

Ca-S鋼の耐超硬工具摩耗特性および疲労亀裂伝播特性

藤松 威史*1・常陰 典正*2・平岡 和彦*3

Resistance to Carbide Tool Wear and Fatigue Crack Propagation Property of Calcium Treated Resulfurized Steel

Takeshi Fujimatsu, Norimasa Tsunekage and Kazuhiko Hiraoka

Synopsis: Recently unleaded free machining steel has been required from the point of view of clean environment. Sulfides seem to be one of the promising substitute to lead because of its machinability. We developed the calcium treated resulfurized carburizing steel for the application of automobile gear and shaft parts. Carbide tool machinability and long fatigue life would be important to use for those parts. In this study, the optimum chemical compositions for superior carbide tool turning property and the effect of sulfides in steel on fatigue crack propagation were investigated. It was found that Ca/sol.Al ratio in steel effected on carbide tool wear and a steel of high Ca/sol.Al ratio reduced flank wear (V_B) and crater depth (K_T) of carbide tool. It was confirmed that this carburizing steel with Ca and S (sulfur contents up to 0.06mass%) and leaded steel (lead contents = 0.06mass%) had almost same fatigue crack propagation property.

Keywords: carbide tool wear, unleaded, free machining steel, carburizing, calcium, aluminum, sulfur, resulfurize, fatigue crack propagation

1. 緒言

近年の環境負荷物質低減の時流から、鉛(Pb)快削鋼に代わる非Pb快削鋼が求められており、硫化物を利用した硫黄(S)系快削鋼が主流となりつつある。主にはだ焼鋼が多く用いられるギヤ、シャフト等の駆動系部品用途に対しても、被削性重視の観点から少なからずハーフPb鋼(Pb=0.04~0.09mass%)が利用されており、これらをターゲットとして、カルシウム(Ca)、Sを含有した非Pbはだ焼鋼を開発した。対象とする駆動系部品においては超硬工具やコーティング工具を用いた旋削や歯切加工が多用され、ドリル加工性のニーズは比較的少ない。そこで本研究では、Ca、S含有はだ焼鋼において良好な被削性、特に耐超硬工具摩耗特性に優れる成分バランスの検討を行った。そして、超硬工具摩耗特性向上機構について介在物組成の観点から考察を試みた。また、駆動系部品には静的ならびに衝撃強度のみならず疲労特性が重視されることから、浸炭層硬度域におけるCa-S鋼の疲労亀裂伝播特性の確認を行った¹⁾。

2. 耐超硬工具摩耗特性に優れる成分バランスの検討

2.1 実験方法

耐超硬工具摩耗特性評価のため、Table1に示したA~Gの化学成分を有する鋼を100kg真空高周波誘導炉にて溶製した。A~F鋼はJIS SCr420を基本鋼として、0.06mass%程度のSを含有するとともに、後述のCaとsol.Alの比が0.03~0.29に調整されている。また、G鋼は比較用のPb鋼(Pb=0.06mass%)である。いずれも1473Kで、 ϕ 65mm(鍛錬比8.1)に鍛伸後、焼ならし(1173K-3.6ks, AC)を実施して超硬工具旋削試験に供した。超硬工具はP20種(刃先Rは0.4mm)を使用し、切削速度250m/min, 送り0.25mm/rev, 切り込み0.5mmの切削条件下で試験片長手方向の乾式旋削試験を実施し、10分間切削後の工具逃げ面摩耗量 V_B 、およびすくい面摩耗量 K_T を測定した。

2.2 実験結果及び考察

2.2.1 超硬工具摩耗量に及ぼす成分の影響

A~F鋼の超硬工具旋削試験後の V_B および K_T をTable2に示す。A~F鋼とPbを含有するG鋼とを比較した場合、 V_B

*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ

*2 軸受営業部 軸受CSグループ, 工博

*3 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ長

Table1. Chemical compositions of steels for turning test (mass%)

Steel	C	Si	Mn	S	Cr	sol.Al	Pb	Ca	O	N	Ca/sol.Al
A	0.24	0.25	0.93	0.061	1.23	0.036	-	0.0012	0.0014	0.0170	0.03
B	0.23	0.26	0.96	0.061	1.26	0.031	-	0.0014	0.0013	0.0128	0.05
C	0.22	0.25	0.96	0.064	1.26	0.016	-	0.0012	0.0030	0.0142	0.08
D	0.23	0.25	0.94	0.058	1.25	0.005	-	0.0006	0.0017	0.0154	0.12
E	0.23	0.24	0.93	0.056	1.24	0.006	-	0.0011	0.0018	0.0164	0.18
F	0.23	0.24	0.93	0.057	1.24	0.008	-	0.0023	0.0019	0.0159	0.29
G	0.22	0.24	0.85	0.014	1.31	0.016	0.06	-	0.0021	0.0116	-

Table2. Turning test results

Steel	Work hardness (HRB)	Carbide tool wear	
		V_B (mm)	K_T (mm)
A	88	0.169	0.094
B	88	0.205	0.079
C	88	0.131	0.066
D	88	0.098	0.059
E	88	0.103	0.055
F	88	0.099	0.041
G	89	0.216	0.064

Carbide tool wear measured after dry cutting for 10min.

についてはA～F鋼のいずれもG鋼と同等もしくは軽減されており、 K_T についてはA、B鋼を除くC～F鋼はG鋼と同等もしくは良好な特性を示した。なお、A～F鋼はほぼ同量のSを含有し、かつ硬さも同等であるにも関わらず、 K_T 、 V_B には鋼種間の差が認められている。Ca-S系快削鋼において鋼中のCa含有量の増大により工具寿命が向上することが報告されているが²⁾、本供試材についてはCa量と K_T 、 V_B の明瞭な相関は見られなかった。

一方で、鋼中に存在するアルミナ (Al_2O_3) は極めて硬質かつ高融点であるために、鋼中に多量に存在すると切削工具のアブレーションを促進させると言われている。川上ら³⁾は Al_2O_3 を主要な介在物として含有する鋼において鋼中の Al_2O_3 量と乾式旋削試験後の V_B 、 K_T に正相関が見られることを報告している。本供試材について、 V_B 、 K_T をsol.Al量で整理するとFig.1に示すように正の相関が認められた。そこで、sol.Al量と Al_2O_3 含有量の相関を確認するため、本供試材の Al_2O_3 量を定量した。その結果、ほぼO含有量が同等のA、B、D～F鋼においてはsol.Alが高い鋼で若干 Al_2O_3 量が増加している傾向を認めたものの、C鋼はsol.Al量がA、B鋼より少ないにも関わらず、最も Al_2O_3 量が多かった (Fig.2)。これはC鋼のO含有量が高いことに起因すると考えられる。しかしながら、Table2で示したようにC鋼に比して Al_2O_3 量が少ないA、B鋼の V_B および K_T

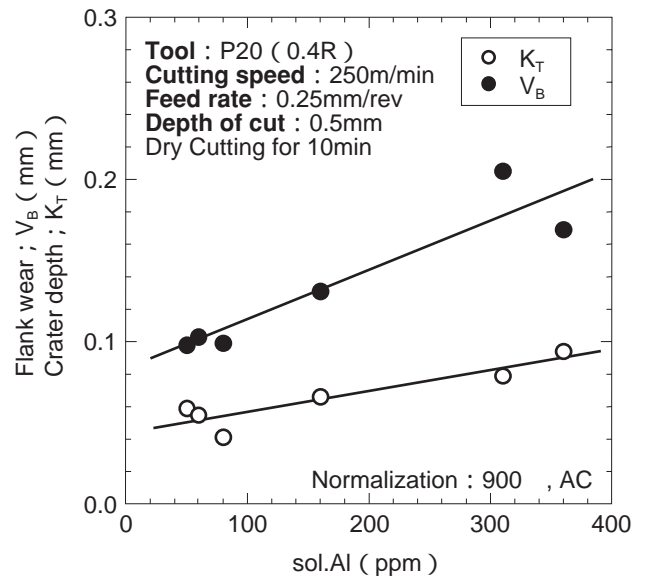


Fig.1. Effects of sol.Al content on carbide tool wear after 10min. cutting.

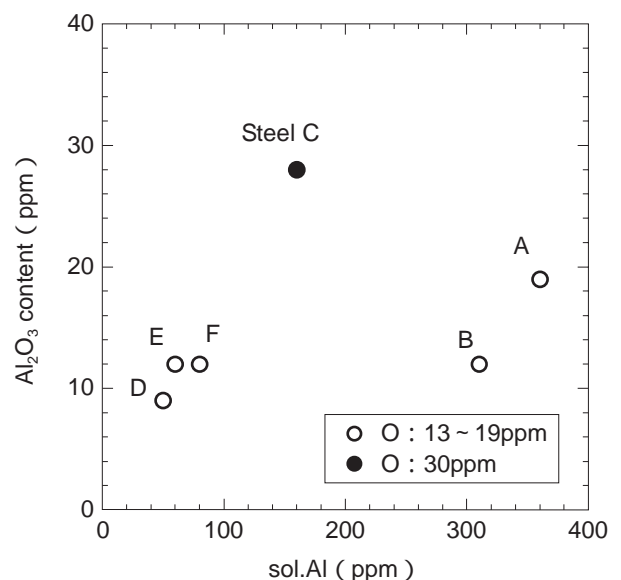


Fig.2. Volume contents of Al_2O_3 in each steel.

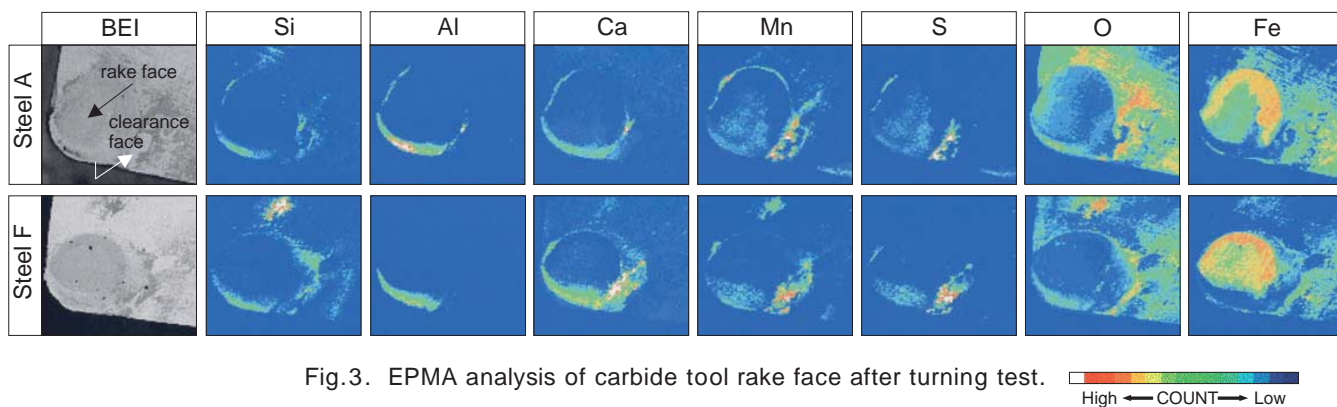


Fig.3. EPMA analysis of carbide tool rake face after turning test.

ともにC鋼に比べて大きい。したがって工具摩耗量は必ずしも Al_2O_3 量に依存していないことが分かった。なお、工具摩耗量と Al_2O_3 量の相関が認められなかったことに関しては、川上ら³⁾の提示した Al_2O_3 を主要介在物として含有する鋼のtotal.Al量が0.024～0.060mass%であるのに対して、本供鋼中のsol.Al量が0.005～0.036mass%とやや低いため、 Al_2O_3 量以外の要因も工具摩耗特性に影響を及ぼした可能性があると考えられる。

次に V_B および K_T が大きいA鋼と最も小さいF鋼について工具すくい面のEPMA観察を実施した。その結果、Fig.3に示すようにクレーター摩耗部には主に被削材主成分のFeの付着が観察されるのに対し、刃先近傍（逃げ面側）および境界摩耗部付近にFe以外のCa, Al, Si, Mn, S, Oの付着が認められた。これらの酸化物あるいは硫化物に類似した組成の付着物が旋削時に工具表面に堆積した結果、工具摩耗の進行が抑制されたものと推測される。一方、同Fig.3において V_B , K_T の大きいA鋼はすくい面上へのCaの付着面積がF鋼に比べ少ないことが確認される。上述のようにCa量と工具摩耗との相関は判然としないが、すくい面観察の結果からCaが工具被覆保護に有効に作用していることは明らかと考えられる。そこで、工具すくい面の付着物成分の中で鋼種毎の含有量に殆ど差が無いSi, Mn, Sを除外した上で、工具摩耗抑制に有効に作用すると推定されるCaとFig.1に示したように工具摩耗量増大に作用するsol.Alを工具摩耗特性を律する化学成分と仮定した。Caとsol.Alの重量%比 (Ca/sol.Al) によって K_T , V_B を整理した結果、Fig.4のようになった。Ca/sol.Al比の増加に伴い K_T は減少する傾向が見られ、本供試材中ではCa/sol.Al = 0.29のF鋼が最も良好な摩耗特性を示した。一方、 V_B も K_T と同様にCa/sol.Al比が高い鋼は摩耗が抑制される傾向があり、Ca/sol.Al 0.1でほぼ一定となった。

2・2・2 Ca/sol.Al比の増大に伴う工具摩耗抑制機構の推察

Pytelら⁴⁾はSAE8620鋼のハイス工具切削において、 $B\text{-index} = f(S, Ca/Al) = 18.59 + 0.05S + 117.38(Ca/Al)$

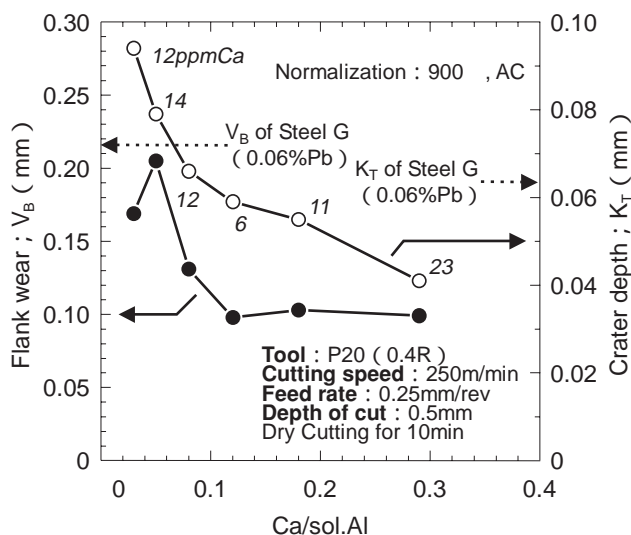


Fig.4. Influence of Ca/sol.Al ratio on tool wear in turning test for carburized steels.

なる指標を提案し、Ca/Al比が大きい組成の鋼は切削性に優れていることを報告している。それによればCa/Al比が大きくなると、(Ca, Mn)Sの面積に占める $CaO-Al_2O_3$ 組成からなる酸化物核の大きさが增大すること、全硫化物に占める(Ca, Mn)Sの割合が増加することを見出し、Ca/Al比を鋼中の酸化物あるいは硫化物の改質と関連付けている。また、佐田ら⁵⁾は、S45Cベースでの超硬工具旋削において K_T を減少させるCaとAlのバランスが存在することを示唆している。

そこで、供試材に含まれる介在物に着目して、介在物個数、形態、組成について調査した。A～F鋼について別途40角（鍛錬比16.8）に鍛伸した素材を使用して、EPMAにより中周部、L断面の基準面積 $1mm^2$ の面分析を実施した。なお、EPMAの介在物検出下限を長径 $2\mu m \times$ 短径 $2\mu m$ （断面積 $4\mu m^2$ ）に設定した。EPMA分析により検出した $1mm^2$ 中のCa含有介在物の総個数について、A～F鋼のCa含有量をS含有量で規格化したCa/S比を用いて

Fig.5に整理を試みた。その結果、本供試材の成分範囲ではCa/S比の増大に伴って、Caを含有する介在物数は直線的に増大する傾向が見られた。また、Fig.6に示すようにCa含有量の増大に伴い介在物の平均アスペクト比（断面積 $4 \mu m^2$ を超える全検出介在物の長径/短径比の平均値）が低減する傾向があり、Ca添加による介在物形態制御効果が認められた。なお、ここで述べた平均アスペクト比とはEPMAによって検出された断面積 $4 \mu m^2$ を超える全介在物の長径/短径比の平均値を表す。しかしながら、Table2に示したようにCa含有量と工具摩耗量の相関は認められておらず、Ca含有量に依存した上記のCa含有介在物個数やその形態は超硬工具摩耗に対して支配的な要因ではないと考えられる。

次にCa含有介在物の化学組成に着目した。各供試材について、酸化物核を含まない硫化物、酸化物核を含む硫化物に分類し、EDSを用いてそれぞれ任意の個数の硫化

物の化学組成を分析し、その平均値をTable3に示した。Fig.7は硫化物に含まれるCa量（Table3参照）をCa/sol.Al比で整理した結果であり、Ca/sol.Al = 0.18, 0.29のE, F鋼は硫化物中のCa量が他鋼種に比べてやや増加していることが分かった。また、Table4に示すように低Ca/sol.Al比であるA, B鋼（Ca/sol.Al = 0.03, 0.05）の酸化物は Al_2O_3 主体の組成を有するのに対し、C, D, E, F鋼（Ca/sol.Al = 0.08 ~ 0.29）においては酸化物組成に占める Al_2O_3 の比率が減少し、CaOや SiO_2 の比率が増加していることが確認された。これらの酸化物は Al_2O_3 に比べて低融点の組成となっており、高速切削加工時の工具被覆保護に有効に作用している可能性が考えられる。Fig.8に酸化物の形態および化学組成の一例を示す。

以上のことから、Fig.4に示したCa/sol.Al比の変化に伴う超硬工具の摩耗挙動を以下のように推測した。

- ・低Ca/sol.Al比の組成を有する鋼では、鋼中に Al_2O_3 主体

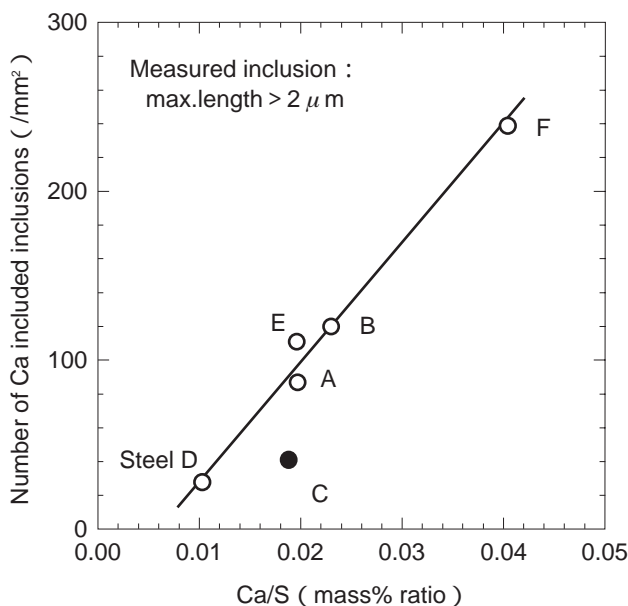


Fig.5. Number of calcium included inclusions.

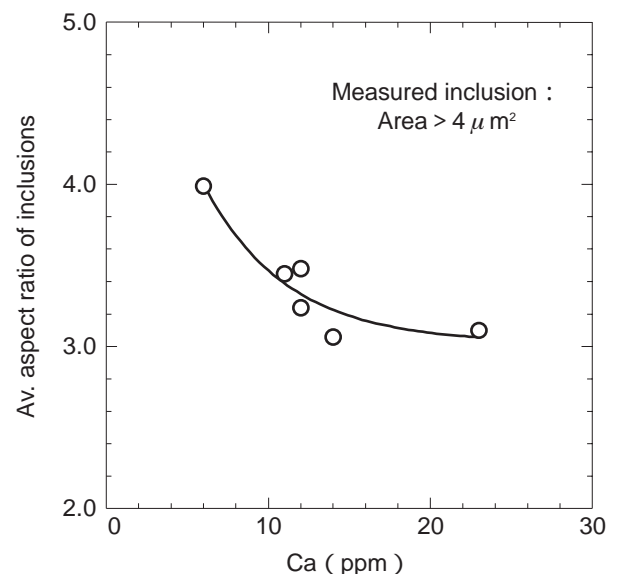


Fig.6. Average aspect ratio of non-metallic inclusions.

Table3. Average chemical compositions of sulfides (atm%)

Steel	Ca/sol.Al	Sulfides with oxide as nucleus						Sulfides without oxide						Av. and					
		n	Ca	Al	S	Mn	Fe	n	Ca	Al	S	Mn	Fe	n	Ca	Al	S	Mn	Fe
A	0.03	4	0.23	0.00	46.65	46.49	6.63	15	2.60	1.43	43.85	41.33	10.79	19	2.07	1.11	44.47	42.48	9.88
B	0.05	6	0.59	0.00	48.45	47.65	3.32	10	1.67	0.77	45.95	44.22	7.38	16	1.26	0.49	46.90	45.51	5.85
C	0.08	6	0.15	0.00	47.01	46.79	6.05	6	1.82	1.32	47.15	45.29	4.41	12	0.97	0.64	47.08	46.06	5.26
D	0.12	10	0.38	0.02	48.40	43.01	8.19	19	1.87	2.68	43.87	36.84	14.74	29	1.33	1.69	45.54	39.12	12.32
E	0.18	9	0.02	0.00	47.11	46.26	6.61	19	5.81	1.28	45.62	40.20	7.09	28	3.92	0.86	46.11	42.18	6.94
F	0.29	6	1.97	0.20	44.77	42.80	10.26	22	4.49	1.13	46.07	41.48	6.83	28	3.93	0.93	45.79	41.77	7.59

n: Total number of analysis

の硬質酸化物が生成したことによって超硬工具逃げ面のアブレーション摩耗を促進したと推測される。また、介在物組成が高融点の Al_2O_3 主体であることから超硬工具す

Table 4. Average chemical compositions of oxides (mass%)

Steel	Ca/sol.Al	n	Al_2O_3	SiO_2	CaO
A	0.03	14	93.7	-	6.3
B	0.05	17	96.6	-	3.4
C	0.08	20	80.5	0.6	18.9
D	0.12	25	81.0	5.5	13.5
E	0.18	25	71.4	10.2	18.4
F	0.29	21	87.9	2.7	9.3

n: Total number of analysis

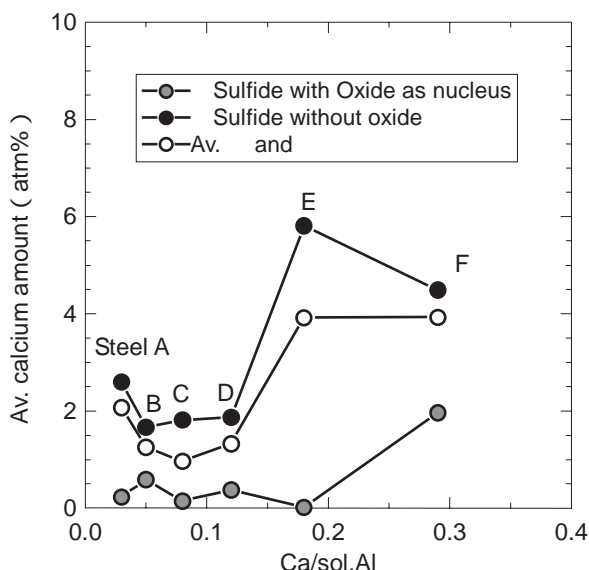


Fig. 7. Average calcium amount in sulfides in each steel.

くい面上の保護皮膜形成が不十分となり、すくい面摩耗が進行したと考えられる。

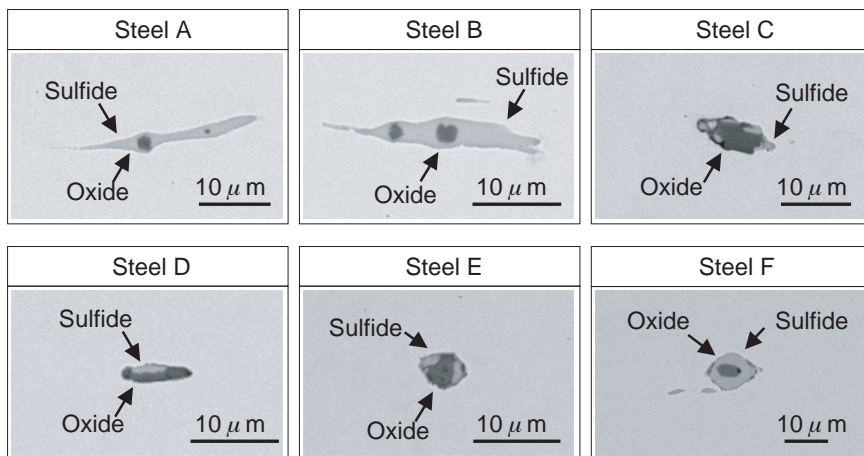
・高Ca/sol.Al比の場合、鋼中の酸化物が Al_2O_3 に比べて低融点のCaO- Al_2O_3 やCaO- Al_2O_3 - SiO_2 に改質されることや、硫化物中のCa量が増大したことによって、旋削加工時の超硬工具の被覆保護効果もたらされ、切削時の摩擦抵抗が低減されることにより良好な工具摩耗特性が得られたと解釈される。

これらの知見により、C鋼のようにO含有量が高いことに起因して Al_2O_3 を多く含有する場合においても、Ca/sol.Al比を高めることにより工具摩耗を改善できる可能性が示された。

3. 浸炭層硬度域における疲労亀裂伝播特性に及ぼす硫化物の影響調査

3.1 実験方法

2章の結果からCa, S含有はだ焼鋼の基本組成として高Ca/sol.Al比となる組成が有望と考えられる。また、本章の実験の目的は浸炭層内において硫化物が疲労亀裂伝播特性に及ぼす影響を確認することであり、浸炭層硬度域で安定した疲労亀裂進展曲線を得る必要がある。通常、試験に先んじて試験片に約1mmの長さの予亀裂を導入する必要があることから、浸炭処理を施した試験片(硬化深さは約1mm)では特性評価が困難となる。そこで、SCr420の浸炭層の化学成分を模擬するためにC量を0.8mass%に設定し、ズブ焼き試験片にて疲労亀裂伝播特性の評価を行うこととした。Table 5に示したH~Jの化学成分を有する鋼を100kg真空高周波誘導炉にて溶製し、鍛伸加工の後、鍛伸方向に垂直に亀裂が進展する方向に試験片(試験片形状はASTM E-647に準拠, Fig.9参照)を採取し、焼入焼戻しを施して疲労亀裂伝播試験に供した。なお、H, I鋼はCa/sol.Al比を0.3程度に調整した。J鋼は比較用のPb鋼である。



Steel A : 3.2CaO-96.8 Al_2O_3 (mass%)
 Steel B : Al_2O_3
 Steel C : 46.8CaO-53.2 Al_2O_3 (mass%)
 Steel D : 21.1CaO-66.9 Al_2O_3 -12.0 SiO_2 (mass%)
 Steel E : 29.2CaO-56.4 Al_2O_3 -14.5 SiO_2 (mass%)
 Steel F : 17.8CaO-75.2 Al_2O_3 -7.0 SiO_2 (mass%)

Fig. 8. Typical shape of oxide in each steel.

3・2 実験結果及び考察

疲労亀裂伝播試験により得られたH~J鋼の疲労亀裂進展曲線をFig. 10に示す。図中で da/dN は疲労亀裂進展速度、 ΔK は応力拡大係数幅（応力）を表す。はだ焼鋼を使用した駆動系部品は、主として浸炭処理を施すことにより表面に深さ1mm程度の硬化層が付加される。一方、部品内部は浸炭後の焼き入れ処理時に部品の化学成分、冷却速度に応じた硬さとなり、通常、その硬度は浸炭層に比べて大きく低下する。したがって、実質的な部品の疲労強度は表面の浸炭層部が担うものと推定できる。仮に表面の浸炭層深さを1mmと仮定すると、疲労寿命における時間強度域に相当する 10^6 サイクルで破断に至る場合の疲労亀裂伝播速度 da/dN は 10^{-9} m/cycleに相当する。そこで、Fig. 10において $da/dN = 10^{-9}$ m/cycle付近の応力拡大係数幅 ΔK に注目すると、Ca-S含有鋼とPb鋼の ΔK に顕著な差は認められない。さらに 10^{-9} m/cycle以上の疲労亀裂進展曲線の傾きについても、Ca-S鋼とPb鋼ではほぼ同等とみなすことができる。したがって、Sを0.06%程度まで含有するCa、S含有はだ焼鋼の疲労亀裂伝播特性に及ぼす硫化物（MnSもしくは（Ca，Mn）S）の影響は小さいと推測される。

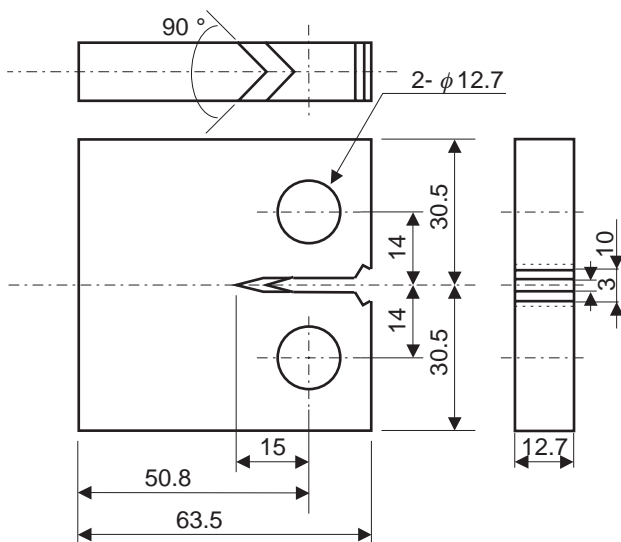


Fig.9. Test piece for fatigue crack propagation test.

4. 結言

- 1) 本研究の成分範囲において超硬工具旋削加工における K_T 、 V_B はCa/sol.Al比と相関を有し、 V_B はCa/sol.Al 0.1、 K_T はCa/sol.Al 0.3で最も良好な特性が得られた。
- 2) 上記の効果は、溶製時のCaとsol.Alのバランスに起因して鋼中介在物の組成が変化したことの影響を受けたものと推測された。すなわち、Ca/sol.Alが低い領域では硬質かつ高融点の Al_2O_3 が生成して超硬工具旋削時の工具摩耗が増大しやすく、一方、Ca/sol.Alが高い領域では Al_2O_3 に比して低融点のCaO- Al_2O_3 、CaO- Al_2O_3 - SiO_2 が生成し、かつ硫化物中のCa量が増大することにより工具を被覆保護することで工具摩耗が抑制されると推定した。
- 3) Ca/sol.Al比を0.3程度に設定し、0.06mass%Sを添加したCa-S含有鋼において、その疲労亀裂伝播特性はPb鋼（0.06mass%Pb）と同等であった。したがって、浸炭層高硬度域において硫化物が疲労亀裂伝播に及ぼす影響は小さいと考えられた。

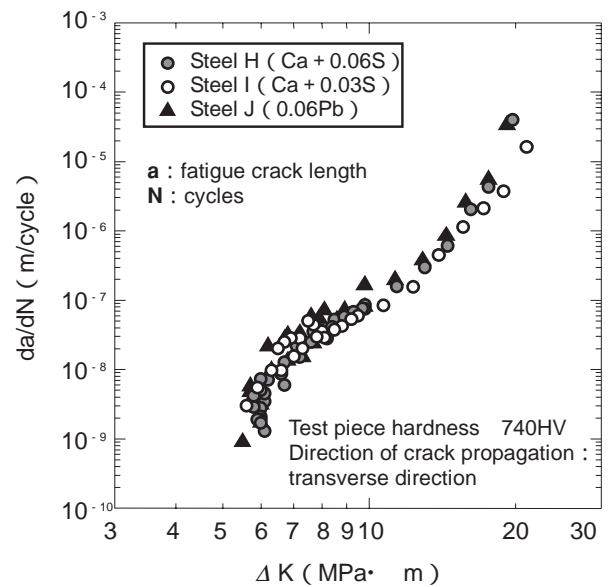


Fig.10. Fatigue crack propagation test results for leaded and Ca treated resulfurized steel.

Table5. Chemical compositions of steels for fatigue crack propagation test (mass%)

Steel	C	Si	Mn	S	Cr	sol.Al	Pb	Ca	O	N	Ca/sol.Al
H	0.79	0.16	1.03	0.060	1.24	0.009	-	0.0032	0.0008	0.0116	0.36
I	0.80	0.14	0.98	0.028	1.26	0.010	-	0.0032	0.0010	0.0108	0.32
J	0.80	0.30	0.87	0.014	1.27	0.017	0.06	-	0.0015	0.0108	-

4) 開発したCa, S含有はだ焼鋼は, 被削性や疲労特性の観点から, 従来使用されているPb鋼に代わり, 駆動系部品用途に適用できる可能性が高いことが確認された。

4) S.M.Pytel, C.I.Garcia, and A.J.DeArdo: SAE Tech. Pap. Ser., 930964 (1993).

5) 佐田登志夫, 宮下芳雄, 西川勝彦, 奈良修録, 耳野亨: 鉄と鋼, 57 (1971), 589.

文 献

- 1) 藤松威史, 常陰典正, 平岡和彦: 材料とプロセス, 16 (2003), 1440.
- 2) 小川兼弘, 山中量一, 小山伸二, 佐々木敏彦: 神戸製鋼技報, 41 (1991), 65.
- 3) 川上平次郎, 古沢貞良, 竹下秀男, 佐々木敏彦: 神戸製鋼技報, 31 (1981), 42.

著者



藤松 威史



常陰 典正



平岡 和彦

