論
Paper
説

熱連成FEMによる孔型圧延特性の評価

河野正道*¹, 五十川幸宏*¹, 川西邦仁*²

Evaluation of Roll Pass Designs by Thermal Mechanical FEM Simulation

Masamichi Kawano, Sachihito Isogawa, and Kunihiro Kawanishi

Synopsis

Workhardable materials like high speed tool steels and super alloys have low ductility and narrow range of temperature suitable for rolling. In the hot profiled rolling of these materials, prevention of cracking in roughing process is significant technique. Considering the strong temperature dependence of deformability, keeping surface of materials high temperature is essential. And relatively homogeneous deformation should be also required. Then thermal mechanical FEM simulations of typical 5 roll pass designs for roughing mill were promoted. The distribution of strain, history of temperature, and mean normal stress at free surface of rolled materials were evaluated. In the view point of surface temperature, square-oval-square method was pointed as the most recommended process. The validity of given results were verified in commercial mass production. The improvement of productivity is supported by the FEM simulation.

1. 緒 言

変形能の温度依存性が大きく、かつ圧延に適した温度範囲が狭いことから難加工性材料と位置付けられる高速度工具鋼や超合金の熱間棒線圧延においては、粗列での割れ防止が重要な課題である。粗列には、素材表層を高温に維持し、素材断面内のひずみ、応力、温度の分布が可能な限り均一である方案が必要と考えられる。

適切なパススケジュールの選定には孔型法の特徴を理解することが不可欠であり、その特徴は接触投影形状や接触投影長などの観点から解説されている¹⁾。しかし、応力、ひずみ、ひずみ速度、温度の断面内分布によら

ず孔型法の影響を、共通条件のもとに比較した例は少ない。そこで、条件を共通とした5種類の孔型法を熱連成の有限要素（以下、FEMと記す）によって解析し、素材表層の温度推移と圧延中の自由面の静水圧応力の観点から、難加工性材料の粗列用として最適な孔型法を検討した。

2. 供試材の加工性

2. 1. 供試材の化学成分

高速度工具鋼Aの成分をTable 1に示す。C量が約1.2%、炭化物形成元素の総量が約20%、Coが12.5%の代表的な

1999年8月17日 受付

* 1 大同特殊鋼（株）技術開発研究所(Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.) * 2 大同特殊鋼（株）知多工場(Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

難加工性材料である。

Table 1. Chemical composition of steel A.

C	Cr	Mo	W	V	Co	Fe
1.18	4.17	5.24	7.30	2.94	12.50	bal.

2. 2. 変形能

圧延用鋼片より作製した試験片を用いて鋼Aの変形能と変形抵抗を評価した。加工方法として端面拘束圧縮法²⁾を採用した。加工温度は973～1373K、ひずみ速度は6.7s⁻¹である。圧縮後の試験片側面の目視観察によって変形能を求めた。

Fig.1に示すように変形能の温度依存性は非常に強い。

Fig. 1. Deformability of steel A in constrained compression test.

限界圧縮率は1273Kから1173Kにかけて急減し、1173Kにおいては50%の圧縮率で割れを生じる。肌焼鋼SCr420は1173Kにおける70%の圧縮率でも割れを生じない。

2. 3. 変形抵抗

実加工速度における変形抵抗は加工発熱の影響を含んでおり、そのままでは熱連成解析用として適当ではない。そこで、塑性仕事の90%が熱に変換される^{3)~5)}として発熱量を計算し、実験データを等温度条件下の値に変換した。等温度化された変形抵抗は次式(1)によって表現した⁶⁾。

$$\sigma = F \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \exp((Q_{\text{def}}/8.31 \cdot T)) \quad (1)$$

ここで、 Q_{def} は活性化エネルギー、 T は絶対温度である。 F は材料定数、 n は加工硬化係数、 m は歪速度依存性指数である。 F 、 n 、 m は T の関数とした。1173K以上の温度域においては、鋼Aは肌焼鋼SCr420の約2倍の変形抵抗を有する。

3. 熱連成FEMによる孔型法の比較

3. 1. 解析方法

小森によって開発された圧延専用の解析ソフト⁷⁾を改造し、プリ・ポストと多パスの連続解析を容易にしたSIMURO-D(SIMULATION of Rolling in Daido)を用いる。本剛塑性モデルは、変形解析を3次元、接触界面における熱移動を1次の差分法、パス間での伝熱解析を2次元の問題として解く。非圧縮性の取り扱いはペナルティ法による。対称性を考慮し、断面内の1/4の領域を解析する。予変形域となる噛込み前および噛出し後の要素数は共に4とした。

2.3において定式化した変形抵抗中の ϵ は弾性ひずみと塑性ひずみの和であるため、 $\epsilon \leq 0.05$ では $\epsilon = 0.05$ として降伏応力を定義し、ひずみ速度0.05s⁻¹を剛体変形のしきい値とする。第2パスへのひずみの残留は考慮しない。

3. 2. 圧延スケジュールと計算条件

孔型法をFig.2に示す。いずれも90°転回して第2パス

	initial	1st pass	2nd pass
SDS	◇	◇	◇
SOS	□	○	◇
SOR	□	○	○
BOX	□	□	□
ROR	○	○	○

Fig. 2. Roll pass designs for roughing mill.

に噛込む。SOS(角→オーバル→角)における第3パス前の45°転回が1/4断面モデルでは解析できないため、現行のSIMURO-DではSOSが2パスの計算となる。他の孔型法は90°転回のための4パスあるいは6パスの解析が可能であるが、SOSに合わせて2パスの解析とする。総減面率42%は5種類の孔型法に共通とした。

Table 2はリバーシングの粗列圧延2パスを想定した計算条件である。第1パス噛込み直前の断面内温度分布は一樣として扱い、スタンド間は無張力とする。

Table 3は各パスの減面率である。Fig.2に示したパススケジュール上の設計値において孔型法を比較した。減面率の範囲は、第1パスが24.0～27.3%、第2パスが20.3～23.7%である。SDSはパス間の差が最小である。

3. 3. 解析結果および考察

設計値に対する幅広がり計算誤差は最大でも5%で

Table 2. Conditions for thermal mechanical FEM simulation.

Shape	Material entered for 1st pass	Roll
	94mm × 94mm × 5m φ 105mm × 5m (for ROR)	φ 600
Initial temperature [K]	1423	323
Heat conductivity [W/(m·K)]	29.12	25.19
Specific heat × Density [J/(m³·K)]	5.313 × 10⁶	4.585 × 10⁶
Coefficient of coulomb friction	0.52	
Roll gap [mm]	5	
Exit speed [m/s]	2.5 (reversing)	

Table 3. Comparison of reduction in area on pass schedule(%).

	SDS	SOS	SOR	BOX	ROR
1st pass	24.0	24.6	26.1	24.4	27.3
2nd pass	23.7	23.1	21.5	23.2	20.3
total	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0

あり、熱連成FEMにおける延伸効率がほぼパススケジュール通りであることを確認した。

3. 3. 1. 加工力

Table 4に示す加工力の大小関係は、Table 3における大小関係とほぼ一致する。SDSは総荷重、総トルクとも孔型法中で最も小さい。

Table 4. Comparison of rolling power in FEM simulation.

	SDS	SOS	SOR	BOX	ROR
1 load/kN	1710	1924	1944	1807	2035
torque/kN·m	82	95	91	85	102
2 load/kN	1263	1257	1210	1260	1059
torque/kN·m	62	56	54	63	57

3. 3. 2. 表層における相当塑性ひずみの分布

Fig.3は対象とする流線をRORの第1パスを例にとつて示す。流線Tは天地、Qは座標系45°方向の表層、Sは

Fig. 3. Stream lines monitored.

左右面である。TとQはロールと接触する流線である。孔型法の比較においては、嚙放し時の相当塑性ひずみを用いる。

各流線における相当塑性ひずみをFig.4に示す。全体的な傾向として、凸型接触であるSDSおよびRORは流線Tにおける値が大きく、凹型接触となるSOSについては

Fig. 4. Comparison of equivalent plastic strain.

流線Qの値が大きい。BOXは流線間およびパス間の差が最小であり、相当塑性ひずみの分布が最も均一な孔型法と言える。SORはSOSとBOXの中間的な傾向を示す。相当塑性ひずみは、SOSの流線Qにおいて0.8程度と特に大きいですが、その他については0.6以下である。

3. 3. 3. 左右面における静水圧応力

孔型圧延においては左右面に割れを生じやすいため⁸⁾、流線Sに沿った静水圧応力を評価する。

Fig.5は相当塑性ひずみに対する左右面の静水圧応力の推移である。静水圧応力は、相当塑性ひずみが0.1～0.15において最大値を示す。Fig.6は、流線Sにおける静

Fig. 5. Relationship between equivalent plastic strain and mean normal stress.

Fig. 6. Comparison of maximum mean normal stress.

水圧応力の最大値である。SDSとRORの静水圧応力はいずれのパスにおいても正であり、圧延中の左右面は引張状態にある。特に、SDSは50~70MPaと大きな値を示す。逆に、BOXとSORは圧縮状態となる。SOSの第1パスは非常に強い圧縮状態であるが、オーバル形状の素材を角

形状に圧延する第2パスでは弱い引張状態となり、オーバル形状の素材を丸形状に圧延するRORの第2パスと同等である。

いずれの孔型法も流線Sにおける圧延方向応力は正で推移した。圧延方向応力の最大値の大小関係はFig.6と全く同じであった。最小値はSOSの第1パスにおける20MPa、最大値はSDS第1パスの200MPaである。いずれのパスにおいても、BOXは100MPa程度であった。

3. 3. 4. 素材表層の温度推移

以下では、ミドル部を対象として温度変化を比較する。

Fig.7は、各流線におけるパス直前とパス直後の温度差 ΔT を示す。 ΔT が負であれば、パス直後の温度はパス

Fig. 7. Comparison of temperature change.

直前よりも低温であることを意味する。逆に ΔT が正の場合は、パス直後の方が高温である。いずれのパスや孔型法においても、ロールと接触する流線Tと流線Qの ΔT は負であり、ロールと非接触である流線Sの ΔT は正となる。

凸型接触となるSDSとRORは流線Tの ΔT が大きく、SDSにおいては-83~-101K、RORの場合は-40~-68Kである。

SOSの第1パスにおいて流線Qの温度低下が小さい理由は、Fig.4に示す通り、相当塑性ひずみが大きく加工発熱量も多くなるためと考えられる。流線Sにおける ΔT の大小関係は、Fig.4における流線Sの相当塑性ひずみの大小関係と一致する。

Fig.8は第1パス直前の状態を基準とした素材の観察部位を示す。SDSにおけるコーナーAは、第1パスでは天地

Fig. 8. Monitoring points of temperature in middle length of rolled materials.

(流線T)，第2パスでは自由面(流線S)として圧延される。角を素材とするSDS以外の孔型法においては、コーナーAとコーナーBは全てのパスでロールと接触する流線Qとなる。以下では、素材の同一部位の温度推移を評価する。

Fig.9はコーナーAの温度推移である。パス番号の前後

Fig. 9. Temperature history of corner-A.

の数値は、それぞれパス直前とパス直後の温度を意味する。Fig.7に示した通り、第1パスにおける低下量はSDSが最も大きく83Kとなった。SDSにおけるコーナーAは、第1パスでの温度低下が大きいため、第2パス直前の温度が対象とした孔型法中で最低となる。

Fig.10は面中央Bの温度推移であり、パス直前と直後の温度差は全てのパスでロールと接触するSDSとRORにおいて大きい。Fig.4とFig.7が示す通り、SOSにおける面中央Bは左右面となる第1パスでの発熱が多く、天地となる第2パスでは凹型接触のためロールへの抜熱が小さい。

第3パス直前におけるコーナーと面中央の温度差に注

Fig. 10. Temperature change of face-B.

目すると、SOSが最も小さく20K、他の孔型法においては23~26Kであった。表層4部位の平均温度はSOSが1393Kで最も高く、BOXは1384Kで最も低くなった。

4. 難加工材用の粗列孔型法の検討

左右面における割れの防止に対して最も有効な孔型法を検討する。

SDSとRORにおいては、天地(流線T)の温度低下が大きく、左右面(流線S)の静水圧応力は正となることが示された。つまり、SDSとRORの場合、前パスで温度の低下した素材の表層部は引張り応力状態となる左右面として次パスに嚙込まれる。したがって、凸型接触となる孔型法は左右面における割れを生じやすく、この傾向は特にSDSにおいて顕著と考えられる。

いずれのパスにおいても左右面の静水圧応力が負となるBOXおよびSORは、左右面における割れの危険性が低いと考えられる。

第3パス直前において、SOSは表層温度の部位間差が最も小さく表層4部位の平均温度が最も高い。SOSは角からオーバルへの45°転回を特徴とする。つまり、6パスあるいは8パスの場合、ロールへの抜熱による特定部位の冷却を防止できると考えられ、表層温度の部位間差は更に小さくなる可能性がある。90°転回のみ他の孔型法においては、このような効果は望めない。

以上より、変形能が強く温度に依存する難加工性材料用の粗列孔型法としては、表層における相当塑性ひずみの分布は不均一であるが、素材表層を高温に維持でき、かつ自由面の引張り応力の弱いSOSが適切と判断できる。

5. 結 言

熱連成のFEMシミュレーションによって、熱間棒線圧延に用いられる5種類の孔型法を比較した。粗列2パスのリバーシング圧延を想定し、総減面率などの条件は共通とした。断面内におけるひずみ、応力、温度の分布を評価し、以下の知見を得た。

- (1) 凸型接触であるSDSとRORの天地は、変形量と温度低下が他の孔型法よりも大きい。この傾向は特にSDSにおいて顕著である。
- (2) 凸型接触であるSDSとRORにおける左右面の静水圧応力は正であり、圧延中の白左右面は引張り状態となる。この傾向は特にSDSにおいて顕著である。
- (3) SDSにおいては、前パスで温度の低下した素材コーナー部が次パスでは左右面として圧延される。素材コーナー部の温度推移、左右面の静水圧応力、素材の変形能の温度依存性を考慮すれば、左右面における割れを最も生じやすい孔型法はSDSと考えられる。
- (4) SOSは表層の平均温度が最も高く、表層温度の部位間差も最小である。また、45° 転回を有するため、多パス時は素材表層の特定部位の冷却が防止され、表層温度の部位間差は更に小さくなる可能性がある。したがって、変形能が強く温度に依存する難加工性材料用の孔型法としては、素材表層を高温に維持できるSOSが適切と考えられる。

(文 献)

- 1) 湯川：第74回塑性加工学講座「圧延加工の基礎と応用」, (1999), 47
- 2) Osakada他：Ann. C.I.R.P., **30-1**(1980), 135
- 3) A. J. Brand他：Materials Science and Technology, **12**(1996), 963
- 4) 小坂田ほか：平成3年度 塑性加工春期講演会, (1991), 39
- 5) 山口ほか：昭和62年度 塑性加工春期講演会, (1987), 359
- 6) 井上：鉄と鋼, **41**(1955), 15
- 7) 小森：日本機学会論文集A, **59**(1993), 2993
- 8) 木内：塑性と加工, **38**(1997), 19