
連続鋳造法による低炭素硫黄快削鋼の製造とその品質特性

Development of a Low Carbon Resulphurized Free Cutting Steel by Continuous Casting,
and its Properties

西村 隆 (Takashi Nishimura) 小石 想一 (Soh-ichi Koishi) 山本 芳治 (Yoshiji Yamamoto) 和田 芳信 (Yoshinobu Wada) 峰 公雄 (Kimio Mine) 新庄 豊 (Yutaka Shinjo)

要旨：

当社では低炭素硫黄快削鋼の連続鋳造による製造技術を確立した。連続鋳造に際しては、気泡発生ならびに耐火物溶損などの制御が重要である。それらに対しては脱酸制御技術および適正耐火物の選定などにより健全な鋳片の製造が可能となった。連鋳材の特徴は、造塊材に比較し紡錘形の硫化物が安定して得られること、および硫化物サイズは小さいが均一分布することで、被削性は劣化することなく、冷鍛性もすぐれる。以上のことから硫黄快削鋼は品質特性、省エネルギーおよび歩留り向上などの観点から、連鋳法による製造が今後の主流プロセスになると考える。

Synopsis：

A technique for continuous casting of low-carbon resulphurized free cutting steel has been established at Mizushima Works. Inhibiting the generation of blow holes and the fusion of refractories is important in continuous casting of this type of steel. The sound blooms have been produced by the control of deoxidation and the selection of suitable refractories for this material. The features of continuous-cast products are that the sulphides are not so elongated by hot rolling as those of ingot products, and they are small and uniformly distributed. Therefore, the continuous-cast products are not inferior in machinability and superior in cold forgeability to conventional ones from ingots. It is expected that continuous casting will be used in the future for producing low carbon free cutting steel, because of the excellent work-abilities of products and energy saving and high productivity of the process.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

連続鋳造法による低炭素硫黄快削鋼の製造と その品質特性*1

川崎製鉄技報

15(1983)2.201-207

西村 隆*2 小石 想一*3 山本 義治*4 和田 芳信*5 峰 公雄*6 新庄 豊*7

Development of a Low Carbon Resulphurized Free Cutting Steel by Continuous Casting, and its Properties

Takashi Nishimura, Soh-ichi Koishi, Yoshiji Yamamoto, Yoshinobu Wada, Kimio Mine, Yutaka Shinjo

要旨

当社では低炭素硫黄快削鋼の連続鋳造による製造技術確立した。連続鋳造に際しては、気泡発生ならびに耐火物溶損などの抑制が重要である。それらに対しては脱酸制御技術および適正耐火物の選定などにより健全な鋳片の製造が可能となった。

連鋳材の特長は、造塊材に比較し紡錐形の硫化物が安定して得られること、および硫化物サイズは小さいが均一分布することで、被削性は劣化することなく、冷鍛性も優れる。

以上のことから硫黄快削鋼は品質特性、省エネルギーおよび歩留り向上などの観点から、連鋳法による製造が今後の主流プロセスになると考える。

Synopsis:

A technique for continuous casting of low-carbon resulphurized free cutting steel has been established at Mizushima Works. Inhibiting the generation of blow holes and the fusion of refractories is important in continuous casting of this type of steel. The sound blooms have been produced by the control of deoxidation and the selection of suitable refractories for this material.

The features of continuous-cast products are that the sulphides are not so elongated by hot rolling as those of ingot products, and they are small and uniformly distributed. Therefore, the continuous-cast products are not inferior in machinability and superior in cold forgeability to conventional ones from ingots.

It is expected that continuous casting will be used in the future for producing low carbon free cutting steel, because of the excellent workabilities of products and energy saving and high productivity of the process.

1. 緒 言

近年、機械部品加工の高速化と無人化が急速に進展するにともない、それに対応できる快削鋼の需要が増加してきている。また、最近の快削鋼は単に被削性が優れているというだけでなく、冷鍛材としても使用できる性質が併せて要求されることも多くなった。このような背景において、当社は連続鋳造法の特長を生かして、被削性と冷間鍛造性をともに満足できる低炭素硫黄快削鋼の製造技術確立した。本報は硫黄快削鋼を連続鋳造する場合の製造技術上の問題検討および対策、また、当方法で製造した製品の被削性および冷間鍛造性などの品質特性について述べる。

2. 連続鋳造法による製造上の問題点とその対策

硫黄快削鋼の最重要特性である被削性に対しては、硫化物形態が大きく影響することが良く知られている¹⁾。被削性に好影響を与える紡錐形の硫化物を得るためには、鋼中酸素含有量を200~300 ppmに制御する必要があるといわれている²⁾。このレベルの酸素含有量は、凝固時における気泡発生に対し極めて不利となり、製品の表面性状を劣化することから、連鋳法の推進

に対し最大の阻害要因であった。また、鋼中の酸素含有量の高いことから、耐火物の溶損、パウダーの劣化などの諸問題が発生し、これらの検討および対策が連鋳法による製造可否を決定する重要な課題となる。

2.1 気泡発生の抑制

硫黄快削鋼の場合、被削性の問題からSi, Alなどの脱酸元素の添加を避けなければならない³⁾が、脱酸不足の場合は鋳片表皮下にブローホール欠陥が生じる。R. B. G. Yeo⁴⁾は高硫黄鋼のリミングおよびキルド状態の区分をSおよびMn濃度によりFig. 1のように示している。当社で製造している快削鋼の成分範囲を図中に示すが、連鋳化対象のうちSAE 1213, SAE 1215は一部リミング領域となる。そこで、両鋼種の鋳片表面の気泡発生限界を調査するためにMnを0.90% (一定)としSを0.003~0.300%, Oを100~300 ppmと変化させた溶鋼中に鋼棒を挿入し、これに溶鋼を付着凝固させて気泡発生状況を調査した。溶鋼中の自由酸素濃度(a_0)と気泡発生の関係をFig. 2に示す。 $[S] > 0.100\%$ の場合 $a_0 \leq 200$ ppmで気泡の発生を抑制できる⁵⁾。硫黄快削鋼のような高S, 高Oの溶鋼では a_0 と鋼中酸素量(O_T)がほぼ一致することから、Fig. 3に示すTap [C]により酸素量を100~200 ppmに制御すれば、気泡発生は防止できる。

*1 昭和58年3月19日原稿受付

*2 水島製鉄所管理部検査課課長

*3 水島製鉄所管理部検査課課長

*4 水島製鉄所管理部条鋼管理室主任(掛長)

*5 水島製鉄所製鋼部製鋼技術室

*6 技術研究所水島研究部主任研究員(課長)

*7 技術研究所水島研究部主任研究員(掛長)

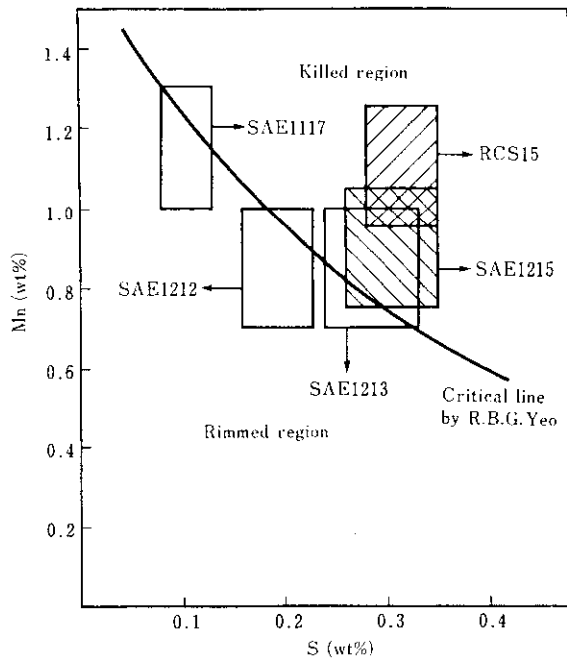


Fig. 1 Relation between Mn and S contents on rimming

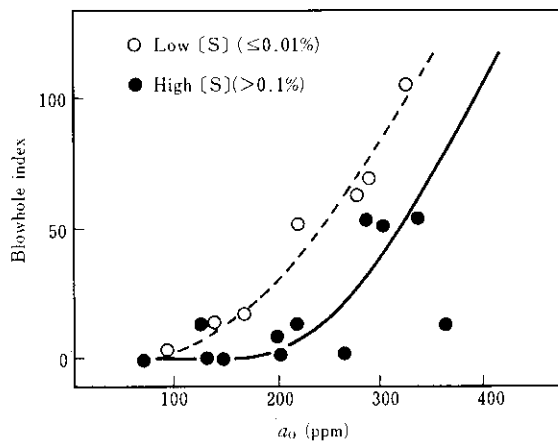
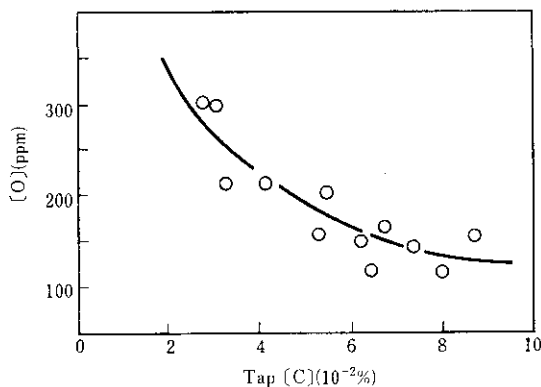
Fig. 2 Influence of oxygen activity, a_O , on blowhole generation

Fig. 3 Relation between [C] at tapping and [O] in tundish

2・2 浸漬ノズルの溶損対策

硫黄快削鋼の成分系は耐火物の溶損に対し極めて不利である。

特に浸漬ノズルの溶損は鋳造を継続する上で問題があるばかりでなく、品質面へも悪影響を及ぼす。浸漬ノズルの耐溶損性について SiO_2 質、 Al_2O_3 質および ZrO_2 質の比較調査を行った。溶損量と溶鋼 S 量の関係を Fig. 4 に示す。 Al_2O_3 質および ZrO_2 質ノズルの溶損量は少なく、かつ、S 量に依存せず一定である。これに対し、 SiO_2 質ノズルは S 量の増加にともない溶損量が増加し、S が 0.300% の場合、 ZrO_2 質の 5 倍程度となる。

さらに、酸素量によっても大きく影響され Fig. 5 に示すように高酸素量になるほど溶損量は増加する傾向にある。 SiO_2 質ノズルは溶鋼との濡れ性が大きく、また、表面に低融点の MnO-SiO_2 層が生成するため、表面活性化成分である S, O の影響を受けやすいものと考えられる。したがって、浸漬ノズルの材質は連鋳作業上および品質面からも耐溶損性の優れた ZrO_2 質が好ましい⁶⁾。

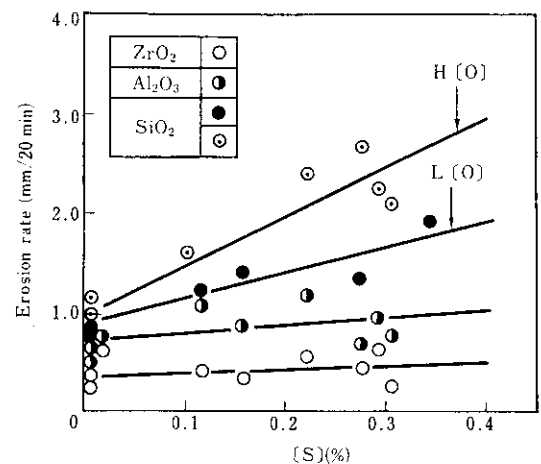


Fig. 4 Effect of [S] on erosion rate of immersed nozzle

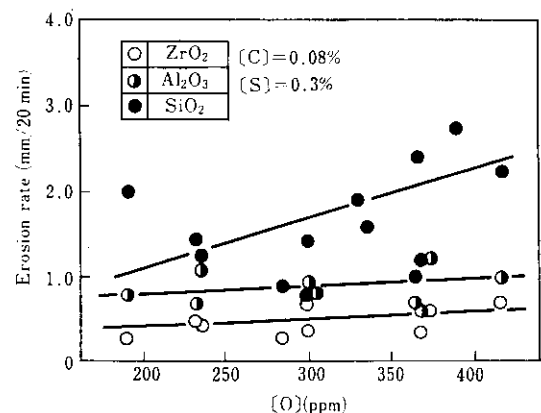


Fig. 5 Effect of [O] on erosion rate of immersed nozzle

2・3 硫化物の形態

硫黄快削鋼の被削性を支配する主要因子として硫化物の形態、組成、量および分布状態などが挙げられるが、これら諸要因に対しては凝固条件の影響が大きいと考えられる。鋳片における硫化物の平均粒径の分布を Fig. 6 に示す。連鋳材の硫化物は造塊材より若干小さい。これは連鋳法の場合、造塊法にくらべ鋳型断面が小さく、さらに、凝固速度も早いためと考えられる。

差分法による二次元伝熱解析を行い、凝固点における冷却速度と硫化物の平均粒径の関係をFig. 7に示す。冷却速度10～30°C/minにおける硫化物の平均粒径は10～15 μmと高田らの値⁷⁾より若干大きい。冷却速度が小さくなるほど、硫化物粒径が大きくなる傾向は一致する。しかし、Fig. 6からもわかるように硫化物粒径に対し、連铸の銑片断面サイズの影響は少ない。これは銑片断面サイズの違いによる冷却速度差が通常の連铸操業条件範囲内では小さく、硫化物粒径に差が出るに至らないためと考えられる。

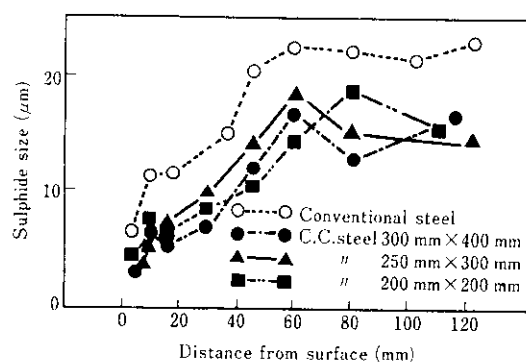


Fig. 6 An example of sulphide size variation in continuous-cast steel and conventional steel with distance from surface

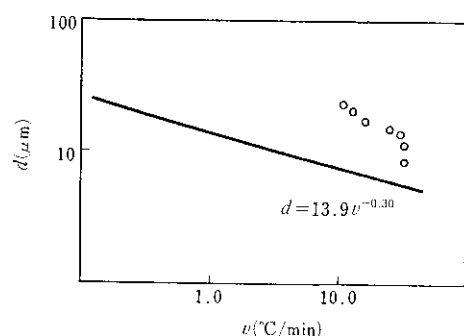


Fig. 7 Relation between average size of sulphide, d , and cooling rate of solidification front, v , in bloom

3. 連铸材の品質特性

3.1 内質および表面性状

製品棒鋼における硫化物形状比と鋼中全酸素量の関係をFig. 8に示す。被削性に好ましい紡錘形の硫化物を得るに必要な酸素量は造塊材の場合200～300 ppmであるといわれているのに

対し、連铸材の場合、造塊材と同程度の硫化物形状比を確保するのに必要な酸素量は100 ppm以上でよいことになり、鋼中酸素量を低減できる⁸⁾。これは同一製品径に至るまでの压下比が造塊材よりはるかに小さいため硫化物の延伸が少ないことによるものである。

さらに、造塊材の場合、硫化物形態を考慮して酸素量200 ppm以上を狙うためブローホールの生成あるいは耐火物溶損などにもなるMnO-SiO₂系の介在物による表面疵、地疵が発生しやすい。そのため製品の冷間引抜き加工あるいは切削加工時の割れなどの欠陥原因となる。Fig. 9に磁気探傷による製品の表面疵評点と酸素量の関係を示す。連铸材の場合、酸素量を150 ppm程度に管理することで優れた表面状況を得ることができる。

3.2 被削性

被削性の評価は超硬およびハイス工具による長手旋削ならびに突切り切削試験で行った。試験条件をTable 1に示す。突切り

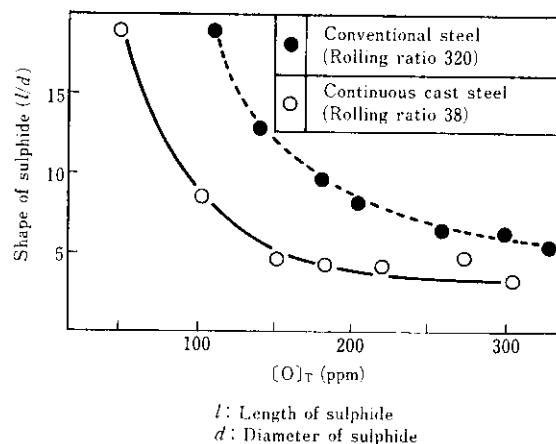


Fig. 8 Relation between $[O]_T$ and shape of sulphide

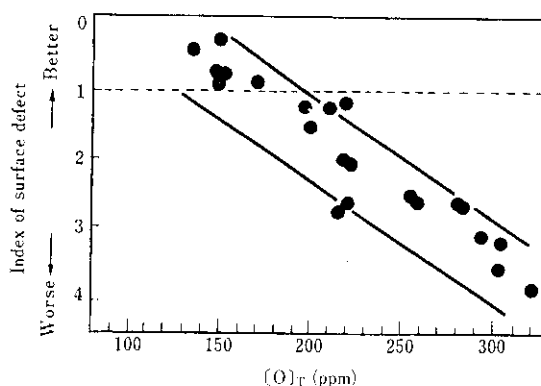


Fig. 9 Relation between $[O]_T$ and index of surface defect

Table 1 Machinability test conditions

Machinability test	Turning test		Cutting-off test	
	P 10	SKH 4	P 20	SKH 4
Tool				
Tool profile	-5, -5, 5, 5, 15, 15, 0.8	-5, 15, 5, 5, 15, 15, 0.8	See Figs. 10, 11	
Cutting speed, V (m/min)	140~360	80~140	16~100	20~80
Feed, f (mm/rev.)	0.25	0.25	0.10	0.10
Depth of cut d (mm)	2.0	2.0	—	—
Cutting fluid	Dry	Dry	Dry	Wet

試験は鳴瀧^{9,10)}の試験法を参考に工具形状を決定した。Fig. 10 および 11 には超硬およびハイス工具を用いて突切り試験を行ったときの工具摩耗特性を示す。前者は前逃げ面摩耗がほとんど認められないことから横逃げ面摩耗で評価した。後者は前逃げ面摩耗が切削数の増加とともにほぼ直線的に進行するのに対し、横逃げ面は初期摩耗が著しく、測定値が不安定なため前逃げ面摩耗で評価した。

3・2・1 圧延材の被削性

長手旋削試験による被削性評価を連铸材と造塊材について行った結果を Fig. 12 に示す。被削性は連铸材と造塊材で違いがないことがわかる。Fig. 13 には製品棒鋼の径方向各位置にお

ける試験結果を示す。連铸材の表層部は硫化物が微細であるにもかかわらず造塊材と比較して被削性の低下が認められない¹¹⁾。

切削加工中における硫化物の作用は切削剪断域における内部応力集中源および工具と切屑間の粘性体潤滑作用が考えられ、

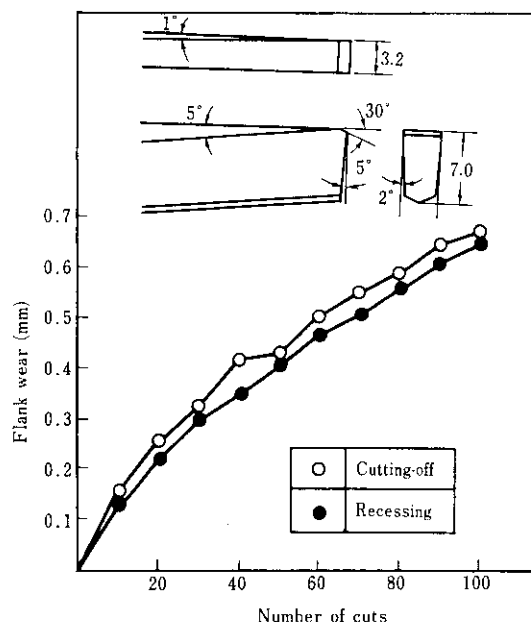


Fig. 10 Relation between number of cuts and flank wear (Tool: P20)

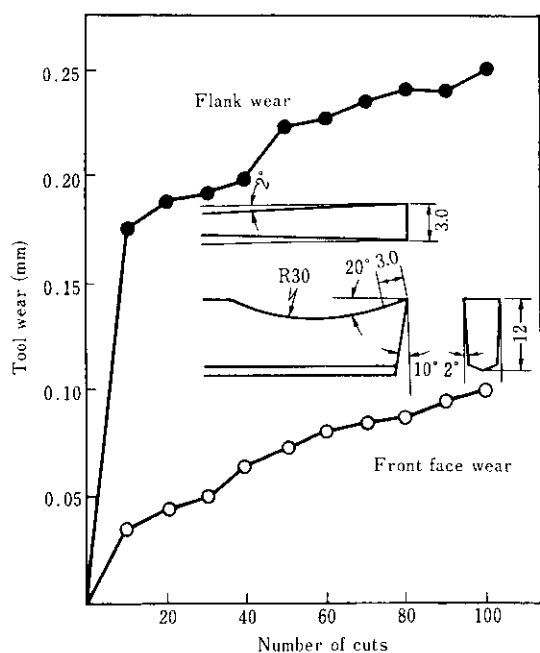


Fig. 11 Relation between number of cuts and tool wear (Tool: SKH 4)

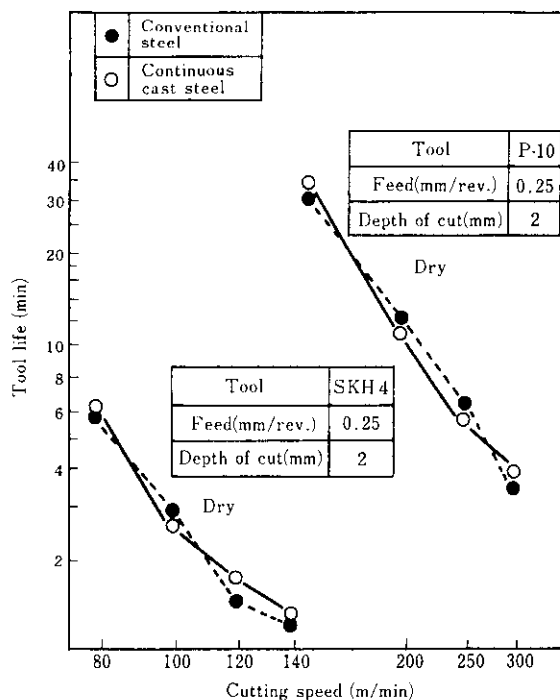


Fig. 12 Comparison of V-T curves in turning test, between conventional and continuous cast steel

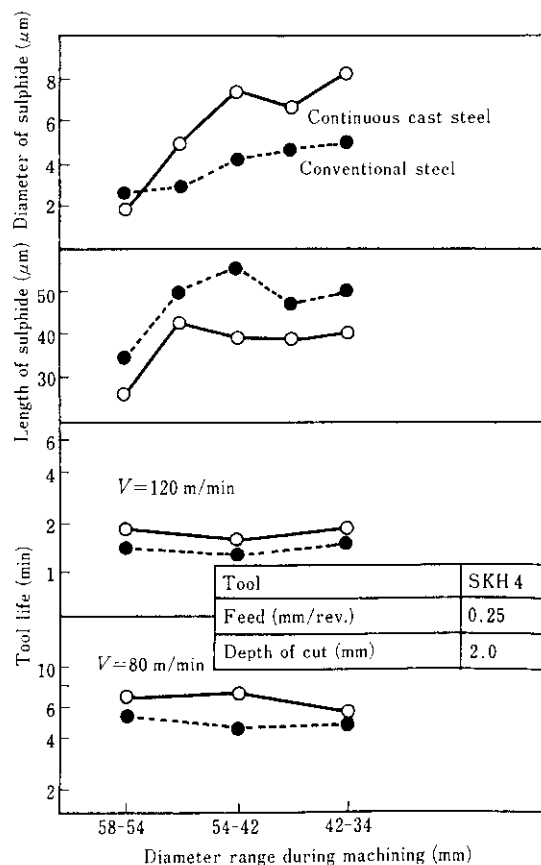


Fig. 13 Radial distribution of sulphide shape and tool life in $\phi 60$ mm specimen

一般に硫黄快削鋼の場合、前者の効果が大きい¹¹⁾といわれている。

連鋳材の被削性が造塊材と同等の特性を示すのは硫化物の大きさが総体的に小さいにもかかわらず、紡錘形の硫化物が安定して得られるためであろう。さらに、連鋳材表層部の硫化物微細域においても被削性が低下しないのは硫化物の数が多くしかも均一分布するため硫化物間の間隔が小さくなることによる効果と考えられる。

3.2.2 冷間引抜き加工度と被削性

連鋳法で製造した棒鋼について冷間引抜き加工後の被削性を調査するために減面率5~24%の4水準に引抜き加工した。引抜き加工後の材質特性は一般に減面率の増加にともない硬さおよび強度は上昇し、延性および靱性が低下する。

ハイスおよび超硬工具を用いて長手旋削試験を行って得られた減面率と工具寿命の関係を Fig. 14 および Fig. 15 に示す。ハイス工具ではいずれの切削速度においても減面率が大きくなるほど工具寿命が延びる。一方、超硬工具では減面率が大きくなるほど工具寿命が短くなり、ハイス工具とは逆の傾向を示す。引抜き加工にともなう延性の低下は切屑剪断面のボイドおよびミクロクラックの発生を促進させることにより、ハイス工具の場合には摩耗を抑制する。超硬工具を用いた場合、本実験における切削速度は140 m/min 以上であるため切屑剪断面の温度が高くなり、材料特性の回復がおり、引抜き加工の影響があらわれなかった¹²⁾ものと考えられる。

切屑厚さは Fig. 16 のようにハイスおよび超硬工具とも切削速度が早くなるほど、また、減面率が大きいものほど薄くなる。

Fig. 17 は切削面粗さの測定結果を示す。減面率が大きくなるほど切削面粗さ (R_{max}) は小さくなる。超硬工具では切削時間の経過にともない切削面粗さが小さくなるのに対し、ハイス工具では経時変化が認められない。

引抜き加工にともなう延性の低下は切削面粗さおよび切削厚さに対し有利に作用する。特に超硬工具では構成刃先の生成がハイス工具より少ないことなどが切屑厚さおよび切削面粗さを

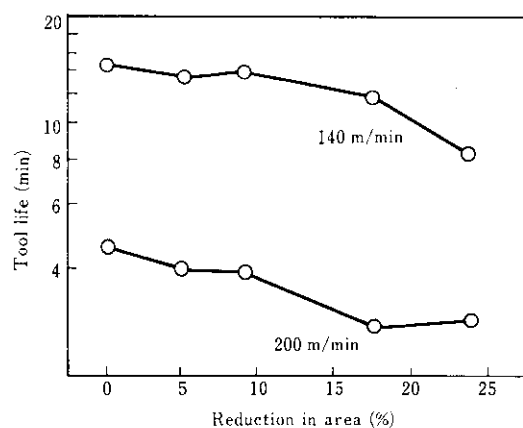


Fig. 15 Influence of cold drawing on tool life in turning test (Tool: P10)

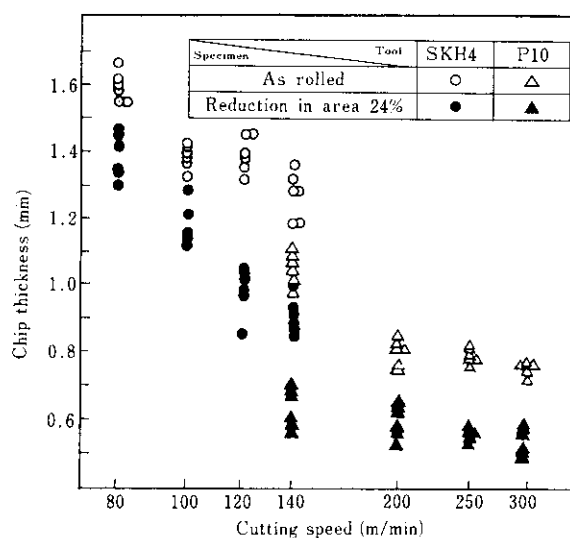


Fig. 16 Relation between cutting speed and chip thickness in turning test

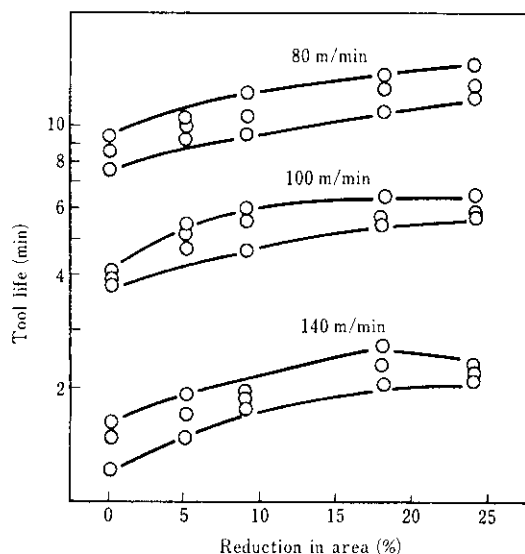


Fig. 14 Influence of cold drawing on tool life in turning test (Tool: SKH4)

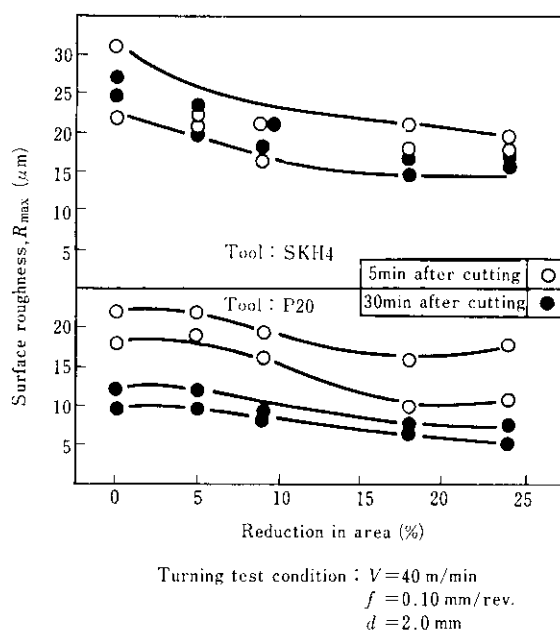


Fig. 17 Relating between reduction of area and surface roughness, R_{max}

小さくしていると考えられる。

次に、ハイスおよび超硬工具を用いて突切り切削試験を行った結果を Fig. 18, および 19 に示す。両工具とも減面率が大きくなるほど工具摩耗は減少する。また、突切り切削の場合、周速 50m/min 近傍の工具摩耗が著しい。この現象を構成刃先との関連において検討した。構成刃先の生成は低速切削域で著しい¹³⁾といわれている。Fig. 20 に突切り切削時における低速切削割合（全切削に対する切削速度 20m/min 以下の占める割合）と工具摩耗の関係を示す。低速域ですべて切削が行われる場合、構成刃先は安定付着するため摩耗が抑えられる。低速域切削の割合が 40% 程度を占める条件下では構成刃先の生成および脱落をくり返すため摩耗が促進される。この割合が 40% より少なくなると構成刃先の生成頻度が減少することから、脱落時の摩耗が抑制されるものと考えられる¹⁴⁾。

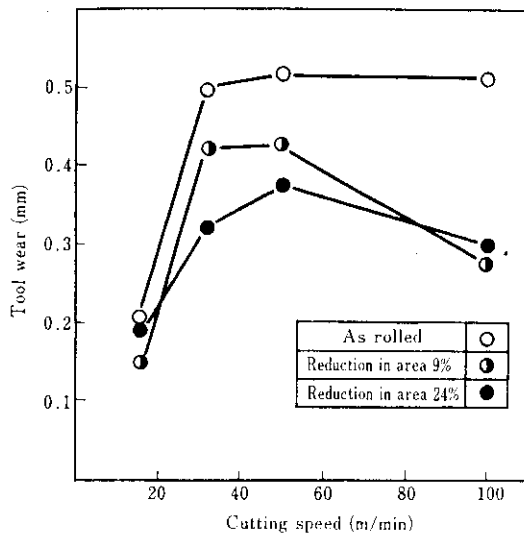


Fig. 18 Influence of cutting speed on tool wear in cutting-off test (Tool: P-20)

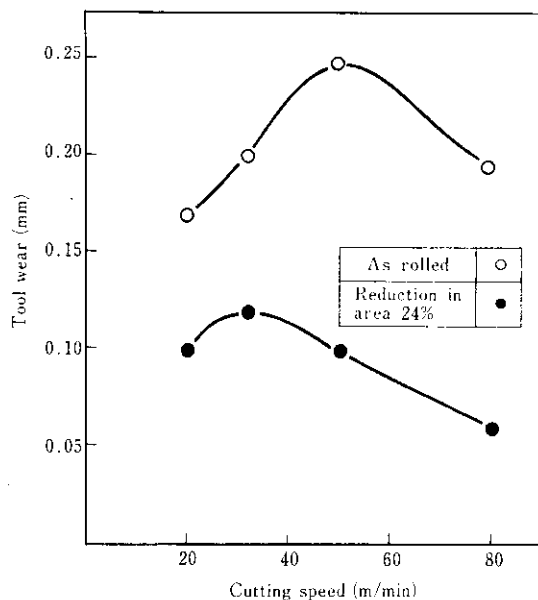


Fig. 19 Influence of cutting speed on tool wear in cutting-off test (Tool: SKH4)

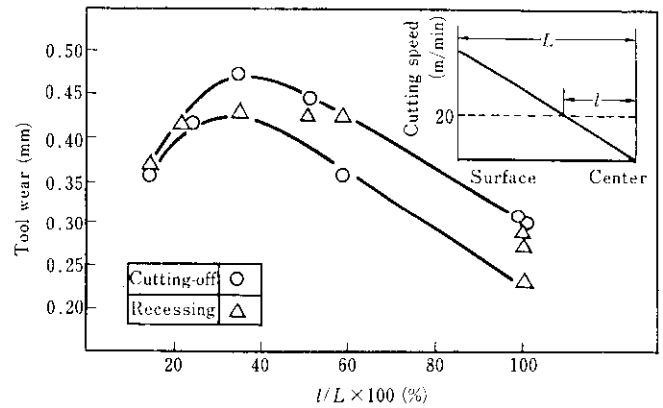


Fig. 20 Relation between l/L and tool wear in cutting-off test (Tool: P20)

3.3 冷間鍛造性

一般に冷間鍛造性と被削性は相反する特性であるといわれているが、最近では本鋼種においても冷鍛性を要求されることが多い。連铸材と造塊材について冷鍛特性を比較調査した。冷鍛性の試験は塑性加工学会冷鍛分科会推奨¹⁵⁾の試験治具および試験片を用い低速速度で実施した。

冷鍛性の試験結果を Fig. 21 に示す。連铸材は造塊材に比較し加工限界までの圧縮歪量が大きく冷鍛性が優れる。Photo. 1 には冷鍛性試験後の割れ部のミクロ観察結果を示す。造塊材は連铸材にくらべて表層部から粗大硫化物が多く存在しており、比較的小さい歪量で硫化物を起点に割れが発生し、歪量の増加にともない硫化物を伝播しつつ割れが進展する。これに対し、表層部に微細な硫化物の存在する連铸材は割れ感受性が小さい。Fig. 22 には限界圧縮歪量に及ぼす供試材表層部の微細硫化物域厚さ (t_s) の影響を示す。 t_s が増加するほど冷鍛性が向上することから、連铸材の造塊材に対する冷鍛性の優位性が硫化物の微細域厚さから説明される¹⁶⁾。

さらに、冷鍛性に関しては酸化物系介在物も悪影響をおよぼす。この点、連铸材は酸素量の低減が可能であるために、酸化物系介在物も少なく、Fig. 21 に示す造塊材（高酸素）のように冷鍛性が極端に低下することもない。

4. 結 論

当社では従来より困難とされていた低炭素硫黄快削鋼の連続

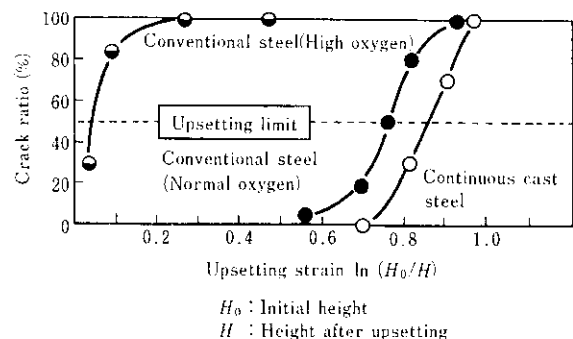


Fig. 21 Relation between upsetting strain and surface crack ratio of upset specimen

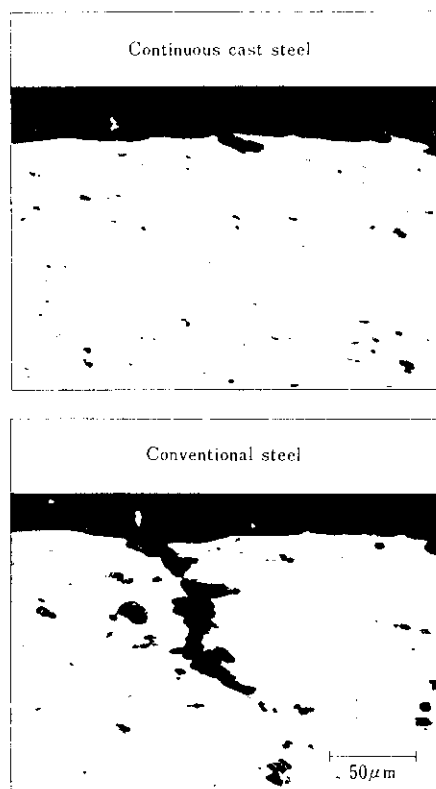


Photo. 1 Typical micrographs of crack observed at cross section

製造化に成功した。連続製造に際しての主な問題は①ブローホールの発生、②耐火物の溶損、などがあり、これらに対しては①脱酸コントロール技術の確立、②適正耐火物材質の選定、な

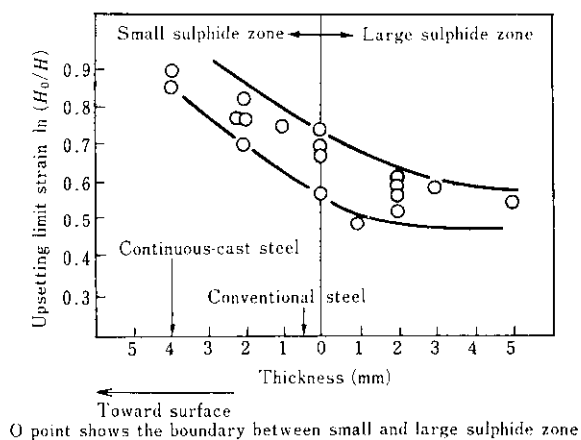


Fig. 22 Relation between upsetting limit strain and thickness of small sulphide zone at surface of specimen

どにより健全な鋸片の製造が可能となった。

連铸材の品質特性は、造塊材に比較し素材から製品までの圧下量が小さいことにより、鋼中酸素量を低減しても紡錘形の硫化物が得られ、さらに、酸化物系介在物も減少できる。そのために、被削性は造塊材と同等の特性が得られる。さらに、冷間鍛造性は表層部の硫化物が微細であること、および酸化物系介在物の少ないことから造塊材にくらべ大幅に向上する。被削性と冷鍛性は相反する特性であるといわれていたが、連铸法で製造することにより両特性を満足することが可能となる。

以上のことから、連続製造製の硫黄快削鋼は被削性および冷間鍛造性が優れ、省エネルギーおよび歩留り向上の観点からも今後の主流プロセスになると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば山本、山口：マシニスト，13 (1963) 5, 31
- 2) 例えば T. J. Baker et al. : JISI, 210 (1972), 686
- 3) O. Weidman : Stahl u. Eisen, 56 (1963), 790
- 4) R. B. G. Yeo : Metals, July (1967), 23
- 5) 上杉、荒木、山本、西村、和田、岡野、峰：鉄と鋼，68 (1982) 2, 85
- 6) 新庄、岡野、松野、和田、大森、佐藤：鉄と鋼，67 (1981) 5, S195
- 7) 高田、金子、井上、木下：鉄と鋼，62 (1976) 7, 866
- 8) 山本、西村、和田、上杉、新庄、岡田：鉄と鋼，67 (1981) 5, S196
- 9) 鳴龍、越智：精密機械，41 (1975) 8, 70
- 10) 鳴龍、越智、古本、山口：精密学会秋季講演大会，(1977), 51
- 11) 小石、荒木、西村、山本：鉄と鋼，67 (1981) 13, S1372
- 12) 山口、下畑、喜多：神戸製鋼技報，24 (1974) 3, 16
- 13) 精密工学講座 No. 1, 「切削工学」，(1974) [コロナ社]，282
- 14) 小石、荒木、西村：精機学会切削加工専門委員会，「最近の鋼の被削性」シンポジウム 昭和57年10月
- 15) 冷間鍛造分科会材料研究班：塑性と加工，22 (1981) 241, 139