. 5のHMn-S20Cについてみると、その切削速度 200m/min における工具寿命は基本鋼のB-1に

比較してB-3、B-4のように、介在物融点を $1400 \sim 1440^\circ\text{C}$ に調整すると、4～6倍工具寿命が向上する。介在物融点を $1180 \sim 1230^\circ\text{C}$ に低めたB-5、B-6試験材については、基本鋼の2～3倍の工具寿命にとどまった。

3.4 工具寿命におよぼす介在物融点と切削温度との関係

今まで求めてきた酸化物系介在物融点と平均切削温度との比、 T_{MP}/T_c と工具寿命の関係を切削速度 200

m/minについて整理したものが、Fig. 6, 7である。

Fig. 6. Effect of T_{MP}/T_C on the tool life of cemented carbide tool. (S20C and HMn-S20C steels)

Fig. 7. Effect of T_{MP}/T_C on the tool life of cemented carbide tool. (S45C steels)

Specimen No.	Tool wear and Belag on measuring planes.	Tool life ($V_B = 0.20$ mm)
A-1	Crater depth Cut. time 10 (min) 3 μ	14 (min)
A-2	Belag 3 μ	100
A-3	Belag 3 μ	140
A-4	Belag 3 μ	57
A-5	Belag, Crater depth 3 μ	18
A-6	Belag, Crater depth 3 μ	12

Cutting condition
 Tool: P10 (-5°, -5°, 5°, 5°, 30°, 0°, 0.4)
 Feed: 0.20 mm/rev, Depth of cut: 2.0 mm
 Cutting Speed: 200 m/min, Cut. lub.: non

Fig. 8. Tool wear and Belag on measuring planes. (S20C steels)

Fig. 6についてみると、S20C および HMn-S20C とも工具寿命のもっともすぐれたところは、 $T_{MP}/T_C = 1.7$ 付近に存在し、Fig. 7 の S45C に関しても $T_{MP}/T_C = 1.7$ の狭い範囲に工具寿命のピークがあることが判った。そして Fig. 8 は S20C のすくい面の状態を示したものであるが、 $T_{MP}/T_C = 1.7$ 付近の A-2, A-3 試験材はもっとも Belag の付着量が多く、基本鋼の A-1 および介在物融点を著しく低めた A-5, A-6 試験材は Belag は認められずクレータ摩耗が発生している。これらの傾向は HMn-S20C, S45C にも認められた。ここで鋼種が異なると工具寿命はともに $T_{MP}/T_C = 1.7$ でもっとも良好であるが、曲線の傾向が若干異なってくることがわかる。これは同じ融点をもつ Ca 系介在物を鋼中に含有していても鋼種が異なれば切削温度も異なり工具寿命曲線のこう配も異なるため、工具寿命比は切削速度すなわち切削温度が変化すれば一定とならない。この結果、鋼種によって T_{MP}/T_C と工具寿命の曲線の傾向は異なるわけであるが、主なる原因は各鋼種マトリックスのせん断応力およびせん断ひずみのちがいにありと考えられ、単にかたさだけに起因していないことは Fig. 3 から

も明白である。

この実験結果から、切削温度に対して酸化物系介在物融点が2000°Cの高温となっている基本鋼では、当然 Belag は生成せず、介在物は工具に対してすべてアブレイシブに作用するとともに、工具形成元素は切くず中に拡散され、工具摩耗が進行する。

Ca 快削鋼といえども酸化物系介在物融点によって工具寿命に差が認められるのは、つぎの理由が考えられる。鋼中における介在物組成はE PMA測定などから一定ではなく、かなりの範囲にわたっていることが普通である。したがって、切削温度（速度）に応じて介在物は選択されてBelagになるものと考え⁷⁾、 $T_{MP}/T_c=1.7$ 付近の試験片では Belag の付着量が多く、工具寿命がもっともよいことからみて、工具と接触した介在物の大部分が Belag として付着し、工具摩耗を著しく抑制する。一方 $T_{MP}/T_c=1.7$ よりもやや数値の高い Ca 快削鋼では、全体として介在物は高融点側にあるため、本来はアブレイシブと作用するが、中には低融点の介在物も存在するため、それが Belag として付着し工具摩耗を抑制する。この場合 Belag の付着は完全でないため、工具寿命はいくぶん低下する。他方 $T_{MP}/T_c=1.7$ よりもやや数値の低い Ca 快削鋼では、大部分の介在物は、切削時の温度、圧力に耐えず工具すくい面後方に押し流されてしまうが、一部存在する比較的高融点の介在物がBelagとして働き、工具摩耗の進行を若干抑制するため、Fig. 6, 7のような工具寿命を示した。そして MnO を多量に含む著しい低融点の酸化物系介在物は、すべて工具すくい面後方に押し流されるため、工具摩耗が著しく進行し、基本鋼並みの工具寿命にとどまったものと考えられる。

Fig. 6, 7の結果から、3鋼種の切削速度 200m/minにおける工具寿命をもっともすぐれたものにする酸化物系介在物の融点は、S 48 C Ca 快削鋼では約1450°Cである。S20C系は約1350°Cであり、Mnを1.4%に高めた HMn-S20Cでは、約100°C高い1440°C付近に調整すればよいことがわかった。

なお、本実験に示した切削温度は被削材と工具の熱電対法による平均切削温度であり実際には Fig. 9⁹⁾に示すような温度分布があり、最高切削温度域が存在する。工具寿命に直接影響するのはこの最高切削温度であり K. J. Trigger¹⁰⁾, E. G. Luewen¹¹⁾らによれば最高切削温度は平均切削温度の1.3~1.5倍であるとされている。したがって今回の最高切削温度はS20Cで1200°C、HMn-S20Cで1270°C、S45Cで1300°Cということになるが、これらの温度は切削圧力の影響を

Material cut : 30 Mn4
Tool : cemented carbide P10
Rake angle : 0°
Clearance angle : 4°
Entering angle : 45°
Feed : 0.74 mm/rev
Cutting depth : 3 mm
Cutting speed : 180 m/min

Fig. 9. Variations in temperature in a turning tool measured perpendicular to the cutting edge.

も考えあわせればそれぞれの鋼中 Ca 系介在物の軟化温度とほぼ一致する。このことから切削時の切刃部最高温度が Ca 系介在物の軟化温度とほぼ一致したとき Belag はもっとも多く付着し工具寿命ももっとも良好となるといえる。これを平均切削温度と Ca 系介在物の溶融点の比であらわすと 1 : 1.7 となる。

4. 結 論

S20C, Mn を 1.4% に高めた HMn-S20C および S45C について、酸化物系介在物組成をかせ、P10 超硬工具寿命におよぼす介在物融点と切削温度との関係を検討した。得られた結果を要約するとつぎのとおりである。

(1) Ca 快削鋼中の酸化物系介在物組成は CaSi, Al, FeSi などの脱酸剤の処理法によって変化し介在物融点を左右する。高融点の介在物にするには S, Al を高めて介在物中の Al_2O_3 を増し, SiO_2 , MnO を減ざればよく、低融点にするにはその逆の方法をとればよい。

(2) 工具寿命をもっともすぐれたものにするには、酸化物系介在物融点 (T_{MP}) と切削温度 (T_c) の比を一定値に調整する必要がある。すなわち、 $T_{MP}/T_c=1.7$ 程度に介在物融点を調整すれば、Belag の付着量は多く工具寿命はもっとも高められる。

(3) したがって S20C に比較して切削温度の高くなる HMn-S20C, S45C は切削温度上昇に見合うだ

け、酸化物系介在物融点を高めなければよりすぐれた工具寿命が得られない。

これらの知見をもとに、Ca 快削鋼の鋼種拡大化および同一鋼種内における熱処理のちがいによるかたさの影響がある場合にも適用化を図り、Ca 快削鋼全般のレベルアップに寄与したいと考えている。

終わりに本研究を行なうにあたり、終始ご指導、ご協力を賜った大同製鋼㈱研究開発本部中央研究所第5研究室長阿部山尚三氏、柴田範嘉氏、第1研究室研究員柳田稔氏ならびに関係諸氏に深く感謝いたします。

(文 献)

- 1) 奥島, 鳴滝: 精密機械, 35 (1962) 2, 28~34
- 2) 加藤, 吉田: 精機学会秋期講演会前刷, (1969),

243~246

- 3) 鳴滝, 岩田ほか: 鉄と鋼, 56 (1970) 3, 391~401
- 4) 山田ほか: 鉄と鋼, 57 (1971) 13, 2111~2127
- 5) 梶山, 加藤ほか: 金属学会秋期講演会前刷, (1969), 199
- 6) K. J. Trigger: Trans. ASME., 80 (1958), 302
- 7) 伊藤, 加藤ほか: 電気製鋼, 43 (1972) 2, 83~93
- 8) Phase Diagrams for Ceramists (1964)
- 9) K. J. Küsters: Industrie-Anzeiger. Essen., 6 (1956), 1337~1340
- 10) K. J. Trigger, B. J. Chao: Trans. ASME., 73 (1951), 230
- 11) E. G. Luewen, M. C. Shaw: Trans. ASME., 74 (1952), 217