CRT 用ガラスの強度に及ぼす影響因子の分析[†]

大 杉 重 夫* 吉 岡 純 夫* 宮 崎 政 行**
伊 藤 順 子** 谷 周 一** 中 村 浩 二***

A Study of Influencing Factors on Mechanical Strength of Cathode Ray Tubes

by

Shigeo OHSUGI*, Sumio YOSHIOKA*, Masayuki MIYAZAKI**,
Junko ITOH**, Shuichi TANI** and Koji NAKAMURA***

The static strength and delayed fracture strength characteristics of the glass used for CRTs were examined. The influences of surface roughness, thickness and test conditions on them were examined. The main results obtained are summarized as follows. (1) The influence of surface roughness on the static strength was especially recognized. (2) The delayed fracture strength of the scratched specimen, which was normalized by the static strength, was lower than those of the polished and abraded specimens.

Key words: Glass, Cathode ray tube, Mechanical strength, Delayed fracture

1 緒 言

電子機器の構造部材として広く使用されているガラスは、強度的には、表面の傷に敏感な材料であることはよく知られている。^{1)~3)} このため真空容器としての機能を有する電子機器である CRT (Cathode Ray Tube) の耐圧に対する安全性確認試験には、エメリー紙 (#150) で加傷した CRT が用いられている。一方、ガラス材料の強度は時間依存性があり、長時間の遅れ破壊強度の把握の重要性もよく認識されている。しかしながら、加傷の影響、長時間の時間依存性の影響などの定量的評価といった実用的な研究^{4),5)} は少ないようである。

そこで、筆者らは CRT 用ガラス材料を用いた静的強度試験と遅れ破壊強度試験を実施して、主に、強度特性に及ぼす加傷の影響の定量化についての検討を行ったので、その結果について報告する。

2 供試材と試験方法

供試材料は、CRT に使用されているバリウム・ストロンチウム系ソーダガラスであり、その主成分の化学組成は 11.2BaO, 5.0SrO, 60SiO₂ (いずれも wt.%) である。これを溶解後、板厚 5mm と 10mm に成型し、応力除去焼なましを施した。

Fig. 1 に、試験片の種類および形状を示す。本試験には、鏡面仕上げを施した試験片 (表面粗さ 0.04 μ m 以下、以下鏡面試験片と略す)、片面をエメリー紙 #150 で研磨して加傷した試験片 (方向性のないように円弧状に研磨、表面粗さ: 傷^{*} 0.030~0.075mm, 平均 0.052mm, 以下加傷試験片と略す) および片面にスク

ラッチ傷を入れた試験片 (傷の深さ^{*} 0.08~0.49mm, 以下スクラッチ試験片と略す) を供した。

(※破断面での測定値)

Table I に示す試験条件で、静的強度試験と遅れ破壊強度試験を行った。静的強度試験では、基準特性試験 (大気中、四点曲げ) の他に、試験環境と負荷様式の影響を把握するために、水中試験と三点曲げ試験も併せて行った。

四点曲げと三点曲げの静的強度試験状況を Fig. 2 に示す。静的強度試験の、応力の負荷速度は約 10MPa/min とした。なお、水中での静的強度試験では、雰囲気安定させるために、試験前に、試験片を約 10 分間水中に放置した。

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens.

[†] 原稿受理 平成 9 年 5 月 7 日 Received May 7, 1997

* 正 会 員 三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 〒661 尼崎市塚口本町, Advanced Tech. R & D Center, Mitsubishi Elec. Corp., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661

** 三菱電機 (株) 先端技術総合研究所 〒661 尼崎市塚口本町, Advanced Tech. R & D Center, Mitsubishi Elec. Corp., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661

*** 三菱電機 (株) CTR 統括事業所 〒617 長岡京市馬場図所, CRT Business Division, Mitsubishi Elec. Corp., Zusho-Baba, Nagaokakyo, 617

遅れ破壊強度試験では, Fig. 3 に示す四点曲げ治具を用いて, 負荷用ボルトを締付けることにより所定の曲げ応力に相当するひずみを与え, 破壊に至るまで最大約 1×10^4 時間放置した. 破壊によるひずみゲージの出力値の急変 (零または無限大に変化) を検知することにより破壊時間を求めた.

3 試験結果および考察

3・1 静的強度特性

試験結果を 2 母数ワイブル分布で整理し²⁾, 静的強度特性に及ぼす表面粗さ (加傷) と板厚, 試験環境および負荷様式の影響を求めた.

鏡面試験片と加傷試験片の静的強度特性 (大気中, 四点曲げ, $t=5, 10\text{mm}$) を Fig. 4, 大気中と水中での加傷試験片の静的強度特性 (四点曲げ) を Fig. 5, 四点曲げと三点曲げの加傷試験片の静的強度特性 (大気中) を Fig. 6 に示す.

また, Fig. 4, Fig. 5 および Fig. 6 から得られた大気中, 板厚 5mm の加傷試験片の四点曲げ強度 σ_b (50%) (破壊確率 50% の静的強度) に対する各試験条件の σ_b (50%) の強度比を Table II に示す.

大気中, 板厚 5mm の加傷試験片の四点曲げ強度 σ_b (50%) を基準にすると, 鏡面試験片の強度は 2.54 倍である. また, 加傷試験片内の比較では, 板厚 10mm は 1.10 倍, 水中は 0.91 倍, 三点曲げは 1.27 倍になる. 静的強度に及ぼす表面粗さ (傷) の影響が特に顕著で, 板厚, 試験環境および負荷様式の影響も認められる.

Fig. 7 に, 板厚 5mm, 10mm のスクラッチ試験片の

Table I. Test condition.

Types of specimen	Static test		Delayed fracture test
	In air	In water	In air
	3-point bending	4-point bending	
Polished		○, △	○
Abraded	○, △	○, △	○, △
Scratched		○, △	○, △

○: $t=5\text{mm}$ △: $t=10\text{mm}$

Fig. 2. Bending condition.

Fig. 3. Apparatus of 4-point bending delayed fracture test.

静的強度 (破壊じん性値 K_c) とスクラッチ傷の深さ (a) の関係を示す. K_c は, 次式に示す片側き裂を有する梁の純曲げのモード I の応力拡大係数 K の式⁶⁾ を用いて求めた.

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (1)$$

(σ は応力, a はき裂長さ, F は無次元補正係数)

Fig. 7 に示すように, 破壊じん性値 K_c はスクラッチ傷の深さに関係なくほぼ一定値である. 従って, スクラッチ傷のような比較的深い傷が表面に存在する場合の静的強度の評価には, 破壊力学的手法の有効性が確認できたといえる. なお, 鏡面, 加傷試験片では認められた板厚の影響が Fig. 7 では認められない. これは, 極く表面層 (0.1mm 以内) に存在する残留応力が, 板厚の強度への影響因子の一つとして考えられるが, スクラッチ傷のように 0.1mm 以上の傷では, 残留応力が存在しない領域となるため, 板厚の強度への影響はなくなるものと考えられる.

Fig. 8 に, 加傷試験片とスクラッチ試験片の静的強度 (σ_b) と傷の深さ (a) の関係を示す (但し, 加傷試験片は傷の深さを測定したデータのみ表示している). 図中に示す実線は, Fig. 7 に示す破壊じん性値 K_c の平均値 $K_{c(50\%)} = 0.56\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に対応したものである. 加傷試験片の傷が浅い場合には, スクラッチ試験片のデータと

Fig. 4. Weibull distribution of static strength for polished and abraded specimens.

Fig. 5. Weibull distribution of static strength for abraded specimen (in air and in water).

Fig. 6. Weibull distribution of static strength for abraded specimen (3 and 4-point bending).

Table II. Comparison of static strength (σ_b (50%)) for polished and abraded specimens.

Types of specimen	Thickness t(mm)	In air		In water
		3-point bending	4-point bending	
Polished	5	---	2.54	---
	10	---	2.79	---
Abraded	5	1.27	1.00	0.91
	10	1.42	1.10	---

の対応はあまり良くないが、深い傷の場合にはスクラッチ傷とほぼ等価であると見なせる。加傷試験片の傷の深さは $a = 0.030 \sim 0.075 \text{ mm}$ であるが、破壊力学的手法によると、加傷試験片の傷は、深さ $a = 0.08 \text{ mm}$ 程度のスクラッチ傷に対応する。

3・2 遅れ破壊強度特性

遅れ破壊強度特性に及ぼす表面の傷の影響を求めるとともに長時間特性の確認をした。

Fig. 9 に、板厚 5mm の鏡面試験片と板厚 5mm, 10mm の加傷試験片の遅れ破壊強度特性を示す。鏡面および加傷試験片ともに、遅れ破壊強度特性は 10^2 時間までは急激に低下するものの、その後は低下が鈍化する傾向を示す。

また、板厚 5mm の鏡面試験片と板厚 10mm の加傷試験片の試験データ数は板厚 5mm の加傷試験片のそれに比べ少ないが、各試験片の遅れ破壊強度の関係は静的強度の場合と同様の傾向を示す。すなわち、遅れ破壊強度においても、それに及ぼす表面粗さの影響は大きく、また、板厚の影響も若干認められる。

Fig. 10 に、板厚 5mm の鏡面試験片と板厚 5mm, 10mm の加傷試験片の、負荷応力をそれぞれの試験片の静的強度 σ_b (50%) で基準化した遅れ破壊強度特性を示す。

Fig. 7. Relation between fracture toughness (K_c) and depth of scratched flaw (a) for scratched specimen.

Fig. 8. Relation between static strength (σ_b) and depth of abrasion or scratched flaw (a) for abraded and scratched specimens.

それぞれの試験片の遅れ破壊強度特性は、図中、実線で示した全データ（板厚 5mm, 10mm の加傷試験片と板厚 5mm の鏡面試験片のデータ）から整理した遅れ破壊強度特性線図の平均線（破壊確率 $P = 50\%$ ）にほぼ一致しており、各試験片の短時間（10 時間）における時間強度は、それぞれの静的強度の約 0.6 程度であり、また、長時間（ 10^4 時間以上）の時間強度は静的強度の約 0.45 程度に漸近する傾向を示す。

この様に、鏡面、加傷試験片の、 $\sigma_b(50\%)$ で基準化し

Fig. 9. Delayed fracture characteristics for polished and abraded specimens.

Fig. 10. Nondimensional delayed fracture characteristics for polished and abraded specimens.

Fig. 11. Delayed fracture characteristics for scratched specimens.

Fig. 12. Nondimensional delayed fracture characteristics for abraded and scratched specimens.

た遅れ破壊強度特性は表面粗さに関係なくほぼ同一となり、鏡面試験片と加傷試験片の遅れ破壊特性（破断、き裂発生）は、静的強度に強く依存しているといえる。なお、試験片に貼布したゲージ出力の一定間隔（0.1～10時間）でのモニターで、き裂の進展を検知できなかったこと、き裂の進展が認められた破面でのき裂進展量が最大でも 0.1～0.15mm 程度と極くわずかであることなどから、き裂の進展は急速であり、き裂進展寿命は無視でき、き裂発生（進展開始）寿命と破断寿命はほぼ等しいと考えられる。

Fig. 11 に、式 (1) に示す応力拡大係数 K で整理した板厚 5mm, 10mm のスクラッチ試験片の遅れ破壊強度特性を示す。スクラッチ試験片の場合は破断はすべて 10^3 時間以下で、 10^3 時間から 10^4 時間での破断のデータは得られなかった。

Fig. 12 に、静的強度 $K_c(50\%)$ で基準化した板厚 5mm, 10mm のスクラッチ試験片の遅れ破壊強度特性を示す。スクラッチ試験片の短時間（10時間）における時間強度は静的強度の約 0.5 程度であり、また、長時間（ 10^3 時間）の時間強度は静的強度の約 0.35 程度になり、同図に併記した、 $\sigma_b(50\%)$ で基準化した加傷試験片の遅れ破壊強度特性に比べ低い。これは、エメリー紙による傷の先端はそれほど鋭くないため、先端にき裂が形成され、進展を開始するまでには長い時間を要し、一方、スクラッチ傷は先端が鋭くき裂と見なせ、き裂が進展を開始する時間は短くなることが反映していると考えられる。

4 結 言

CRT 用ソーダガラス材料を用いた静的強度と遅れ破壊強度試験を実施し、強度特性に及ぼす影響因子の分析を行い、下記の結論を得た。

(1) 静的強度に及ぼす影響因子の中で、最も顕著なのは表面粗さ（傷）であり、加傷（エメリー紙 #150 による加傷）されることにより、その静的強度は鏡面材強度の $1/2.5 \sim 1/2.8$ に低下する。板厚、試験環境および負荷様式の静的強度への影響はそれに比べると少ない。

(2) 破壊力学的手法によると、加傷試験片（エメリー紙 #150 による加傷）の傷は、深さ $a = 0.08\text{mm}$ 程度のス

リット傷に対応する。

(3) 静的強度で基準化した鏡面，加傷試験片の遅れ破壊強度特性は表面粗さ，板厚に関係なくほぼ同一となり，長時間（ 10^4 時間以上）の時間強度は静的強度の約 0.45 となる。

(4) 静的強度で基準化したスクラッチ試験片の遅れ破壊強度特性は，同様に基準化した加傷試験片の遅れ破壊強度特性に比べ低く，長時間（ 10^3 時間）の時間強度は静的強度の約 0.35 になる。

参 考 文 献

1) 宮田 寛，中門公明，木本 寛，日本材料強度学会誌，

21, 45 (1986)。

2) A. Ghosh, C. Y. Cha and S. Vaidyanathan, IEEE Trans. on Consum. Elec., **38**, 819 (1992)。

3) 小林秀敏，臺丸谷政志，野島武敏，材料，**45**，310 (1996)。

4) Y. Kimura, T. Yagasaki and K. Kunio, Engng. Fracture Mech., **19**, 1025 (1984)。

5) 木村雄二，山本茂夫，関谷道雄，国尾 武，材料，**36**，160 (1987)。

6) Y. Murakami, "STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK Vol.1", p.11 (1987) The Society of Materials Science, Japan and Pergamon Press.

書 評

“複 合 材 料”

三木光範，福田武人，元木信弥，北條正樹（著）

（1997 年，共立出版発行，A5 判，248 ページ，定価 3600 円）

本書は，大学院学生や企業エンジニアなどを読者対象とし，異方性を有する複合材料の力学的側面に焦点を当てた解説書となっている。1, 2 章では，複合材料とはどのような材料かについて，その定義から丁寧に説明され，特に先進複合材料の歴史を知る上で象徴的な CFRP の実用例に重点を置いて紹介されている。3～5 章では，それぞれ複合材料における高剛性と高強度の発現機構（強化のメカニズム），複合材料の構成要素の基本であるラミナの特性（力学，破壊，疲労，クリープ）とその評価方法，積層構造を持つ複合材料の基本的な解析方法である積層理論について解説されている。さらに，複合材料の破壊に関して 6 章では破壊力学，7 章では損傷力学を用いた評価方法を紹介している。最後に 8 章では，最近のテーマであるスマート（知能）複合材料への展望を示し，将来の複合材料の新しいイメージを提示している。本書では複合材料の現在の位置づけとして，もはや特殊な材料ではなく，あくまで工業材料のひとつと言う謙虚な立場と，新しいコンセプトを持つ将来の材料という積極的な立場があるとしている。したがって前者の立場から，現在複合材料の中では最も実用化が進んでいる樹脂基複合材料が，実例として挙げられている場合が多くなっている。本書は要所要所に実際に破壊した試験片やき裂の写真を掲載して理解の助けとしており，例えば，樹脂が純せん断応力下において，微視的には引張りにより破壊する場合があることを豆腐の破壊写真を用いて解説するアイディアには感服した。また，演習問題もあることから，複合材料を力学面から知る上の入門書として非常に適している。

（大阪大学工学研究科 植松 美彦）