

ロール加熱機構を備えた真空超高温熱間圧延用ロールの開発

金沢工業大学 機械系

講師 瀬川明夫

(平成10年度研究開発助成 AF-1998017)

キーワード：熱間圧延，圧延ロール，真空圧延

1. 緒言

優れた機能を持つ新材料の開発が進められている今日、異なる物理的性質の板材を組み合わせることにより、単一材料で得られないそれぞれの材料の長所を活用した複合材料 (Composite Material) が注目されている。今後はさらなる産業界の発展に伴い金属材料はますます過酷な環境のもとで使用されることになり物理的・化学的・機械的特性を要求される。

筆者はこれまで、クラッド材と呼ばれる板状積層材料の製造法と金属同士の接合界面強度の検討および評価法について研究を行ってきた。現在は真空雰囲気中でのクラッド材の製造および諸特性の解明を行っている。

本研究室所有の真空圧延機は冷却水路の確保や電力供給の問題でロール温度を圧延材の加熱した温度ほど上げることができず (材料は 1100℃，ロール表面温度は 500℃まで加熱でき最高温度差が 600℃にも及ぶ)，ロール表面温度と被加工物の温度差により接合力低下や表面変質などが起こり最終製品の精度を著しく低下させることが懸念される。

本研究は、真空圧延機の圧延ロールの中心に通っている軸受冷却水路を利用し、内部ヒーターを設置し、加熱することによってロール表面温度の恒温状態を維持する機構を構築し、製品品質の向上を図るものである。

今回、ロール表面加熱用の内部ヒーターを設計、製作し、ヒーター単体での性能と内部ヒーターを圧延用ロールに組込んだ状態で、大気中 (室温) にて昇温実験を行い、電圧と温度の較正曲線の作成。真空圧延機内にヒーターを組み込んだ際の問題点を明らかにすると共に、その対策を検討した。

2. 真空圧延機

2.1 真空圧延機について

真空中で熱間圧延することの大きな特徴は、非酸化雰囲気であるため、大気中では酸化して加工しにくい金属が容易に加工できること、さらに脱ガスを助けるために清浄な仕上げ表面状態が得られることである。

真空圧延機 (KIT HIGH-TECH MILL と呼称している) の外観を図 1 に、仕様を表 1 に示す。

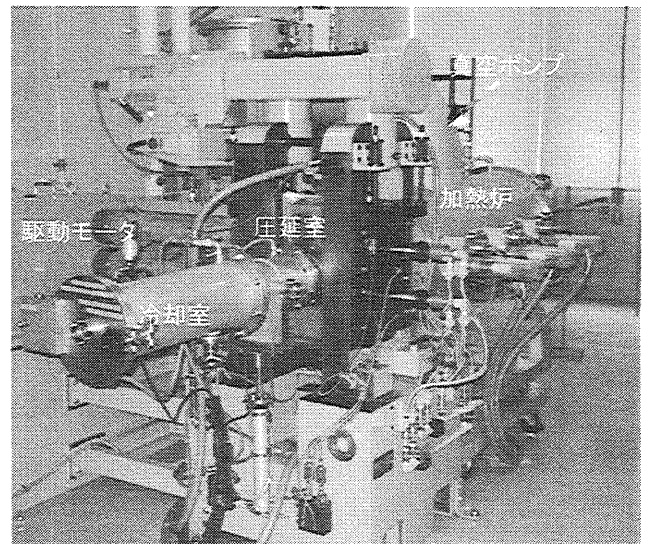


図 1 真空圧延機の外観

表 1 真空圧延機の主仕様

圧延機基本形式	2 段, $\phi 165 \times 150^L$
ロール材質	冷間圧延: SUJ-2 熱間圧延: SKD61 SiAlON (サイアロン)
圧延速度	Max 10m/min
真空度	Max 10^{-6} Torr (1.33×10^{-3} Pa) 高真空領域
加熱温度	Max 1100℃
圧延荷重	Max 390kN
圧延機能	異周速圧延: ツインドライブ (制動速度制御) クロス圧延: ワークロールのクロス角 Max $\pm 2^\circ$ カリバーロール圧延
鍛造機能	据込み鍛造

真空圧延機の加熱用設備としては、材料加熱のための加熱炉ヒーター 3 機、上下ロール表面加熱用外部ヒーターを 2 機備えている。

真空度の推移と加熱炉雰囲気温度の関係を図 2 に示す。真空圧延機の設定温度は 1000℃である。真空引きを始めて 30~50min で 10^{-4} Torr 領域に達する。メインバルブを開いた直後から急速に真空度が上がる。およそ 120min 後、加熱直後から真空度が悪くなる傾向がある。

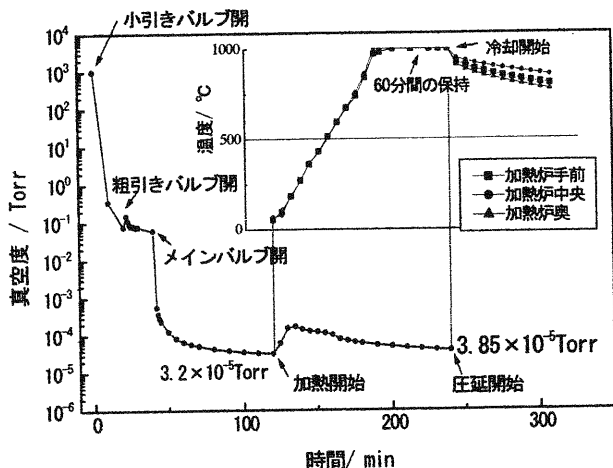


図2 真空度の推移と加熱炉温度の関係

これは、加熱炉内部のセラミックから出されるガスやオリングに付着している油が蒸発するためである。設定加熱温度に達したら60minの加熱保持をした後、圧延を行う。さらに、加熱炉内の温度を見ると、加熱炉中央が設定温度に最も近いことがわかる。

2.2 真空圧延機の問題点

真空圧延機で熱間圧延をする場合、ロール表面温度と圧延材の温度差が問題となってくる。圧延室にはOリングがあり、このOリングは真空シールの役割をしている。Oリングを冷却するためにロール内に水路が設けてあり、その結果、外部ヒーターでロール表面を加熱しているが、水路でロール温度が奪われてしまいロール温度を加熱した圧延材の温度ほど上げることができない。

このような構造で例えば銅-ステンレスクラッドを作製する場合、熱伝導が良く軟らかい銅は圧延によって伸ばされようとしているのに対し、ロール表面温度と圧延材の温度差によって、ロールによって圧延材が急冷され圧縮力が接合界面に作用し亀裂が生じ、接合力の低下が認められる。

また、真空状態で熱間圧延を行うので圧延材の酸化がなく清浄な表面が仕上げられるが、ロール表面と圧延材の温度差により圧延後の製品の表面変質も考えられる。

2.3 実験用ロールの材質¹⁾

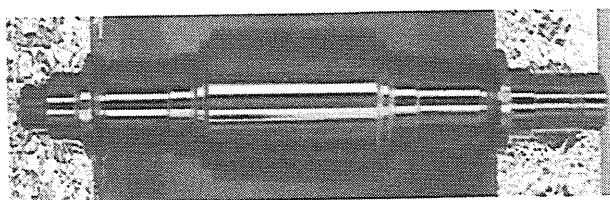


図3 圧延用ロール外観

本実験で使用するロールの材質はSS400である。SS400を使用したのは、今回提案する機構の妥当性を検証することが主たる目的であり、コストが低いためである。ロールの外観を図3に、SS400の化学成分、機械的性質、熱伝導率を、それぞれ表2、表3に示す。

表2 SS400の主要化学成分(wt.%)

材質	C	Si	Mn	P	S	N	O
SS400	0.12	0.007	0.37	0.014	0.03	0.003	0.001

表3 SS400の熱伝導率

熱膨張 RT~1000℃	熱伝導率 350℃ W/(m·k)	荷重軟化 温度 ℃	比熱 KJ/(Kg·k)
1.12%	31.4	600	0.72

3. 内部ヒーター

図4に内部ヒーターの外観を示す。ヒーターの外周部はSUS304、発熱体はカンタル(Cr:20%, Al:4.5%, Co:0.5%, 残Fe)、絶縁体として酸化マグネシウムを用いる。最大容量は1kWである。

またロールの水路(ヒーター挿入口)がφ32mmに対してヒーター部外径は30mmとし、両端に位置決めとヒーター支持用のベアリングを備えた。

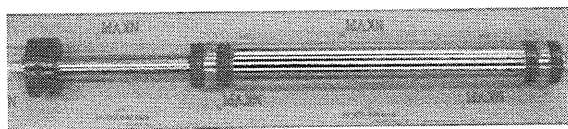


図4 内部ヒーター外観

図5にヒーターの組み込んだ状態のロールのモデル図を示す。

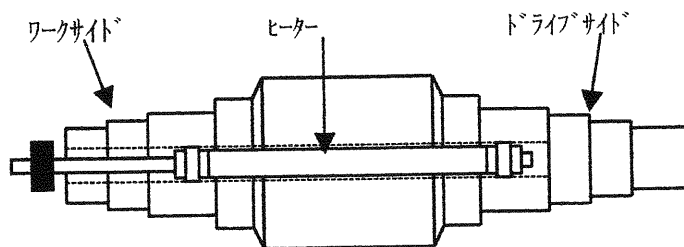


図5 ヒーターを組み込んだロールのモデル図

・カンタル²⁾

カンタルとはFe-Cr-Al系電熱合金で、ニクロムより高温の使用に耐える。電気炉などの加熱エレメントに用

いられる。

4. 実験結果及び考察

4.1 ヒーター単体の温度上昇における較正曲線

ヒーター単体での昇温実験を行った。実験条件は以下に示すとおりである。

- ・実験条件：室温 18℃，湿度 40%，
ヒーター電圧 Max200V

表 4，図 6 に昇温実験の結果の一例を示す。

表 4 各電圧における最高到達温度

電圧/V	0	40	80	120	160	200
最高到達温度/℃	15	164	340	500	645	760

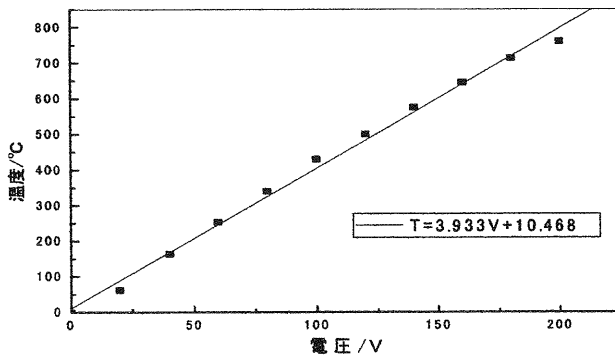


図 6 電圧と最高到達温度の関係

これより、ヒーター単体での最高温度は 760℃である。

図 6 より電圧と温度は比例関係にあり、近似曲線は右上がりの一次式で表され、

$$T = 3.9V + 10.5 \quad (1)$$

で表すことができる。これらから分かるように電圧を上げる程、最高温度が高くなる性能も保証された。

また、前述のように、ヒーターの半径 15mm に対してロールの水路の半径は 16mm であり、ヒーターとロールの間には 1mm の空間がある。そこでヒーター外周より約 1mm の距離での温度を測定した結果、513℃であった。これは、ヒーターをロール内部に挿入した際、ロール内壁に伝達されるであろう温度を示している。

4.2 ヒーター組み込みロールの昇温実験

圧延ロール内にヒーターを組み込み、ロール表面温度の昇温実験を行った。実験条件は以下に示すとおりである。

- ・実験条件：室温 18℃，湿度 40%，
ヒーター電圧 Max200V

表 5，図 7 に昇温実験の結果の一例を示す。

表 5 各電圧における最高到達温度

電圧/V	0	50	100	150	200
最高到達温度/℃	16	64	151	256	355

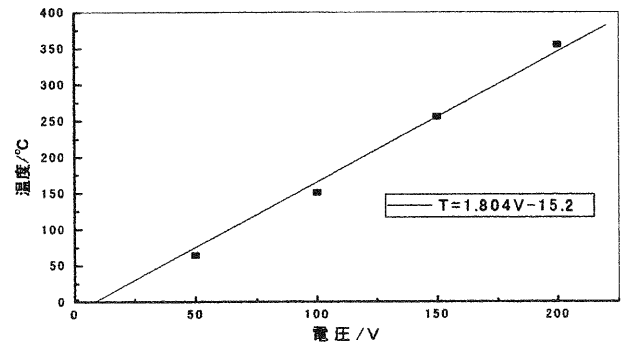


図 7 電圧と最高到達温度の関係

図 7 より電圧と最高到達温度の関係は近似曲線で表すと右上がりの一次式で、

$$T = 1.8V - 15.2 \quad (2)$$

となった。

昇温は大気中で行っている為、ヒーターおよびロールを実験で使用するにつれ、その表面が酸化して加熱温度に影響をもたらすのではないかと考えていたが、同条件で 3 回測ったが結果はほぼ同じ値を取り影響が極少ないことが判明した。酸化などの影響を受けない真空雰囲気下では、もっと安定した性能を発揮できるのではないかと考えられる。

なお、ロールの表面温度の最高温度は、377℃であった。

実験中ロールは最高点に達するまでかなりの時間を要したが（およそ 8 時間）、その一方、最高温度まで上がると温度の下降は少なくほぼ一定に保たれたため、恒温状態を維持する面では十分な性能を有している。

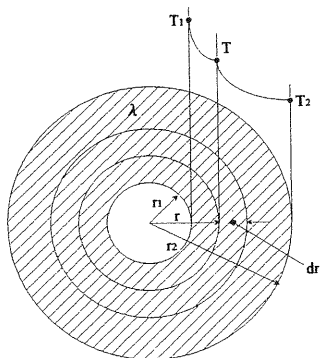
4.3 ヒーター単体とロール表面温度の温度差³⁾

ヒーター単体では 760℃まで上がったものがロールに挿入すると表面温度は 350～370℃程度である。これは室温で行っていたため、雰囲気温度の影響を受けていると考えられる。また、ヒーターの熱が逃げている事が考えられ、

ロール挿入時の密閉度についても検討が必要と思われる。ヒーターには前述のベアリングがあるため、ヒーターとロールとのわずか1mmほどの隙間ができています。そのためわずかな隙間から熱が逃げると共にロールに熱が伝導しないと考えられる。

今回製作した高温用ロールを使用した際のロール表面温度上昇の効果について、以下に示すように理論解析を行った。

$$Q = \frac{2\pi l \lambda}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \quad (3)$$



r_1 = ロール内半径, r_2 = ロール外半径, π = 円周率,

T_1 = 内部表面温度, T_2 = 外部表面温度,

l = 軸方向長さ, λ = 熱伝導率, Q [W] = 熱流量

図8 中空円筒の半径流定常熱伝導

表6に温度の計算結果を示す。

表6 計算結果

	ロール内壁とヒーター非接触	ロール内壁とヒーター接触
SS400 (大気圧延機用)	488°C	735°C
SS400 (真空圧延機用)	483°C	729°C
サイアロン (真空圧延機用)	371°C	612°C

表中、大気圧延機は一般的な構造の圧延機を指し、ロールの内壁にヒーターが接触した場合と接触しない場合について検討した。大気圧延機用ロールは、真空圧延機用ロールに比べ、直径が若干小さい。また、サイアロンは高温用ロールとして所有しているものである。

SS400の計算結果よりロール内壁とヒーターが非接触の場合およそ350°C~500°C、接触した場合600°C~750°Cといった結果が得られた。SS400のロールを用いた実験値と先ほどの計算値とを比べ、減した割合を求めたところ22.7%減少した。その減少した割合を用いて、他のロールを使用した時、ロール表面温度の最高値として予測されるであろう値を表7に示した。

表7 予測されるロール表面最高温度

	ロール内壁とヒーター非接触	ロール内壁とヒーター接触
SS400 (大気圧延機用)	377°C*	568°C
SS400 (真空圧延機用)	373°C	564°C
サイアロン (真空圧延機用)	287°C	473°C

*印は今回実測の値であり、他は推測値である。

この結果、ロール内壁とヒーター外周の間隙1mmによる温度減少が著しく、また実測値と理論値の間に111°Cという差が生じた。(SS400大気用)

これは、ヒーターとロールを密着させなければ大幅な温度上昇が見込めないという事と、ロールの肉厚が厚すぎ熱が中心の方にこもり表面まで熱が伝わらなかったため、計算値と実験値の差が出たと考えられる。

既設の外部ヒーターと今回製作した内部加熱ヒーターを組み込んだロールを併用することで、現状のロール表面温度(500°C)よりもさらに昇温が可能である。

5. 水路にヒーターを挿入した事による問題点の改善

ヒーター中心部分以外にチョック(ロール軸受支持部)に当たる部分の温度を測定したところ、200Vで200°C近くあることが判明した。真空圧延機は真空シールとして、Oリングを多用しているため、熱に耐えうることができない。そこで、チョックの構造を検討することとした。

5.1 現状のOリング

図9に示すOリングはゴムできており高温に耐えられる構造にはなっていない(耐熱温度120°C)。現状の冷却方法は圧延ロールの中心に水路を通す事により、ロールを冷却している。

この水路がこれまで、ロール表面温度を下げる原因となってきたのであるが、水路を利用して内部ヒーターを組み込んだため、Oリングの冷却手段が消滅したことになる。

現在の仕様のままでは、ロール表面温度の上昇とOリング冷却を同時に行う事は困難である。

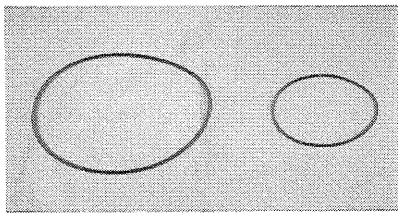


図9 Oリング外観

5.2 ロール軸受部の表面温度

ロールとOリングが直接接触する部分は、どの程度まで温度が上昇するか、ロールのワークサイド側とドライブサイド側の表面温度を測定した。ロールは表面の酸化膜のみ除去して、内部の酸化膜はそのままの状態で使用した。温度測定結果から、ワークサイド側の方がドライブサイド側よりもおよそ 20~25℃程度高温になり、ワークサイド側では最高温度 256℃まで達し、ドライブサイド側でも 230℃以上まで温度は上昇した。

5.3 水冷チョックの提案

Oリングを冷却する方法であるが、Oリングを冷却するものは、冷却のし易さやコスト面を考慮して今までと同様に水を使用し、現在の真空圧延機の基本的構造を変更しない事とする。これらの条件を考慮し出された代替案として、チョック内に水路を設け、Oリングを冷却する事を提案した。水冷チョックを使用する事により、圧延ロール内部のヒーターによるロールの昇温と同時にOリングを冷却することができるようになる。さらにチョック部分の構造を変えるだけなので真空圧延機本体の基本的構造を変更しなくてもよい。内部ヒーターと水冷チョックを組み込んだ真空圧延機のチャンバー内の構造を図10に示す。

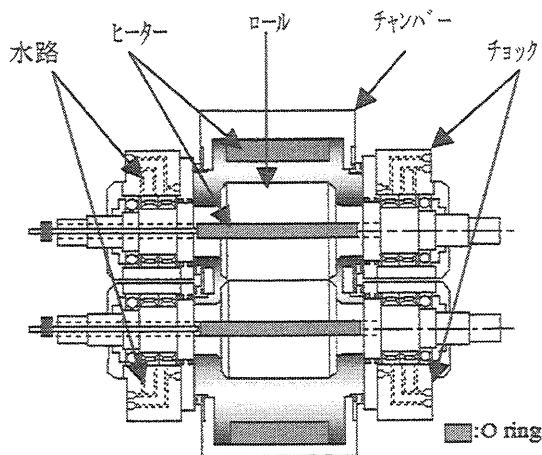


図10 チャンバー内の構造

6. 結言

今回、超高温熱間圧延用ロールの開発と行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 現状の真空圧延機の構造を大幅に変更することなく、ロール表面温度の昇温が可能となった。
- 2) 内部ヒーターと外部ヒーターを併用することで、ロール表面温度の上昇が見込まれる。
- 3) 真空シール用Oリングを冷却するための水冷機構を持ったチョックを提案した。

本実験から、真空圧延機用ロールに内部ヒーターを挿入する事で、ロールの表面温度を上昇させることがわかった。今回使用したSS400材では、内部ヒーターを挿入することにより、表面温度を377℃まで昇温することができた。

真空圧延機のロールに内部ヒーターと水冷チョックを組み込み、内外部のヒーターで昇温させ、真空圧延機の基本構造を変える事なく、外部ヒーターのみの場合より更に表面温度を上昇させる見通しを得ることができた。

7. 今後の展望・展開

本報告で示したように、ロール表面温度を昇温でき、材料温度との温度履歴の低減が可能であるとの見通しを得た。今回の実験では、ロールの構造・機構を構築することに終始し、ロール材質の検討は行うことができなかった。圧延ロールとして実用上問題なく、かつ高温に耐えうる材料の選定が今後の重要な課題であると認識している。

現在は、水冷チョックの試作が完了し、真空圧延機に組み込んだ状態で、ロールの昇温、および水冷チョックの効果についても検証を進めている。

また、有限要素法による熱伝導解析の併用もっており、今回の成果と併せ、ロールの開発を続けていく。

謝 辞

本研究遂行に際し、助成いただいた財団法人 天田金属加工機械技術振興財団の関係各位に対し衷心より感謝申し上げますと共に、実験機器の製作にご尽力いただいた株式会社 大東製作所関係各位、実験実施に協力していただいた研究室の大学院生、4年次学生に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS 鉄鋼 G3101 日本規格協会
- 2) ステンレス協会：ステンレス鋼便覧—第3版—，日刊工業新聞社(1995)，554~556.
- 3) 相原利雄：伝熱工学，裳華房 (1996)，P19~21