Ca+S系介在物形態制御型快削鋼

狩野 隆*¹, 次井慶介*², 中村貞行*¹

New Free-machining Steel with Calcium Sulphides Surrounding Calcium Aluminate Inclusions

Takashi Kano, Keisuke Tsugui, and Sadayuki Nakamura

Synopsis

In an attempt to develop a free machining steel without lead, a quite new free machining steel which has superior machineability was developed. This new free machining steel is characterized by characteristic inclusions as calcium sulphides surrounding calcium aluminates controlled by special calcium treatment. This steel not only has a good machinability same as of 0.05% lead steel in drilling operation with high speed steel tool, but also has that more than conventional calcium bearing free machining steel in turning operation.

The mechanical properties of this free machining steel is also attractive, in addition to machineability. The degradation of strength and enlargement of anisotropy in the mechanical properties with increase of sulphur contents is small due to the characteristic morphology of inclusions in this steel.

The performance of this steel has made it possible to apply the free machining steel to the structural steel such as even high-strength steel for gear.

1. まえがき

“地球環境に優しい”を合言葉に、エネルギー節約の観点から構造物の軽量化が図られる中、材料の高強度化がますます進み“難切削材¹⁾”が増加してきている。一方、加工現場においては加工技術の進歩に呼応して高速・高能率化が進められており、材料の被削性に対する要求は逆にますます高まってきている。さらに、最近環境負荷物質である鉛 (Pb) の使用を規制する動きが世界規模で見られ、現在国内の機械構造用快削鋼の約80%を占めるPb快削鋼に対してもPbを含有しない代替鋼の開発が求められるなど、快削鋼の開発は新たな展開を迎えている。

こういった状況の中、大同特殊鋼 (株) (以下当社とする) では、鋼中の介在物形態を特殊なCa処理によって制御することを特徴とした新しいタイプの快削鋼を開発した。この快削鋼はPbなどの環境負荷物質を含有しないといった観点からE (イー: Ecological) 鋼と名づけられているが、同時に優れた被削性能を有する快削鋼となっている。また、特に切屑破碎性をPb鋼と同等以上に改善した鋼種も同時に開発されており、これをEE (ダブルイー: Ecological & Easy Cutting) 鋼と称している。

以下にこれらの快削鋼の特徴について報告する。

2. 介在物形態制御型快削鋼の考え方²⁾

高強度歯車用鋼などの難切削構造部品の被削性改善を

1999年10月27日受付

* 1 大同特殊鋼 (株) 技術開発研究所 (Research and Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.), * 2 大同特殊鋼 (株) 技術サービス部 (Metallurgical Service Dept. Daido Steel Co., Ltd.)

考える場合には、材料強度を低下させ機械的性質の異方性を助長する硫黄（S）の添加には限度があり、また高面圧疲労強度を低下させるPbなどの低融点金属元素を被削性改善元素として添加することも制限される。一方、高速切削に対応できる被削性能を確保するという観点からは、凝着や拡散摩耗など熱的作用による工具の損耗を抑制することが特に必要となり、こういったことから、難切削の構造用材料に高速切削性能を付与する快削鋼としては、脱酸調整型のCa快削鋼が最も有効であると考えられる^{3)~5)}。しかしこの快削鋼は、Pb鋼と同様強度劣化が少なく超硬旋削性には優れるという特徴を有するものの、Pb鋼のような溶融脆化挙動を示さないため切屑の破碎性は劣る。また、ハイスドリル加工のような比較的低速での切削では工具寿命の改善効果が認められなくなるという特徴もある⁶⁾。このため脱酸調整型のCa快削鋼は、切屑破碎性とハイスドリル寿命改善を目的に、一般にはS快削鋼との組合わせで使用されており⁷⁾、脆化型のS快削鋼と組合わせることで機械的性質の劣化が少ないという特徴を犠牲にしているのが現状である。

Ca+S系介在物形態制御型快削鋼（以下E鋼とする）は、特殊なCa処理により鋼中の酸化物と硫化物の形態を同時に制御することを特徴としたS添加快削鋼であり、この介在物形態制御により、S添加による材料強度の低下と異方性の増大を抑制しつつ、脱酸調整型のCa快削鋼と同様、特に高速切削時の被削性能確保を図っている。E鋼は他のCa系快削鋼^{5),6),8),9)}とは異なりハイスドリルによる穿孔性や切屑破碎性に関しても良好な被削性能を有しており、機械的強度の確保と被削性を両立した快削鋼であると言える。

E鋼は硫黄快削鋼と同様に鋼中の硫化物を利用した快削鋼であり、S含有量によって被削性あるいは機械的性質は変化する。Table 1にE鋼およびEE鋼のS含有量別の特性を示す。

3. E鋼の介在物

上述したように、E鋼は特殊なCa処理によって酸化物および硫化物の形態を制御することを特徴としており、形態制御された介在物は紡錘型の2重構造介在物となっている。この介在物はCaを含んだ酸化物の周囲をやはりCaを含んだ硫化物が取巻く構造をしており、硫化物中のCa含有量は0.1~10atm-%、S含有量は80~90atm-%で比較的安定した組成となっている。Fig.1には電子線マイクロアナライザ（EPMA）を用いた2重構造介在物の面

Fig. 1. Typical inclusion morphologies in developed free-machining steel.

Table 1. Machinability and mechanical properties of new developed steel series.

		S45C (Base)	E-steel series				Manganese-sulfide		half-Pb	Calcium bearing
			E1	E2	EE1	EE2	S1	S2		
Machinability	S content, %	0.02	0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.10	0.02	0.02
	turning	△	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	○	○	Base	◎
	drilling	×	○△	○	○	◎	△	○	Base	×
	chip form	×	○△	○	○	○	△	△	Base	×
Mechanical properties	impact value	Base	○	△	○	△	○	×	○	○
	0.2% Proof stress	Base	○	○	○	○	○	○	○	○
	Tensile stress	Base	○	○	○	○	○	○	○	○
	elongation	Base	○	○	○	○	○	○	○	○
Fatigue	Reduction of area	Base	○	△	○	△	○	×	○	○
	Rotating- bending	Base	○	○	○	○	○	○	○	○
	radial	Base	○	○	○△	○△	○	○	×	○

Machinability ◎◎:superior, ◎:good, ○:parity, △:inferior, ×:bad

Mechanical properties ○:parity, △:inferior, ×:bad

分析結果を示すが、このように酸化物中にも硫化物中にもCaを含み、かつ紡錘型の2重構造となることで以下に述べる種々の被削性改善機能を出現させている。

また、硫化物の一部がこのように紡錘型に形態制御されているために機械的性質の異方性を軽減する効果もあり、即ちこの2重構造介在物は被削性を改善するばかりではなく機械的特性の改善にも寄与している。

4. E鋼の被削性

4. 1 超硬工具による旋削性能

Fig.2に超硬旋削時の切削速度と工具寿命の関係を示す。ここで、被削性能の評価はS45Cを基本鋼としたそ

Fig. 2. Tool life vs cutting speed in turning operation.

れぞれの快削鋼について行っており、旋削工具寿命は逃げ面の平均摩耗幅が $200\mu\text{m}$ に達するまでの切削時間としている。E鋼旋削時の工具寿命は同程度のSを含有する硫黄快削鋼やハーフ鉛快削鋼に対して約8倍の値を示し、脱酸調整型のCa快削鋼に比べても約2.5倍の値を示している。

E鋼を旋削加工した後の工具のすくい面には、Fig.3のEPMAによる面分析結果に示すようにCaおよびSが検出されており、E鋼旋削時には工具すくい面にCa系硫化物被膜が形成されていることが推定される。CaやAlなどで脱酸制御された脱酸調整鋼においても、加工後の超硬工具表面にCaを含む被膜成分が検出される¹⁰⁾が、この被膜がCaO、SiO₂、Al₂O₃からなる複合酸化物であるのに対し、E鋼旋削時に形成される被膜はCaを含有する複合硫化物

Fig. 3. EPMA map analysis of adhered layers on the tool surface.

であることが特徴である。この被膜の成分は、特殊なCa処理によって形態を制御した2重構造介在物中の硫化物とほぼ同一組成となっており、この硫化物が切削加工中に軟化して工具表面に保護被膜を形成したものと考えられる。

旋削中の工具のすくい面の摩擦係数を測定した結果をFig.4に示すが、E鋼切削時の摩擦係数は硫黄快削鋼切削

Fig. 4. Comparison of dynamic friction.

時の摩擦係数に比べ若干小さくなっている程度であり、すくい面の潤滑性の大幅な改善効果は認められない。よってこのCa系複合硫化物の被膜は、脱酸調整鋼における酸化物被膜と同様熱拡散摩耗を抑制することで工具寿命を改善しているものと考えられる。

4. 2 ハイスドリルによる穿孔性能

特に鉛快削鋼を代替することを考えた場合、最大の課

題となるのはハイスドリルによる穿孔性能の確保である。鉛快削鋼では切削時にPb粒が応力集中源となることで微少クラックを誘発し、さらにPbの溶融脆化により材料の剪断強度を低下させることでドリル穿孔性能および切屑の破碎性を改善する¹¹⁾。加えて溶融Pbによる工具と切屑間の摩擦抵抗を低減する効果を有するなど、すなわち切削温度がPbの融点近くになるハイスドリル穿孔などでは鉛快削鋼は抜群の被削性能を発揮する。

Fig.5に各快削鋼のハイスドリル寿命試験の結果を示

Fig. 5. Tool life vs cutting speed in drilling operation.

す。この場合のドリル寿命は、切削速度を30～100m/minの範囲で変化させて各速度でドリルが折損するまで加工した時の総切削距離としている。ドリル穿孔性能をこの工具寿命で評価した場合、E鋼のドリル穿孔性能はハーフ鉛快削鋼とほぼ同等と評価することができ、同レベルのSを含有するS快削鋼や脱酸調整鋼に対しては大幅に良好な穿孔性能を示している。

E鋼のドリル寿命改善の機構としては、ひとつには酸化物の軟質化と酸化物を硫化物により包み込むことでのアブレイシブ摩耗の抑制効果が考えられる。Fig.1に示した2重構造介在物中の酸化物は、Caによる形態制御によりアノルサイト (Anorthite) あるいはゲーレナイト (Gehlenite) 組成となっており、一般に鋼中に存在する Al_2O_3 組成の酸化物に比べ軟質化している。またこれら酸化物の多くが硫化物によって包み込まれることでさらにアブレイシブ摩耗は抑制される傾向にあるものと考えられる。一方、介在物が紡錘型に形態制御されていることによって切削加工時の材料に対する切欠脆性効果は高まっていると考えられ、これにより切削時のせん断流動

応力の低減あるいは切削温度の低減といった効果も期待できる。E鋼においてはこれら2重構造介在物の特徴が総合的に作用することでPbの溶融脆化に匹敵する被削性改善効果が発揮され、その結果、0.05%程度のSを含有するE鋼では、ハイスドリル穿孔性に関しても良好な被削性能を示す結果となっているものと考えられる。

4. 3 切屑破碎性

Fig.6には、超硬旋削切屑の破碎性を切屑形状の評点評価により指数化し、さらにS+Pbとの関係で整理した結果を示す。切屑の破碎性は硫化物やPb粒が応力集中源と

Fig. 6. (%S+%Pb) vs chip-breaking index in turning operation.

して作用することにより工具刃先前方の一次せん断変形領域において微少き裂を誘起することにより改善される⁹⁾ため、SおよびPbの含有量の増加に伴って切屑の破碎性は向上し、一般にこの場合のSとPbの効果はほぼ同等と考えることができる。Fig.6中においてE鋼の切屑破碎性は硫黄快削鋼やPb快削鋼とほぼ同等となっており、Sの含有量が増加するに従い切屑破碎性は改善される傾向を示している。一方、特に切屑の破碎性改善を目的に開発したEE鋼では非常に良好な切屑破碎性を示し、Fig.6中に示す条件ではS快削鋼あるいは鉛快削鋼の約1.5倍の切屑破碎性となっている。EE鋼の旋削切屑をFig.7に示すが、この場合EE鋼は0.06%S鋼でありながらハーフPb快削鋼 (0.03%S+0.07%Pb) と同等の細かく破碎した切屑が得られている。

このようにE鋼およびEE鋼は切屑処理性においても他の一般的な快削鋼と同等以上の性能を有し、総合的な被削性においては現状最高レベルの性能を発揮する快削鋼であるといえる。

	Cutting condition	Grade	Depth of cut $d = 2.0\text{mm}$		$d = 0.5\text{mm}$
			$f = 0.1\text{mm/rev}$	$f = 0.2\text{mm/rev}$	$f = 0.2\text{mm/rev}$
	S45C normalized $v=200\text{m/min}$ dry	E1 $S=0.05\%$
		EE1 $S=0.06\%$
		Pb-contained $Pb=0.07\%$

Fig. 7. Comparison of chip form, normalizing:1123K(850℃X7, 2ks(2hr), AC.

5. E鋼の機械的性質

硫黄快削鋼のように硫化物を利用した快削鋼ではS含有量を増すことで被削性を向上させることが可能であるが、S含有量の増加にともない圧延方向に伸展した硫化物の影響が増大し、機械的性質の異方性が顕著になるとともに圧延直角方向の強度が低下する。E鋼も被削性改善に硫化物を利用しているため同様の問題を抱えるが、E鋼では硫化物の一部を紡錘型2重構造介在物に形態制御することで異方性の増大と強度低下の問題を軽減している。またE鋼は同一S含有量のS快削鋼に比べて被削性を大幅に向上させることができるため、現用のS快削鋼の低S化による機械的強度の改善という手段も考えられる。

Fig.8～Fig.10に各快削鋼の機械的性質を比較した例を示す。E鋼は回転曲げ疲労特性において大幅な異方性の改善を示し、転動疲労特性においては鉛快削鋼に対して約6倍の寿命値を示す結果となっている。このようにS含有量が0.05%程度のE鋼では、機械的強度の劣化が少なく、特に疲労強度は基本鋼と同等以上の性能を発揮する。こういった特徴は高面圧下での疲労強度が要求される歯車部品などさまざまな機械構造用部品への適用を期待させるものである。

Fig. 8. Charpy impact value, heat treatment; H:850℃ WQ, T:600℃ AC.

Fig. 9. Rotating-bending fatigue strength, heat treatment; H:850℃ WQ, T:60℃ AC.

Fig. 10. Relative fatigue life, heat treatment; induction hardening (ECD=3.0mm, hardened ratio=0.5).

6. E鋼の熱処理特性

E鋼は基本鋼に対して特殊なCa処理を実施することで被削性を付与した快削鋼であり、Ca (EE鋼においてはCa+極微量の特殊元素) を添加すること以外に成分の変更はない。また圧延などの工程も従来の製造工程と同一工程であるため、材料組織も基本的に何ら変わるところはない。そのため焼ならしや焼入れ焼戻しの特性、あるいは高周波焼入れ性などの熱処理特性は基本鋼の特性をそのまま維持し、現状の熱処理工程その他に制約を与えるようなこともない。

7. まとめ

E鋼は特殊なCa処理を実施することによって酸化物と硫化物の形態を同時に制御することを特徴とした快削鋼であり、その被削性改善の機構はE鋼中に含まれる2重構造介在物の特徴として以下のように説明できる²⁾。

① 硬質の酸化物をCa処理によって軟質化し、さらにこれら酸化物を硫化物が包む2重構造の介在物となるよう形態制御することで工具のアブレイシブ摩耗を抑制する。

② 硫化物をCa系複合硫化物となるよう組成制御することで工具表面に安定した硫化物保護被膜を形成させ、特に高速切削時の熱拡散摩耗を抑制する。

③ このようなCaを含む2重構造介在物は圧延方向への伸展が抑制され、その結果通常のMnSに比べ切削時の切欠き脆性効果を向上させる。

当社では、今回ここに報告したCa+S系介在物形態制御型快削鋼 (E鋼) を開発することで、Pbを含有せずにハイスドリルによる穿孔加工などの比較的低速切削においても十分な被削性を有する快削鋼を実現した。またこの快削鋼は高速旋削時において特に優れた被削性能を発揮することから、機械加工の能率向上やコスト改善に寄与していけるものと考えられる。さらにこの快削鋼は機械的性質においても基本鋼と同等以上の特性を発揮するため、歯車用鋼などにおいても強度特性を維持しつつ被削性を付与することが可能になるものと期待される。

(文 献)

- 1) 狩野勝吉：難削材の切削加工技術 [工業調査会] (1989), 21
- 2) 狩野 隆：機械技術, **47**(1999), No.10, 35
- 3) 藤原達雄, 伊藤哲朗：日本金属学会会報, **15**(1976), 613
- 4) 荒木泰治, 浜端 進：鉄と鋼, **57**(1971), 2090
- 5) 音谷登平, 形浦安治：カルシウム鋼 [丸善] (1981), 88
- 6) 柳瀬雅人, 森 俊道, 奥野嘉雄：CAMP-ISIJ, **3**(1990), 869
- 7) 白神哲夫：特殊鋼, **35**(1986), No.10, 64
- 8) 小川兼弘ら：神戸製鋼技報, **41**(1991), No.2, 65
- 9) K.Ogawa, and R.Yamanaka：KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, (1991), No.10, 1
- 10) Lou Shengheら：日本—中国鉄鋼学術会議第2回製鋼学術会議報告(1983), 129
- 11) 秋葉賢樹：特殊鋼, **38**(1989), No.9, 18