金属材料のキャビテーション壊食挙動の定式化*

服部 修次^{*1}, 前田 浩平^{*2}

Formulation of Cavitation Erosion Behavior of Metals

Shuji HATTORI^{*3} and Kohei MAEDA^{*3}Department of Mechanical Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

The authors previously reported that the variation in volume loss rate during cavitation erosion process could be expressed by a logistic curve. In this study, the validity of this model was examined for the various materials such as pure aluminum, carbon steels, stainless steels and cobalt alloys, etc. The MDE (mean depth of erosion) d with exposure time was expressed by three parameters α , β and c in the following equation. $d = (\alpha/\beta)t - (1/\beta) \ln(1+c)/(1+ce^{-\alpha t})$. The parameter α , β and c were derived from the relation of the incubation period and the slope of maximum rate stage in MDE curve. It was concluded that the calculation based on this model corresponds well to MDE curve due to cavitation in various materials, test conditions and test methods.

Key Words: Cavitation Erosion, Iron and Steel, Nonferrous Metal, Erosion, Cavitation, Modeling, Logistic Curve

1. 緒 言

キャビテーション壊食は、気泡崩壊時の衝撃力が材料表面に繰返し作用して材料表面が塑性変形し、その後き裂が発生、進展して損傷する疲労破壊現象である。壊食量を予測するためには、壊食量の時間的変化を定量的に記述する必要がある。加藤⁽¹⁾は流水中の水中翼モデルを使用して気泡崩壊時に発生するエネルギーから壊食量を予測する方法を提案し、Rao-Buckley⁽²⁾は回転円板法における長時間予測モデルや解析方法を報告している。しかし、両報告とも、提案されている手法が他の試験方法に適用できるかどうか明らかにされていない。Karimi ら^{(3)~(5)}は、材料の機械的性質(耐力、破断応力、加工硬化係数など)と気泡崩壊圧の頻度分布を用いた壊食モデルから質量減少量の時間的変化を速度期と定常期に分けて表示できている。しかし、この方法では壊食の全期間を通じて一つの式で表すことができない欠点がある。

著者ら⁽⁶⁾は先に、キャビテーションによる壊食過程

が全過程を通じて三つのパラメータを用いたロジスティック曲線で表示できることを報告した。しかし、前報⁽⁶⁾では、アルミナセラミックスおよび純銅の限られた試験材料について検討し、試験条件としては、磁わい振動装置の全振幅 50 μm の場合のみであった。

本研究では、前報⁽⁶⁾で提案した壊食過程の表示式で、パラメータの数を少なくする方策を検討した。また、こうした方法で種々の材料、試験方法、試験条件のキャビテーション壊食過程を表示できるかどうかについても検討した。

2. 壊食挙動の定式化

図1は前報⁽⁶⁾で報告した壊食過程を表すモデル図で、図1(a)~(c)は壊食痕の増殖過程を示している。図1に示すように、壊食痕は先に存在する気孔を核として増加するので、壊食痕の数を p とおくと単位時間当たりの壊食痕数の変化は次式で表示できる。

$$dp/dt = ap \dots\dots\dots (1)$$

このとき、壊食痕1個の体積がほぼ同じであると仮定すると単位時間当たりの体積減少速度 u の変化は次式で表すことができる。

$$du/dt = au \dots\dots\dots (2)$$

一方、合体過程における壊食速度の変化がピットど

* 原稿受付 2004 年 12 月 10 日。

^{*1} 正員, 福井大学工学部 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)。^{*2} 福井大学大学院工学研究科。

E-mail: hattori@mech.fukui-ac.jp

うしの組合せの数に比例し、 u の二次式で与えられるとすると、

$$du/dt = -\beta u^2 \dots\dots\dots (3)$$

したがって、単位時間当たりの体積減少速度の変化は式(4)で与えられる。

$$du/dt = \alpha u - \beta u^2 \dots\dots\dots (4)$$

上式を初期体積減少速度 $u = u_0$ を基に解けば体積減少速度は

$$u = \frac{\alpha}{\beta} \frac{1}{1 + ce^{-\alpha t}} \dots\dots\dots (5)$$

となる。ただし、

$$c = \frac{\alpha}{\beta} \frac{1}{u_0} - 1 \dots\dots\dots (6)$$

である。累積体積減少量 V は式(5)を積分し、初期体積減少量 $V_0 = 0$ とすると、

$$V = \int_0^t u(t) dt = \frac{\alpha}{\beta} t - \frac{1}{\beta} \ln \frac{1+c}{1+ce^{-\alpha t}} \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。式(5)は体積減少速度が一定時間の潜伏期ののち急増し、一定値に漸近する曲線を表し、式(7)は初期に潜伏期を示したのちに一定の速度で増加する累積体積減少量曲線を示す⁽⁶⁾。ここで、 α は単位時間当たりの壊食痕の増加係数(壊食痕の増殖のしやすさ)、 β は単位時間当たりの壊食痕どうしの合体係数、 α/β は体積減少速度曲線のピーク値である。MDE (Mean Depth of Erosion, 平均壊食深さ) は累積体積減少量を試験面積 (201 mm²) で除したものであるから時間変化に対する曲線の挙動は変わらない。したがって、MDE を d とおくと

$$d = \frac{\alpha}{\beta} t - \frac{1}{\beta} \ln \frac{1+c}{1+ce^{-\alpha t}} \dots\dots\dots (8)$$

で表示できる。 α/β は、MDE 曲線の最大速度期の直線部のこう配を示している。また、式(7)と式(8)のパラメータの次元は異なっている。

Fig. 1 Growth model of pits

3. 試験材料および試験方法

本研究で解析する壊食試験結果の多くは、これまで本研究室で試験してきたものを用いたが、一部は今回追加試験を行った。試験材料としては、アルミニウム、純銅、炭素鋼、炭素工具鋼、鋳鉄、ステンレス鋼、ステンレス鋳鋼、コバルト合金である。供試材料の化学成分、機械的性質を表1, 2に示す。また、供試材料は、

Table 1 Chemical composition [mass.%]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	V	Ti	Al
A1050	0.09	0.14	0.01	0.01	0.01	0	0.01	-	0.01	Bal
A1070	0.09	0.15	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	Bal
C1020	-	-	99.96	-	-	-	-	-	-	-
C1100	-	-	99.90	-	-	-	-	-	-	-

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
S15C	0.15	0.25	0.47	0.015	0.013	0.14	0.18	0.04	Bal
S55C	0.54	0.27	0.82	0.016	0.017	0.14	0.18	0.04	Bal
SS400	0.14	0.25	0.46	0.21	0.013	-	-	-	-

	C	Si	Mn	P	S	Pb
SK95	0.94	0.23	0.73	0.027	0.063	0.12

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
FC200	3.38	2.19	0.58	0.021	0.016	-	0.038	-

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SUS304	0.05	0.37	1.19	0.026	0.004	18.17	8.16	-	-
SUS316	0.05	0.24	1.36	0.033	0.027	16.94	10.21	2.06	-
SUS630	0.05	0.3	0.89	0.039	0.004	15.66	4.29	-	3.35

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SCS3	0.1	0.73	0.55	0.037	0.005	1.38	12.75	0.7
SCS5	0.06	1	1	0.04	0.04	4	13.5	-
SCS16	0.03	1.5	2	0.04	0.04	14	18.5	2.5

	Co	Fe	Cr	W	Ni	C	Mn	Si
Pure-Co	100	-	-	-	-	-	-	-
Co-2Wt%Fe	98	2	-	-	-	-	-	-
Co-4Wt%Fe	96	4	-	-	-	-	-	-
Co-10Wt%Fe	90	10	-	-	-	-	-	-

Table 2 Mechanical properties

Material	Density mg/mm ³	Modulus of elasticity GPa	Tensile strength MPa	Vickers hardness HV	Rockwell hardness HRC
A1050	2.71	71	178	33	-
A1070	2.71	73	99	32	-
C1020	8.96	115	326	90	-
C1100	8.96	129	328	103	-
S15C	7.87	206	388	151	-
S55C	7.87	204	701	238	-
SS400	7.80	210	442	143	-
SK95	7.80	-	655	-	52.3
FC200	7.10	97	-	243	-
SUS304	7.98	200	618	209	-
SUS316	7.98	193	612	173	-
SUS630	7.80	206	892	330	-
SCS3	7.81	204	777	238	-
SCS5	7.86	204	849	260	-
SCS16	7.86	204	565	173	-
Pure-Co	8.90	210	245	261	-
Co-2Wt%Fe	8.90	210	-	185	-
Co-4Wt%Fe	8.90	210	-	219	-
Co-10Wt%Fe	8.90	210	-	165	-

エメリー紙で研磨したのち、鏡面になるまでバフ仕上げされている。

キャビテーション壊食試験は、ASTM G 32-98⁽⁷⁾に基づく磁わい振動装置を用いた静置試験片法である⁽⁶⁾。すなわち、増幅ホーン先端に耐エロージョン性の良い直径 16 mm のステンレス鋼(SUS 304)のディスクをねじ込んで取付けて振動させ、これと平行にすきま 1 mm 隔てて試験片を対向させて静置し、試験面にエロージョンを発生させた。試験面積はディスク直径 16 mm に対応する円形領域の 201 mm²である。振動子の共振周波数は 19.5 kHz で、ディスク端面の全振幅(peak to peak)は主として 50 μ m 一定とした。試験液はイオン交換水で、液晶は恒温装置により 25 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C に保持した。壊食量は所定時間ごとに精密天秤(感度 0.01 mg)で質量減少量を測定し、密度と測定面積で除した MDE(平均壊食深さ)で示した。また、試験方法や試験条件を変更したときの壊食量を求めるために、静置試験片法で共振周波数を 14.7 kHz, 振動振幅を 40, 60 μ m に変えて試験を行い、振動試験片法やキャビテーション噴流法でも試験を行った。振動試

験片法は磁わい振動装置のディスク部分を試験片とする試験方法であり、キャビテーション噴流法は ASTM G 134-95⁽⁸⁾に準じて作成した試験水槽内を用い上流圧 $Pu=17.4$ MPa, キャビテーション数 $\sigma=0.025$, スタンドオフ距離 14 mm で行ったものである。

4. 試験結果および考察

4.1 壊食試験結果 各供試材料のキャビテーション壊食試験をおこなったときの MDE(平均壊食深さ)の実験点を図 2 に示す。図 2 ではアルミニウムおよび純銅の壊食が他の材料よりも短時間で進行するために図を二つに分けて示した。図 2 の MDE 曲線ではすべての材料において壊食速度の小さい潜伏期を経たのち、ほぼ一定のこう配で増加する最大速度期に至る傾向が認められる。また、潜伏期が長い材料ほど最大速度期における傾きが小さくなる。図中の曲線および矢印については 4.2 節で述べる。

4.2 パラメータ α , β , c の決定方法 緒言でも述べたように、著者ら⁽⁶⁾は先に累積体積減少量曲線が三つのパラメータ α , β , c を用いて表示できることを提案した。本研究ではパラメータ数の減少について検討した。

図 3 は MDE 曲線の模式図で、最大速度期の延長線と時間軸の交点を潜伏期 t_i とし⁽⁷⁾、このときの MDE を d_i とする。また、最大速度期の任意の時間 t_0 のときの MDE を d_0 とする。

式(8)を再記すると

$$d = \frac{\alpha}{\beta} t - \frac{1}{\beta} \ln \frac{1+c}{1+ce^{-\alpha t}} \dots \dots \dots (8)$$

である。以下では、 t_0 と d_0 が与えられたとき、式(8)の α/β , c , α , β の求め方について述べる。

MDE 曲線の最大速度期において式(8)の第 2 項は

(a) Pure aluminum and copper

(b) Steels and Co-alloy

Fig. 2 MDE curves of various materials

Fig. 3 Schematic diagram of MDE curve

$t \rightarrow \infty$ のとき $e^{-at} \rightarrow 0$ となるから、MDE 曲線の最大速度期の直線部は式(9)で表すことができる。

$$d = \frac{\alpha}{\beta} t - \frac{1}{\beta} \ln(1+c) \quad (9)$$

潜伏期 t_i は式(9)に $d=0$ を代入して

$$t_i = \frac{1}{\alpha} \ln(1+c) \quad (10)$$

となる。

図4はこれまでの試験結果から MDE 曲線の最大速度期の傾きと潜伏期の関係を示したものである。潜伏期の長い材料ほど、最大速度期の傾きが小さく、両者の間には

$$\alpha/\beta = 7.72 t_i^{-1} \quad (11)$$

の関係が成り立つ。ここで $A=7.72$ とおくと、式(11)は

$$\beta = \frac{1}{A} \alpha t_i \quad (12)$$

となり、式(10)を式(12)に代入すると

$$\beta = \frac{1}{A} \ln(1+c) \quad (13)$$

となる。

式(9)、(10)より

$$d = \frac{\alpha}{\beta} (t - t_i) \quad (14)$$

が得られる。式(14)に式(12)を代入すると、最大速度期の任意の一点 (t_0, d_0) に対して

$$d_0 = \frac{\alpha}{\beta} t_0 - A$$

となり、これより

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{d_0 + A}{t_0} \quad (15)$$

が得られる。式(15)は、最大速度期の任意の一点 (t_0, d_0) より最大速度期の傾き α/β が与えられることを示している。

Fig. 4 Relation between incubation period and the slope of maximum rate stage

潜伏期終了時 (t_i, d_i) において式(10)、(13)を式(8)に代入すると

$$\frac{d_i}{A} \ln(1+c) = \ln \frac{1+2c}{1+c} \quad (16)$$

が得られる。ここで $1 \ll c$ とすると

$$c = 2^{A/d_i} \quad (17)$$

となる。

図5はこれまでの実験により得られている潜伏期終了時の MDE と潜伏期の関係を示す。図5より潜伏期終了時の MDE である d_i は潜伏期 t_i によらずほぼ一定であることがわかる。 d_i の平均値は $d_i = 2.2 \mu\text{m}$ であるので、この値を式(17)に代入して c の値を得る。また、式(17)を式(13)に代入することにより β の値が得られる。 α の値は式(15)を用いて

$$\alpha = \frac{\alpha}{\beta} \times \beta \quad (18)$$

より得られる。以上より最大速度期の任意の一点 (t_0, d_0) が与えられると式(13)、(15)、(17)、(18)を用いることによりパラメータ α 、 β 、 c の値を得ることができる。

図2の曲線は、図中の矢印の一点 (t_0, d_0) を用いて上述の方法で α 、 β 、 c の値を求め、これらの数値を式(8)に代入した計算曲線である。どの材料でも試験時間の経過に伴う MDE の変化が式(8)で表示できることがわかる。表3は図2の曲線に使用した各パラメー

Table 3 Material parameters

	t_0 h	d_0 μm	α/β $\mu\text{m/h}$	c	α 1/h	β 1/ μm
A1070	0.08	22.5	378	11.4	123.0	0.326
C1020	0.33	11.0	56.7	11.4	18.50	0.326
S15C	4.5	27.1	7.74	11.4	2.520	0.326
S55C	9.0	9.36	1.90	11.4	0.619	0.326
SS400	5.0	43.8	10.3	11.4	3.360	0.326
SK95	18	4.11	0.657	11.4	0.214	0.326
SUS304	8.0	21.7	3.68	11.4	1.200	0.326
SCS3	7.0	25.2	4.70	11.4	1.530	0.326
Pure-Co	12	8.09	1.32	11.4	0.430	0.326

Fig. 5 Relation between incubation period and MDE

タである。 α は、単位時間当たりの腐食痕の増殖係数、 β は腐食痕の合体係数であり、 α/β はMDE曲線の最大速度期のこう配である。 β 、 c は式(13)、(17)より材料によらず一定値となる。しかし、図2(b)において、S15CやSS400の計算曲線が試験初期の実験結果と少し離れている。

4.3 鉄鋼材料のパラメータ α 、 β 、 c の決定方法

4.2節で述べた方法により種々の材料のMDEの変化を式(8)で表示することができた。しかし、SS400およびS15Cの計算曲線が試験初期の実験結果を少し離れていた。これは、図4で、潜伏期と最大速度期の傾きの関係を表示する直線に比べて鉄鋼材料の値がやや離れていることによる。軟質のアルミニウムや純銅は流体機械材料には一般的に使用されていないので、4.3節では、主に鉄鋼材料を対象にして解析した。図6はアルミニウムや純銅を除いた場合のMDE曲線の最大速度期の傾きと潜伏期の関係を示したものである。最大速度期の傾きと潜伏期の間には

$$\alpha/\beta = 33.5 t_i^{-2} \quad (19)$$

の関係が得られる。ここで $B=33.5$ とおくと、式(19)は

$$t_i = \sqrt{B \frac{\beta}{\alpha}} \quad (20)$$

となる。式(20)を式(14)に代入すると

$$\frac{\beta}{\alpha} d_0 = t_0 - \sqrt{B \frac{\beta}{\alpha}} \quad (21)$$

が得られる。ここで β/α の二次方程式として式(21)を解くと

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{2d_0^2}{(2d_0 t_0 + B) - \sqrt{(4d_0 t_0 + B)B}} \quad (22)$$

が得られる。式(22)の分母の根号が正の場合は式(21)の右辺が $t_0 + \sqrt{B\beta/\alpha}$ の場合に対応するので負の根号の場合のみを示した。このように最大速度期の傾き

α/β は最大速度期の任意の一点(t_0 , d_0)より求めることができる。

また、式(10)、(20)より

$$\beta = \frac{t_i}{B} \ln(1+c) \quad (23)$$

が得られる。潜伏期終了時(t_i , d_i)において式(10)、(23)を式(8)に代入すると

$$\frac{t_i d_i}{B} \ln(1+c) = \ln \frac{1+2c}{1+c} \quad (24)$$

となる。ここで $1 \ll c$ とすると

$$c = 2^{B/(t_i d_i)} \quad (25)$$

である。ここで、 d_i の値は図5において鉄鋼材料のみの潜伏期終了時のMDEと潜伏期の関係を考えても、潜伏期終了時のMDEの平均値が $d_i = 2.2 \mu\text{m}$ となる。 t_i の値は式(22)を式(20)に代入して得る。この t_i 、 d_i の値から c の値が求められる。 α は式(18)を用いて得られる。以上のように最大速度期の任意の一点(t_0 , d_0)を用いることで式(18)、(22)、(23)、(25)によりパラメータ α 、 β 、 c の値が求められることがわかる。

図7の曲線は、図中の矢印の一点(t_0 , d_0)を用いて、上述の方法で α 、 β 、 c の値を求め、これらの数値を式(8)に代入した計算曲線である。どの材料も試験時間の経過に伴うMDEの変化が式(8)で表示でき、4.2節の方法よりも試験結果により近い曲線となる。表4は図7の曲線に使用した各パラメータである。

図8は磁わい振動装置による静置試験片法で共振周

Table 4 Material parameters

	t_0 h	d_0 μm	α/β $\mu\text{m/h}$	t_i h	c	α 1/h	β μm
S15C	4.5	27.1	10.1	1.82	330	3.19	0.315
S55C	9.0	9.36	1.93	4.16	12.6	0.629	0.325
SS400	5.0	43.8	12.9	1.61	703	4.07	0.315
SK95	18	4.11	0.442	8.71	3.36	0.169	0.383
SUS304	8.0	21.7	4.20	2.82	42.0	1.33	0.317
SCS3	7.0	25.2	5.55	2.46	4.52	0.693	0.125

Fig. 6 Relation between incubation period and slope of maximum rate stage

Fig. 7 MDE curves of various materials

波数が異なる場合、図9は振幅が異なる場合に同様の方法で曲線を当てはめたものである。図10は試験装置の違いとして静置試験片法、振動試験片法、キャビテーション噴流法の結果を比較したものである。図8~10に示すように試験条件や試験方法が異なる場合でも式(8)を用いてMDE曲線を表すことができる。最大速度期中の任意の一点(t_0 , d_0)は図8~10中の矢印の点を用いた。表5~7は図8~10の曲線に使用した各パラメータである。なお、表5中の f は共振周波数を、表6中の A は振動振幅を表す。表7中のSは静置試験片法、Vは振動試験片法、Cはキャビテーション噴流法を表す。 α/β の値は振動振幅が大きく、共振周波数が大きいものほど大きくなっている。また、振動試験片法のほうが静置試験片法よりも α/β の値が大きくなっている。磁わい振動方式と噴流法では直接的には比較できないが今回の条件ではキャビテーション噴流法の方が α/β の値が大きい。

以上のように材料、試験条件、試験方法を問わず、最大速度期の任意の一点(t_0 , d_0)がわかれば式(8)によりMDEの挙動を表示できることが明らかになった。

Fig. 8 MDE curves at different frequency

Fig. 9 MDE curves at various vibration amplitudes

5. 結 言

本研究では、前報⁽⁶⁾で提案した壊食過程の表示式のパラメータ数を少なくする方法を考案し、種々の材料、試験方法、試験条件の実験結果に対する適用性について検討した。その結果、以下の点が明らかになった。

(1) キャビテーション壊食過程におけるMDE曲線の挙動は、ロジスティック曲線を積分した次式で与えられる。

$$d = \frac{\alpha}{\beta} t - \frac{1}{\beta} \ln \frac{1+c}{1+ce^{-\alpha t}}$$

ただし、 α , β , c は定数である。

(2) 純アルミニウムおよび純銅を含めた一般材料のMDE曲線の最大速度期の傾き α/β と潜伏期 t_i には関係 $\alpha/\beta \propto t_i^{-1}$ の関係がある。鉄鋼材料のみでは

Table 5 Parameters at different frequency

	t_0 h	d_0 μm	α/β μm/h	t_i h	c	α 1/h	β 1/μm
S15C f=14.7kHz	5.0	23.9	8.07	2.04	178	2.54	0.315
S15C f=19.5kHz	6.0	2.02	1.53	4.68	9.54	0.503	0.329
SUS304 f=14.7kHz	7.0	7.37	2.31	3.81	16.0	0.743	0.322
SUS304 f=19.5kHz	8.0	21.7	4.20	2.82	42.0	1.33	0.317

Table 6 Parameters at various amplitudes

	t_0 h	d_0 μm	α/β μm/h	t_i h	c	α 1/h	β 1/μm
SUS304 A=40 μm	8.0	8.35	2.09	4.00	14.0	0.675	0.323
SUS304 A=50 μm	8.0	21.7	4.20	2.82	42.0	1.33	0.317
SUS304 A=60 μm	8.0	37.5	6.54	2.26	107	2.07	0.316

Table 7 Parameters of various test methods

	t_0 h	d_0 μm	α/β μm/h	t_i h	c	α 1/h	β 1/μm
SUS304-S	8.0	21.7	4.20	2.82	42.0	1.33	0.317
SUS304-V	4.0	38.0	15.1	1.49	1204	4.77	0.315
SUS304-C	8.0	70.3	11.2	1.73	448	3.53	0.315

Fig. 10 MDE curves of various test methods

$a/\beta \propto t^{-2}$ となる。

(3) MDE 曲線の潜伏期終了時の MDE は潜伏期 t_i によらず $2.2 \mu\text{m}$ である。

(4) MDE 曲線の最大速度期の任意の一点 (t_0, d_0) がわかれば, 結言(2), (3)を用いて, 結言(1)の MDE 曲線のパラメータ α, β, c を求めることができる。

(5) 得られたパラメータ α, β, c の値を用いて計算した曲線は, 実験結果の傾向とよく一致する。

文 献

- (1) Kato, H., *Int. Shipbuild. Prog.*, **22**-253 (1975), 305-327.
- (2) Rao, P. V. and Buckley, D. H., *Wear*, **94** (1984), 259-274.
- (3) Karimi, A. and Maamouri, M., *Proc. 7th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact*, (1987), 27-1-27-8.
- (4) Karimi, A. and Leo, W. R., *Mater. Sci. Eng.*, **95** (1987), 1-14.
- (5) Karimi, A., *2nd Int. Symp. Cavitation*, (1994), 231-236.
- (6) 服部修次・前田浩平, 機論, **70**-691, A (2004), 182-187.
- (7) ASTM Designation G 32-98, *Annual Book of ASTM Standards*, (2000), 107-120.
- (8) ASTM Designation G 134-95, *Annual Book of ASTM Standards*, (2000), 61-572.