

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 γ' 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 γ' 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 α -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 α -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。

(討33) 超塑性利用技術の最近の動向

(長岡技術科学大学 宮川松男ほか)

最近の超塑性に関する研究の全般的なサーベイをした講演である。微細結晶粒超塑性合金の開発は結晶粒の微細化技術の進展と大きな関係がある。従来の共析、共晶合金のほか、強加工—析出—再結晶の組合せ (Al 系, Ti 系合金)、合金の特性に応じた加工熱処理法、スピノーダル分解による方法などがある。これらの方法を工業化するための手段が紹介されている。次いで、超塑性合金加工品の強化法として、微量元素の添加、加工後の熱処理、他の高強度材との複合化などが示されている。さらに、超塑性を利用した加工技術として、現在次世代基盤技術開発制度で開発中の恒温鍛造、空圧成形、加熱—冷却深絞り法、ダイレス引抜き法、固相接合法などが紹介されている。なかでも、固相接合法は新しい技術であり、今後の発展が期待できる。とくに、一般構造用材と特殊機能材とを組み合わせた複合材は、制振材、高強度材など多目的な利用が行われている。

(討34) Ni 基耐熱合金 Mod. IN-100 の押出しによるプリフォーム条件と超塑性

(機械技術研究所 鳥坂泰憲ほか)

次世代基盤技術開発制度におけるテーマの一つで、Ni 基超耐熱合金製タービンディスクを製造する Gatoring 法の改良をねらった研究である。Ni 基合金は塑性加工に対しては難加工性であり、超塑性を発現させることにより、加工性を改善することは、ニアネットシェーブに対して有効である。この技術の一番のポイントは、超塑性材を得るための結晶粒微細化を目的としたプリフォームにある。結晶粒を細くするためには、プリフォーム時の押出し加工度を大きくすることが重要なポイントである。加工度を大きくするためには、押出し温度の設定が重要であり、動的再結晶により微細化するならば、再結晶温度 -250 K から γ' の固溶温度の間でなければならない。しかし、本研究によれば動的再結晶は何ら認められず、結晶粒の微細化は静的再結晶によるものであるとの仮定により、種々の押出し温度で加工し健全材を得ることに成功した。最適押出し条件は、押出し比 70% 以上、押出し温度 $1353\sim 1393\text{ K}$ の範囲で 1393 K が最も望ましい。

(討35) 超高炭素鋼の超塑性

(立命館大学 時実正治)

多量の過共析セメントイトを含む、極めて塑性加工が困難な $1.3\sim 1.9\%C$ の超高炭素鋼ならびに白鉄鉄に超塑性を発現させる方法について述べている。たとえば、 $1.9\%C$ 鋼を 1433 K に加熱後 1パス当たり 10% の圧下で 873 K まで連続圧延することにより、 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$ の球状セメントイトと $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ のフェライトからなる二相混合組織を得ている。この鋼は 500% 以上の伸びを示し超塑性を示した。また、鋼中の不純物 (Si,

Mn) の存在が微細粒組織の安定化を促す効果があることからヒントを得て、Cr, Ni を添加したところ、Cr は組織の安定化に役立つが、Ni は超塑性を阻害している。なお、微量の V 添加は効果がある。さらに、C 量が 2.11% 以上の白鉄鉄の場合にも、高 Mn, 低 Si であれば、同様の加工熱処理を行うことにより、超塑性を示すことを明らかにした。しかし、加工中に多量のポイドが発生して実用上問題であつたので、白鉄粉末を用いた所よ超塑性を示した。白鉄の超塑性は、超高炭素鋼同様粒界拡散に律速されている。その他、実用化へ向けての改善策として、高ひずみ速度下での超塑性性能を改善するために Si を添加する方法、加工熱処理をより経済的に行う方法について述べている。

(討36) アルミニウム系材料の超塑性と加工

(東京都立大学 西村 尚)

アルミニウム合金の超塑性材は、現在の所超塑性材の主流であり、チタンと並んで航空宇宙産業に利用されている。とくに、2014, 7475 など高強度合金は加工性が悪く、除去加工にたよることが多い。最近開発されているアルミニウム系超塑性材料の紹介とその加工技術について述べられている。添加元素として、Zr を入れた Supral (英国) に対して、我が国では標準的合金に対して、加工熱処理によつて微細結晶粒を得る方法を取つている。そのためのシーケンスが種々発表されており、より効率的、経済的な方法が指向されている。加工技術としては、薄板材に対する真空・ブロー成形が多く用いられているが、粉末冶金、恒温鍛造なども徐々に普及しつつある。特に粉末は急冷凝固が容易で微細結晶粒が得やすいため、今後の展開が期待される。加工への応用事例として、航空機用大型パネルが 7475 材で、建材用大型パネルが Al-Mg-Cu 系合金で実用化しており、電波のしゃへい性を利用したコンピューターカバーも数多く生産されている。経費が節約できること、部品点数が減らせることを特徴とした多種少量生産品に有利である。新しい試みとして、FRM のマトリックスとして超塑性アルミニウム合金が利用されている例が紹介された。

(討37) チタン系材料の超塑性と加工

(三菱金属(株)中央研究所 西野良夫ほか)

チタン合金の超塑性は、異方性の改善、延性の増加、スプリングバックの減少を目的とした研究を行つていながら偶然見いだされた。チタンの優れた特性の裏腹にこのような加工性の悪さが問題になつていた。超塑性は、チタンの加工性の改善に大きな力となつた。さらに、チタンの超塑性温度と拡散接合の温度とが一致しているために、前述した SPF/DB が行えるという利点がある。チタンの超塑性は、 $\alpha+\beta$ 相温度領域での微細粒恒温超塑性と鉄鋼と同じく、 α, β 温度領域での熱サイクルによる変態超塑性とがある。後者はまだ実験室段階で実用化には至つていない。チタン合金の超塑性成形

は、Ti-6Al-4V 板材の航空機パネルの成形（拡散接合を含む）と粉末成形、超塑性鍛造などがある。板材成形では、アルミニウムと異なつて成形中にボイドの発生がないという大きな利点を有している。成形法は真空・ブロー成形である。アルミニウムと異なり、昇温中に変態超塑性を利用して、成形圧力を低減できる。拡散接合は、わずか 20 MPa 程度の圧力で可能であり、複雑な成形品を一工程で作ることができ、部品点数の減少、軽量化コストの低減に役立つ。粉末成形は、回転電極法によつて製造され、急冷凝固したのち、HIP を用いて緻密化、形状付与を行う。FRM の製造にも、この Ti 超塑性粉末を利用している。超塑性鍛造は、次世代産業基盤技術制度の中の研究として行われており、ター

ビンディスクを恒温鍛造により製造している。粉末を焼結した後、鍛造プリフォームを作る過程で動的再結晶により微細化が生ずる。Ni 基合金とは、微細化の過程が異なる。

以上、5 件の講演に対して総合討論が行われた。さらに、追加のコメントとして、最近の国際的な研究状況が加えられた。超塑性応用の今後の技術問題として、成形速度がおそいこと、ボイドの発生、などがあるが、これらの問題の解決のためには、何といたつても、結晶粒の微細化技術を確立することが重要である。今回の討論会では、変態超塑性の講演がなかつたが、鉄鋼系材料を中心として、技術的にも興味ある現象であるので、今後の展開を期待したい。