

Fig. 4.38. Layout of cooling trough and slow cooling cover and temperature pattern. (Oba, Yatsuka, Tanabe *et al.*: *CAMP-ISIJ*, 1 (1988), p. 837)

などの応用による圧延制御のインテリジェント化，スキルフリー化が必要である。

さらに，次世代ミルとして，以下の技術が重要と考えられる。

- ① パーツ製造までの一貫工程コストダウンに寄与する材質を造り込むためのプロセス (TMCP など)
- ② ニヤネットシェイプ化に対応した形状の鋼材製造のためのプロセス (中間サイズ，異形断面)
- ③ 寸法精度，表面性状のレベルアップと品質保証技術
- ④ スケジュールフリー，小ロット対応を含めた圧延稼働率向上のためのプロセス
- ⑤ レーイングヘッドでの巻き取り形状，通材性の改良などによる圧延の高速化 (現状実績 100 m/s → 150 m/s)

4.4.2 継目無鋼管製造法

(1) はじめに

1975年から1985年にかけては第2次オイルショックを契機とした油井管ブームもあって，設備投資意欲も旺盛で国内外で十数基の熱間継目無鋼管製造設備が建設されたが，本稿で対象とするその後の10年間は需要の低迷期にあたり恒常的設備過剰に悩まされることとなった。国内においては円高により輸出競争力に陰りがでてきたこと，慢性赤字体質により投資意欲は減少し，技術開発も全体的には活発とは言えなかった。新規の設備投資は主に中進国を中心に行われ，安価なエネルギー，労働コストを背景に輸出市場に参入する企業が出現した。また製品の面からは使用環境の過酷化に伴って高合金化が進んだ。このような環境下で材質の高合金化，製品の高精度，高品質化に応じた技術開発がなされた。以下にいくつかのトピックスを取り上げ解説を行う。また本稿は継目無鋼管製造法のなかで熱間圧延技術を取り上げることとし，比較的技術変化の少なかった押し出し法や冷間加工技術については割愛させていただく。

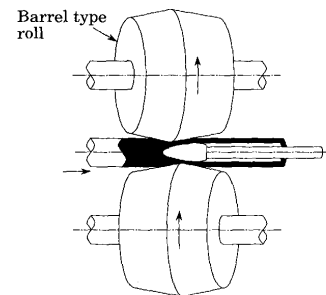


Fig. 4.39. Mannesmann piercer.

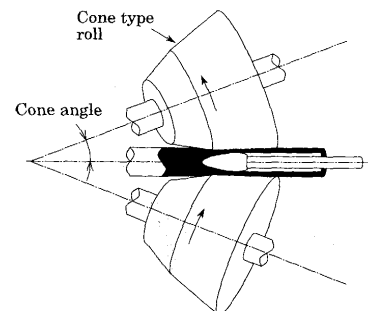


Fig. 4.40. Cone piercer.

(2) 穿孔圧延

(a) 交叉穿孔機

継目無鋼管の大量生産ラインに用いられる傾斜ロール穿孔機には特筆すべき進歩があった。Fig. 4.39は従来から広く使用されているマンネスマンピアサの模式図で，向かい合って傾斜して配置された樽型 (バレル型) のロールにより丸鋼をプラグに対して押し込んで中空素管を成形する。これに対して Fig. 4.40に示すコーン型のロールを用いる交叉穿孔機またはコーンピアサと呼ばれる穿孔法がある。このタイプの近代的な圧延機は約10年ほど前から用いられるようになっているが，その後しだいにその技術的優位性についての理解が進んでいる。交叉穿孔機ではコーン型のロールを用いるためロール径が圧延方向にしだいに大きくなるので，管が進行方向にブレーキされず，ピアサの宿命と考えられていた回転鍛造効果を抑制する効果があること，また円周方向の剪断歪が小さいことが示されている。回転鍛造効果，円周方向の剪断歪の抑制により従来のマンネスマンピアサでは内面疵発生

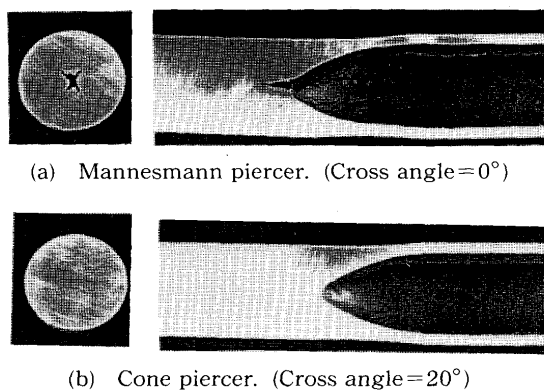


Fig. 4.41. Effect of cone angle on Mannesmann effect. (*Sumitomo Met.*, 46 (1994), p. 106)

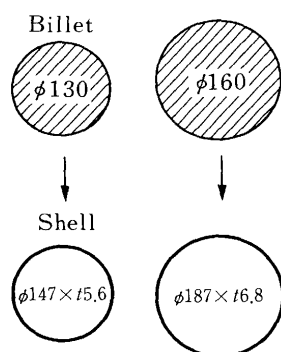


Fig. 4.42. Example of pierced shell. (*TPT-USA*, (1991), March-April, p. 20)

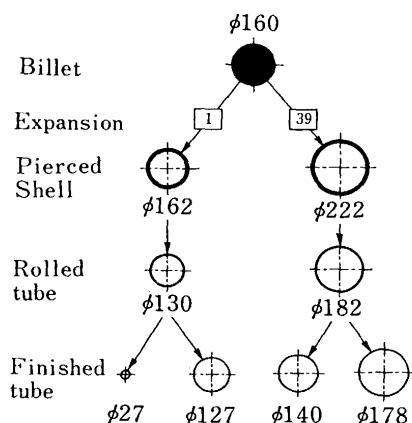


Fig. 4.43. Example of rolling schedule. (*Metall. Plant Technol.*, 4 (1987), p. 80)

のため穿孔がむずかしい難加工性材料の穿孔が可能となった。Fig. 4.41 に穿孔途中止め材の比較を示す。交叉穿孔法によりプラグ前での回転鍛造効果に起因する割れの発生が防止されている。難加工性材料の内面疵発生に及ぼす穿孔条件を系統的に調査した結果では、加工度が大きいほど、丸鋼加熱温度が高いほど内面疵が発生しやすいことまた傾斜角が大きいほど穿孔疵は発生しにくい、難加工性材料になると傾斜角に加えて交叉角を付与することで初めて疵の無い穿孔が可能となることなどが明らかとなっている。交叉角は通常 $10 \sim 30^\circ$ が用いられるが、一般的には交叉角が大きいほど穿孔に有利であるとされている。

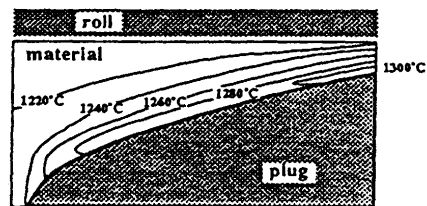


Fig. 4.44. Temperature simulation during piercing. (*CAMP-ISIJ*, 6 (1993), p. 370)

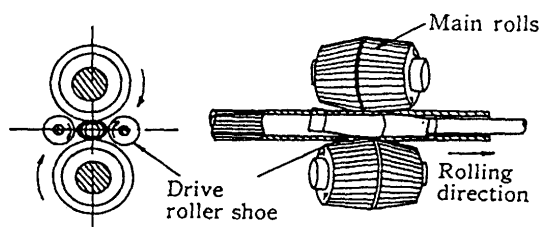


Fig. 4.45. Drive roller shoe. (*Kawasaki Steel Gihō*, 21 (1989), No. 1, p. 13)

(b) 拡管穿孔法

交叉穿孔機の別の使い方として拡管穿孔法がある。バレル型ロールでは拡管比(穿孔外径/鋼片外径)は $1.0 \sim 1.1$ だが、コーン型ロールでは $1.4 \sim 2$ の穿孔が可能となる。また肉厚の圧下と同時に外径を拡管するので無理無く穿孔でき、従来のピアサより薄肉の穿孔材が得られる (Figs. 4.42, 4.43)。今後の製管ラインの構成はピアサで従来より加工度を大きくし後続の延伸圧延機を軽負荷とする方向となっていくと思われる。また拡管率を制御すれば同一の鋼片から外径の異なる穿孔材が得られるので製管工場に供給する鋼片の外径種類を減少できる。

(c) マンネスマン穿孔機での高合金鋼の穿孔技術

ステンレス鋼のマンネスマンピアサによる穿孔時の2枚割れ状の疵発生原因推定のため穿孔過程でのプラグと材料の温度解析が行われている (Fig. 4.44)。その結果加工発熱により、管内表面より若干内部に入った位置で最も温度が高くなって Zero-Ductility 温度域に達するため疵が発生すること、また防止策として加熱温度を低くし、穿孔速度を低下させることが有効なことが示されている。穿孔疵には丸鋼加熱温度、穿孔速度のみならず加工度や傾斜角、交叉角などの穿孔条件も大きく影響するので、これら穿孔条件の疵発生への影響についての統一した理論的な説明が今後の課題である。

(3) 延伸圧延

(a) エロンゲータドライブローラ式ガイドシュウの開発

傾斜式エロンゲータのガイドとしては近年はディスクロールタイプが一般に用いられる。これに対して既存の固定式ガイドの欠点を簡単な設備改造で改善する目的で、ローラ式シュウが開発された。Fig. 4.45 に示すように圧延ロールの左右に各々1本のドライブするローラを配置し、かつローラと圧延ロール間にガイドプレートを設置する。固定式ガイドを大幅に上回る品質、生産性、シュウ原単位の低減を実現

でき、特に合金鋼に顕著な効果が見られている。

(b) マンドレルミルの大型化、コンパクト化

バー操作方法には圧延中バーを自由にフロートさせるフルフロート、バー速度を一定に制御するリテインドの2種類ある。最初に実用化されたのはフルフロート方式で、1960年代に建設が開始され5'以下の小径サイズに用いられていた。その後リテインド方式の開発により大径化が進行した。最初ダルミネに133/8''ミルが建設され、その後は95/8''~103/10''ミルが多く建設され、このサイズレンジでは従来のプラグミル製管方式を凌駕するに至った。最近旧ソ連に163/4''ミルが建設されたが、操業が順調に行われているとはいいがたいようであり、163/4''ミルの技術的、経済的評価についてはまだ定まらない。ここ十数年のマンドレルミルの設備上の進歩は上述の大径化と付随する設備のコンパクト化、スタンド数の削減である。また最近3ロールマンドレルミルの提案がなされている (Fig. 4.46)。

(c) マンドレルミルの理論

マンドレルミルはタンデム圧延であり、変形が3次元なので管の変形が複雑で、孔型や回転数の設計がむずかしい。薄肉品、合金鋼の圧延に特に工夫を要する。経験的手法では限界があるため理論解析が行われており、最近では3次元剛塑性有限要素法の適用も試みられている。Fig. 4.47 は剛塑性

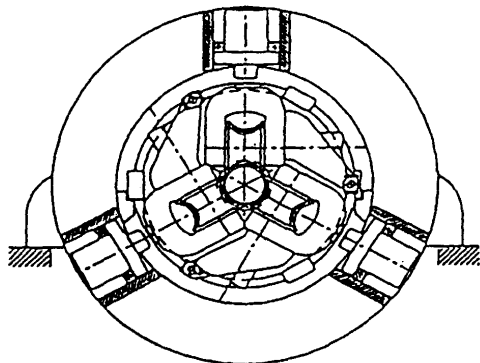


Fig. 4.46. 3 roll mandrel mill. (Proc. ITA Conf., Italy, (1993))

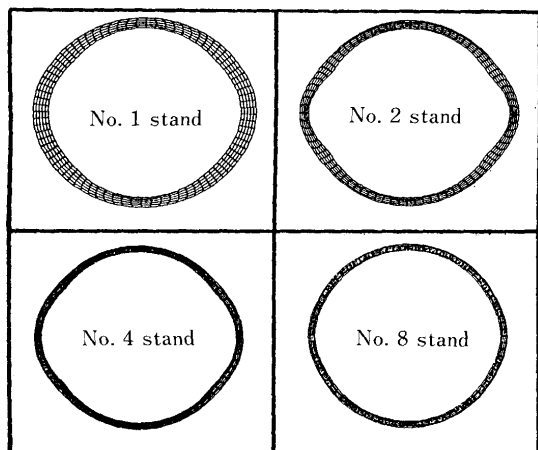


Fig. 4.47. FEM analysis. (Proc. 3rd ICTP, 2 (1990), p. 701)

有限要素法での解析を行った例で予測がむずかしいフランジ側の外径、肉厚が計算されている。今後はさらなる高精度モデルの開発が必要で、3次元剛塑性有限要素法の実用化とそのタンデム理論への組み込みが必要と思われる。

(d) マンドレルミルの計測制御

マンドレルミルの制御は管1本ごとの長さ制御、長手方向の肉厚、外径を均一にする制御が行われる。最近ではスタンド間で管の幅を計測し、制御のモニターとして用いることも行われている。トピックスは、圧延時に管の両管端を薄く予成形して後続のレデューサで管端厚肉化を相殺し歩留向上を狙った技術の開発である。このため管圧延機としては初めて油圧圧下装置が導入された。Fig. 4.48 は管端制御によるレデューサ圧延後のクロープ代の削減効果を示す。

(4) 絞り・定径圧延

(a) 3ロールサイザの大型化と圧延理論

絞り・定径圧延には2または3ロールの孔型圧延機を用いる。外径減少率が~30%の場合をサイザ、~70%の場合をレデューサと呼ぶ。従来3ロールは小径側のレデューサに用いていたが、寸法精度が良いなどの特徴により大径サイズのサイザにも採用するケースが多くなった。圧延上の問題は外径減少率の大きいレデューサに生じ、張力不足のため両管端が厚肉化する管端厚肉化現象と厚肉管の管内面6角張り

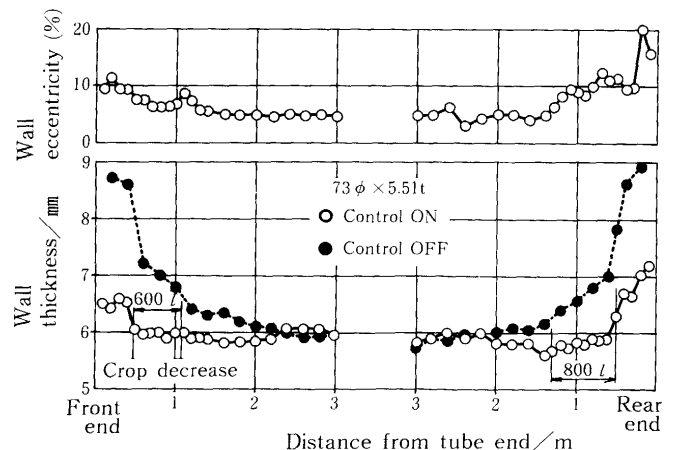


Fig. 4.48. Effect of hydraulic screw down control. (Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28 (1988), p. 440)

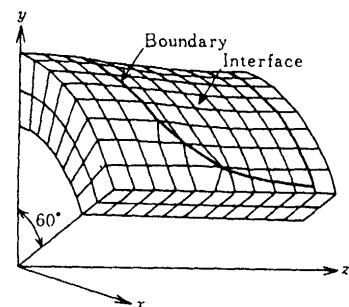


Fig. 4.49. FEM analysis of reducing process. (J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 28 (1987), No. 321, p. 1054)

がある。管端厚肉化については従来から理論的取り扱いが行われていたが、内面6角張りについても実験的解明が進みメカニズムが明らかとなった。また剛塑性有限要素法による解析も一般化した。しかしまだ肉厚の計算精度や計算時間にやや問題があり実生産の孔型、回転数の決定には用いられていないようだ (Fig. 4.49)。

(b) レデュースの計算機制御

制御機能として、管1本ごとの長さを制御する伸ばし長さ制御、レデュース特有の管端厚肉化を軽減するためのクロップエンドコントロールがすでに以前から実用化されているが、オンライン肉厚計の進歩によりレデュース出口側で管肉厚を測定して結果のモニターを行うことが一般的となりつつある。さらに最近ではレデュースの入口側で測定した肉厚情報に基づく管長手方向肉厚分布制御も実用化されている。今後は γ 線肉厚計の応用、制御モデルの改善による高精度化が継続されるものと思われる。

(5) 工具・潤滑

(a) 工具の高寿命化技術

材質の高合金鋼化に伴って、工具・潤滑技術の進歩も著しい。ピアサで高合金鋼を穿孔するときに、プラグ先端部の溶損が生じて問題となる。このためプラグ熱負荷に関する基礎的な検討や新材質プラグの開発が行われている。穿孔時のプラグ温度の測定や、プラグ先端には高温強度の高い材料、また胴部には摩擦特性に優れた異なった特性を有する材質が必要との見解もある。岡らは高温強度向上を目的として Mo, W, Nb を添加し、プラグ表面酸化スケール皮膜の膜厚を増すために Cr 量を低減し、さらに酸化皮膜と母材の密着性の向上を目的として Co を添加することによって新材質のプラグを開発している。この結果 13Cr ステンレス鋼穿孔において従来の3倍のプラグ寿命を達成した。Fig. 4.50 に表面酸化皮膜の比較を示す。従来材質では酸化皮膜が薄くかつ母材と酸化皮膜の界面が比較的平坦であるのに対し、新材質では膜厚が厚くかつ母材との界面が複雑に入り組んでおり、密着性

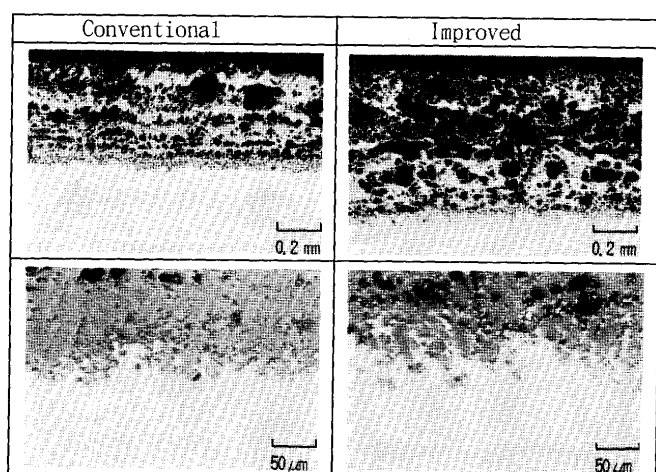


Fig. 4.50. Cross sections of plug surfaces. (CAMP-ISIJ, 6 (1993), p. 382)

向上が期待できる。またロールに関してもピアサロールの合金鋼穿孔時の損耗機構の解明やマンドレルミルロールへの高Crロール適用の試みがなされている。

(b) 潤滑技術

高合金鋼を圧延する際のもう一つの問題点は工具と材料の焼付きである。焼付き対策としてピアサのディスクガイドに摩擦係数の低下の小さいホウ酸系の潤滑剤を用いる技術や、圧延材に酸化鉄と水ガラスの混合物を塗布してロールとのスリップを発生せずに焼付きを防ぐ技術などが開発されている。マンドレルミル、レデュースについても高合金鋼圧延時にはロール焼付きが生じやすく、マンドレルミルにはホウ酸系の潤滑剤、レデュースには通常の油性潤滑油が試用されている。

(6) あとがき

熱間継目無鋼管の大量生産ラインの技術動向について解説を行った。穿孔圧延に関し特筆すべきことは交叉穿孔機の開発であり、難加工性材料の穿孔を可能とただだけでなく高加工度を可能とする優れた特性を有しており、製管ラインの簡略化に寄与している。マンドレルミルについては当初小径管用の技術として開発された圧延技術が、技術の成熟と(設備)更新の時期とも関連してしだいに大径管製造に用いられるようになっており、また設備もコンパクト化、スタンド数も減少の方向にある。上工程との関連において、鋼片サイズを統合する必要から製管工場において中間外径サイジングを行ったり、穿孔機により異なる外径を作り分けるなどの新しい技術も採用されている。さらに解析技術、計測・制御技術の進歩により高精度、高品質製造への努力も継続されている。また製造する材質の高級化に伴って、工具・潤滑技術も着実に進歩し、工具寿命に及ぼす諸因子の影響についての理解が進み、工具寿命の延長が図られた。

4.4.3 溶接鋼管製造

(1) 電縫鋼管製造

電縫鋼管製造技術の高度化に伴い電縫鋼管の品質に対する信頼性は大幅に向上し、コスト的あるいは肌・寸法精度などの優位性を背景に継目無鋼管や潜弧溶接鋼管分野への進出が顕著となった。

電縫鋼管製造技術の高度化として成形技術、溶接技術といった電縫鋼管製造技術の改善開発の他に素材製造技術、品質保証技術などの周辺技術の改善開発により溶接品質の信頼性が大幅に向上した。特に素材製造技術(コイル形状・寸法精度の向上、鋼の清浄化、制御冷却など)の改善開発により製造品種の高級化およびサイズの拡大が図られた。

生産構成の多品種・小ロット化傾向への対応として、ロール組替えの高能率化、ロール位置の自動設定化などが進められた。またコストダウン対応として、ミルの高進化や省力・省工程化を目指した自動化技術の推進、ライン構成の見直しなどが図られた。この傾向は今後ともさらに進むものと思わ