

鋼材と溶接

—厚鋼板の製造法とその特徴—

ここ4分の1世紀の間、大型船舶、長大橋、超高層ビル、大型貯蔵タンク、大型揚水発電所のペンストックなど、多数の大型鋼構造物がぞくぞくと建造された。これは鋼構造物の設計技術の進歩に負うことはいうまでもないが、それに使用される鋼材と、それを組み立てる溶接技術の進歩発展も見逃すことはできない。

鋼構造物を大型化する場合に、軟鋼のみを使用すると、肉厚のより厚い鋼材を使用しなければならず、必然的に鋼材費の上昇、構造物の重量増加、溶接工数の増大、などによって建造費のコストアップを招く。このような背景から、強度の高い鋼すなわち高張力鋼の開発に対する要望が起こってきた。

一般に鋼の高強度化を図る場合に、合金元素の添加量を増加すればその目的を達成することができる。しかし、逆に溶接部に溶接われが発生しやすくなったり、またその部分のじん性が低下するなど、鋼の溶接性が低下してくる。

したがって、この間の高張力鋼の研究開発の方向は、合金元素の添加量をあまり増加させずにいかにして強度を高くするか、ということにあったといっても過言ではなく、製鋼技術、圧延技術、熱処理技術の改善が積極的に図られてきた。

その結果、百花繚乱のごとく、世界に冠たる溶接性に優れた高張力鋼が開発され、実用化されるにいった。

本稿では、これらの溶接性の優れた高張力鋼について、その製造法と、それによって製造された鋼板の強度とじん性の基本的な特徴について概説する。



鋼の製造技術

A - 1

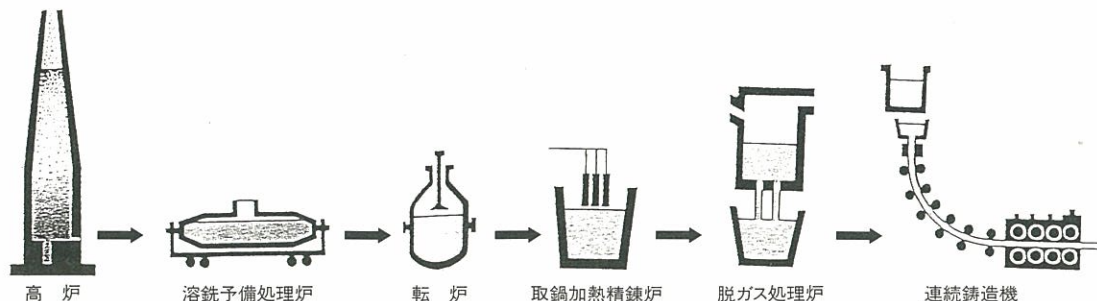
従来、製鋼は転炉吹錬—鋳型造塊のプロセスで行われてきたが、この方法では、溶接性に悪影響をおよぼすC、あるいはP、Sなどの不純物、N、O、Hなどのガス成分の低減・除去には、ある程度の限度があった。しかし現在では、第1図に示すような工程で鋼が作られるようになり、上記の問題は大幅に改善された。

すなわち、第1図に示すように、高炉で作られた溶けた銑鉄を転炉に装入する前に、まず溶銑予備処理炉においてCaO、CaC₂などを添加して、Si、P、Sの大部分を除去する。ついで、これを転炉に装入して純O₂ガスを吹き込み、Cと残っていたSiを燃焼させて除去する。さらにこれを取鍋に取り出し、電極で加熱しながらCaOを添加してP、Sをさらに除去し、ついで脱ガス炉において、N、O、H

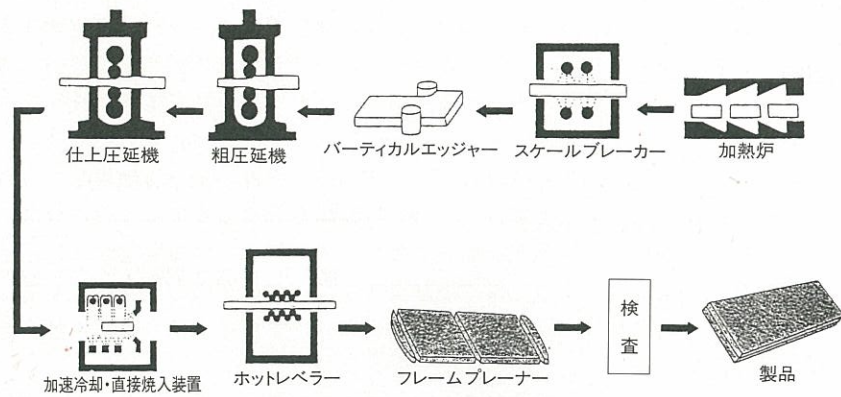
などのガス成分の低減・除去を行う。また、転炉以降の工程において、合金元素を添加して溶鋼の化学成分の調整を行う。そして最後に、連続鋳造機により溶鋼を連続的に鋳造して凝固させ、スラブと呼ばれる板状の粗鋼片をえる。

その結果、最近の鋼中の不純物の管理限界レベルは、C：10～20ppm、N：10～20ppm、S：3～5ppm、P：10～20ppm、O：5～10ppm、H：0.5～1ppmに達しており、非常に高純度化されている。

また、このようなプロセスの改善によって、微量で鋼の高強度化とじん性改善に有効なNb、V、Ti、レア・メタル、あるいは鋼中のMnSの形態制御に有効なCaなどの微量添加元素の含有量の調整も可能となり、鋼材の性能はいちじるしく向上した。



第1図 鋼の製造工程



第2図 厚鋼板の製造工程

厚鋼板の製造工程

厚鋼板の製造は、主として第2図に示すような工程によって行われる。

連続 casting によってえられたスラブを加熱炉に入れて加熱し、加熱時に生成したスラブ表面のスケールをスケールブレイカーによって高圧水を吹きかけて除いてから、バーティカルエッジャーにより所定の板幅にする。ついで粗圧延機、仕上圧延機において繰り返し圧延を行い、目標とする板厚にする。場合によっては圧延後、加速冷却・直接焼入れ設備において注水を行って、鋼板の冷却速度を調整することがある。その後ホットレベラーで鋼板の平坦度を矯正し、フレイムプレーナーで所定の長さに切断し、検査を経て製品とする。

厚鋼板の圧延法

従来、圧延は板の厚さ、幅、長さなどの鋼板の寸法、形状を整えるという意味合いが強かったが、熱加工制御圧延法 (TMCP: Thermo-Mechanical Control Process) が開発されてから

は、圧延によって強度、じん性などの鋼板の性質をも積極的に作り込む方向に変わってきた。

ここでは、TMCPについて、従来の方法と対比しながら、現在行われている鋼板の圧延法と熱処理法の概略を説明する。

① 従来の圧延法

① 普通圧延法

従来からいろいろな鋼板の圧延に適用されている一般的な方法である。第3図(a)に示すように、連铸材を所定の長さに切断したスラブを1,200°C程度の温度に加熱保持した後、目的の板厚になるまで繰り返し圧延を行い、約950°C以上の温度で圧延を終了し、その後空冷する方法である。

この圧延は、オーステナイト (γ) と呼ばれる単一金属組織の状態で行われ、冷却時に変態点を経て、最終的に金属組織は写真1(a)に示す白く見えるフェライト (α) と、黒く見えるパーライト (P) からなる2相組織となる。

引張強さが400N/mm²級の軟鋼および490N/mm²級の高張力鋼の一般構造用鋼板 (JIS SS) は、主としてこの方法で製造され、圧延のままで使用供される。

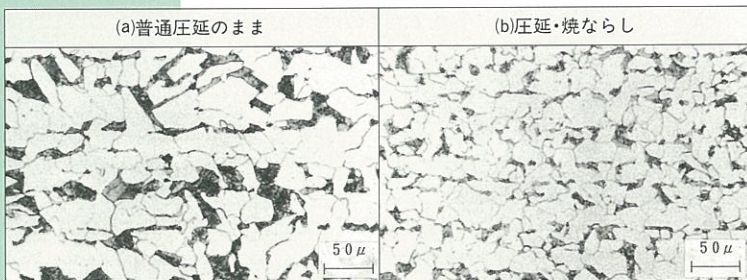
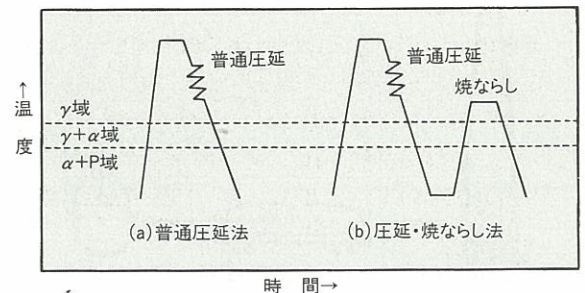


写真1 従来法で製造した490N/mm²級高張力鋼板の顕微鏡写真



第3図 従来法による厚鋼板製造の模式図

② 圧延・焼ならし法

この方法も従来から行われており、第3図(b)に示すように、普通圧延された鋼板を約920℃に再加熱保持し、その後空冷する。冷却過程で変態点を経て、写真1(b)に示すように、フェライト+パーライトの2相組織となる。この処理を焼ならしと呼んでいる。

焼ならしによって(a)の圧延ままのものより結晶粒がいく分細かくなり、組織も均一化する。したがって、鋼板のじん性改善には有効ではあるが、強度の改善までにはいたらない。

この方法は、従来は溶接構造用鋼板(JIS SM)などの中グレードの厚肉の軟鋼および490N/mm²級高張力鋼板の製造に採用されていたが、後述するTMCPの拡大によって、最近ではこの方法による製造量は少なくなっている。

② 熱加工制御圧延法

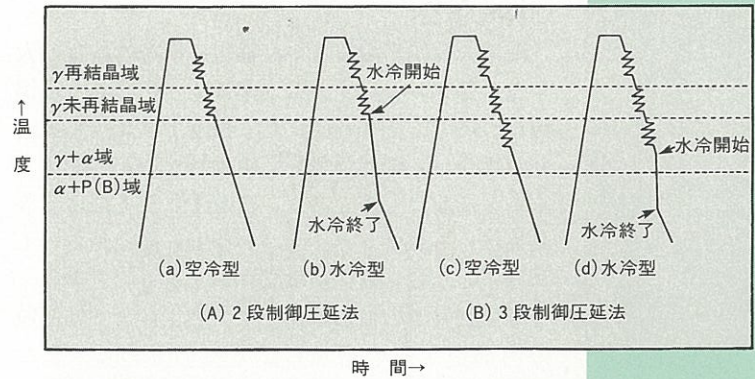
TMCPは、鋼板の圧延条件と圧延後の冷却条件を厳重に管理して行う圧延方法であり、その模式図を第4図に示す。

この方法の第1の特徴は、スラブ加熱時の結晶粒の粗大化を防ぐために、普通圧延の場合よりも100℃程度低い温度にスラブを加熱保持してから圧延を開始する、ということである。

第2の特徴は、第4図の(a)、(b)に示すように、第1段目の圧延に引き続いて、さらに低い温度範囲で第2段目の圧延を行うことである。この温度範囲はオーステナイトの未再結晶域と呼ばれており、温度が低いためにオーステナイトの再結晶が起こりにくく、圧延によって結晶粒が細長く引き伸ばされたままになるので、結晶粒界の面積が増加する。そしてまた、その結晶粒内に加工ひずみが集積した変形帯と呼ばれるものが生成される。この結晶粒界と変形帯は、冷却時の変態核の生成場所となるので、非常に微細なフェライト粒が生成される。この圧延法を2段制御圧延法と呼んでいる。

さらに引き続いて、第4図の(c)、(d)に示すように、もう一段低い温度範囲で第3段目の圧延を行う場合がある。これは、オーステナイトとフェライトの2相が共存する温度域での圧延で、未変態のオーステナイトには第2段圧延のところで述べた効果がより一層促進され、またフェライトにも加工ひずみが蓄積されるので、2段制御圧延よりも品質改善効果が大きくなる。この圧延法は3段制御圧延法と呼ばれている。

TMCPの第3の特徴は、圧延終了後の鋼板の冷却条件を空冷または水冷によって任意にコントロールするということである。第4図の(a)、(c)を空



第4図 熱加工制御圧延法(TMCP)による厚鋼板製造の模式図

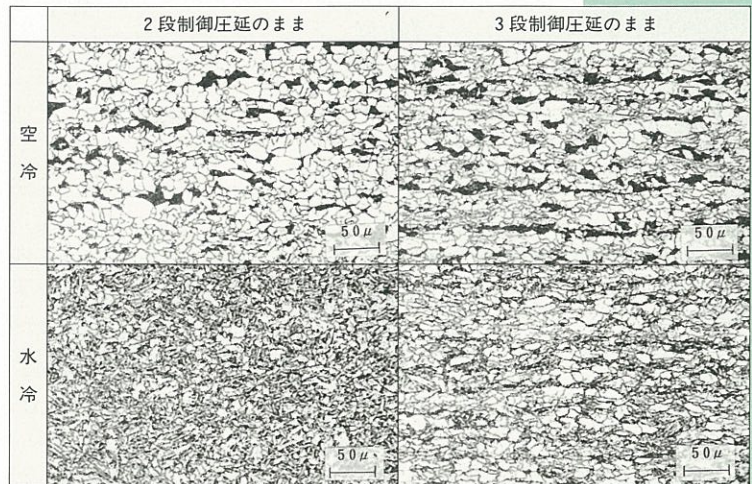


写真2 熱加工制御圧延法で製造した490N/mm²級高張力鋼板の顕微鏡写真

冷型、(b)、(d)を水冷型あるいは加速冷却型と呼んでいる。とくに水冷型の場合、水冷の開始温度と終了温度、注水量、を任意に調整することができるので、いろいろの強度とじん性を備えた鋼板を製造することができる。

ちなみに、TMCPの場合の冷却速度は、後述する焼入れの場合に比べてかなりおそい。

③ 熱加工制御圧延による品質改善効果

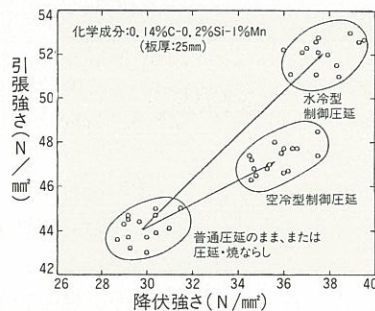
① 金属組織

TMCPによって製造された鋼板の金属組織を写真2に示す。いずれも、前述の従来法によって製造されたものよりかなり細粒になっており、また2段制御圧延より3段制御圧延の方が一層微細になっている。さらに空冷と水冷を比較すると、空冷の場合にはパーライト組織が生成されているのに対し、水冷の場合には、冷却速度がはやいためこの部分の組織がベーナイト(B)状となっており、また層状組織も弱くなっている。

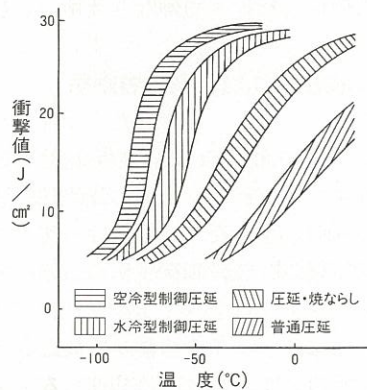
②機械的性質

前述の金属組織の違いが鋼板の機械的性質に大きな影響をおよぼす。第5図は同一化学成分の鋼板について、普通圧延およびTMCPによって製造した場合に、降伏強さと引張強さがいかに変化するかを示したものである。TMCPによる強度改善効果がいちじるしいことがわかる。降伏強さの上昇は主として結晶粒の微細化によるものであり、また引張強さの増加は主として加工による結晶粒の内部ひずみの増加によるものである。またTMCPにおいて空冷よりも水冷の方が強度の上昇が大きいのは、ペーナイト状の組織の生成による。

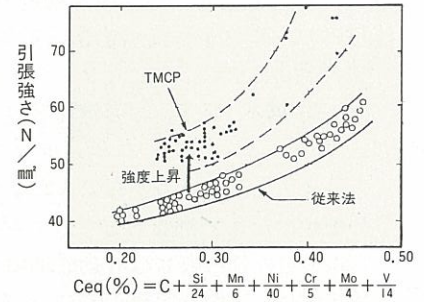
つぎに、490N/mm²級高張力鋼板の製造法の違いによるシャルピー衝撃試験結果を半定量的に示したものが第6図である。試験値が最大値の50%を示す温度すなわちエネルギー遷移温度は、TMCPによって低温側に移行しており、じん性がいちじるしく改善されていることがわかる。これは結晶粒の微細化によるものである。なおTMCPにおいて、水冷の場合の遷移温度が空冷のものよりも高温側にあるのは、主としてじん性に悪影響をおよぼすペーナイト状組織の生成によるものである。そして同じ冷却条件の場合、2段階制御圧延よりも3段階制御圧延の方が遷移温度が低い。



第5図 圧延法の違いによる厚鋼板の引張強さと降伏強さの変化



第6図 490N/mm²級高張力鋼板の製造法の違いによるシャルピー衝撃試験結果



第7図 圧延法の違いによる厚鋼板のCeqと引張強さの関係

第7図は普通圧延したものとTMCPによって製造したものについて、鋼板の炭素当量(Ceq: Carbon equivalent)と引張強さがどのような関係になっているかを示したものである。ここで、Ceqは鋼の溶接性の尺度として一般に使用されているもので、個々の合金元素が鋼の溶接による硬化性に対して、Cと比較してどの程度の影響をおよぼすかを示したものである。

この図から明らかなように、Ceqが同一であっても、TMCPの方が普通圧延よりも引張強さが7~15N/mm²程度高いことがわかる。このことは、たとえば、Ceqが0.30~0.34%という軟鋼と同じ程度の化学成分で490N/mm²級の高張力鋼を製造することができることを意味している。したがって、最近では中および高グレードの490N/mm²級の高張力鋼板は、TMCPによって製造されるようになり、鋼板の材質および溶接性の向上と溶接施工の合理化に大きな役割を果たしている。

厚鋼板の焼入れ・焼もどし法

焼入れ・焼もどし法は、鋼の強じん化の方法として従来から実用されており、570N/mm²級以上のより強度の高い高張力鋼や含Niの低温用鋼などに適用され、合金元素の低減による溶接性の改善、じん性向上などに寄与している。最近はこの方法とTMCPの技術を組み合わせることによって、より一層の品質改善を図る方法が研究されており、すでに一部の鋼板について実用化され始めている。

① オフライン焼入れ・焼もどし法

第8図(a)に示すように、普通圧延した鋼板をオフラインの焼入れ炉に装入して約920℃に加熱保持して水焼入れを行い、620℃程度の温度に再び加熱保持して空冷し、焼もどしを行う方法である。この場合、金属組織は焼入れによって非常に硬く

でもろいマルテンサイトになるが、焼もどしを行うことによって硬さが低下すると同時にじん性がいちじるしく向上し、最終的には写真3(a)に示す焼もどしマルテンサイトと呼ばれる強じん性に優れた組織となる。

この方法は、従来から現在にいたるまで、570~950N/mm²級のより高強度の高張力鋼板、すなわち、JISに規定されている溶接構造用鋼板SM570や、溶接構造用高降伏点鋼板SHYシリーズ、あるいはWES(Japan Welding Engineering Standard)に規定されている溶接性の優れたHW(High Weldability)鋼板、さらには、低温用の含Ni鋼板の製造法の基本となっており、大型鋼構造物の重要強度部材の製作に、重要な役割を果たしている。

2 2段焼入れ・焼もどし法

第8図(b)に示すように、1段目の焼入れは従来のものと同じであるが、これを再びフェライト+オーステナイトの2相域の温度に加熱して再焼入れし、焼もどしを行う方法である。結晶粒が従来法よりも微細になるのでじん性が向上すること、あるいは、組織中にフェライトが存在するので、降伏強さと引張強さの比すなわち降伏比が低くなることなどの利点があり、これを利用して、特殊用途の鋼板が開発されている。

3 オンライン焼入れ・焼もどし法

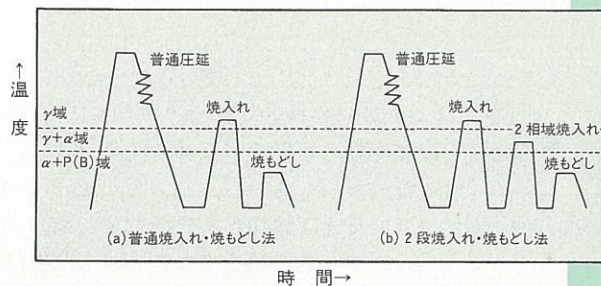
第9図(a)に示すように、圧延後、TMCPの設備を使っただけに焼入れし、焼もどしを行う方法で、直接焼入れ・焼もどし法とも呼ばれている。

この場合、焼入れ性の向上に有効な合金元素が完全にオーステナイトに固溶しているので、焼入れ効果はより一層大きくなる。また、焼もどし過程でもNb, V, Tiなどの炭・窒化物の析出硬化が十分に起こり、強度上昇が一段と大きくなる。その結果、従来の方法よりも合金元素の添加量を低下させることができる。最近はこのような観点から、従来の780N/mm²級鋼の化学成分で950N/mm²級のものを作る研究開発が行われており、一部実用化されつつある。

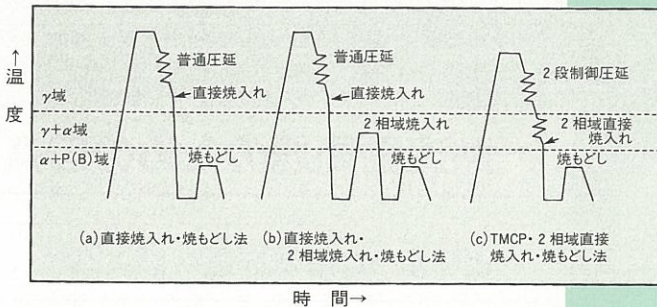
なお、この方法で製造した鋼板の金属組織には、写真3(b)に示すように、圧延によって引き伸ばされた影響が残っている。

一方、直接焼入れ法の場合には、第9図の(b)、(c)に示すようなバリエーションが考えられる。(b)の場合にはじん性の改善が、(c)の場合にはじん性と降伏比の改善が期待され、現在鋭意研究が行われている。

なお、直接焼入れの場合には、オフライン焼入れの場合と異なって、焼入れのための鋼板の加熱



第8図 オフライン焼入れ・焼もどし法による厚板製造の模式図



第9図 オンライン焼入れ・焼もどし法による厚板製造の模式図



写真3 焼入れ・焼もどし法で製造した780N/mm²級高張力鋼板の顕微鏡写真

が不必要となるので、経済性に優れた方法であるといえる。

近年の厚鋼板の進歩発展には目覚ましいものがあり、それは主として、不純物の低減技術、微量元素の利用技術、熱加工制御圧延技術および熱処理技術の研究開発によるところが多い。そして現段階では、490N/mm²級の高張力鋼板は軟鋼と同じ感覚で使用できる、いわゆる“fool proof”なものになっている。今後はこれらの技術のさらなるブラッシュ・アップによって、780~950N/mm²級のより高強度の高張力鋼板についても fool proofな鋼板が出現するであろう、といっても過言ではなからう。

次号では、これらの方法によって製造された各種鋼板の具体的な性能について概説する予定である。

〔顧問 笠松 裕〕