

8. 耐熱鋼

日本冶金工業(株) ソリューション営業部 おい かわ まこと
ソリューション営業部長 及 川 誠

I. 特性

a 耐熱鋼の種類と用途

耐熱鋼は、JIS G0203に「高温における各種環境で耐酸化性、耐高温腐食性、または高温強度を保持する合金鋼」と規定され、石油精製プラント、エンジン排気系部品、タービンや工業炉など様々な用途で使用される。

JIS G4311に耐熱鋼棒・線材として35鋼種、JIS G4312に耐熱鋼板・鋼帯として28鋼種が規定され、表1¹⁾に示すようにSUH鋼種以外に一部のSUS鋼種も含まれる。これは、ステンレス鋼の耐食性を

向上させるCrが、同時に耐熱鋼としての特性も向上させて耐熱用途にも適用されるためである。

また、耐熱鋼は、主に組織により4つの系に分類されるので、各系の特徴をまとめる。

オーステナイト系耐熱鋼は面心立方構造のため、体心立方構造のフェライト系、マルテンサイト系に比べて拡散速度が遅く、高温側での高温強度、クリープ強度が高い。また、耐酸化性も有するため、一般的に高温強度、クリープ特性を必要とする用途で、高温域で使用される。なお、熱疲労特性が要求される部材への適用には注意を要する。また、固溶化熱処理の後に時効処理を行い、より

表 1 代表的な耐熱鋼の成分と用途¹⁾

	鋼種	成分	用途
オーステナイト系	SUH31	15Cr-14Ni-2Si-2.5W-0.4C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH35	21Cr-4Ni-9Mn-N-0.5C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH37	21Cr-11Ni-N-0.2C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁
	SUH38	20Cr-11Ni-2Mo-高P-B-0.3C	ガソリン及びディーゼルエンジン用排気弁、耐熱ボルト
	SUH309	22Cr-12Ni-0.2C	加熱炉部分、重油バーナー
	SUH310	25Cr-20Ni-0.2C	炉部分、ノズル、燃焼室
	SUH660	15Cr-25Ni-1.5Mo-V-2Ti-Al-B-0.06C	タービンロータ、ボルト、ブレード、シャフト
	SUH661	22Cr-20Ni-20Co-3Mo-2.5W-1Nb-N-0.1C	タービンロータ、ボルト、ブレード、シャフト
	SUS304-HR	18Cr-8Ni	汎用耐酸化鋼
	SUS309S-HR	22Cr-12Ni	炉材
	SUS310S-HR	25Cr-20Ni	炉材、自動車部品用材料
	SUS316-HR	18Cr-12Ni-2.5Mo	熱交換器、高温腐食用ボルト
	SUS347-HR	18Cr-9Ni-Nb	化学プロセス部材
フェライト系	SUH21	19Cr-3Al-0.08C	発熱材料、自動車排ガス浄化装置用材料
	SUH409L	11Cr-Ti-0.03C	自動車排ガス浄化装置用材料、マフラー
	SUH446	25Cr-N-0.2C	燃焼室
	SUS405-HR	13Cr-Al	タービン材、焼入用部品
	SUS410L-HR	13Cr-低C	自動車排ガス処理設備、ボイラ燃焼室、バーナー
	SUS430-HR	18Cr	耐酸化用部品、炉部品、オイルバーナー
マルテンサイト系	SUH1	9Cr-3Si-0.4C	ガソリン及びディーゼルエンジン吸気弁
	SUH3	11Cr-2S-1Mo-0.4C	高級吸気弁、低級吸気弁、ロケット部分、予燃焼室
	SUH11	9Cr-1.5Si-0.5C	ガソリン及びディーゼルエンジン吸気弁、バーナーノズル
	SUH600	12Cr-Mo-V-Nb-N-0.15C	蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
	SUH616	12Cr-Ni-1Mo-1W-V-0.25C	高温構造部品、蒸気タービンブレード、ディスク、ロータシャフト、ボルト
	SUS403-HR	13Cr-低Si	タービンブレード、蒸気タービンノズル
	SUS410-HR	13Cr	耐酸化用
	SUS410J1-HR	13Cr-Mo	タービンブレード、高温用部品
	SUS431-HR	16Cr-2Ni	スプリング、ワッシャー、計器部品
析出硬化系	SUS630-HR	17Cr-4Ni-4Cu-Nb	シャフト類、タービン部品、積層板の押板
	SUS631-HR	17Cr-7Ni-1Al	高温ばね、ペローズ

高い強度を有する鋼種もある。

フェライト系耐熱鋼は体心立方構造のフェライトを母相とし、総じて炭素量も高くもないため、高温強度は高くない。一方、熱膨張係数は小さく、熱伝導性も高いために、熱疲労特性に優れる。また、耐酸化性は有するので、強度をそれほど必要とされない部材に適用される。

マルテンサイト系耐熱鋼は、焼入焼戻し処理により、焼戻しマルテンサイトに炭化物が析出した組織となり、靱性や強度が向上する。そのため、600℃くらいまでは他の系に比べて最も高温強度や高温クリープが強いが、さらに高温となると組織変化により強度は急激に低下する。一方、Cr量はあまり高くなく、かつ炭化物も析出するので、他の系に比べて耐酸化性は低い。よって、600℃程度までの中温域で、耐酸化性よりも強度を重視する用途に適用される。

析出硬化系耐熱鋼は、析出硬化性を与える元素を添加し、析出硬化処理によって優れた高温強度を持つ。本系は析出相により高強度を有するが、析出相の粗大化等の組織変化を生じるような高温域では強度は低下するので、使用温度は500℃程度までとなる。

b 物理的性質

物理的性質にはヤング率、密度、比熱、熱伝導度等があるが、耐熱鋼においては、熱疲労特性や耐酸化性に影響を及ぼす熱膨張特性が最も注目すべき性質である。表2に代表鋼種の熱膨張特性を示す²⁾。

熱疲労とは、加熱や冷却に伴う熱膨張や熱収縮が拘束される部材などで、加熱・冷却により内部に応力が発生し、この温度変化に伴う応力の増減

表 2 代表的な耐熱鋼の熱膨張特性²⁾

	鋼種	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
オーステナイト系	SUH310	17.5 (0~649℃)
	SUH660	17.7 (21~750℃)
	SUS304	18.8 (0~649℃)
	SUS347	19.1 (0~649℃)
フェライト系	SUH409L	12.6 (20~700℃)
	SUH446	11.6 (0~649℃)
	SUS430	11.9 (0~649℃)
マルテンサイト系	SUH1	12.4 (20~600℃)
	SUS410	11.7 (0~649℃)
析出硬化系	SUS630	11.3 (21~427℃)

が繰り返されることで材料が損傷する現象である。熱膨張特性には金属組織の影響が大きく、フェライト系耐熱鋼は熱膨張係数が小さく熱疲労特性に最も優れ、一方、オーステナイト系耐熱鋼は熱膨張係数が大きく熱疲労特性に劣る。例えば、自動車排気系のエキゾーストマニホールドなどで、熱疲労特性が問題になる場合には、フェライト系耐熱鋼が適用されている。

耐酸化性では、特に繰返し加熱環境下で熱膨張係数が影響する。熱膨張係数が大きく、酸化スケールとの熱膨張差が大きいオーステナイト系耐熱鋼では酸化スケールの剥離が生じやすく、一方、熱膨張係数が小さいフェライト系耐熱鋼では酸化スケールの剥離が少なく、繰返し酸化特性に優れる。

c 機械的性質

耐熱鋼で重要な高温強度特性には、クリープ特性、高温疲労特性、(前述の)熱疲労特性がある。

クリープとは、高温下で金属材料に一定の負荷がかかった際に、時間とともに変形が進行し、最終的には破断にいたる現象である。一定温度、一定荷重下で生じる典型的なクリープ曲線は、図1³⁾に示すように、ひずみ速度が時間とともに減少する遷移クリープ(第1次クリープ)、ひずみ速度が時間とともにほぼ一定となる定常クリープ(第2次クリープ)、再びクリープ速度が時間とともに加速される加速クリープ(第3次クリープ)に分けられる。クリープ現象は一定温度では荷重が大きいほど、一定荷重では温度が高いほど変形が速くなり、破断時間は短くなる。

クリープ特性には、主にクリープ強度とクリープ破断強さがある。前者は一定温度下で規定した

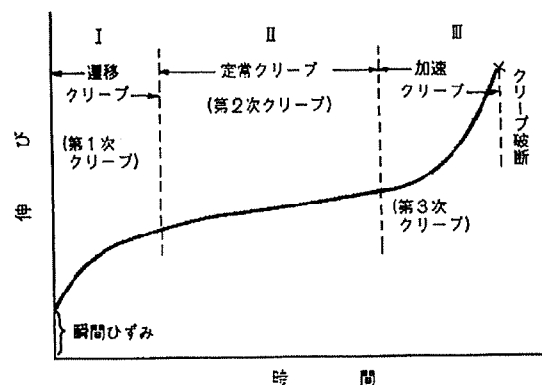


図 1 典型的なクリープ曲線³⁾

負荷時間に規定したひずみを生じる応力で、例えば、1,000時間で0.1%のひずみ (0.1%/1,000h) を生じる応力などがある。後者は一定温度下で一定時間にてクリープ破断を生じる応力で、例えば、 10^3 時間で破断する応力などがある。図2に代表的な耐熱鋼のクリープ破断強度の比較⁴⁾を示す。マルテンサイト系耐熱鋼は焼入れ-焼戻し状態で使用し、中温度域での強度に優れるために約600℃程度まで使用されるが、Mo、V、Nbなどを添加したSUH600やSUH616ではさらに600℃近傍のクリープ強さが改善されている。これ以上の温度域ではオーステナイト系耐熱鋼が他の系に比べて高強度であるために選択される。さらに、オーステナイト系耐熱鋼の中でも、SUH38やSUH661などは時効処理を行うことで、炭化物等を析出させて、より高強度を得ている。

高温疲労とは、高温域での繰返し応力を受けて材料が損傷する現象である。高温における疲労現象は、温度、繰返し速度、雰囲気、材料の組織変化等が影響するために、常温のそれに比べて複雑になるが、高温疲労強度と高温引張強さにはそれなりの相関が確認されている⁵⁾。

II. 熱処理

a オーステナイト系耐熱鋼

本系の大部分は固溶化熱処理状態で使用される。また、時効処理を施して、高強度を得る鋼種もいくつかある。

(1) 固溶化熱処理

固溶化熱処理は前処理で生成したマルテンサイトやひずみをなくし、また炭化物を固溶させてオーステナイト単相にして、優れた耐食性と加工性等を確保する熱処理である。

熱処理温度は、炭化物を固溶させるためには高温ほどよいが、高温にしすぎるとフェライトの発生や結晶粒の粗大化が生じるので、最適な温度範囲が存在する。冷却は急冷とする。550~800℃近傍の温度域で冷却速度が遅いと、Cr炭化物が主に結晶粒界に析出し、耐食性が劣化するので、熱処理でCを固溶化した後はCr炭化物が析出しないように急冷することが必要である。

(2) 安定化熱処理

安定化元素のTi、Nbを添加したSUS316Ti、SUS321、SUS347では安定化熱処理を施す場合が

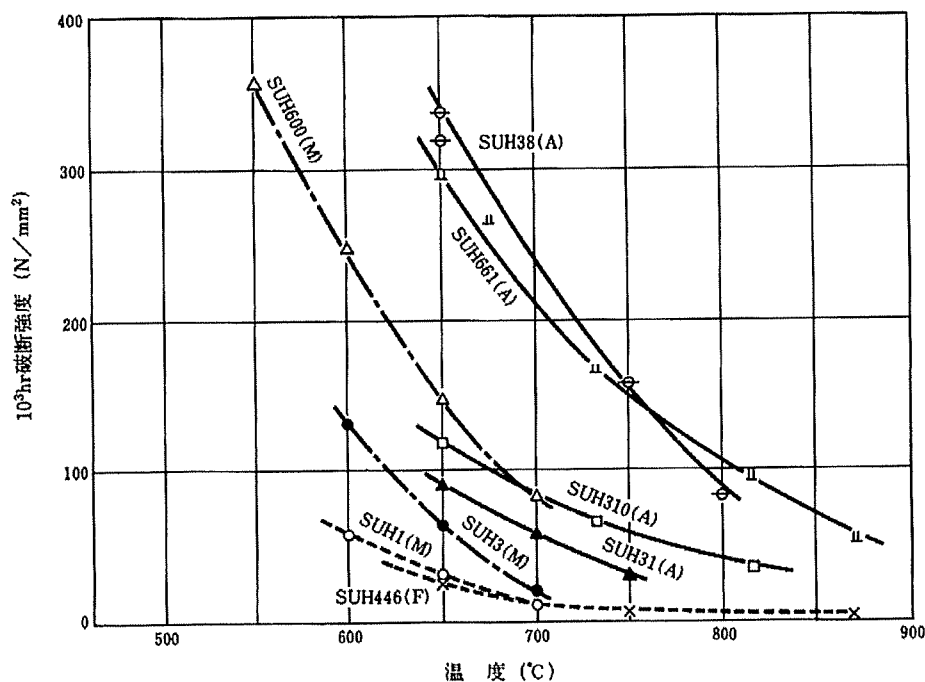


図 2 耐熱鋼のクリープ破断強度の比較⁴⁾
(図中のAはオーステナイト、Fはフェライト、Mはマルテンサイトを示す。)

ある。安定化熱処理はCrよりもCとの親和力の大きいTiやNbと固溶Cを反応させて析出物とし、固溶C量を低減して、Cr炭化物の粒界析出を防ぎ、耐粒界腐食性を向上させる熱処理である。

熱処理温度は、Cr炭化物が析出し難い温度域(850℃以上)で、かつTiCやNbCが十分に析出し固溶C量を低下させる温度(930℃以下)とし、冷却は、固溶C量が十分に低減しているため、急冷とする必要はない。

(3) 時効処理

SUH35、SUH36、SUH660、SUH661などでは、硬さや機械的な強さを高めるために固溶化熱処理後に時効処理を実施する。

時効処理は30番台の系では炭化物を析出することを、600番台では金属間化合物や炭化物を析出することを目的としており、固溶化熱処理状態を記号Sで、固溶化熱処理後時効処理状態を記号Hで表す。

b フェライト系耐熱鋼

本系は高温に加熱してもほとんどフェライト組織であるために焼入れによる硬化はなく、焼なまし状態で使用される。

焼なましは前工程で発生したひずみや応力を除去し、組織の均質化と優れた耐食性、良好な加工性を得る熱処理である。なお、熱処理温度が高すぎると結晶粒が粗大化し、韌性は劣化し、粒界腐食感受性も高まるので、焼なまし温度は機械的性質の許す範囲で低くするほうが無難である。また、高Cr系に特有な475℃脆性(475℃前後の温度に長時間保持すると脆くなる現象)が問題になる場合には、冷却の際に400~500℃の領域を速やかに通過させることが望ましい。

c マルテンサイト系耐熱鋼

本系は焼入れによりマルテンサイト組織となって硬化し、さらに焼戻しによって韌性と強さを兼ね備えた性能が得られるため、焼入れ焼戻し状態で使用される。

(1) 焼入れ

焼入れはオーステナイト化した後にマルテンサイト変態させ、高強度を得るための熱処理です。

熱処理温度は変態開始温度以上とし、オーステナイト化して、成分の均質化を図った後、油冷でマルテンサイト化する。熱処理時に多くのCr炭化物が分解するので、拡散の遅いCrが移動して均質

化が図れるように保持時間は十分にとる必要がある。熱処理温度は、高くすることで炭化物が多く分解し、オーステナイト中の固溶C量が増し、焼入れ後の硬さが増加する。しかし、高温にしすぎると、固溶C量のさらなる増加によりマルテンサイト変態開始温度が低くなり、残留オーステナイトが増加して硬さが低下する。一方、熱処理温度が低い場合には、オーステナイト化が不完全となり、十分な焼入れ硬さを得られない。よって、最適な熱処理温度を選ぶ必要がある。

(2) 焼戻し

焼入れ状態では硬さが高いものの脆いので、焼戻しにより硬さを幾分犠牲にして用途上必要な韌性を得る。耐熱鋼では、高温での使用中に焼戻しが進行して急速に強度が低下したり、性能が変化したりすることは好ましくなく、安定化した焼戻し状態にしておく必要がある。

一般的には、使用温度よりも高い温度での焼戻しが選ばれ、主に600~800℃で行われる。なお、中間温度域の400~550℃では韌性の低下、耐食性の劣化が生じるので、この温度域での焼戻しは避けるようにする必要がある。また、焼戻し後の冷却時には、この温度域を速やかに通過させることが必要である。

(3) 焼なまし

焼なましは前工程で生じたひずみや組織不均質性を除去して、軟質で冷間加工や機械加工に適する状態にする熱処理である。本系では、鍛造、熱間圧延などの熱間加工後は焼きが入り硬化しているので、機械加工や冷間加工をやすくするために、あるいは、置き割れなどが生じないように焼なましを行う。

焼なましの方法には主に完全焼なましと低温焼なましがある。完全焼なましはオーステナイト変態開始点(A_1)より50℃から100℃程度高い温度に加熱してオーステナイト化し、徐冷時に炭化物を析出してフェライトに完全に変態させ、軟化する方法である。低温焼なましは A_1 点直下のフェライト+炭化物領域で再結晶させ、加工性を回復させるもので冷間加工後の軟化方法などとして用いられる。

d 析出硬化系耐熱鋼

本系は固溶化熱処理後に析出硬化処理を行い、基

地に微細な第2相を均一に析出させて、強度を得る。

SUS630は固溶化熱処理により低Cの軟質マルテンサイトとなり、析出硬化処理でCu-rich相を析出させる。析出硬化処理は熱処理温度が最も低いH900処理で最大の強度が得られ、熱処理温度が高くなると強度は低下し靱性が改善される。SUS631は固溶化熱処理により準安定オーステナイトとなり、析出硬化処理ではオーステナイト相のMs点調整とマルテンサイト化を行い、510℃あるいは565℃の最終熱処理段階でNi-Alの金属間化合物を析出させて硬化させる。両鋼種ともに使用時にはマルテンサイト基地に析出相を含む組織である。

具体的な熱処理条件については、耐熱鋼棒の熱

処理条件がJIS G4311の附属書JAに、耐熱鋼板及び耐熱鋼帯の熱処理条件がJIS G4312の附属書JAに記載されているので、参照されたい。

参考文献

- 1) JISハンドブック1 鉄鋼 I、日本規格協会編、(2020)、p. 2822-p. 2826
- 2) 耐熱鋼高温特性データシート、ステンレス協会技術員会編、ステンレス協会発行、(1978)、p. 4-p. 5
- 3) 特殊鋼ガイド 第5編 特性と事故例、特殊鋼倶楽部「特殊鋼ガイド初級編集委員会」編、特殊鋼倶楽部発行、(1979)、p. 179
- 4) 特殊鋼の技術と用語のやさしい解説、特殊鋼倶楽部編集員会編、特鋼倶楽部発行、(1998)、p. 28
- 5) 金澤健二、山口弘二、佐藤守夫、西島敏：材料、37 (1988)、p. 254

