

氏 名	かつ 勝 亦 正 昭
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月15日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最 終 学 歴	昭 和 3 6 年 3 月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	大形鍛鋼品の脆化とその対策に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 及川 洪 東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 西澤 泰二

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

1960年代から世界的に諸産業の著しい成長がみられ、生産設備が大形化し、これに伴い、機器や構造物の部品として使われる鍛鋼品も大形化した。例えば発電機用ローターシャフトは直径2000mm、長さ15000mm、質量250tを超え、圧力容器用リング材は肉厚300mm、内径4500mm、質量100tにも達した。鍛鋼品の大型化に伴い大形鍛鋼品を製造するための精練、造塊、鍛練、熱処理技術が著しく発達した。ところが、大型化により鍛鋼品の靱性の確保が困難になるとともに使用時の負荷応力も高くなった。さらに、生産の効率化のために設備の使用条件は苛酷となり、鍛鋼品の靱性は使用中に生じる種々の脆化のために劣化し、機器や構造物の破壊事故が発生した。大型化に伴う鍛鋼品の靱性確保はNi、Cr、Moなどの合金元素の添加や増加により対処されたが、鍛鋼品の製造中や使用中の脆化防止に関しては十分な対応がされているとはいえなかった。そこで、本研究では、大形鍛鋼品の中でも最も苛酷な条件で使用される低圧タービンローター及び圧力容器において、近年問題とされている製造中や使用中に起こる脆化-(1)加熱による脆化、(2)応力除去焼なまし脆化、(3)焼もどし脆化、(4)水素脆化-に及ぼす種々の因子を明らかにし、脆化の対策を検討した。さらにそれらの研究結果に基づいて、製造中及び使用中の脆化の少ない新鋼種の開発を試みた。

第 2 章 低圧タービンローター用鋼の過熱による脆化とその対策に関する研究

最近の精練技術の進歩による低S鋼の出現と大形低圧タービンローターの靱性確保のための低S

鋼の採用により、過熱による脆化が生起する温度の低下が問題となった。過熱による脆化は過熱時にオーステナイト中に溶け込んだMnSが鍛練後の冷却中にオーステナイト粒界に析出し、延性粒界破壊が生ずることにより、靱性が劣化する現象である。過熱による脆化に及ぼす過熱温度、鍛練終了温度、冷却速度、S、Mn、Ce含有量の影響を調査した結果、S含有量低下に伴って過熱による脆化が生起しやすくなる原因は、過熱時のオーステナイト粒径が大きくなり、単位粒界面積に析出するMnS量が増加したためと考えられた。オーステナイト粒界に析出するMnS量が増加すると、このMnSを核としてボイドが形成され、それらの成長、合体によって延性粒界破壊が起こるので、破壊に必要なエネルギーが通常の延性粒界破壊に比べ低くなると考えられる。Mn量の低下も過熱による脆化の生起温度を低下させるが、この原因は過熱時のオーステナイト粒径が大きくなることと単位体積中に析出するMnS量が増すことの両者によると予測された。また、過熱による脆化は、鍛練後の冷却速度が速い場合(>300°C/min)あるいは非常に遅い場合(<0.5°C/min)には、軽減または防止される。これは急速冷却の場合、MnSの析出が抑制されるためであり、徐冷の場合にはMnS粒子が粗大化し、MnS粒子間距離が増大するため、ボイドの成長、合体に大きなエネルギーを必要とするためと考えられる。

過熱による脆化の脆化量が多い時、その後の熱処理で脆化を完全に回復させるのは困難であるが、オーステナイト化の繰返しやオーステナイト化前の長時間焼もどしにより脆化の一部は回復させることが可能である。また、Sを高温でも固溶しないCe硫化物として固定することにより過熱による脆化は防止できた。Mn量が0.02~0.35%の範囲内でSを0.001%以下にすると、過熱による脆化は抑制できた。

過熱による脆化を防止するには、通常の1250°C過熱において、Mn量及びS量を適切に選び、オーステナイト粒径とMnS析出量から決まる単位粒界面積に析出するMnS量を一定量以下とすることが有効である。この限界値は溶解度積に基づく計算から $5 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{mm}^2$ 以下と決定された。また、Ceと同等の効果のあるCaの添加や鍛練後の徐冷も有効ある。

第3章 圧力容器用鋼の応力除去焼なまし脆化とその対策に関する研究

圧力容器の大形化による溶接施工回数の増加に伴う応力除去焼なまし(SR)処理回数の増加と使用鋼材の厚肉化に伴うSR処理時間の延長は、圧力容器製造時のSR処理の総時間の増大をもたらし、鋼材の靱性劣化が生じた。SR脆化は鋼種(合金元素の添加量)やマイクロ組織によらず起こることがわかった。ただし、SR脆化が生起する温度、時間条件はMn、Cr、Mo量が増加すると高温、長時間側に移る。また、SR脆化はSR処理温度に保持中の脆化とその後の徐冷中の焼もどし脆化によって生じることもわかった。

SR処理に伴い、炭化物の粗大化、サブグレンの成長が観察された。また、脆化破面中の破面単位の大きさはSR処理を行っても、一部の鋼種を除き、変化しなかったが、SR処理によって破面単位内に存在するティアリッジの間隔は増大し、破面の塑性変形量は減少した。これらの結果から、SR脆化はティアリッジの生成原因となるマルテンサイトパケット内の下部組織の間隔が広がったことにより、亀裂先端近傍でなされる仕事が低下し、脆化破壊応力(σ_f)が低下したためと考

えられる。また、炭化物粒子径が $1\ \mu\text{m}$ 以上になると、炭化物自体または炭化物・フェライト母相界面の剥離による σ_t の低下が加わると考えられる。Mn, Cr, Mo含有量の増加により、SR脆化が起りにくくなるが、これはMn, Cr, Moが炭化物のオストワルド成長を抑制し、炭化物や下部組織の成長を抑制するためと考えられる。

規格成分範囲内でMn, Cr, Moを増加させることにより、SR処理温度に保持中の脆化を抑制することができる。また、徐冷中の焼もどし脆化を抑制するために不純物元素を低減させることも必要である。さらに、初析フェライトの生成をできるだけ抑制し、マルテンサイトあるいはベイナイトを主体とした組織とし、初期靱性を向上させ、SR脆化が生じても十分な靱性を確保することもSR脆化対策の一つである。

第4章 大形鍛鋼品の使用中の焼もどし脆化とその対策に関する研究

低圧タービンローター、圧力容器ともその使用温度が焼もどし脆化域にあるため、長時間の使用中に脆化が進行し、脆化破壊を起こす事故が発生したため、ユーザーから使用中の焼もどし脆化対策が要求された。そこで、低圧タービンローター用鋼と圧力容器用鋼の使用中の焼もどし脆化に及ぼす不純物元素、合金元素、マイクロ組織、応力の影響を調査し、使用中の焼もどし脆化対策及び焼もどし脆化量の推定を行った。

低圧タービンローター用鋼ではP及びSb含有量の低減が重要である。低圧タービンローターの寿命(約30年)末期においても脆化破壊を防止するには、Pを0.010%以下に制限する必要がある。Sbは焼もどし脆化能は高いが、鋼中での拡散速度が遅いため、低圧タービンローターの寿命範囲内では脆化は飽和に達しない。現在Sb含有量は0.005%以下に低減可能なため、Sbに対する処理は現状で十分と考えられる。低圧タービンローター用鋼の使用温度である375°Cで脆化が飽和に達するには2000~4000年必要であり、飽和脆化量はステップクーリング脆化量の3倍、また低圧タービンローターの寿命末期における脆化量はステップクーリング脆化量の1.5倍と予測された。

圧力容器用2.25Cr-1Mo鋼に関しては、使用温度である450°Cで、脆化は約10000hで飽和し、脆化に寄与する不純物元素はPのみであった。圧力容器の脆化破壊を防止するためには、Si量が0.25%レベルの時にはP含有量を0.010%以下、Si量が0.10%レベルの時には含有量を0.012%以下にする必要がある。また、マイクロ組織の焼もどし脆化に及ぼす影響はマルテンサイト>ベイナイト>フェライト+パーライトの順であるが、初期靱性もこの順に良好なため、焼もどし脆化後の靱性はマルテンサイト及びベイナイトが良好であった。すなわち、熱処理時の組織はフェライトを含まない組織とすることが好ましい。

第5章 圧力容器用鋼の使用中の水素脆化とその予測に関する研究

高温高圧の水素雰囲気で使用される圧力容器の容器壁には1.5~4 ppmの水素が吸収されており、容器壁が厚いため運転停止時にも脱水素が起らないので、水素脆化が生ずる可能性がある。また、圧力容器の長時間の使用中に焼もどし脆化が進行するので、それと重畳効果が心配された。各種Cr-Mo鋼の水素助長割れが進展する下限界応力拡大係数(K_{IH})は破壊靱性値(K_{Ic})の $\frac{1}{3}$

～1/4であり、2.25Cr-1Mo及び3Cr-1Mo鋼の K_{IH} は焼もどし脆化处理により低下した。2.25Cr-1Mo鋼の K_{IH} と焼もどし脆化の関係を調査したところ、水素添加量が一定の場合、 K_{IH} は組織、不純物元素の種類、焼もどし脆化量によらずシャルピー破面遷移温度(vT_{rs})により一義的に決まることがわかった。すなわち、 K_{IH} に対しては焼もどし脆化は単純に加算的に作用するものと考えられる。

水素添加により変化する特性のうち、焼もどし脆化处理の影響が顕著にみられる vT_{rs} 、室温での衝撃エネルギー及び K_{Ic} と K_{IH} の関係を求めたところ、 K_{IH} は水素添加後の vT_{rs} から推定できることがわかった。また、水素添加による vT_{rs} の上昇量は水素添加量に比例することがわかった。

これらの結果から、 K_{IH} を高くするには vT_{rs} を低くする必要があり、初析フェライトを含まず初期靱性が良好で、焼もどし脆化感受性が低い鋼材を製造することが重要であることがわかった。

第6章 製造中及び使用中の脆化の少ない大形鍛鋼品新鋼種の開発

最近、生産の効率化のため、機器や構造物の運転条件を一段と苛酷化する動きにある。この数年の間にユーザーから要求のあった苛酷な運転条件においても十分耐えることができる新鋼種の開発を、前章までに述べた脆化の軽減策に基づいて行った。

低圧タービンローター用鋼では、現状よりも25～75℃高温での運転においても、使用中の焼もどし脆化が少なく、かつ過熱による脆化も生じない鋼材として、 $Mn \leq 0.08\%$ 、 $Si \leq 0.06\%$ 、 $P \leq 0.003\%$ 、 $S \leq 0.002\%$ 及びAs, Sn, Sb $\leq 0.003\%$ とした3.5Ni-1.7Cr-0.4Mo-0.1V鋼を開発した。

圧力容器用鋼では、現状よりも温度で30℃、圧力で50～150kgf/cm²高い状態で運転されても、クリープ強度が十分高く、靱性、焼入性、溶接性、耐水素浸食、耐水素脆化、耐焼もどし脆化に優れた2.25Cr-1Mo改良鋼及び3Cr-1Mo改良鋼を開発した。新鋼種の組成は通常の2.25Cr-1Mo鋼または3Cr-1Mo鋼に0.25～0.35%V, 0.04～0.06%Nb, 0.7～0.9%(Mn+Ni)及び20～30ppmCaを添加し、 $Si \leq 0.1\%$ 、 $P \leq 0.08\%$ 、及びAs, Sn, Sb $\leq 0.005\%$ 以下に抑制したものである。

第7章 結 言

本章では以上に述べた各章をまとめ、本研究を総括した。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、鍛造鋼材は著しく大形化され、またその使用条件も苛酷となり、これに伴って大形鍛鋼品の脆化防止がおおきな問題となってきた。本論文は大形鍛鋼品の代表例である低圧タービンローター及び压力容器用鍛鋼材について、その製造時及び使用中に生じる脆化に及ぼす種々の因子と、それらの脆化についての対策に関する研究結果をまとめたものであり、全編7章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、研究方針などを述べている。

第2章では、低圧タービンローターの製造中に生じる過熱による脆化とその対策について述べている。この脆化は通常鋼中に含まれるS濃度範囲ではS濃度減少に伴って低温に移行することを見出し、その対策としてはMn濃度を高めること、S濃度を10ppm以下にすることが有効であることを示した。

第3章では、压力容器用鋼における溶接後の応力除去焼なまし脆化とその対策について述べている。この脆化は過熱保持中脆化と徐冷中の焼もどし脆化とから成っており、前者を抑制するためにはMn、Cr、Moを増加させることが、後者を抑制するためにはP、Sbを低減させることが有効である。

第4章では、低圧タービンローター、压力容器の使用中の焼もどし脆化とその対策について述べている。これら鋼材の長時間使用に伴う焼もどし脆化に及ぼす各種因子の影響を調べ、いずれの鋼でもP含有量を100ppm以下に制限することによって焼もどし脆化による脆性破壊は防止できることを示した。

第5章では、高温高圧の水素雰囲気中で使用される压力容器用鋼の水素脆化とその予測法について述べている。

第6章では前章までに示した脆化の軽減策に基づいて、現状よりも苛酷な使用条件に耐える新しい低圧タービンローター用鋼及び压力容器用鋼を開発した経緯について述べている。

第7章は総括である。

以上要するに本論文では、大形鍛鋼品で認められる各種の脆化の程度と原因を明らかにし、それらへの材料学的な対策を示し、さらに脆化の少ない新鋼種を開発したものであり、材料工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。