

金材技研

1983

科学技術庁

ニュース

金属材料技術研究所

単結晶でガスタービンの効率を飛躍的に向上

—ニッケル基耐熱合金の高温強さの限界に挑む—

実用的なジェット機が始めて飛行してからわずか40年あまりの今日、機体重量約160t、積載物重量約200tという巨大なジャンボジェット機が、世界の空をとことん狭しと飛び回っている。ジェット機の歴史はジェットエンジンの心臓部であるガスタービンの性能向上の歴史であり、それは耐熱合金開発の歴史でもある。また、発電用ガスタービン用材料も、ジェットエンジンに追隨して発展してきた。

ガスタービンの部品の中でも最も過酷な条件にさらされるのは、タービン動翼であり、例えばジャンボジェット機の離陸時には約1300℃の高温ガスが毎秒113kg吹き込まれ、毎分最大7800回転している。ガスタービンの効率をタービンに吹き込む燃焼ガスの温度が高いほど良くなるので、1950年当時800℃であったものが現在では1300℃をこえ、更に高くするための努力が続けられているが、このネックになっているのがタービン翼材料の高温強度である。

タービン翼材料として現在主流となっているNi基耐熱合金は、Niに約10種類の合金元素を添加した析出硬化合金である。また、高温では結晶粒界で破壊するため、粒界を強化するための元素も添加されている。1950年代以来、Ni基耐熱合金はこれらの成分の最適な組合せを求めて改良されてきたが、合金成分の調整だけで更に性能を向上

させるのは既に困難になってきた。そこで注目されているのが、鑄造方法を改めて結晶の成長を精密に制御し、弱い結晶粒界をなくしてしまう技術である。

この方法には、結晶を一方向だけに成長させて柱状晶にする方法と、結晶粒界を全く含まない単結晶にする方法があり、柱状晶のタービン動翼は既に実用的に使用されている。柱状晶よりも更に強い単結晶タービン翼は今後の大きな発展が期待されており、当研究所のこれまでの研究においても、既にいくつかの好成果が得られている。

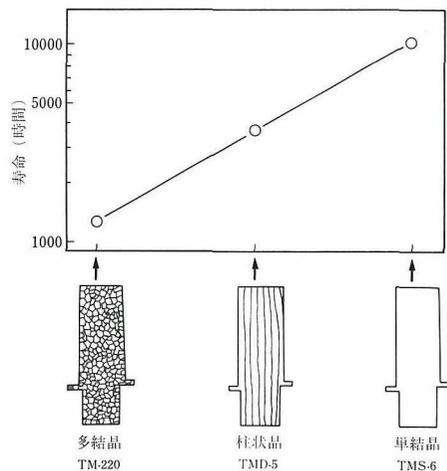


図 当研究所で合金設計法により開発したNi基耐熱合金の1000℃、12kgf/mm²でのクリープ破断寿命の比較

世界最強の耐熱合金を目指して

——合金設計による単結晶タービン翼材の開発——

Ni 基耐熱合金製の高圧タービン動翼は、精密鋳造法により製作されている。普通は溶融した合金を流し込んだ鋳型を放置して自然に冷却させるので、鋳型全体が一様に冷却し、でき上るタービン翼は無数の結晶粒から成る多結晶体である。

ところが結晶粒界は最後に凝固する部分であるため、成分の偏析及び粗大な析出物が晶出しやすく、高温ではその部分が弱い。したがって、結晶粒界をなくしてしまうと、高温での強度が飛躍的に向上する。結晶粒界をなくすと、強度向上にとってもう一つ有利なことがある。

Ni 基耐熱合金は、Ni に W, Mo, Nb などを固溶させて硬化させた γ 相中に、高温強度の優れた金属間化合物 $Ni_3(Ti, Al)$ の γ' 相を微細に析出させて高温強度を高くしたものである。 γ' 相が微細で均一に分布しているほど強度は高く、その γ 相の高温での安定性は成分元素が均一に分布しているほど良いので、鋳造後に高温に加熱して成分の均一化（溶体化処理）を行う。粒界強化元素を含む合金ではこれらの化合物の融点が低いために、溶体化処理を充分に行えないが、粒界強化元素を含まない場合にはこの処理を充分に行うことができる。

一方、タービン動翼は大きな遠心力を受けるので、遠心力の方向を横切る結晶粒界をなくし、結晶の最も強い方位が遠心力方向と同じになるようにそろえた柱状晶にただけで、強度は大巾に向上する。

柱状晶翼は、**図1**のような構造の一方方向凝固装置を用いて製造されている。鋳型に溶融金属を流し込むと水冷銅板に接した部分が凝固するので、

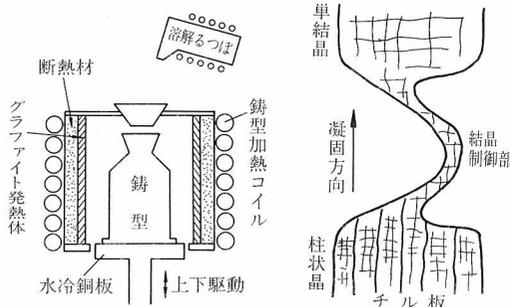


図1 一方方向凝固装置

鋳型を加熱炉から一定速度で引き出すと凝固面が前進し、その方向に長く伸びた結晶粒ができ、柱状晶が得られる。単結晶翼も同様の一方方向凝固技術を用いて作製するが、**図2**のように鋳型の途中を細くして柱状晶の中の一つの結晶だけが成長するように工夫されている。

単結晶には優れた強度を示す特定の方角があるため、結晶を成長させる際にこの方角からのずれをできるだけ小さくする必要がある。このため、凝固の際の熱流の制御及び鋳型の結晶制御部の形状などが、良い結晶作製のポイントになる。

当研究所では、通商産業省工業技術院のムーンライト計画の一部である高効率ガスタービンの研究開発に参加し、高圧タービン動静翼用 Ni 基耐熱合金の開発に独自の合金設計法を用いて大きな成果をあげている。その一環として一方方向凝固用耐熱合金の開発を行い、 1000°C 、 $12\text{kgf}/\text{mm}^2$ の条件の大気中クリープ試験で破断寿命が3500時間に達し、従来合金より大巾に優れた合金 TMD-5 を得た。

また、昭和56年度から始まった工業技術院の「次世代産業基盤技術研究開発制度」の「高性能結晶制御合金の研究開発」にも参加し、同じ合金設計法を粒界強化元素を含まない合金系に応用し、単結晶用合金の開発に取り組んでいる。多結晶合金、柱状晶合金の開発で培われた経験と実績を基に、現時点で世界で最も強い合金である NASAIR-100（米国）に匹敵あるいは凌駕する合金を開発しつつあり、更に高いプロジェクトの計画目標達成を目指した合金設計を行っている。

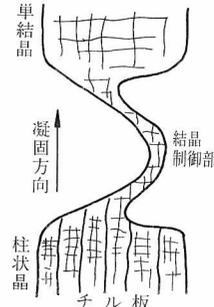


図2 単結晶成長の模式図
柱状晶の中の一つの結晶のみを選択成長させる。

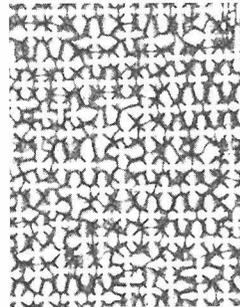


写真1 凝固したままの単結晶の(001)面上のデンドライト組織 (×40)

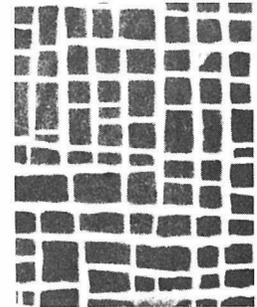


写真2 単結晶の(001)面上で観察される γ' 相(黒い部分)の規則的な配列 (×10000)

マルエージ鋼、引張強さ 400kgf/mm²達成

比強度（重量当りの強さ）の高い材料の開発が要望される分野においては、超強力鋼、チタン合金と複合材料が競合関係にあるが、現在は、材質上の均質性に優れ、製法面などで利点を有する金属材料が依然として優位を占めている。これらの金属材料の中でも最高の比強度が得られるのは、マルエージ鋼である。

当研究所では、10Ni-18Co-12Mo-1Ti マルエージ鋼に対し、溶体化処理後の冷却過程で熱間加工を行う特殊な加工熱処理により、350kgf/mm² を超える引張強さが得られることを既に明らかにしている。

この強度を更に高めるために、CoやTi、あるいはMoなどを増加させた組成のものを特殊加工熱処理をした後に、更に80%の冷間加工を付加してから時効処理をすることにより、397kgf/mm² の引張強さを得ることに成功し、比強度の記録を更新した。（強力材料研究部）

水噴霧法による 金属微粉の製造

最近の高密度焼結部品製造法では材料特性を向上するために、平均粒度数ミクロンの微粉を活用する傾向が強まっている。その粉末には成分偏析を起しやすい混合粉よりも合金粉が望ましいが、良質で安価な微粉を安定して供給できる製造技術がまだ確立されていない。

当研究所では最高水圧50MPaの水噴霧装置を用いてSn、Cu、Ni、Feなどの単一金属や50Ni-50Fe、80Ni-20Crなどの合金の微粒化条件を検討し、水噴霧法による数ミクロンの微粒の製造に成功した。

その噴霧は円錐水ジェット方式によるが、円錐頂角を45°～90°と従来法より1.5～3倍大きくし、ジェットの粉化エネルギーを効果的に頂点近傍に集中できるのを特色とする。生成粉中にはサブミクロン粉も観察され、液体噴霧法が微

粉製造に十分なポテンシャルを持つことを確認した。（金属加工研究部）

迅速かつ高感度な燃焼 一赤外線吸収法による 鉱石及びフェロアロイ 中の硫黄の定量

鉱石及びフェロアロイ中の硫黄の定量方法としては、JIS法に規定された硫酸バリウム重量法や燃焼中和滴定法などが用いられている。これらの方法は煩雑な操作で長時間を要し、分析者の熟練を必要とする。また燃焼中和滴定法では、酸化反応を円滑に進めるために使用する助燃剤の規定が充分になされていない。

そこで、これらの欠点を解決するために燃焼一赤外線吸収法の適用を試み、その結果、簡便、迅速かつ高感度な定量法を確立した。

鉱石には通常数パーセントの化合水が含まれており、この影響を除去するための簡単な予備加熱法や、最適な助燃剤の種類、組合せ、量などを検討し、各種鉄鉱石、マンガン鉱石、クロム鉱石及びフェロマンガ、フェロクロムなどに満足のいく結果を得た。精度の良い日常作業分析法として採用し、作業能率の向上に資している。

（金属化学研究部）

長時間腐食疲れ寿命 評価のためのマルチ 型試験機を開発

機械や構造物の破壊原因として材料の疲れが大きな要因であることは従来から指摘されている。最近特に腐食環境の影響下における構造材料の疲れ強さに対する関心が高まっており、実用上重要な長時間データの整備、それに基づく長時間寿命予測法の研究などが急がれている。

この場合、試験時間の有効利用を図り、かつ研究開発の効率を高めるためには、なるべく種々の条件において多数の試験を平行して

行うことが望ましい。この見地から、設置面積が10m²程度で、消費電力も従来型の1/10程度のマルチ型回転曲げ試験機を開発した。

この試験機は、上下三段重ねで、各段とも30、3、0.3、0.03Hzの4速度で4個ずつの試験片を取付けられる構造であり、腐食環境を各段ごとに独立に制御することができる。試験片はつかみ部直径15mm、試験部直径8mmのJISの標準型（II-8号）で、同時に48本についての試験ができる。

現在までに、この試験機2台を用いて試験方法の検討などを行い、S45C、SCM435 調質鋼などについて約1万時間までの系統的試験を進めている。（疲れ試験部）

クリープ、疲れデータ シートの刊行

当研究所では昨年後半に以下のような、約6万時間までの破断データを含めたクリープデータシート改訂版と、疲れデータシートとを刊行した。

○クリープデータシート

（57年9月30日付）

No.22A ガスタービンディスク用鉄基耐熱合金 A286 (Fe-15Cr-26Ni-1.3Mo-2.1Ti-0.5V)

No.23A ガスタービンブレード用鉄基耐熱合金 N155 [Fe-20Cr-20Ni-20Co-4W-4Mo-4(Nb+Ta)]

No.24A ガスタービンブレード用ニッケル基耐熱合金 Inconel 700 (Ni-15Cr-28Co-4Mo-2.5Ti-3Al)

○疲れデータシート

（57年12月25日付）

No.29 機械構造用ステンレス鋼棒 SUS430 (17Cr) の疲れ特性

No.30 機械構造用ステンレス鋼棒 SUS403 (13Cr) の疲れ特性

No.31 溶接構造用800N/mm² 級高張力鋼の突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性

No.32 耐食耐熱超合金棒 NCF800 H (Fe-21Cr-32Ni-Ti-Al) 高温高サイクル疲れ特性

（クリープ試験部、疲れ試験部）

1982年外国人来訪者一覽

●筑波支所

来訪者合計95名

国名	人数	月日	氏名	所属機関			
アメリカ	23名	4. 27	Dr. D. G. Doran	ほか2名	Hanford Engineering Development Laboratory		
		5. 18	Prof. K. T. Hartwig		University of Wisconsin		
		5. 18	Dr. W. K. Macdonald		Wah Chang ALBANY Co.		
		5. 19	Prof. J. E. C. Williams		Massachusetts Institute of Technology		
		5. 19	Dr. M. Suenaga		Brookhaven National Laboratory		
		5. 19	Dr. S. Foner		Francis Bitter National Magnet Laboratory M.I.T.		
		5. 20	Dr. D. S. Beard		Department of Energy		
		5. 20	Dr. D. N. Cornish		Lawrence Livermore National Laboratory		
		5. 21	Dr. L. U. Gubser		Navel Research Laboratory		
		5. 24	Dr. A. K. Clark		National Bureau of Standards		
		5. 26	Prof. J. D. Corbett		Ames Laboratory D O E Iowa State University		
		6. 24	Mr. D. E. Yuhas	ほか1名	Sonoscan Laboratory		
		7. 14	Prof. Y. B. Kim		University of South California		
		8. 26	Dr. M. J. Leopold	ほか1名	Francis Bitter National Magnet Laboratory M.I.T.		
		9. 21	Dr. H. M. Ledbetter		National Bureau of Standards		
		9. 24	Dr. A. I. Braginsky		Westinghouse R & D Center		
		10. 27	Dr. M. Kaminsky		Argonne National Laboratory		
		12. 3	Prof. R. F. Bunshah		University of California, Los Angeles		
		12. 6	Dr. L. M. Schetky		International Copper Research Association incorp.		
		フランス	21名	3. 25	Mr. H. Deportes		Ceaisaclay
				5. 17	Prof. P. Seyfert	ほか16名	Centre d'Etudes Nucléaires
				5. 19	Mr. A. Marquet		Electricite de France
				9. 9	Mr. P. F. Gobin		Ministère du la Recherche et de Industrie Mission Scientifique et Technique
11. 26	Prof. G. Moulin				Université de Paris-Sud Laboratoire de Métallurgie Physique		
西ドイツ	9名	3. 11	Prof. R. Kammel	ほか4名	Technische Universität Berlin		
		5. 8	Prof. C. Heiden		Justus Liebig Universität Gießen		
		5. 17	Dr. R. Flukiger		Kernforschungszentrum Institut		
		5. 21	Dr. G. Bogner		Siemens AG Research Laboratoris		
		5. 21	Dr. R. Gremmelmaier		Siemens AG Research Laboratoris		
ブルガリア	7名	3. 18	Mr. L. Bontchev	ほか6名	Bulgarian Embassy		
		11. 29	鄧 恩 誠	ほか6名	中国金工業部建築研究総院		
マレーシア	5名	12. 7	Mr. M. B. H. M. Yassin	ほか4名	マレーシア代表国長連邦直轄区副閣僚		
韓 国	4名	7. 19	李 承 院		ソウル大学		
		11. 8	文 仁 琳	ほか2名	韓国科学技術研究所		
コスタリカ	4名	2. 3	Prof. J. M. Páez	ほか3名	University of Costa Rica		
イタリア	3名	5. 17	Prof. N. Sacchetti		C.N.E.N. Laboratorio Superconductivita		
		5. 18	Prof. M. Aadente	ほか1名	CISE S.P.A.		
台湾	3名	10. 19	莊 以 德	ほか2名	核能研究所		
ブラジル	2名	3. 11	Prof. A. F. Sortori		Instituto de Niodio e outros Metals Refractorios		
		11. 2	Prof. K. K. Chawla		Institute of Engineering Riode Janeiro		
インド	1名	6. 22	Dr. V. S. Tomar		National Physical Laboratory, Cryogenics Div.		
オーストラリア	1名	10. 20	Mr. R. S. Goleby		Department of Science & Technology		
カナダ	1名	5. 22	Dr. R. Roberge		Institut de Recherche d'Hydro-Québec		
ソ連	1名	5. 19	Prof. K. Yushchenko		Paton Electrowelding Institute		
その他	3名	10. 11	Mr. M. Linna	ほか2名	OECD 調査団		

【出願公開発明の紹介】

連続溶解精錬製造法

特公開昭57-92124

昭和57年6月8日

本発明は、鋼屑、還元鉄等を原料とした商品質鋼材の連続的製造方法に関するものである。従来の電弧炉製鋼法は電力公害、環境対策、低歩留り等の問題点のほか、高価な電力をエネルギー源とするなど将来に多

くの不安材料を抱えている。本発明は、工程の各機能を溶解加炭工程、精錬工程、鍛造工程のごとく有効に分離し、これを連続化したプロセスにおいて、溶解加炭工程には電弧炉の代りにキューボラを用い、各工程間に溜炉工程を設け、各工程の溶湯平均滞留時間を規定することにより上記欠点を解消し、併せて無電力製鋼法を提供せんとするものである。本発明によれば、製品コストも大巾に低減される見込である。

◆短 信◆

●人事異動

昭和57年12月31日付

退職 九島 元治 (管理部技術課長)

昭和58年1月1日付

併任 管理部技術課長

一色 長敏 (管理部長)

通巻 第290号

編集兼発行人 越 川 隆 光
印刷 株式会社三興印刷
東京都新宿区信濃町1-2
電話 東京(03)359-3811(代表)

発行所 科学技術庁金属材料技術研究所

東京都目黒区中目黒2丁目3番12号
電話 東京(03)719-2271(代表)
郵便番号 153