

冷却時ならびに巻取時に大量に析出させたベイニティックフェライト組織の780 MPa級の鋼板やIF鋼ベースにCuを析出させた590 MPa級の鋼板が開発されている。前者の鋼板では冷却中に析出物が生成するので、冷却温度パターンにより析出量が異なり、強度や穴広げ性にばらつきが生じ易く安定製造に各社独自のノウハウがある。

ところで、構造用部材ではストレッチャーストレインが起こっても品質上は問題が無いので、パネル材よりも高いBH量を付与することが出来る。特に、構造用部材は衝突エネルギーの吸収能が問われるので、降伏時だけでなく応力ひずみ曲線全体をBH処理で高強度側にシフトすることが望まれる。このニーズに応じて、急冷して炭素のほかに窒素を過飽和に含んだ熱延鋼板に10%程度の予ひずみを加えBH処理することによりYPが80 MPa程度、TSが60 MPa程度上昇することが報告され、商品化が図られた。

シャーシー系部材で問題になるアーク溶接時に生成する溶接熱影響部(HAZ)の軟化を抑制するためにNbとMoを添加した鋼板が開発された。これらの元素はHAZ部の転位の消滅を抑制し、その転位上に炭化物として微細析出することによりHAZ軟化を軽減している。

また、シャーシー系部材の板厚を支配することの多い疲労特性を向上した鋼板として、Cu添加ハイテンが開発された。Cuの使い方としては固溶状態で鋼中に存在させると交差すべりが抑制され、表層に現れるすべりに伴う段差が小さくなり、疲労き裂の発生が抑制されることにより疲労限が高くなることが明らかにされた。

(4) 超高強度域の補強部材用ハイテンと

ホットプレスによる部品の超ハイテン化

980 MPa超級ハイテンのプレス成形は曲げ加工やハット型加工が多いが、曲げ性の向上には組織の均一性が重要であることが明らかにされ、それを実現する組織制御により曲げ性に優れた超ハイテンが開発された。また、最近ではより複雑形状の部材への超ハイテンの適用が要求され、DP系の延性重視型や延性一穴広げ性バランス型の鋼板が高度な組織制御によって実用化されている。

超ハイテン部品の製造方法は超ハイテン材をプレスあるいはロール成形による一般の成形方法の他に、低強度の鋼板を成形後に焼き入れ、焼き戻しをする方法などが知られているが、室温での成形は形状凍結性や金型の調整ならびに磨耗の問題があり、既プレス材を焼き入れる場合は、熱ひずみによる形状不良問題が避けられない。

そこで、最近注目を集めているのがホットプレスによる超ハイテン部品の製造方法である。ホットプレスとは鋼板を変態点以上に加熱し、プレス加工工程で金型の抜熱により焼き

を入れて高強度を得る技術で、極めて優れた形状凍結性が得られるのが特長である。ホットプレス部品のスプリングバックは皆無である。高温でのプレス成形なので優れた成形能を示し、センターピラーのリンフォースのような複雑形状の部品も製造されている。今後、ホットプレス用の成形技術も進展し、さらなるハイテン化にはホットプレスが重要な役割を果たす可能性が高い。

また、ホットプレス部品に耐食性を付加する方法としてアルミめっき鋼板が適用されている。純アルミの融点は660℃なので焼入れによる強化を前提にするホットプレスではAe3以上の加熱が不可欠であるので、アルミめっき鋼板の適用は不可能と考えられていた。しかし、加熱速度を制御することにより鋼板のFeとの合金化が進み、めっきの溶融を抑制し、プレス時にはめっきがほぼ固相状態で成形できることが確認された。そして、その際に形成される多層構造のFe-Al合金相をコントロールすることにより優れた耐食性が得られることも明らかにされた。また、アルミめっき鋼板はスケール剥離がないため、デスケリング工程が省略できる利点もある。一方、十分な耐食性の確保には至っていないが、デスケリング工程を省略する目的で溶融亜鉛めっき鋼板もスケール生成を阻止する目的で使用されている。しかし、亜鉛めっきは酸化し易いので、加熱温度の管理精度が要求される。

4.2.2 厚鋼板

(1) 需要分野別の厚鋼板の歩み

(i) 造船用鋼

造船分野では1980年代にTMCP鋼が他分野に先駆けて開発・実用化され、高張力鋼の使用が拡大された。近年の動向の特徴は溶接性の優れた高強度鋼に加え、厚肉化、超大入熱溶接性、腐食、疲労、アレスト特性、加工時の変形抑制など種々の特性に対応した新機能鋼板の開発がさかんなことである。近年増加しているコンテナ船では甲板の開口部が大きいため船側上部に厚肉の高強度厚鋼板を用いて船全体の強度を確保する構造であり、6000TEU (Twenty feet equivalent unit) を超える大型コンテナ船では船側上部に最大板厚65～80 mm、降伏強度390 MPa級の高張力厚鋼板が用いられる。またこの鋼板にはエレクトロガス溶接による1パス施工が適用され、その入熱は40から50 kJ/mmもの大入熱溶接になる。また造船用の高強度鋼として船積みタンク用のKD51 (降伏点500 MPa) が開発された。

(ii) 建築用鋼

建築分野では1995年の阪神淡路大震災以後、一層性能を重視する動きが進行している。梁など部材の塑性変形能力の確保が必要な主要部材では低降伏比(YR)化および、溶接性確保の観点からCeq、Pcmの低減が要求されている。また

耐脆性破壊性能確保の観点から、溶接部にシャルピー吸収エネルギーを確保するなどの性能基準が新たに定められている。建築用高張力鋼としてはHT490 (SN490) が一般的であるが、建築構造物の高層化とともに、建築構造用590 MPa級鋼材 (SA440) が規格化・実用化された。

また降伏点がSN490鋼 (325 MPa) とSA440鋼 (440 MPa) の間で溶接性にすぐれた降伏点385 MPa鋼も開発された。

建築分野ではエレクトロスラグ溶接による100 kJ/mmもの超大入熱溶接が適用されてきており建築ボックス柱用超大入熱溶接用鋼が開発実用化されている。

(iii) 橋梁分野

橋梁分野においてはTS400～490 MPa級厚鋼板が主として使用されてきたが、主桁断面の1部材1断面化からなる合理化橋梁に対応した1996年の道路橋示方書の改訂により、鋼板の適用可能板厚が100 mmまで拡大された。その結果、高いTS (570 MPa級) でかつ板厚が厚い鋼板の実用化が加速した。

さらなる高強度厚鋼板として、溶接時の予熱温度を低減できる板厚34 mmの橋梁用のTS780 MPa級厚鋼板が開発・実用化された。低温割れ阻止予熱温度は従来の100℃以上から50℃に低減され、明石海峡大橋の補剛桁に適用された。

近年、橋梁のミニマムメンテナンス化が注目されており、これに対応する技術として耐候性厚鋼板の無塗装裸使用がある。最近では0.05 mddを超える飛来塩分量の、いわゆる海浜地域でも使用可能なニッケル系高耐候性厚鋼板が開発されている。

(iv) 大径ラインパイプ用厚鋼板

寒冷地あるいは深海域を含む海底におけるガス・油田開発が進み、敷設・使用環境ならびに輸送される石油や天然ガスの性状は多様化している。その結果、厚鋼板を用いて製造される大径ラインパイプへの要求特性も、敷設・操業のコストダウンの観点からの高強度化および優れた現地溶接性、安全性の観点からの優れた低温靱性はもとより、海底ラインパイプ向けの厚肉化、優れた耐サワー特性など多岐にわたる。

高強度化についてはX80までが既に実用化されており、X100ラインパイプについても高強度材の適用にむけた共同研究プログラムが欧米で盛んにおこなわれている。そして、2002年にはX100相当のGr690がカナダ規格 (CSA) の最新版に規格化され、カナダのプロジェクトで部分的ではあるが実使用に至っている。

また日本国内では高強度ラインパイプにおいて高強度、高靱性以外に必要な特性として、大規模地震を想定した耐震性・変形吸収能があり、これに対応して、高座屈性能を実現した耐震ラインパイプが開発されている。

(v) ペンストック、海洋構造物用鋼、低温タンク用鋼、産業機械用鋼

揚水発電所に用いられる水圧鉄管 (ペンストック) は陸上構造物の中でもっとも強度が高く板厚の厚い鋼材を使用してきた分野であるが、大型揚水発電所用にその傾向が著しく加速された。下流部に設けられる分岐部にはHT780の200 mm厚やさらにHT980の100から150 mmの極厚高強度鋼が要求され、予熱低減型のHT980やTMCP型のHT980が開発された。

海洋構造物用鋼は海洋構造物の形式により高強度化の趨勢が異なるが、最近は寒冷域で稼動する海洋構造物では通常の船体用鋼板に較べて特に厳しい靱性要求が母材および溶接部に求められている。それらの要求に対応してTMCPを適用した氷海域用YP420鋼や、YP460、YP500及びYP550級鋼が開発された。

エネルギーの世界的な需要増大と地球環境問題への対応から、天然ガスへの需要が一貫して拡大しており、それに伴って液化天然ガス (LNG) タンクの建設が活発化している。近年、特に地上式LNGタンクの内容積は増大し、従来の8万kl級を越える14万から18万kl級が建設され、使用鋼材の板厚も40 mmから50 mmの9% Ni鋼が開発・実用化された。また液化石油ガス (LPG) タンク用として液体アンモニア混載可能な低温用鋼などが開発された。

トラッククレーン等の産業機械分野は大型化が著しく進み、疲労強度が問題とならないブーム材ではHT780からHT950が開発されている。また土木建設機械の大型化とともに耐磨耗性の向上を狙った高硬度耐磨耗鋼もHB500級が開発されている。

図4.7に、以上述べた鋼のなかで、橋梁、建築およびペ

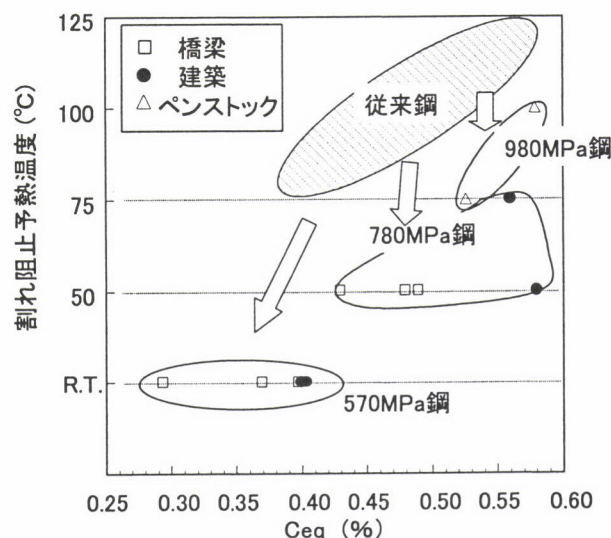


図4.7 高強度鋼のCeqと割れ阻止予熱温度の関係

ストック用の引張強度 (TS) 570～980 MPa級厚鋼板の炭素当量 (Ceq) と低温割れ阻止予熱温度の関係を従来鋼のレベルと比較して示す。いずれも高強度にもかかわらず溶接性の向上が著しい。

(2) トピックス

(i) 大入熱溶接用厚鋼板

大入熱溶接が適用されたとき高温に長時間さらされる厚鋼板のHAZのミクロ組織を制御して高靱性を確保することが最大の課題で、HAZの組織制御は1) γ 粒の成長抑制、および2) 粒内組織の微細化である。

前者は鋼板中に高融点の粒子を微細分散することによる γ 粒界のピン止め効果を利用する方法で、TiN あるいはREM (O, S) などの分散鋼が開発されてきた。また後者についてはREM (O, S) -BN、TiN-MnS、TiN-MnS-Fe₂₃(C, B)₆ あるいはTi₂O₃-TiN-MnSなどによるフェライト核生成能を有する粒子の利用技術が開発されてきた。その代表例が、溶接金属の組織制御に用いられている、アシキュラーフェライト生成能を有するTiオキシドを鋼中に微細分散させることで、HAZにおいて粒内フェライトを生成させるオキシドメタラジーである。この技術においては溶接過程でオキシド上にMnSが析出しその結果オキシドの周囲にMnの希薄帯が形成されることがフェライト析出を容易にする。

これらのHAZのミクロ組織制御技術を駆使することで、造船用の超大入熱溶接用厚鋼板や、エレクトロスラグ溶接に対応した超大入熱溶接可能な建築用厚鋼板が開発されている。

(ii) タンカー用耐食鋼

タンカーでは、原油タンク内が厳しい腐食環境におかれるため腐食の問題がクローズアップされてきた。原油タンク内で生じる主な腐食は、タンク底板の孔食と上甲板裏側の全面腐食である。前者にたいしては孔食の進行速度を1/5程度に低減させる耐孔食鋼板、後者に対して、防錆塗装と併用して使用することで5年ほど耐用寿命を延長できる耐食鋼が開発されている。

(iii) 高アレスト鋼板

造船分野では脆性破壊が発生した場合でも、船舶にもたらされる被害を最小限度にとどめるための特性である母材の脆性き裂の伝播停止特性 (アレスト性能) が要求される場合がある。表面超微細粒鋼板はアレスト性能を低コストで高めた厚鋼板であり、鋼板表層部を2 μ m以下の超微細フェライト組織として表層部の破壊靱性値を高め、き裂が進展しても表層部の大きな伝播抵抗でき裂を停止する能力を付与している。この表層部の超微細フェライト組織は厚板圧延途中で厚鋼板を強制冷却し表層部を一旦フェライトに変態させ、その

後鋼板内部の顕熱により表層が復熱する過程で再び圧延を行うことでおこるフェライトの再結晶により形成される。

(iv) 残留応力制御型TMCP鋼板

ユーザーにおける厚鋼板の切断、溶接等の施工時に発生する変形に対処するための技術が開発されている。TMCP製厚鋼板ではその製造工程で生じる残留応力に起因した形状不良がしばしば問題となる。一般にTMCP製厚鋼板の残留応力は、加熱・圧延・加速冷却プロセスにおける不均一な温度分布に起因するが、現状の技術レベルでは、完全な温度分布制御による残留応力の均一化は困難である。そこで、TMCP工程で発生する残留応力を、ハード・ソフト両面から統合的に制御した残留応力制御型TMCP製厚鋼板が開発された。

(v) 極低炭素ベイナイト鋼

極低炭素ベイナイト鋼は、実用されている溶接構造用厚鋼板としては例のない炭素量を従来の約1/10以下に低減した上で、マイクロアロイング元素の最適化によって変態温度を制御した極低炭素ベイナイト単相組織を特徴とする鋼である。この鋼は、Ac3温度以上に加熱後の冷却において、広い冷却速度範囲で極低炭素ベイナイト組織一定となり、その結果図4.8に示すように硬さがほぼ一定となる特徴を有す。冷却速度が低い領域では従来鋼より高い硬度となるため、TS 570 MPa級の厚肉鋼板が圧延後の空冷プロセスで製造可能となる。一方冷却速度が高い領域では従来鋼に比べて硬化能が抑制されており、小入熱溶接でのHAZの硬化が生じず優れた耐溶接割れ性が確保される。同時に板内の冷却速度差に起因するミクロ組織変化による強度ばらつきが解消される。また、炭素量が極端に低いベイナイト単相組織のために母材および溶接部靱性に優れるとともに、さらに大入熱でのHAZ軟化の抑制にも有利である。

極低炭素ベイナイト鋼: 0.01C-0.01Si-1.75Mn-Cu, Ni, Nb, Ti, B

従来低炭素鋼 : 0.140C-0.40Si-1.31Mn-Nb, Ti

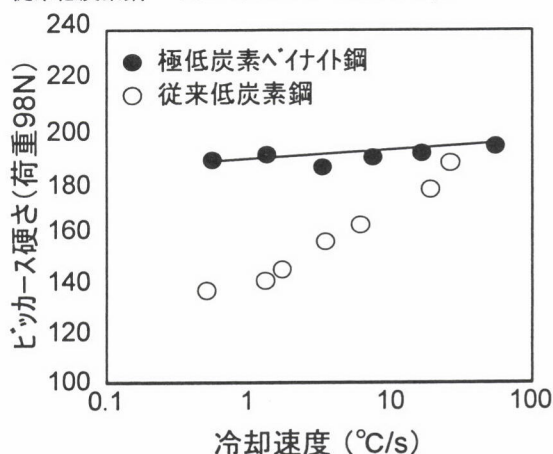


図4.8 極低炭素ベイナイト鋼と従来鋼の硬さの変化

(vi) オースフォームドベイナイト鋼

オースフォームドベイナイト鋼はNbを添加することで未再結晶域圧延を利用する従来のTMCP法をより強化したもので、オーステナイト域での強圧下加工によって多くの転位を導入し、その転位を圧延後の急冷で変態後まで引き継ぐことによって高強度化させる。また同時にベイナイト組織のパケットサイズが微細化されるため靱性も向上する。

(vii) ニッケル系高耐候性鋼板

0.05 mddを超える飛来塩分量の、いわゆる海浜地域でも使用可能な新耐候性厚鋼板が開発されている。これらの厚鋼板の海浜地域における優れた耐候性の詳細なメカニズムについては、特にNi添加の有効性が注目されている。Niの添加は鋼板表面に形成されるさびを緻密化し、その結果Clイオンが地鉄界面へ侵入することを抑制する。

耐候性鋼を裸で使用する場合、保護性さびが形成されるまでの期間は、さびの色調や均一性の点で外観は必ずしも良好でない場合がある。また、腐食により生成した鉄イオンを含む雨水はコンクリートなどの着色を引き起こす場合がある。この汚染の軽減と外観を良好にし、実用上優れた保護性さびを形成可能とするさび安定化処理技術が開発され始め、最近では保護性さびを早期に形成するさび安定化処理技術も開発されている。

(viii) 厚鋼板および溶接継手の疲労強度向上技術

鋼の降伏強度を上昇させても、それを用いた溶接継手の疲労強度は一般には向上しない。このことが疲労設計される溶接構造物への高強度鋼適用の妨げになってきた。最近、溶接金属の変態膨張を利用した疲労強度向上技術が開発されている。

通常の溶接材料を用いた場合、溶接金属は500℃程度で変態膨張し、その後の温度低下に伴い熱収縮するため、室温で溶接部は引張残留応力となる。一方、溶接材料の変態開始温度(Ms点)を室温付近に制御すると、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態にともなう膨張過程で冷却が終了するので溶接部には圧縮の残留応力が導入される。この効果にもとづく溶接部の疲労強度が向上する溶接材料が開発された。

また、結晶粒の微細なフェライト・ベイナイト2相組織鋼を利用して疲労き裂進展速度が従来鋼の約1/2となる疲労亀裂進展抑制鋼が開発されている。この疲労き裂進展速度抑制のメカニズムとして、相境界でのき裂進展抑制などが挙げられている。

(ix) 形状制御厚鋼板

LP鋼板(Longitudinally profiled plate)は、厚鋼板長手方向で板厚を変化させており、これをフランジまたはウェブに使用することにより、さらに合理的構造とすることが出来る。LP鋼板を使用することにより、鋼材の重量が低減され

るだけでなく、接合部の等厚化によりフィラープレートやテーパー加工の省略など、作業性も改善できる。LP鋼板は厚板圧延時に厚鋼板長手方向の厚さを変化させるため、高度な油圧式板厚制御技術が必要である。またTMCPの適用も可能であり、種々の長手方向断面形状が製造可能となっている。

(x) 厚板の新製造プロセス

加速冷却はTMCP技術の根幹のひとつをなす技術であり、1980年に実用が開始されたが、最近、熱伝達係数の高い核沸騰現象を冷却開始と同時に実現する水冷却方式が実用化され、高い冷却能とすぐれた冷却停止性能が実現した。

また、2004年には世界ではじめて厚鋼板のオンライン加熱設備が開発・実用化され、オンラインでの焼き入れ焼き戻しの連続熱処理が可能となり、またオンライン組織制御の自由度も拡大された。

4.2.3 機械構造用鋼**(1) この10年間の研究開発動向**

自動車部品などに使用される機械構造用鋼の最近10年間の動向は、地球環境問題、トータル製造コスト低減と安全性確保を主な要求として検討されてきた結果の反映である。地球環境問題としては、自動車からのCO₂ガス排出量の抑制(燃費改善)が最も重要な課題として認識されており、部品の小型軽量化に必要な鋼材の高強度化が課題となっている。高強度化を阻害する原因が部品の使われ方と製造方法によって異なるため、具体的な要求強度と特性も、部品によって異なる。従って、それぞれ部品毎を対象として研究開発が行われてきた。環境問題の一環として、スクラップで問題となる有害物質低減も求められている。これに伴い、快削鋼中の鉛を削減する鉛フリー快削鋼の開発も活発に行われ、一部採用されたと報告されている。トータル製造コスト低減可能な部品製造方法がいくつか提案されており、それに適した鋼材の開発も行われた。高強度化などの高特性化を追求する研究開発においても、トータル製造コストのミニマム化が強く要求されたことも、最近10年間の傾向として特筆できる。

以下に最近10年間の機械構造用鋼に関する主なトピックスを記述する。全ての部品、鋼材についての記述は出来ないが、全体感を把握する一助になろう。

(2) ばね鋼

自動車のサスペンションに使用される懸架ばねも、燃費改善を目的として高強度化が図られてきた。設計最大せん断応力は、1980年に980 MPaであったのが、1987年には1080 MPaまで高強度化され、さらにその後の約10年間の間に約1200 MPa程度まで向上された。これに伴い、鋼材の引