存在することが明らかになった。

発光領域の2次元形状を知るには、イメージインテンシファイアを備えた高速度カメラで、輻射光の像を撮影する必要があるが、現在進行中である。

6. 衝撃波層と後流の熱化学的構造

これらの結果から、飛行体周りの熱化学的構造を考えると、飛行体前方の衝撃波層では温度が比較的高温で、空気の解離や、アブレーション生成物の分解等の吸熱反応が起こる。

そのため空気分子からの輻射と同時に、炭素を含む分子からの輻射が見られる。一方、飛行体側面や後方では、流れの膨張に伴って並進温度が低下し、CN分子の生成などの発熱反応が支配的となり得る。

非平衡に励起された炭素を含む分子は、失活する際に輻射を起こすため、飛行体後方にまで発光領域が存在すると思われる。

これらのことを考え合わせると、再突入速度が高く、飛行体表面の加熱率が大きくなるに従って、アブレーション層まで含めた解析が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) Park, C.: Calculation of Nonequilibrium Radiation in AOTV Flight Regimes, AIAA 84-0306, 1984.
- 2) Walberg, G. D.: A Survey of Aeroassisted Orbit Transfer, J. Spacecraft and Rockets, 22 (1985), pp. 3-18.
- 3) Sharma, S. P. and Gillespie, W.: Nonequilibrium Shock Front Radiation Measurement, J. Thermophysics, 5 (1991), pp. 257-265.
- 4) Park, C. S. and Barshader, D.: Studies of Radiative Emission from the Simulated Shock Layer of the Huygens Probe, Proc. 18th Intl. Symp. Shock Waves, Sendai, 1992, pp. 671-676.
- 5) Homma, H. and Iizuka, H.: A Shock Tube Study on Radiation Emission from High-Temperature Air in Hypersonic Flows, Aerothermo-Chemistry of Spacecraft, IUTAM, Marseille, 1992.
- 6) Page, W. A. and Arnold, J. O.: Shock Layer Radiation of Blunt Bodies at Reentry Velocities, NASA TR R-193, 1964.
- 7) Dietz, K. L., Beale, K. S. and McGregor, W. K.: Ultra-violet/Visible Spectral Radiation from the Nose Cap of a Projectile Launched in a Ballistic Range, AIAA Paper 90-1552, 1990.
- 8) 小紫公也, 矢野修二郎, 笠原次郎, 藤原俊隆: 極超音速飛行体周りに形成される非平衡衝撃波層からの輻射熱伝達に関する実験及び解析, 日本航空宇宙学会誌, 42 (1994), pp. 503-509.
- 9) Yano, S., Komurasaki, K., Kasahara, J., Takaoka, H., Saito, A. and Fujiwara, T.: Radiative Heat Transfer to a Hypersonic Projectile in Ballistic Range Experiments, Proc. 19th Intl. Symp. on Space Tech. and Sci., Yokohama, 1994, pp. 405-410.

一特 集一

風洞用アークヒータの諸特性*1

田頭成能*2・満田正彦*2
荒井達雄*3

Key Words: Arc Heater, Arc Wind Tunnel, High Enthalpy Flow, Ground Testing

1. はじめに

近年、宇宙往還機やスペースプレーンに関する研究開発が盛んになっている。それにともない、飛翔体の

極超音速での飛行状況を地上で模擬するための、いわゆる高エンタルピ風洞への関心が高まっている。

アーク風洞は試験気体(主に空気)を電気的なアークで加熱して高いよどみ点温度を得るものである。この加熱器をアークヒータと呼ぶ。諸種ある高エンタルピ風洞の中でアーク風洞は、気流のよどみ点温度が燃焼風洞等に比べて高いこと、気流中に燃焼生成物を含まないこと、電離・解離状態の空気による試験ができること、および持続時間が数分~数十分と長いことな

*1 平成6年10月3日, 第26回流体力学講演会で講演。平成7年5月8日原稿受理 Characteristics of Arc Heater for Wind Tunnel

*2 (株)神戸製鋼所機械研究所 Shigeyoshi TAGASHIRA and Masahiko MITSUDA

*3 (株)神戸製鋼所エネルギー・化学本部 Tatsuo ARAI

著者紹介

田頭 成能 (正会員)

昭和39年生。北海道出身。昭和63年東京工業大学大学院制御工学専攻修士課程修了。同年(株)神戸製鋼所入社。現在機械研究所研究員。流体工学、熱プラズマ利用技術などの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会の会員。

満田 正彦 (正会員)

昭和34年生。兵庫県出身。昭和61年東京大学大学院工学系研究科航空学専攻課程修了。工学博士。同年(株)神戸製鋼所入社。現在機械研究所主任研究員。流体力学、伝熱の研究に従事。AIAA 会員。

荒井 達雄 (非会員)

昭和22年生。東京都出身。昭和45年慶応義塾大学工学部機械工学科卒業。同年(株)神戸製鋼所入社。現在、エネルギー・化学本部技術部次長。航空宇宙 Gr. グループリーダー。

どの特徴を持つ。このため従来から宇宙往還機の耐熱材料や熱防御システム (TPS) の試験や、高エンタルピの実在気体流れの研究などに用いられてきた。

アーク風洞の構成機器のうちアークヒータは、気流の比エンタルピ、コンタミネーション、試験部での空間的均一性など、空気力学的な諸元に大きく影響する。このため、アークヒータの高性能化は大きな課題であり、またその特性を的確に把握することは重要である。

本稿でははじめにアーク風洞に関して概説し、またアークヒータについて、その構成と技術的に重要な点について述べる。次に筆者らが行ったアークヒータの実験について、その結果を報告する。最後にアーク風洞に関する最近の技術動向を概観し、今後アーク風洞

に求められる技術課題について述べる。

2. アーク風洞とアークヒータ

2.1 アーク風洞の概要 第1図にアーク風洞の構成例を示す。試験気体 (空気) はアークヒータで超高温に加熱され、超音速ノズルで加速されて、試験部に導かれる。供試体を通じた試験気体は、ディフューザで減速され亜音速となり、熱交換器で冷却され、排気装置を介して放出される。電源については交流、直流、高周波 (RF) の各方式があるが、大型アーク風洞の場合多くは直流で、サイリスタブリッジ式電源などが使用される。このほか付帯設備として、アークヒータ、ノズル、ディフューザなどを冷却する水冷設備や、高温のため発生する NO_x (しばしば数千 ppm となる) を取り除く脱硝設備が必要である。

気流のよどみ点状態や試験部の状態は試験目的によって決められるが、たとえば大気圏再突入時の気流の模擬であれば、よどみ点の比エンタルピは 5~30 MJ/kg、試験部での動圧は 1~4 kPa 程度である。

各国のアーク風洞の整備状況については文献^{1~3)}に詳しいが、主要なものを第1表に示す。広く知られているのは米国 NASA Johnson 宇宙センターの 10 MW 設備⁴⁾、同 Ames 研究センターの 60 MW 設備⁵⁾で、主にスペースシャトルの熱防御システムの開発に用いられた。わが国においては航空宇宙技術研究所の

第1図 アーク風洞の構成

第1表 各国の主要なアーク風洞設備^{1~5)}

国名	保有組織	設備名	出力(MW)	総圧(atm)	流量(kg/s)	備考
米国	NASA Johnson 宇宙センター	ARMSEF-1	10	—	—	
米国	NASA Ames 研究センター	60 MW Interaction	60	1~10	0.05~2.27	
米国	AEDC	HEAT-3	70	25~150	1~9	
フランス	Aerospatiale	JP 200	20	80	—	
イタリア	CIRA	Scirocco	70	1~17.6	0.1~3.5	建設中
ロシア	TsNIIMASH	U 15 T-2	50	50	2~6	
中国	中国空気動力研究発展中心	Arc Heater	20	128	—	
日本	航空宇宙技術研究所	アーク加熱風洞	0.75	1.1	0.022	
日本	宇宙科学研究所	耐熱材料実験設備	0.5	5~16.7	—	

CIRA: Centro Italiano Ricerche Aerospaziali, TsNIIMASH: 中央機械建築研究所

750 kW 設備^{6,7)}、宇宙科学研究所の 500 kW 設備⁸⁾ などが稼働している。

2.2 アークヒータの構造 以下、本稿では直流電源によるアークヒータに限って述べる。第2図にアークヒータの構成例を示す。アークヒータには諸種の形式があるが、両極間のアーク保持方法により Huels 型と縮流安定型に大別される。アーク長が比較的短く内径の数倍～数十倍程度の場合は、アークヒータ内の気流に周方向の旋回をかけ中央の圧力の低い部分にアークを保持する方法がしばしば用いられ、Huels 型 (または旋回安定型) と呼ばれる。しかし大出力のアークヒータではアーク長は数 m にもおよび、旋回流による安定化のみでは保持は困難となる。そこで、相互に絶縁された多数の薄いドーナツ型の板 (コンストリクタ) でアーク保持部を構成し、これを浮遊電位部分としてその中央にアークを拘束する方法がとられ、縮流安定型 (または壁面安定型) と呼ばれる。一般に縮流安定型は構造が複雑であるが、大型化が容易なこと、運転範囲が広いことなどの利点のため、大規模なアーク風洞では好んで用いられる。

アークヒータの性能や運転特性に関係するいくつかの技術的項目について、以下にまとめる。

(1) 電極：電極材料には、タングステンなどの高融点金属材料を用いる場合と、銅系の材料を水冷して用いる場合とがある。一般に、出力数百 kW 以上の設備では、水冷の銅製電極が用いられる場合が多い。

電極は通電にしたがって損耗してゆくが、その要因

は大きく分けて熱による気化と、空気中の酸素による酸化の2つあると考えられている。また両電極のうち一般に陰極の方が損耗が大きいが、これは陰極表面で起こる陽イオン (電離した酸素、窒素など) の分子論的な衝突によるものといわれている。

電極表面上のアークの付着点はアーク足と呼ばれる。その直径は 1 mm のオーダーであるが、電流密度は極めて大きく、タングステン電極で $10^7 \sim 10^8 \text{ A/m}^2$ 、銅電極では $10^8 \sim 10^{12} \text{ A/m}^2$ にも達する^{9,10)}。一方電子放出などのため、アーク足部では電極表面近傍で数 V 程度の電圧降下が起こる¹¹⁾。したがってアーク足部でのジュール発熱による熱流束は極めて大きく、銅製電極では $10^9 \sim 10^{13} \text{ W/m}^2$ のオーダーにもなる。このため、かりにアーク足の付着位置が電極上で固定されていれば、その部分は溶解し、電極の溶損につながる。そこで旋回流による流体力や、磁界とアークとの相互作用によるローレンツ力などを利用し、アーク足を電極上で周回させて溶損を防ぐ対策がとられる。その例として、電磁コイルを利用した例を第3図⁵⁾に示す。

電極の酸化による損耗に対しては、電極近傍でアルゴンや窒素ガスによるシールドを行うなどの対策がとられる。

電極材料の損耗分は気流中の不純物 (コンタミネーション) となり、これは気流成分の純粋性を損なうだけでなく、極端な場合には供試体表面に付着するなどの問題を起こす。数十 MW 級のアークヒータでの気流中のコンタミネーションは、運転圧力 1~10 atm で 10 ppm (質量比) のオーダーであり^{5,12)}、100 atm 程度の高圧下では 200 ppm 程度であるとの報告がある¹³⁾。

(2) 熱効率と熱損失：アークヒータへの投入電力を Q_a 、このうち試験気体のエンタルピ上昇に寄与し

(a) Huels型

(b) 縮流安定型

第2図 アークヒータの構成

第3図 アークヒータ電極の例

た分を ΔH とする。このとき、 $\eta = \Delta H / Q_a$ を熱効率と呼び、また冷却により失われる熱量 ($Q_a - \Delta H$) を熱損失と呼ぶ。熱損失の要因はアークヒータ内での対流伝熱と輻射伝熱である。アークヒータ内圧力が大気圧近傍の時は対流伝熱が支配的であるが、圧力または気流比エンタルピを高めてゆくと徐々に輻射伝熱が支配的になる。大型アークヒータの熱効率の例としては、運転圧力が5~10気圧のとき比エンタルピ 20 MJ/kg では約 60%、30 MJ/kg では約 25% というデータがある⁵⁾。

縮流安定型のアークヒータでは、アーク保持部内の流れは発達流れであるから、気流の均一性の観点からはアーク保持部は長い方が望ましい。しかし過剰に長いと熱損失が大きくなるため、一般に適当なアーク保持部長さが存在する。このことはアークヒータを設計するうえでのひとつの指針になる。

(3) 起動装置：アークヒータを起動するには、アーク保持部内の気体の絶縁を破壊する必要がある。絶縁破壊を容易にするため、起動時にはアークヒータの内圧を低圧 (0.1~1 Torr 程度) に下げ、またアルゴンなど破壊電圧の低い気体を用いる。また、必要に応じて高周波電源などを併用する。

3. アークヒータの実験的研究

筆者らは 300 kW の縮流安定型アークヒータを試作し、その諸特性を実験的に測定した。以下、その実験結果について述べる。

3.1 実験装置 試作したアークヒータの概念図を第4図に示す。電極は上流側に陽極ブロック、下流側に陰極ブロックが配置され、その間にアーク保持部がある。各部は両端のフランジの間に絶縁ボルトで保持されている。電極ブロックはその中央に電極があり、その両側には電極とアーク保持部間をなめらかに接続

第4図 300 kW アークヒータの模式図

する拡大/縮小セグメントがある。アーク保持部は相互に絶縁された多数のコンストリクタにより形成され、その長さはコンストリクタ枚数の増減で変えられる。

コンストリクタは銅製で水冷されており、内径は $\phi 25.4$ mm、一枚の厚さは約 10 mm である。電極は銅製で同じく水冷されており、内径は $\phi 80$ mm、陽極・陰極とも第3図と同様の形式で電磁コイルを内蔵している。

作動ガス（空気）はコンストリクタの間からアークヒータ内に吹き込まれ、アークで加熱された後オリフィスへと導かれる。ただし電極近傍ではアルゴンガスを吹き込み、電極の酸化を防いでいる。

このアークヒータの設計点での諸元（定格性能）を第2表に示す。設計点は大気圏再突入の試験用途を意識して決めた。投入電力は 300 kW で、これは今回使用した直流電源（6パルス/サイリスタブリッジ型）の定格出力である。気流の比エンタルピ 18 MJ/kg は、飛行速度 6 km/s に相当し、連続運転時間の 20 分は一般に再突入に要する時間である。熱効率は他の同種の装置を参考に 50% と設定した。

アークヒータの運転は、専用の試験装置に据え付け

第2表 300 kW アークヒータの設計性能と実測性能

	設計性能	実測性能
投入電力	Q_a 300 kW	324 kW
アーク電流	I_a 600 A	600 A
アーク電圧	V_a 500 V	540 V
ガス流量	$\dot{m}_G$ 8.3 g/s	8.3 g/s
熱効率	η 50%	47%
気流比エンタルピ	h 18 MJ/kg	18.3 MJ/kg
連続運転時間	20 分	最大 90 分

第5図 アークヒータ試験装置の模式図

第6図 試験装置上のアークヒータ

て行った。その構成を模式的に第5図に、また写真を第6図に示す。アークヒータの作動ガス(空気)は圧縮機から連続的に供給され、空気マニホルドを介して各コンストリクタへ分配される。アークヒータの出口には水冷オリフィスがあり、アークヒータ内の圧力を調整できる。水冷オリフィスのスロート径は $\phi 15$ mm, 12 mm, 9 mm の3種類がある。

加熱された高温の空気はオリフィスを経てその下流の混合チャンバに導かれ、ここで空気ブローからの希釈用空気と混合して冷却され、また NO_x を希釈、大気中に排気される。

アークヒータの冷却水は脱イオン水をタンクにため、これを渦巻き型ポンプで循環させて使用している。供給側、戻り側ともにマニホルドを設けてここから各コンストリクタと電極に分配している。供給圧力は2 MPa、流量は5.6 kg/sである。

このほか、アークヒータのスタート時には、真空ポンプにより内圧を0.1 Torr に下げ、アルゴンガスを供給して絶縁を破壊している。

3.2 実験結果

(1) 作動特性：第7図に、アークヒータの電圧 V_a 、比エンタルピ h 、熱効率 η の作動特性を示す。図の場合の実験条件はコンストリクタ23枚、アーク長(電極間の水平距離)350 mm、水冷オリフィス径 $\phi 15$ mmであった。熱効率についてはアークヒータの冷却水の温度上昇から熱損失を求め、これをもとに算出している。図からわかるように、ガス流量 $\dot{m}_G$ を増加させると熱効率、電圧は増加し、比エンタルピは微減する。この図より、設計点(電流 $I_a=600$ A、ガス流量 $\dot{m}_G=8.3$ g/s)での動作特性を読みとると、電圧

第7図 300 kW アークヒータの作動特性

第8図 異なるコンストリクタ数に対する電圧特性

$V_a=540$ V、熱効率 $\eta=47\%$ 、気流比エンタルピ $h=18.3$ MJ/kg であり、設計性能をほぼ満足していることがわかる(第2表)。

このほか、連続運転試験として最長90分間の試験を行い、問題なく作動するのを確認した。

(2) アークの単位長さあたり電圧：アーク保持部内でのアークに対し、単位長さあたりの電圧降下を調べた。同一の実験条件(電流 $I_a=600$ A、水冷オリフィススロート径 $\phi 15$ mm)に対し、コンストリクタ枚数を15枚とした場合と、23枚とした場合の電圧を第8図に示す。ただし、実験時のアークヒータ内圧力はほぼ大気圧であった。両者には55 Vの差があり、これはコンストリクタ8枚分、アーク長にして8 cmに相当する。したがって、単位長さあたりの電圧降下は6.9 V/cmと算出される。

文献5)は、内径 $\phi 80$ mmのアーク保持部に対し、1

第9図 アーク足回転数測定原理

第10図 FFT解析結果の例

気圧での単位長さあたり電圧降下は 7.5 V/cm としている。今回の測定値はこれに近いが、やや低い値となっている。

(3) 電極上のアーク足回転数：測定原理は第9図に示すとおりで、アーク足の付着点の位置によって電極内の電流の経路が変化するが、電極上の2箇所の電位差をとるとその変化が検出でき、電位差の変動周波数が回転周波数と等しくなる。この電位差をアンプで増幅、FFTアナライザで解析して回転周波数を求めた。FFTアナライザの解析例を第10図に示す。

測定の結果の電流 $I_a = 600 \text{ A}$ 、ガス流量 $\dot{m}_G = 8.3 \text{ g/s}$ のとき、回転周波数は陽極では 560 Hz 、陰極では 280 Hz であった。他方、文献14)は同種の問題について数値解析を行い、回転周波数は電流値に比例すると指摘し、また、大気圧下で4連の電極に 1600 A を流した場合(電極1個あたり 400 A)の陰極の回転周波数として、数値解析結果 219.1 Hz 、実測値 210 Hz を紹介している。これは単位電流あたりに換算すると 0.53 Hz/A となり、今回の測定結果 (0.47 Hz/A) と同等である。

3.3 実験のまとめ 300 kW アークヒータを試作し、その諸特性を実験的に測定した。動作特性につい

ては設計値をほぼ満足することを確認した。また、アーク単位長さあたりの電圧や電極上のアーク足回転数を測定したが、それらは諸文献と同様の値であった。

4. 最近の技術動向

今後アーク風洞装置に要求される項目を考えると、大型化・大出力化のほか、地球周回軌道外からの再突入の模擬などさらに高い比エンタルピを要求される場合や、耐熱材料の表面触媒性評価などさらに低いコンタミネーションレベルが必要な場合などが考えられる。また、アークヒータや風洞全体についての性能予測に計算流体力学(CFD)や磁場解析を用いることも行われている。ここでは、最近の技術動向について概観する。

縮流安定型アークヒータの高出力化・大型化については、米国 AEDC の設備で、 400 MW までの計画があると紹介されている¹⁵⁾。また、高出力化にともなう冷却の問題を解決する方策として、空気を液体空気のままヒータに供給する方法が提案されている¹⁶⁾、これは現状では「将来技術」との位置づけである。

縮流安定型以外でも、いくつか注目すべき形式のアークヒータがある。ドイツ Stuttgart 大学で稼働中の MPD アークジェット装置は、陰極がタングステンであり、窒素によるシールドを行うことできわめて低いコンタミネーションレベル (1 ppm 以下) を得ることができると報告されている¹⁷⁾。また気流のエンタルピをさらに高める方法として、いったんアークヒータで発生させた高エンタルピ気流を MHD 的に加速する方法も研究されている^{18,19)}。

アークヒータについての CFD では、ARCFLO-II²⁰⁾ が著名であり、アーク風洞装置の概念設計などで使われている。CFD の発達により、今後はノズルフローを含む気流の均一性評価などにも使われると期待できるが、放射モデルや非平衡流の反応モデルの開発が技術的な課題になるであろう。そのほかの数値解析による研究では、電極近傍での磁場やローレンツ力を考慮したアーク足挙動や流れの解析^{10,14)}、移動するアーク足を考慮した電極の伝熱解析²¹⁾ などがなされており、現象の把握や要素機器の設計に役立てられている¹⁵⁾。

5. む す び

風洞用のアークヒータについて、筆者らが行った実験の結果をまじえて述べた。冒頭に記したような特徴により、アーク風洞およびアークヒータに対する関心は今後も高まるであろう。アーク風洞での試験には、耐熱材料の表面触媒性の評価のように、気流のコンタミネーションが低いことが決定的に重要な場合や、

TPS の開発のように、実際に近いスケールの構造物を高エンタルピー気流中で試験することが決定的に重要な場合などがあり、それらニーズに応じた設備が開発されてゆくものと思われる。また、本稿では特にふれなかったが、超高速・高温気流の計測技術や、耐熱材料の評価技術も並行して開発されなくてはならない。試験の計画者、試験設備の設計者、試験の評価者などが連携して、目的に応じたアーク風洞設備の検討を行ってゆくことが重要と考える。

なお、本稿で述べた実験に用いた直流電源は、関西電力株式会社と株式会社神戸製鋼所との共同研究『廃棄物のプラズマ溶融システム』で使用していたものである。関西電力株式会社殿のご厚意に感謝の意を表す。

参考文献

- 久保田弘敏：諸外国の風洞整備状況，日本航空宇宙学会誌，42 (1994)，pp. 2-11.
- 第 24・25 期空気力学部門委員会：我が国の高速風洞整備状況，日本航空宇宙学会誌，42 (1994)，pp. 11-20.
- 稲谷芳文，他：世界のアーク加熱器を用いた設備の現状と今後，第 26 回流体力学講演会講演集，1994，pp. 101-104.
- Rochelle, W. C. et al.: Arc-Jet Test and Analysis of Orbiter TPS Inter-Tile Heating in High Pressure Gradient Flow, AIAA Paper 78-845, 1978.
- Winovich, W. and Carlson, W. C. A.: The 60-MW Shuttle Interaction Heating Facility, Proc. 25th Int. Instrum. Symp., Anaheim, 1979, pp. 59-75.
- 渡辺泰夫，他：アーク加熱風洞の改修と放射率計測，日本航空宇宙学会誌，42 (1994)，pp. 141-149.
- Smith, R. K. et al.: High Enthalpy Material Test Facility Design Improvements in Japan, AIAA Paper 94-2592, 1994.
- 稲谷芳文，他：HUELS 型アークヒータの性能特性，第 37 回宇宙科学技術連合講演会，1993，pp. 443-444.
- Zhou, X. et al.: Theoretical Study of Factors Influencing Arc Erosion on Cathode, IEEE Trans. Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, 17 (1994)，pp. 107-112.
- Felderman, E. J. et al.: Near-Electrode Model at High Pressure (100 atm), AIAA Paper 94-2039, 1994.
- Cobine, J. D.: Gaseous Conductors, Dover Publishing, New York, 1958, pp. 290-370.
- Stahl, T. J. et al.: Design and Performance Characteristics of the CIRA Plasma Wind Tunnel, AIAA Paper 91-2272, 1991.
- MacDermott, W. N. et al.: Flow Contamination and Flow Quality in Arc Heaters Used for Hypersonic Testing, AIAA Paper 92-4028, 1992.
- Durgapal, P.: Current Distribution in the Cathode Area of an Arc Jet, AIAA Paper 91-1385, 1991.
- Bruce, W. E., III et al.: Arc Heater Development at AEDC, AIAA Paper 94-2591, 1994.
- Laster, M. L. and Bushnell, D. M.: A National Study for Hypersonic Facility Development, AIAA Paper 94-2473, 1994.
- Habiger, H. A. et al.: Investigation of a High Enthalpy Air Flow within a Plasma Wind Tunnel, AIAA Paper 94-2037, 1994.
- Chinitz, W. et al.: Facility Opportunities and Associated Stream Chemistry Considerations for Hypersonic Air-Breathing Propulsion, J. of Propulsion and Power, 10 (1994)，pp. 6-17.
- Alfyorov, V. I. et al.: Application of MHD-Accelerations in Hyper-Velocity Experimental Aerodynamics, Proc. 11th Int. Conf. on MHD, Vol. 4, China, 1992, pp. 1308-1313.
- Nicolet, W. E. et al.: Analytical and Design Study for a High-Pressure, High-Enthalpy Constricted Arc Heater, AEDC TR-75-47, 1975.
- Milos, F. S.: Further Analysis of an Arc Heater Electrode with a Rotating Arc Foot, AIAA Paper 94-2087, 1994.