

がつて、このすべり摩擦をうけて肌荒れを起す部分を局部的に潤滑し、摩擦係数を低下せしめると圧延ロールのトルク負荷が 11% 減少し、また荷重が 3% 低下したことが報告された。潤滑油の供給方法については、ロール面をワイパーと圧縮空気により十分水切りをした後、ロール回転方向に圧延材の噛込みと同時に給油するが、その時点でロールのスリップがないのは、局部潤滑であり、また潤滑油供給が適正量にあるためと推論された。以上のように、熱間圧延潤滑により、ロールカリバー側壁の摩耗肌荒れが大きく改善され、圧延材の表面疵発生状態は、管理基準以下に十分抑えられて、ロール単位圧延量は、潤滑油を使用しない場合の 2.5 倍に拡大可能なことが示された。

(討25) ホットストリップミル仕上げ後段作業ロールに生じるスポーリングのマクロ的解析  
(日立金属(株) 佐野義一, 新日本製鉄(株) 木村和夫)

本講演では、ロールメーカー側から使用中の高合金グレンロールの胴折れ、スポーリング、クラック発生などの破壊事故発生原因解析結果が報告された。調査の対象にされた事故ロールは、ロールメーカー 2 社が 8 年の間に問題とされた 80 本である。これら事故ロールの破壊原因に関する統計的なマクロ解析調査から、その起因がロールの内部欠陥と異常圧延に大別して考えられ、しかも、それは表面損傷、割れき裂の進行状態、破面などから分類整理し得ることが述べられた。一般に、損傷の状態は、クラック、小スポーリング、大スポーリングの順に多くなるが、これらが圧延中に発見されるのは、半分以上であり、内部に大きく進展しているのが特徴で、その進行方向は、ほとんどがロールの回転方向と逆になることが明らかにされた。また、これらの起点は、ロール表層の欠陥や圧延時の絞り事故による表面クラックが主体となつていることもわかつた。これらからロールメーカーがユーザー側に特に要望しているのは、ロールの材質特性を考慮した適正な使用であり、また、圧延で絞り事故を無くすることができないことを前提とするならば、ロールの使用上におけるクラックの発生を確実に、しかも早期に検出して取り除く保守管理を十分に行うことが寿命延長の基本の一つであることが強調された。

(討26) 熱間圧延用補強ロールのスポーリングに関する検討

(日本鑄鍛鋼(株) 大小森義洋ほか)

鋼板圧延用ロールの問題には、ワークロールを支える補強ロールの損傷がある。この補強ロールの損傷は、主として、ころがり疲れによるロール表層の破壊と、圧延事故を含めた通板時の熱衝撃によるクラックの進展である。このような損傷現象は、ロール材質に大きく左右されるほか、ワークロールの表面硬さの影響もうけることが、メーカー側の実機における調査と実験的研究から明

らかにされた。特に、ホットストリップミルの仕上げ圧延後段 FW 6 の使用転動数の大きい補強ロールにスポーリングの発生頻度が多く、ロール表層が、ころがり疲れ限界を越えて生じていることが実験的にも明らかにされ、Miner 則などによる使用管理が必要なことが指摘された。また、ロールメーカーからは、摩耗、ころがり疲れ特性に優れた材質として、C, Cr などの合金添加を増量した高硬度材質が提案され、その適正組成が検討された。さらに、熱衝撃によるクラック発生のシミュレーション実験結果も報告され、ロールが受ける諸負荷と破壊の関係を材質上から定量的に示して、ユーザー側の適正な使用管理情報として利用されることが望まれた。

以上のように本討論会では、ロールのユーザー側とメーカー側よりみたロール摩耗損傷現象と使用上の問題、ならびにその研究報告を圧延ロールの寿命延長技術に対する情報として十分に討論交換することができたと言える。

最後に、講演者、事前に概要を読まれて質問状を寄せて下さった方々、ならびに会場で熱心な討論に参加された皆様に厚くお礼を申し上げますとともに、このようなロールに関する討論の場が、圧延プロセスには非常に有意義なことを再度強調して、討論会の紹介を終えます。

#### IV. 耐熱合金の腐食環境強度

座長 東京都立大学工学部

宮川 大海

近年、各種熱機関や化学プロセスの高温・高圧化に伴い、高温腐食環境下での耐熱合金の材料劣化の問題がますます重要になつてきた。このような情勢を反映して、最近では耐熱合金の高温腐食環境強度に関する国際会議も開催されている。しかしながら、この問題は考慮すべき影響因子が環境・材料両面で複雑多岐にわたるため、現象論的にさえまだ十分に解明されておらず、精確な実験計画に基づくデータの蓄積とその体系化が急がれている。

そこで、本討論会ではボイラ、ガスタービン、ディーゼルエンジン、あるいは高温化学装置などでとくに問題となる燃料油灰や高温硫化などの aggressive な腐食環境下と、高温ガス炉関連のいわゆる不純 He による低酸素ポテンシャル腐食環境下で、酸化、硫化、塩化、脱・浸炭などを受ける耐熱合金の強度特性への腐食環境の影響について講演(前者 4 件、後 2 件)していただき多角的に討論した。以下に講演と討論の要点を報告する。なお、講演の概要はすでに「鉄と鋼」, 71 (1985) 10, A273~A296 に掲載されているのでご参照いただきたい。

(討27) 重油燃焼環境下の高温損傷事例

(三菱重工業(株)高砂研究所 原田良夫ほか)

ボイラやガスタービンなどの高温の重油燃焼実環境下では、種々の応力が重畳して負荷された状態で、S, V, Na, あるいは Cl などを含む腐食性化合物による高温腐食を受けるため、加速酸化や硫化腐食によつて耐熱合金の損耗が加速され、脱 Cr 層、酸化物層、硫化物層、あるいは浸炭層などの脆弱な変質部が局部的に生成しやすい。長時間運転後には、これらの変質部がクリープや疲労によるき裂の発生と進展を促進して高温強度の劣化を招く。また、このような高温損傷は使用燃料や運転条件などによつてもその状況が複雑に変化する。

本講演では、実機のボイラおよびガスタービン高温部における損傷事例とその原因について、長期にわたる調査の実績を踏まえた詳細な紹介が行われ、これに対して異種金属溶接継手における応力酸化、ショットピーニングの功罪、伝熱管用材料の耐食性などに関する質疑応答があつた。

#### (討28) 耐熱合金の溶融塩腐食環境強度

(東京都立大学工学部 吉葉正行ほか)

高温腐食環境のなかでも最も厳しいものの一つである  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaCl}$  系溶融塩腐食について、各種耐熱合金のクリープおよび疲労における強度と破壊挙動への腐食環境の影響が報告された。

上記混合塩を塗布すると、一般に硫化物や塩化物による選択的な粒界侵食が起これ、これによつてクリープ破断強度が劣化しやすいが、とくに Inconel 751 などの析出硬化型 Ni 基合金では、腐食による破断挙動の本質的变化に起因して、この傾向が著しい。Ni 量の異なる一連の Fe-Ni-Cr 合金について、クリープ破断強度の腐食感受性に及ぼす合金中の Ni 量などの影響が破断挙動と関連づけて論じられ、併せて腐食環境中でクリープ破断特性の向上を図るための材料学的対策が提示された。また塩組成の影響が Inconel 751 について述べられ、腐食過程への塩化物の役割が試験温度の高低によつて大きく相違することが示された。

次に、混合塩塗布による高サイクル疲労強度の低下に関連して、疲労き裂の発生と進展を促進する腐食環境の役割が主に Ni 基合金について論じられ、同時に最も重要な組織学的因子である結晶粒径の影響が報告された。

これに対して、混合塩の融点は試験雰囲気(例えば  $\text{SO}_3$  の存在の有無)によつて大きく変わる可能性のあることが指摘され、また強度劣化の原因として粒界析出物の選択腐食による粒界の脆弱化が考えられないかなどの討論があつた。

#### (討29) $\text{CaSO}_4\text{-C}$ 高温腐食雰囲気中での排気バルブ合金のクリープおよび疲れ挙動

((株)豊田中央研究所 森本一史ほか)

陸用ディーゼルエンジン内における高温腐食による排気バルブ合金の強度劣化挙動について解明するため、耐食性の異なる 21-4N(Fe 基)、Incoloy 901 (Fe-Ni

基)、および Inconel 751 (Ni 基)に  $\text{CaSO}_4\text{-20}\%$ C 腐食剤を塗布して、クリープ破断ならびに疲労特性(いずれも主に  $800^\circ\text{C}$  と  $850^\circ\text{C}$ )への腐食の影響を検討した結果の報告である。ディーゼルエンジンを想定した  $\text{CaSO}_4\text{-C}$  系のような「固相硫酸塩」による研究は従来見当たらない。

得られた結果を要約すると、(1)腐食剤塗布量のとくに多い場合を除いて、腐食剤塗布による疲労強度の劣化はクリープ破断強度の場合に比べて著しい。これは主として前者では選択的な粒界侵食が起これやすいなどの腐食形態の相違に起因する。(2)各合金を比較すると、塗布量の多い場合のクリープ破断では、耐食性の悪い Inconel 751 が有効断面積の減少により強度低下をきたす傾向が最も強い。一方疲労では、各合金の耐食性と腐食形態に依存して、Inconel 751 と Incoloy 901 では高応力短時間側で、21-4N では低応力長時間側でそれぞれ腐食によるかなり大きな破断サイクル低下が認められた。(3) $\text{CaSO}_4\text{-20}\%$ C 系では、選択的な粒界侵食がとくに著しい  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-10}\%$ NaCl 系の場合に比べて、腐食による強度劣化が格段に少なく、高温長時間加熱に基づく合金内部の組織変化の方がむしろ強度に対する影響が大きいといえる。

これに対して、実機排気バルブ堆積物中での C の存在状態と実験にグラファイトを用いた理由、固相硫酸塩腐食における C の役割などについての討論が行われた。

#### (討30) $\text{H}_2\text{S-H}_2$ 雰囲気における Fe-Cr 合金の硫化挙動に及ぼすクリープ変形の影響

(北海道大学工学部 成田敏夫ほか)

石油精製、石油化学などの高温化学工業では各種の高温ガスによる腐食損傷が問題になるが、例えば水素化脱硫装置における  $\text{H}_2\text{S-H}_2$  による硫化腐食などはその代表的なものである。ここでは  $\text{H}_2\text{S-H}_2$  混合ガス中における硫化腐食の基礎的研究の結果として、まず無応力下での Fe-Cr 合金の硫化挙動について述べたのち、Fe-26Cr 合金における硫化腐食、とくに粒界硫化に及ぼすクリープ変形の影響について報告した。

その要点はつぎのとおりである。(1)Fe-Cr 合金では、上記混合ガス中の硫黄分圧が FeS-Fe の平衡分圧以下になると粒界が優先的に侵食される。侵食機構として、粒界が Cr の優先拡散経路になること、および Cr の拡散によつて生成した粒界硫化物先端のマイクロボイドが硫化物の解離を促すことなどを示唆した。(2)低応力下の定常クリープ期においてクリープ試片の粒界硫化深さを測定したところ、未変形部での粒界硫化は無応力試片に比べて著しく抑制され、さらにクリープ変形部でも侵食抑制の傾向が認められた。このことは粒界硫化層の成長動力学からも立証された。(3)表面硫化スケールもクリープ変形部 ( $\text{FeCr}_2\text{S}_4$ ) と未変形部 ( $\text{Cr}_3\text{S}_4$ ) では組成や性状が異なる。

これに対して、上記のように応力（クリープ変形）の大小によつて粒界侵食および全面腐食の挙動が異なる理由、あるいは腐食挙動への結晶粒度、炭化物の役割などに関する討論が行われた。

(討31) 高温ガス炉用 Ni 基超耐熱合金の強化因子に及ぼす不純 He 環境効果

(金属材料技術研究所筑波支所 阿部富士雄ほか)

高温ガス炉の熱交換器材料は高温ガス炉用 He という微量の不純物を含む特殊な低酸素ポテンシャル雰囲気中で高温長時間使用され、酸化に加えて脱・浸炭などの厳しい腐食を受けるため、これによる材料劣化の問題が重要である。ここでは、数種類の特徴的な Ni 基超耐熱合金について、1000°C の不純 He 中でクリープ破断試験を行い、高温強度に対する環境効果を微細組織の変化に着目して検討した結果が報告された。

要約すると、(1)炭化物で強化した合金（例：Inconel 617）では、酸化よりも脱炭の影響が大きく、脱炭による炭化物の消滅がクリープ破断強度を著しく低下させる。しかし浸炭によつては強度低下はほとんど起こらない。(2)炭化物と  $\gamma'$  で強化した合金（例：R4286）では、破断強度を低下させる主原因は脱炭であるが、Al および Ti の酸化に基づく表面近傍での  $\gamma'$  の消滅の影響も長時間側では無視できない。一方 Al の内部酸化物は表面クラックの生成を助長すると考えられる。(3)炭化物と  $\alpha$ -W で強化した合金（例：113 MA）では、脱炭のほかに、Cr の酸化によつて間接的に起こる  $\alpha$ -W の消滅が強度低下の原因として考えられ、これはとくに長時間側で重要である。W は浸炭には関与するが酸化物は形成しない。

これに対して、脱・浸炭を支配するガス組成、クラックの生成と酸化、脱・浸炭挙動の関係、合金の中心部では浸炭と同時に表面炭化物が消失するメカニズム、さらに炭素無添加の合金あるいは炭化物による強化作用があまり効かない高温長時間側における金属間化合物の役割などについて質疑応答ないしコメントがあつた。

(討32) 高温ガス炉用 Ni 基耐熱合金のクリープ・疲労特性に及ぼす雰囲気の影響

(石川島播磨重工業(株)技術研究所 服部博ほか)

高温ガス炉用高温部材は 900°C 以上の高温域で使用されるため、その低サイクル疲労特性はクリープ変形の影響だけでなく雰囲気の影響を強く受ける。本講演では、Ni 基耐熱合金 Hastelloy XR と Inconel 617 に関して、大気、真空、および各種不純 He 中での 950~1000°C の低サイクル疲労特性に対する雰囲気ならびにひずみ波形の影響が報告された。

明らかになつた知見としては、(1)不純 He 中の疲労寿命 (fast-fast 波形) は、高温ガス炉用に耐食性を改善した Hastelloy XR では大気中と同等である。一方、Inconel 617 では Al の内部酸化などに関連して大気中

よりかえつて長くなる。(2)各雰囲気とも、FF 型>FS 型>SS 型>SF 型の順に疲労寿命が低下し、引張側にクリープ損傷を受ける波形では寿命低下が大きい。(3)雰囲気効果が顕著に現れるのは、FF 型、SS 型の対称波形の場合であり、FS 型、SF 型では雰囲気効果が小さい。これは、き裂発生寿命を支配する不可逆的な粒界すべりの蓄積が、対称波形では雰囲気（とくに酸化）の影響の強い表面に限定されるのに対し、非対称波形では、変形の非対称性に起因して、雰囲気の影響の存在する表面のほかに合金内部でも多量に起こるためと考えられる。

これに対して、上記(3)の理由、表面き裂の発生と Al の内部酸化の関連性、両合金におけるひずみの繰返しに伴う軟化の機構とその破断繰返し数への影響などについて質疑応答が行われ、議論が白熱化して終了予定時刻を大分過ぎて討論会の幕を閉じた。

以上の講演と討論を通じてまず第一に感じたことは実験室的加速試験の有効性である。環境強度の劣化機構の解明とその対策の検討を目的とする基礎研究では、通常比較的単純化された環境設定のもとで実験を行わざるを得ないが、この場合環境設定が少くとも実機の状況を定性的には不分にシュミレートしたものであることが前提となる。そのためには実際の損傷事例からの情報について十分に検討する必要がある、この意味でも本討論会は極めて有意義であつた。

終わりに講演者、討論者をはじめ本討論会にご協力いただいた各位に深謝いたします。

## V. 最近の超塑性利用技術

座長 長岡技術科学大学

宮川 松 男

副座長 東京都立大学

西村 尚

最近、超塑性を利用する技術は広い範囲に及び、以前のように、延性の大きさを競う材料開発よりも応用面での利用開発が活発になつてきた。

超塑性は、延性が大きいことのほかに、著しく低い変形抵抗、拡散接合性、吸振性、電波のしゃへい性、など応用面はかなり広い。このような特性を利用して、次世代産業基盤技術開発制度における、Ti、Ni 基耐熱合金の難加工性改善法、各種クラッド材、とくに超高炭素鋼の超塑性を利用したクラッド材の開発、SPF/DB（超塑性成形/拡散接合）法によるチタン合金製航空機部品の製造など、先端技術の担い手として超塑性は利用されている。

従来、鉄鋼材料の超塑性に関する研究は少なかつたが、今後は材料製造面、とくに、圧延荷重の低減のための超塑性の利用など新しい展開が期待される。

以下に各講演内容の概略を紹介する。