

衝撃試験

1 衝撃特性

ポリマーの衝撃特性は材料の総合靱性に直接的に関係します。靱性は、ポリマーが加えられたエネルギーを吸収する能力として定義されます。応力対ひずみ曲線を解析することにより、曲線下面積に直接的に比例するため材料の靱性を推定することができます。その意味で、衝撃エネルギーは材料の靱性の測定です。衝撃エネルギーが高いほど靱性は高くなります。さて、衝撃抵抗、衝撃荷重のもとでの破断に抵抗する材料の特性、あるいは高速で負荷された応力のもとでの破断に抵抗する特性を定義することができます。

分子の柔軟性は、材料の靱性と脆性を決定する上で重要な役割を果たします。例えば、可撓性ポリマーは、分子のセグメントが多いと非常に容易に絡み合わなくなり、機械的応力に迅速に応答することができるため、高衝撃挙動を有します。一方、反対に、剛性ポリマーでは、分子セグメントは絡み合いを外すことができず、機械的応力に非常に速く応答することができず、衝撃は脆性破断を生成します。このパートは、本書の別の章で詳細に議論します。

ポリマーの衝撃特性は、分子の配向を変えることによって、または繊維質充填剤を用いることによって、ゴムまたは可塑剤のような組織改質剤を添加することによって改善することができます。

ほとんどのポリマーは、衝撃荷重を受けたとき、明確な方法で破断するように見えます。衝撃荷重および衝撃により、ポリマー表面にき裂が進展し始めます。面上で亀裂を開始させるために必要なエネルギーを亀裂開始エネルギーと呼びます。負荷された荷重が、亀裂発生エネルギーを超えるのに十分なエネルギーを与えれば、亀裂はポリマーに沿って伝播し続けます。荷重エネルギーが亀裂伝播エネルギーを越えると完全な破断が生じます。亀裂発生と亀裂伝播エネルギーの両条件が測定衝撃エネルギーに寄与します。衝撃荷重による破断構造には基本的に4つの異なったタイプが存在しますが、それらについては後述します。一瞬、たとえ衝撃の挙動が特定の機械的特性の一つであっても、4つの異なった種類の破断の間の区別があまり明確でないことを知ることには関心があるのではないのでしょうか。高分子材料の衝撃特性を予測することは、まだプロダクトデザイナーの最も面倒な分野の一つであります。本書の第1部で予想したように、プラスチックに関する衝撃試験が冶金学者から採用されたことに問題が生じており、金属に適用されるような衝撃メカニズムの原理は、材料の構造が全く異なっているため、プラスチックと満足できる働きをしていないと思われる。

以下では、装置および試験片とのプラスチック材料に関する最も一般的な衝撃試験について紹介します。

1.1 振子式衝撃試験

振子式衝撃試験の最も一般的な構成はアイゾットとシャルピーです。これらの衝撃試験の範囲は、振子式衝撃試験機の衝撃荷重に対する標準的な試験片の衝撃値を測定することです。その結果は、試験片の破断に対し、振子が消費する運動エネルギー量で表します。(寸法は試験規格に準拠しています)標準の試験片を破断するのに必要なエネルギーは、実際には、試験片を変形させるエネルギー、破断を開始させる、試験片を横切って破断を伝播させる、破断した試験片を飛ばすために費やされたエネルギーなど、さまざまな現象の合計です。装置の摩擦や振動を通して失われるエネルギーは、通常、あらゆる実用的な目的にとっては非常に小さいので、通常は無視されます。下記は、インストロン振子式衝撃試験機の写真です。



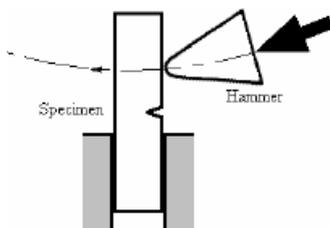
ノッチ

このような種類の試験で使用する試験片には、通常、ノッチを入れる必要があります。試験片にノッチを設ける理由は、延性破断ではなく脆性を促進する応力集中領域を設けるためです。プラスチックの変形は、試験片に設けたこのようなノッチにより防ぐことができます。衝撃値は、特定の種類のプラスチック材料ではノッチ感度により深刻な影響を受けます。

アイゾット試験は、試験片を垂直にクランプする必要があります。この試験片は、試験片固定点から一定の長さ離れた振り子の1回のスイングによって打撃します。反対にシャルピー試験では、試験片は簡単な梁として水平に支持され、振り子によって試験片の中心を打撃します。アイゾット法よりもシャルピー試験の長所は明らかに、試験片をクランプする必要がなく、クランププロセスのばらつきがないことです。

アイゾット試験手順

試験片は、試験片のノッチエッジが振り式衝撃試験機の打撃エッジに向くような位置でバイスにクランプされます。適切に配置された試験片例を下図に示します。



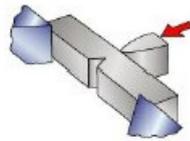
ハンマーがリリースされると、試験片に当たって通過します。試験片が破断しない場合は、より高いエネルギーのハンマーを使用する必要があります。破断が観察されるまで試験を繰り返す必要があります。衝撃強度(弾力性)は、測定から得られた衝撃値を試験片の厚さ(寸法J/m)またはノッチ下の残留面積(寸法kJ/m²)で割ることにより直接的に算出されます。

逆ノッチ付き衝撃耐性技術は、試験片上でのノッチ位置を逆転させることにより得られます。ここでノッチは衝撃中、引張応力よりも圧縮荷重の影響を受けています。

ノッチに関するまとめとして、試験片のノッチングは変形によるエネルギーロスを大幅に低減できると言えます。タタフノッチ付きプラスチック材料(アイゾット衝撃強度 $>27\text{J/m}$)は、試験片の破断後、試験片が飛ぶのに非常に低エネルギーを費やしています。相対的な脆性材料(アイゾット衝撃強度 $<27\text{J/m}$)については、試験片を飛ばすのにエネルギー減少量は全エネルギーのほとんどを費やしています。

シャルピー試験手順

アイゾット試験との唯一の違いは、試験片の設置方法です。



この試験では、試験片は水平に置かれ、両端でアンクランプされて支持されます。完全に壊れた試験片のみを結果として受け入れることができます。衝撃強度(弾力性)は、前試験と同様に、測定から得られた衝撃値を試験片の厚さ(寸法 J/m)またはノッチ下の残留面積(寸法 kJ/m^2)で割ることによって直接的に算出されます。

チップ衝撃試験手順

チップ衝撃試験は、風化によって生じる表面微小亀裂の影響を測定するために独自に開発されたものです。材料の靱性は、アイゾット測定における材料ノッチ感度とは対照的に、この試験において測定される。この試験方法は、実際には、先に述べたアイゾット法の変形であり、試験片は比較的薄く、広い表面に打撃が加わるので、試験結果は表面の状態に影響を受けます。残留靱性は衝撃中に吸着したエネルギーに比例であり、これは衝撃後の振子の振り角で測定されます。

引張衝撃試験手順

引張衝撃強度試験は、元々、曲げ(アイゾットとシャルピーの両方)衝撃試験の欠点を克服するために開発されました。ノッチ感度、試験片を飛ばす力、試験片の厚さなど、結果に大きな影響を与えるすべての要因は、引張衝撃試験を用いることで排除されます。この試験は、厚い試験片のみに限定されるアイゾット型とシャルピー型に反して、非常に薄くて柔軟な試験片の衝撃強度にも対応できます。異方性や方向のようなポリマーの他の多くの特性は引張衝撃試験によって研究できます。

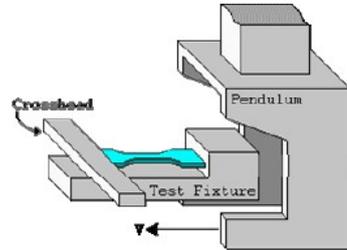
試験構成は異なる2種が存在します。1種目は試験片インヘッド法(メソッドB)で構成され、試験片が振り子に搭載され、衝撃点で完全な運動エネルギーに到達し、試験片を飛ばす力を修正する課題を排除します。衝撃による破断エネルギーは、試験片を破断する過程で振り子式衝撃試験機が抽出した運動エネルギー値によって決まります。試験装置は、試験片の一方の端部をハンマーに取り付け、もう一方の端部をクロスヘッド部材の内側に把持しなければならず、これは、衝撃の瞬間まで振り子と一緒に移動します。試験機のベース部分が振動を防ぐのに十分な剛性があることで、逆方向のクロスヘッドの跳ね返りによって失われるエネルギーは簡単に計算できます。

2種目の構成は、前のものと非常に似ていますが、試験片インベース方(メソッドA)です。試験片は試験機本体に取り付けられたバイスでクランプされ、振り子とクロスヘッド部材との間の衝撃によって壊れ、試験片の他方の両端に常時クランプされます。

引張衝撃試験は、重要な試験変数としてひずみ速度を導入し、多くの研究者が、引張衝撃試験結果がアイゾットやシャルピー衝撃試験よりも実際の現場で見られる破断と良く相関することを実証しています。

まだ一軸試験であっても、ほとんどの衝撃イベントが実使用状況では多軸となります。

試験機に関する限り、振り子式衝撃試験機は、試験片が衝撃の瞬間まで応力を受けないように、ダンベル型の試験片を保持するように特別に設計されています。下図では、その代わりに、最も一般的な試験片インベース法の衝撃構造を記しています。



補正された引張衝撃エネルギー E_c は、両方の試験方法について以下の通りに報告されました。

$$E_c = E_s - E_q \text{ (method A)}$$

ここで、 E_s は、機器によって測定される試験に吸収される衝撃エネルギーであり、式は、クロスヘッドのプラスチック変形および運動エネルギーによる試験片を飛ばすエネルギーです。

$$E_c = E_s + E_b \text{ (method B)}$$

ここで、 E_s は装置によって測定される衝撃エネルギーであり、 E_s の測定値から決定されるクロスヘッド跳ね返りエネルギーです。補正係数は、以下に規定する:

$$E_q \approx \frac{3}{2} \cdot E_{\max} \cdot \mu$$

E_{\max} は振り子の最大衝撃エネルギーですが、 μ はクロスヘッドの質量を振り子の質量で割ったものです。補正項は、メソッドBに関わる限り:

$$E_b = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left\{ v_1^2 - \left[v_1 - \frac{M}{m} \cdot \left(V - \sqrt{V^2 - \frac{2 \cdot E_s}{M}} \right)^2 \right] \right\}$$

ここで、 m はクロスヘッドの質量、 v_1 は跳ね返り直後のクロスヘッド速度、 M は振り子の質量、 V はクロスヘッドの衝撃中心の最大速度です。

2 非計装衝撃試験

工業系ポリマー製品の場合、静的試験に加えて衝撃試験が頻繁に行われます。交通事故、自動車や鉄道車両の正面表面へ石の衝突、オートバイや自転車のヘルメットが関係する事故、破壊などのいくつかの実例が含まれます。

大部分のプラスチック材料の強度と破断挙動を著しく変化させ、増加したひずみ速度の機能としての衝撃荷重結果としてすでに議論しました。更に、脆性破断の要因には、残留応力を含む低温及び多軸応力状態も含まれます。試験片のノッチ加工時の応力集中は脆性破断の生成に寄与するため、ノッチ付き試験片で試験を行うことが多いです。

衝撃荷重を受けるポリマーの靱性を評価するために大部分採用されている試験は、その簡単な適用性のため、シャルピー、アイゾットおよび二軸自由落下ダート試験(すべて前の章に記載)です。

シャルピー衝撃試験は、容易に適用できること、試験時間が短いこと、試験片の使用量が少ないことから、ここ数年間、特に品質管理において重要性を増してきました。しかし、他方では、その適用性は、材料の開発と最適化の分野では非常に限定されており、これが主な関心領域である場合には、計装化測定を行う必要があります。

熱可塑性材料を試験する場合、その簡単な製造技術のため、射出成形試験片を使用するのが理想的です。同時に、最終試験結果に影響を及ぼす可能性のある製造プロセスに関する内部状態を考慮しなければなりません。シート成形のような異なる製造プロセスを使用することにより、配向の影響を低減することができます。

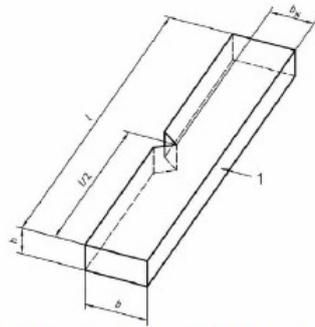
2.1 振子式衝撃試験

振子式衝撃試験機による衝撃荷重の違いによって3種類の構成があります。試験片は、シャルピー試験の場合2点支持の中央にノッチがある側、またアイゾット試験では、ノッチ側面に配置します。衝撃強度を測定する3番目の方法は、引張衝撃試験によるものです。

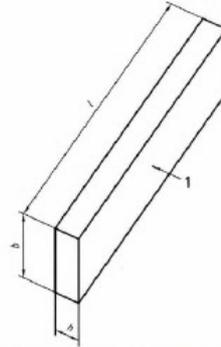
シャルピー衝撃試験は、ノッチありまたはノッチなしの試験片の両方に対して3点支持方式によって実施され、衝撃荷重中の靱性挙動を評価するために使用されます。ISO179およびASTMD6110(最も一般的なもの)で規格化されています。様々な試験片は、対応する成形材料規格に従って製造しなければなりません。試験片は、射出成形または薄板からの切断によって材料から直接作成します。また、アイゾット衝撃試験は、前の章で見られるように、サポートによってノッチ付きまたはノッチなしの両方の試験片で行うことができますが、試験方法が異なります。ISO180およびASTMD256で規格化されています。

ノッチあり衝撃試験では、ノッチを試験片に加工します。ノッチによって、亀裂伝播速度の増大と同様に応力集中が亀裂先端の前面で発生します。ノッチを入れることで、靱性材料も破断することができ、破断しない試験片でも破断することができます。試験片でノッチを切断する場合は、試験片の準備に細心の注意を払う必要があります(ノッチの章で説明します)。

シャルピー試験規格では、下図に示すように、衝撃の方向が試験片の狭い長手面 $h \times l$ 上の衝撃と平行な寸法 b の構造と、衝撃の方向が広い長手面 $b \times l$ 上の衝撃と平行な h の寸法に平行な構造(エッジワイズ)とを区別しています。



Charpy edgewise impact specimen with single notch, as usually used.

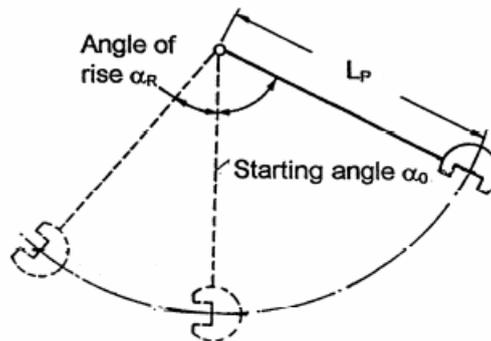


Charpy flatwise impact specimen unnotched, as common used for this test method.

ここで、Aと定義されるノッチ形状は、ノッチベース半径 $r_n=0.25\pm 0.05\text{mm}$ 、試験片のノッチベースにおける残りの幅 b_n が $8.0\pm 0.2\text{mm}$ (ISO179/1eAであり、 b_n は 10.2mm に等しく、規格ASTMを採用すれば試験片寸法が異なります)で使用されます。半径がそれぞれ $r_n=1.00\pm 0.05$ 、 $r_n=0.10\pm 0.05\text{mm}$ である追加のノッチタイプ(BおよびC)がISO規格で定義されています。試験片の形、寸法及びノッチ半径(タイプA及びB)は、ISO180アイゾット衝撃試験でも同一に定義されています。

試験には、ISO13802規格に準拠した振り子ハンマーを使用し、公称衝撃エネルギーは $0.5\text{J}\sim 50\text{J}$ 、衝撃速度はシャルピー試験で 2.9m/秒 および 3.8m/秒 、アイゾット試験では 3.5m/秒 です。

試験を実施すると、試験片に吸収されるエネルギー W (ただし、衝撃中に振り子によってエネルギーが損失することは確かです)は、衝撃前後の試験片にわたる振り子式衝撃試験機ハンマー高さ L_p と振り子式衝撃試験機ハンマー自身の質量 m_p との差から計算されます。



上図から、垂直、開始角度 α_0 、振り角 α_r を定義することができます。

吸収エネルギーは、計算によって算出されます。

$$W = W_{\text{衝撃前}} - W_{\text{衝撃後}} = m_p g L_p (\cos \alpha_r - \cos \alpha_0).$$

材料のレジリエンスとも呼ばれるノッチのない試験片 a_{cU} のシャルピー(またはアイゾット)衝撃強度を求めるには、試験片を破壊するために使用されるエネルギー W_c は、以下の公式によって、試験片の最初の断面積に関連します:

$$a_{cU} = \frac{W_c}{b \cdot h}.$$

以下の公式によって、ノッチありシャルピー(アイゾット)衝撃強さを決定するために、ノッチありの試験片は、サポートの中央に、そのテンション面にノッチを置いて配置します。したがって、衝撃は、ノッチと反対側(アイゾット試験の場合は、ノッチの側面)に生じます。ノッチ付きシャルピー弾性 a_{cN} は、ノッチベースにおける試験片の最小の断面積に関連する衝撃 W_c の間に吸収されるエネルギーから計算されます。

$$a_{cN} = \frac{W_c}{b_n \cdot h}$$

通常は kJ/m^2 で表されるが、ASTM規格では J/m で表すことを好み、総エネルギーを試験片厚さで割ります。また、ノッチのない衝撃強度とノッチのある衝撃強度の違いが、プラスチック材料が外部ノッチに対してどの程度敏感であるかを示していることに気付くことも興味深いです。このようにして、ノッチ感度は、比率からパーセントとして計算することができます。

$$k_z = \frac{a_{cN}}{a_{cU}} \cdot 100$$

次章では、衝撃強度がノッチ半径とノッチ加工手順によってどのように影響されるかを説明します。

以下の表は、ポリマーのシャルピー衝撃強度、ノッチありおよびノッチなしの代表的な値の一覧です(これらの値はキャンパスウェブから提供されています)。※Nは破断なし)

Thermoplastics unreinforced	a_{cU} (kJ/m^2)	a_{cN} (kJ/m^2)	Thermoplastics reinforced	a_{cU} (kJ/m^2)	a_{cN} (kJ/m^2)
PE-HD	N	4.9	PP + Glass Fibres	45	15
PP	100	10	PA6 + GF	85	19
PS	21.5	2.8	PA + Carbon Fibres	70	15
SAN	19	2.5	PP + talc	40	3.5
ABS	120	20	PP + chalk	40	3.5
PC	N	18	PVC + chalk		9
PMMA	25	2.9	Thermosets unreinforced		
PVC-U	80	3.2	PF resin	8.5	2.9
PVC-P	N	50	UF resin	6.3	1.3
PA	N	50	MF resin	4.3	1.8
POM	N	12	UP resin	11	3
PET	N	3.9	Ep resin	22	1.5
PTFE	N	16			

ノッチあり衝撃試験によって測定された衝撃エネルギーの唯一の欠点は、その関係に起因するものです。

$$E_c = \int_{f=0}^{f=f_c} F \cdot df$$

f はたわみ、 f_c は破断でのたわみ、 F は荷重を意味します。この関係から、衝撃中に作用する荷重と全エネルギーを関係付けると、衝撃エネルギーは強度と変形コンポーネントの両方からなることが明らかです。これは、非常に異なった荷重値とたわみ値から同じ衝撃エネルギーが得られることを意味します。このため、非計装試験の結果を衝撃負荷コンポーネントの寸法パラメータとして使用することはできません。寸法パラメータが研究の主な目標である場合、計装化衝撃試験を用いることにより、この問題は解決するでしょう。それは荷重-たわみ線図を直接的に測定することを可能にします。この図の実例を下図に示します。これにより、衝撃強度は同程度ですが、荷重-たわみの挙動が異なる可能性も理解できます。

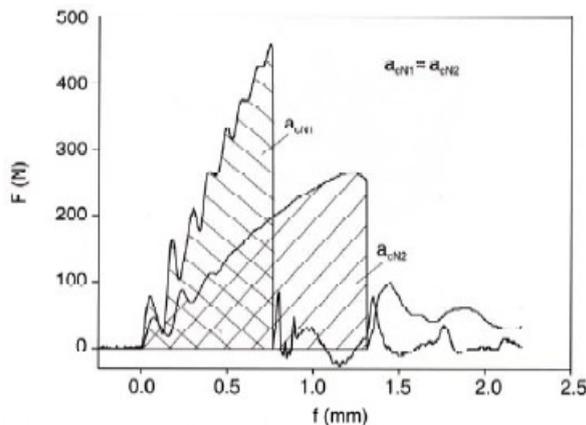


Figure: in this figure two different curves with different force value but with the same absorbed energy are presented. (F_1 is different from F_2 but a_{cN1} is equal to a_{cN2}).

衝撃中のコンポーネント部品の挙動については何らかの結論を導くことができますが、この種の試験は、製造監視及び開発試験室において使用され続けています。さらに、衝撃強度の温度依存性を評価しなければならない場合には、非計装衝撃試験が役立ちます。

引張衝撃試験

従来の引張衝撃試験はISO8256規格で規定されています。シャルピー試験またはアイゾット試験は、軟質または薄いポリマーに一般的に使用される相対高ひずみ速度を有する単軸引張試験です。

この種の試験を行うことができる振子式衝撃試験機は、前の章で提示され、議論されました。規格には、2つの異なる方法が記載され、両者は、単軸衝撃荷重を受けてプラスチック試験片を破断するのに必要なエネルギーを決定するために使用されます。A法では、試験片を水平に置き、一方の端部が試験片固定具に保持され、他方の端部がクロスヘッドに保持されます。クロスヘッドは試験片固定サポートから分離されています。分岐アームは、振り子動作の最低点で、試験片に対して垂直上で、クロスヘッドに衝撃を与えます。B法では、試験片がバイスではなくハンマーにクランプされているため、クロスヘッドはストライカーと一緒に動きます。両方の方法で実施しなければいけない補正は、3.2項に記載されています。

前述の試験に対する5つの異なった試験片形状が存在し、最も一般的なものはノッチ付きシャルピー/アイゾット試験片に非常に似ていますが、両側にノッチがあります。その他の一般的な試験片としては、B法で特に使用されているノッチの無いダンベル形状のものがありますが、ここでは、金型によって作成されたノッチと試験片加工によって作成されたノッチの試験片では異なる結果をもたらす傾向があることに留意する必要があります。それにもかかわらず、これらの手順は、品質保証だけでなく生産におけるモニタリングにも適しています。

引張衝撃強度 a_{tU} 、又はノッチあり引張-衝撃強度 a_{tN} は、この試験から次式により算出します。

$$a_{tU} \text{ (or } a_{tN}) = \frac{E_c}{x \cdot h}$$

ここで、 E_c は補正後の衝撃エネルギー、 x は試験片の狭い平行断面の幅、またはノッチと h との間隔を総試験片厚さとします。通常、 kJ/m^2 で表します。例えば、永久ひずみ ε_{bl} を引張試験で測定することができます。長さの変化は、試験後に試験片の二つの部分を接続部して測定し、次のようにしてひずみを求めます。

$$\varepsilon_{bl} = \frac{l_{bl} - l_0}{l_0} \cdot 100 (\%)$$

ここで、 l_{bl} は最終値、 l_0 は最初の長さです。

寸法の違う試験片から得られた試験結果は、同一である必要はなく、また、A法とB法から得られた実験結果も、必ずしも同等である必要はないです。引張衝撃試験データは部品やコンポーネント設計のための計算には適していません。逆に、非計装引張衝撃試験は、計装化試験により得られる情報量を改善できても、材料開発に適した試験です。

3 計装化衝撃試験

前の章では、非計装衝撃試験とは何かを解説しました。この種の衝撃試験方法の最大の欠点の1つは、試験結果が1つしか得られないこと。すなわち衝撃強度(弾力性)、またはより良い総衝撃エネルギーを提供することであることがすぐに明らかです。また、全エネルギーは、結果に影響する多くのコンポーネント(振動、摩擦等の必ず発生する条件を含む)の合計であることも実証されました。このような試験では、衝撃イベント全体の延性、動的靱性、降伏、または試験片の挙動に関する追加的な情報を提供することはできません。

この事実は、実質的に品質管理において材料順位付けに対する非計装衝撃試験メソッドのアプリケーションを制限します。これに反して、計装化された衝撃試験機は、一般的には、研究開発に適しているだけでなく、高度な品質管理にも適しています。

ひずみゲージによる計装化

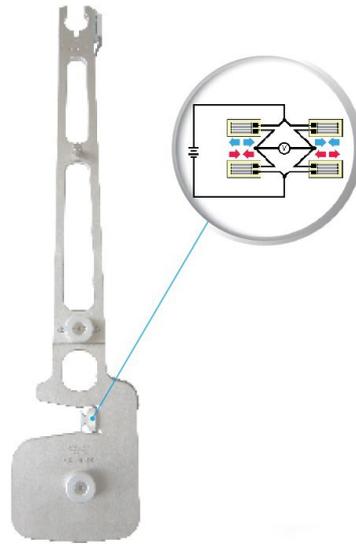
変形(衝撃試験の場合の荷重)を測定するために、伸び計という変換器を用いました。これらのセンサーは、変形をアナログ信号に変換することができますが、これは用いる伸び計の種類により異なります。それは、機械的、光学的、音響的および電気的に異なる伸び計が存在します。最後のカテゴリは、電気抵抗センサーを含み、最も多く用いられ、衝撃イベント中に試験片に作用する荷重を測定するために用いられます。精度が高く、信号の取り込みが容易な回路で、様々な寸法で製作できます。理想の伸び計の特性は以下の通りです。

校正定数は、安定していなければならず、温度または環境要因の影響により、測定中変化しません。

- 平均値では無く、局所的な変化を測定する必要がある。(非常に近い2点間)
- それは周波数に良い反応が無ければならない。

伸び計は、ワイヤーの伸びが内部抵抗に直接的に比例するという物理的な原理に基づいています。この伸び計は、ワイヤーによって作られた1つまたは複数の格子によって作られ、ストライカーに接着されるサポート上に配置されます。伸び計が接着されると、それは読み出し回路に接続され、保護層で覆われます。伸び計は必ず格子の長さにおける変位の平均を読み取ることに注意して下さい。

通常、高いひずみ勾配が生じた場合、短小センサーが採用されるでしょう。以下の画像では、振り子式衝撃試験機のストライカーと、内蔵されているひずみゲージ回路が明確化されています。



この画像では、振り式衝撃試験機ストライカーが表示されます。青色の線は、ひずみゲージセンサーが配置されている場所(ストライカーの内側)を個別に表し、右下にはすべてのセンサーを接続している回路が示されています。導線の場合、電気抵抗は次式で表されます。

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

ここで ρ は材料の抵抗率、 l はワイヤーの長さ、 A はセクションです。前公式を出発点として、伸び計またはゲージ率 K の感度を表すパラメータを定義することもできます。

$$K = \frac{\delta\rho}{\rho \cdot \varepsilon_a} + (1 + 2\nu)$$

第1項はピエゾ抵抗感度であり、第2項は幾何学的感度です。

この公式は伸び計の第一基本法則とも呼ばれます。軸方向センサー伸び計は、線形の特徴的な挙動を有するため、強度を測定することができる公式は、以下の通りです。

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon_a$$

ε_a は変形軸に沿った強度です。

伸び計の抵抗はホイートストンのブリッジ回路で測定されます。以下の画像では、この種の回路は表されています。

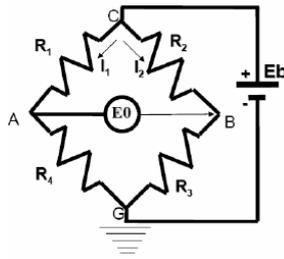


図:ホイートストンのブリッジ回路

システムを解くことで、比率を求めることができます。

$$\frac{E_0}{E_b} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}$$

ブリッジが不平衡になった場合、この値は抵抗変動で直接的に比例します。先述した公式は、すべての抵抗がばらついている場合に使用できます。

$$\frac{\Delta E_0}{E_b} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

そしてその計算より、伸び計の第二の基本法則を説明することができます。

$$\frac{\Delta E_0}{E_b} \approx \frac{1}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

ホイートストンのブリッジに最大4個の伸び計を配置し、ブリッジの不平衡によって変形を計算することが可能です。これは、衝撃中のストライカーの変形を測定し、衝撃イベント全体の間ToStrayカーに作用する荷重と関連付けることができる物理的な原理です。

当然、この単純化された公式は、何らかの外部効果が生じるため、変化させることができます。例えば、温度は、修正するよりも干渉したノイズ信号であり、これは測定に追加されます。温度は、変化するので、耐久性に直接的な影響を与えます。ワイヤーの抵抗性(温度の機能)、格子の長さ、ブリッジの側面間のワイヤーの耐久性。この影響を低減し、最小限に抑えるためには、伸び計とグリッドの両方の熱膨張係数を正しい方法で選ぶことが大切です。正しい選択によって抵抗率のばらつきを補償することができます。ひずみゲージが自己温度補正されていない場合(等弾性合金など)でも、ホイートストンブリッジ配置を使用することで、被測定試験片やひずみゲージ内の温度変動を補正することができます。

リード線が長い場合、温度に対しても無視できない影響を与える可能性があります。これらの影響は、干渉よりも信号を修正すること(つなぎの感度には影響しますが)の両方になります(ただし、4ワイヤー式ブリッジを使用し

ている場合は補正されます)。回路に外部抵抗が付加される可能性を防止するためには、サポートと接着剤の両方が効果的に電氣的に絶縁されていることが非常に大切です。

本図では、伸び計配置の実例を示しました。この構造では次のことができます。

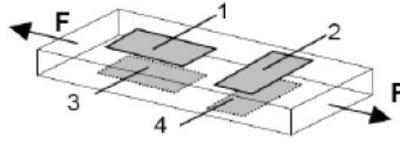


Figure: the extensometer arrangement in the full bridge configuration.

- 変形に対し最大感度を付加する。
- 温度変動を補正する。
- たわみ運動量のコンポーネントの存在の可能性を遅らせる。遅れなければ最終的な結果に影響を与える可能性がある。

また、もう一つの大きな伸び計のグループに半導体が存在します。ワイヤーのグリッドにもかかわらず、これらのセンサーは半導体フィルム(nまたはp)によって作られます。それらは、高精度ピエゾ抵抗感度、または一般的には伸び計に対してより高感度を有しますが、温度に対しては非常に敏感で脆いのが特徴です。

計装データ

この種の試験では、試験片がストライカーによって破損するときに、荷重を連続的に測定することができます。得られたデータは、試験片を破断するのに必要なエネルギーの計算に加えて、破断の種類と演算された最大荷重を決定するために使用することができます。低温で脆性から延性転移に至るまで起こる破断の最も一般的な種類の1つは、荷重(エネルギー)対時間曲線を見ることで研究、観察することができます。ポリマーの破断モードは温度の変化に敏感であり、材料の転移温度で急激に、あるいはすぐに閉じることができます。例えば、自動車向けプラスチックにおける試験では、材料が脆くなる寒冷な気象下を想定し、通常、低温で試験を行っています。荷重対時間または荷重対たわみ曲線の形を研究することにより、破断の種類を解析でき、供用中の性能に関する重要な情報を得ることができます。

すべての標準タイプの衝撃試験機を計装して、試験片の完全な荷重データおよびエネルギー履歴を追うことができます。この種のシステムは、電子システムによって、全体の衝撃イベントをモニター、記録、最初の衝撃までの加速を開始し、プラスチックの曲げのための完全な破断への開始および完全な破断まで行います。この計装化システムは、振子式衝撃試験機の場合は、ハンマー打撃部エッジに、落錘式衝撃試験機の場合は、タップにストレインゲージまたはロードセルを組み込みます。

新型ピエゾ搭載ストライカーは、感度を高め、新材料の試験への扉を開くことができます。軽量化製品または超薄膜を含むアプリケーションは、問題なく試験をすることができます。

この技法を用いることにより、試験片が吸収する見かけの全エネルギーは、次のように時間に対してプロットし計算されます。試験片変位は、荷重対時間曲線の二重積分によっても計算でき、荷重対たわみをプロットすることができます。

以下では、荷重またはエネルギーを変位の関数として計算し、プロットすることができる手順について説明します。まず、衝撃試験より得られる荷重対時間のカーブは下図で示します。

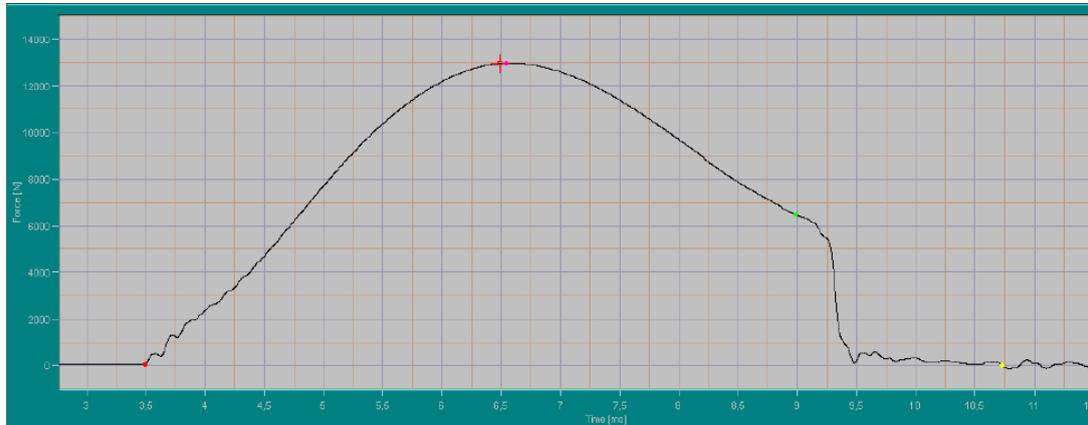


Figure: the force-time curve acquired during a test.

カーブが取得されると、速度を時間の関数として計算し、プロットすることができるように、1点ごとに最初の積分点を取得します。

$$v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \cdot \int_0^t F(t) \cdot dt$$

ここで、 v_0 は出発速度であり、 m はストライカーの質量であり、 $F(t)$ の積分は試験片へのストライカーによって与えられる力積です。それは、荷重対時間曲線の下面積部分を視覚的に見ることができます。現在は速度対時間グラフ(以下に示します)をプロットしたり、荷重対速度グラフをプロットしたりすることができるようになりました。これは、それぞれの瞬間のどれが速度であるかを正確に知ることができるようになったからです。

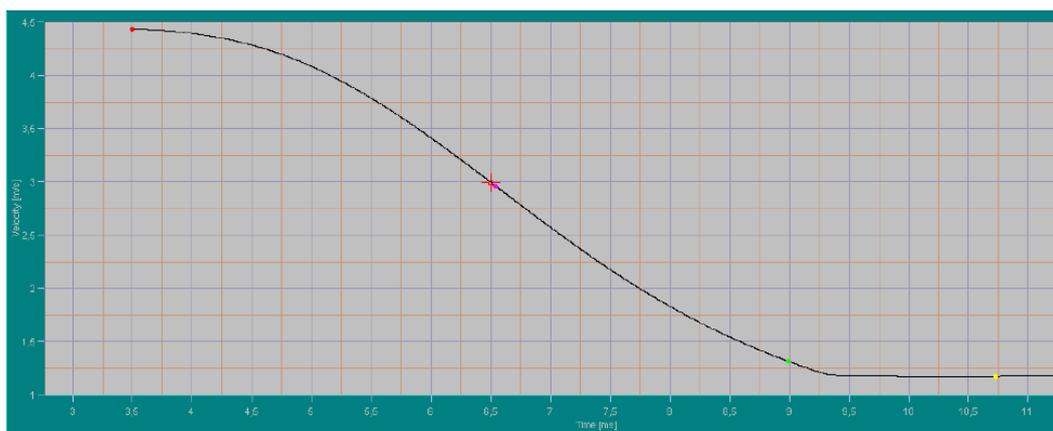


Figure: the velocity-time curve obtained by calculation.

さて、第2の統合によって、その瞬間の試験片の変形を得て、それを時間の関数としてプロットすることができます。さらに興味深い次の図では、荷重対たわみグラフが報告されていますのでご覧ください。

$$d(t) = v_0 \cdot t - \frac{1}{m} \cdot \int_0^t \int_0^t F(t) \cdot dt \cdot dt'$$

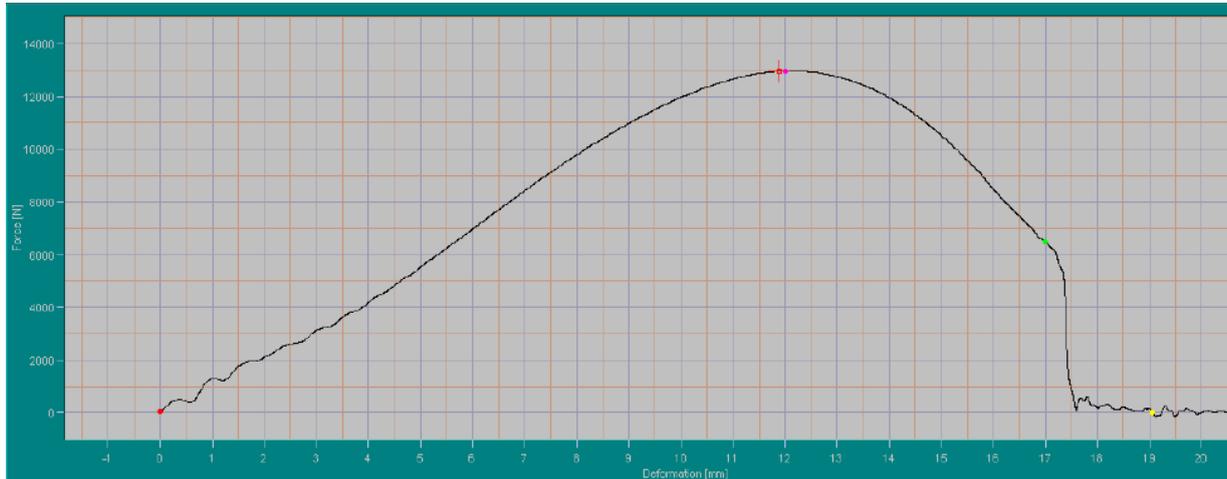


Figure: the force-deformation curve obtained from the test data.

次の図で報告するように、たわみを計算すると、次の公式を用いて、試験中に試験片によって吸収された総エネルギー、荷重対変位曲線下の総面積を評価することもできます。

$$E_{\text{tot}} = v_0 \cdot \int_0^{t_{\text{max}}} F(t) \cdot dt - \frac{\left(\int_0^{t_{\text{max}}} F(t) \cdot dt \right)^2}{2m}$$

点ごとに積分することにより、エネルギー-変形グラフをプロットすることができます。

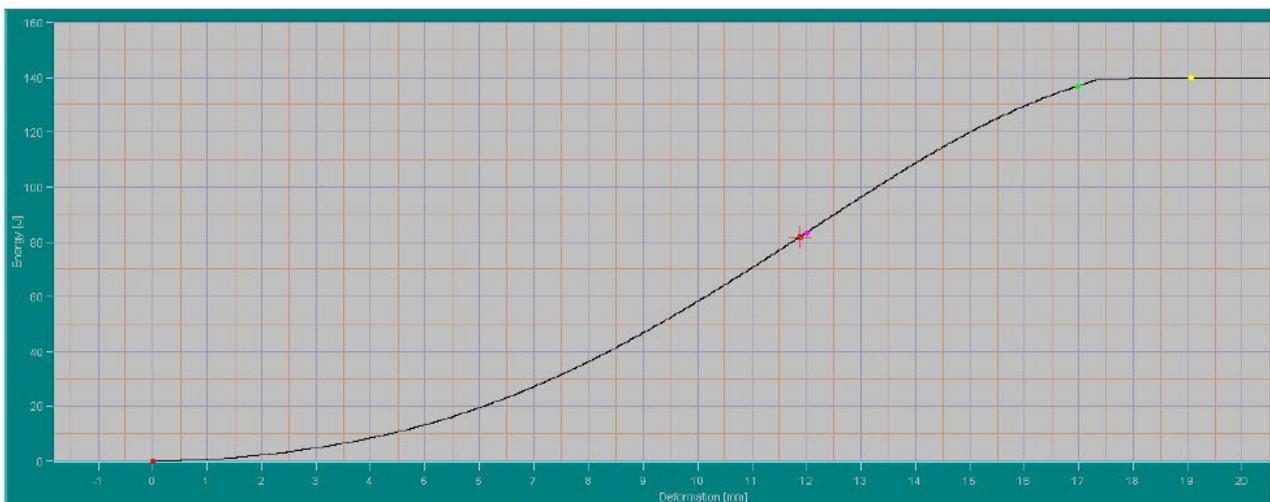


Figure: the energy-deformation curve.

3.1 計装化 振子式衝撃試験機

衝撃荷重条件下でのポリマーの靱性を評価するために、最近では、適切なセンサーと電子ハードウェアが採用されています。次の段落では、衝撃中に荷重を取得するために使用されるさまざまな種類のセンサーについて詳しく示し、議論します。荷重対たわみ線図を記録するための計装の原理はすべての試験で等しいです。ストライカーに取り付けたセンサ(半導体ひずみゲージまたはピエゾセル)で荷重信号を拾い、衝撃点に近づけることができます。このシグナルは、統合された演算アンプを持つ電力アンプによって増幅されます。PCを使用すると、これらすべての情報を管理し、時間の機能としてプロットを直接的に読み込むことができます。以下に、典型的な荷重対時間の測定カーブを示しています。

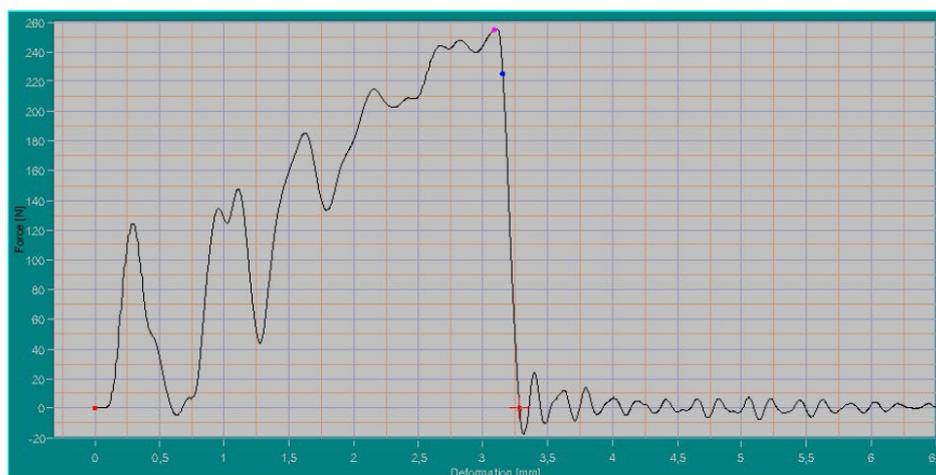


Figure: the force-deformation curve obtained from a test.

現代の計装化衝撃試験機は、試験片対時間を示す荷重を完全に記録することができます。ストライカー対時間または荷重対変位、ストライカー対速度および試験片対時間によって吸収されたエネルギーを計算することが可能です。一旦、それらがプロットされると、衝撃イベントの多くの詳細がデータにはっきりと見えるようになります。計装化された試験から得られた結果は、異なる解釈がなされ、それらは試験される材料の種類と破断基準に依存します。

ほとんどの均一材料では、最大荷重、最大荷重時のエネルギー、全吸収エネルギー、最大荷重時のたわみの4つの値が重要です。

最大荷重は、破断以前の荷重・時間・曲線上の最高点です。しばしば最大は完全な破断の開始に対応します。しかし、これは、ピーク荷重が最大荷重より高くなり得る場合、例えば、充填剤で強化されたポリマーなど、いくつかの場合が存在します。

最大荷重に対するエネルギーは、最大荷重点までの試験片が吸収するエネルギーです。最大点で破断する場合、これは試験片が破断するまでの吸収エネルギーの大きさです。

総エネルギーは、完全な試験中に試験片が吸収するエネルギーの量です。最大荷重へのたわみは、衝撃点から最大荷重点までのストライカーの移動距離です。

これらの点はすべて、先に示したグラフで非常に容易に認識できます。さらに、荷重対時間グラフでは、いくつかの特徴的な挙動を識別することができます。曲線の最初の部分(1つの例が以下で報告されています)は、いわゆる慣性部分です。

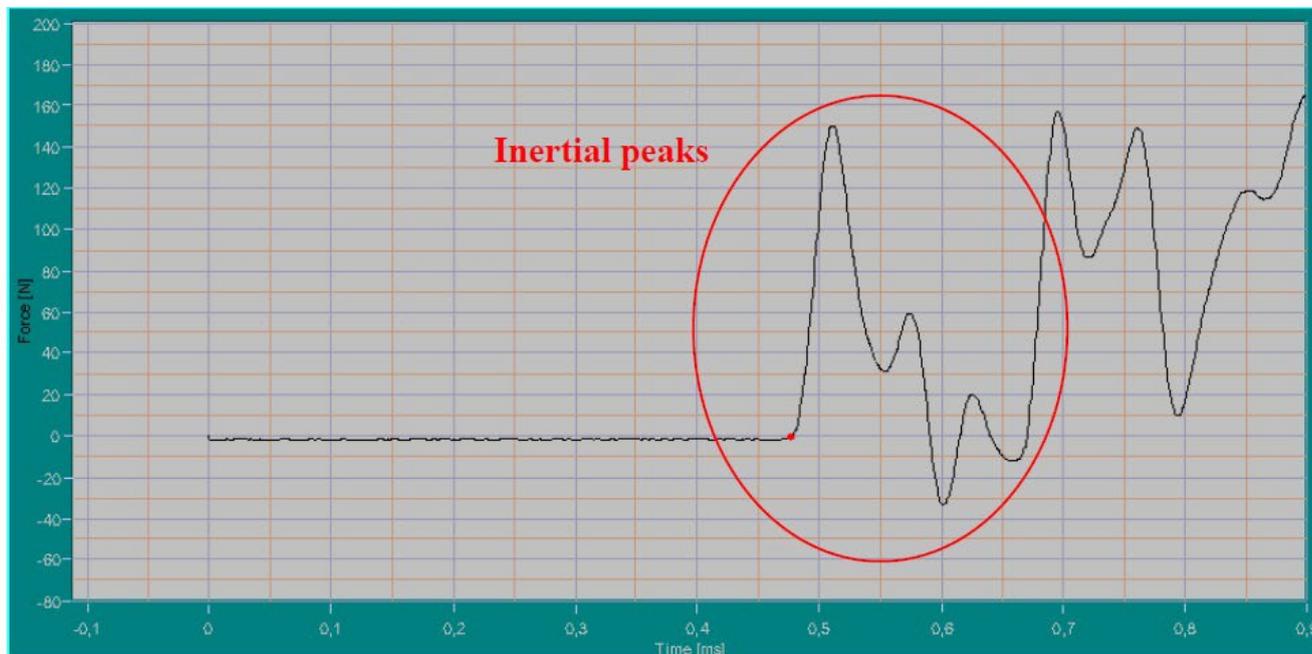


Figure: the typical inertial peaks zone.

ストライカーとの慣性接点後に加速される試験片のその部分の慣性に起因します。ピーク荷重とピーク持続時間は接点の質量と剛性に依存します。衝撃イベントの弾性コンポーネントにより、「跳ね返り」が一般的に発生します。これは、試験片が衝撃速度より高い速度で加速されるため、試験片とストライカーの間で一瞬接点が失われ、グラフの振動シリーズに反映されることを意味します。

計装化された試験から得ることができる別の重要な情報は、弾性係数です。

これは、材料の比例限度以下のひずみに相当する応力の比率であり、曲線が直線であるゾーンです。これはヤング係数とも呼ばれ、曲線のx軸から直線部分までの角度として推定することができます。弾性率は、材料の剛性の測定です。

応力の増加なしにひずみの増加が起こる応力対ひずみカーブ上の最初の点である降伏点(および降伏領域)を推定することもできます。これは、曲線が直線性から逸脱する点と解釈することができます。オフセット降伏応力の定義には通常0.2%の塑性ひずみを使用されますが、材料やアプリケーションによっては他の値を使用することもあります。降伏点が通過すると、変形の一部は永久的で、非可逆的になります。

4 測定に影響する係数

次章では、高分子材料の衝撃強度特性に重要な影響を及ぼす最も重要なパラメータを示します。

温度

プラスチック材料の衝撃挙動は温度に強く依存します。低い温度では、衝撃耐性は大幅に低下します。この衝撃の低減は、ガラス転移温度付近でさらに劇的です。非晶質材料ガラス転移温度では、結晶性ポリマーの融合温度と同じ意味合いをもちます。高い試験温度では反対に、耐性は著しく改善されます。

試験片の切り出し方向

ポリマーが配向する様式はポリマーの衝撃挙動に大きな影響を与えるでしょう。延伸フィルムや繊維に導入された分子配向は等方性材料よりも余分な強度と靱性を与える可能性があります。しかしながら、高分子のこの方向性配向は、衝撃応力が通常多軸であるので、成形部品において非常に致命的であり得ます。通常、衝撃強度はフローの向きの方が高くなります。

結晶度

透明性を増加させると、耐衝撃性が低下し、脆性破断の可能性が増加します。平均分子量の低減は衝撃挙動を低減させる傾向があり、逆も同様です。

加工条件

加工条件は材料の衝撃挙動を決定する鍵を握っています。加工条件が不十分な場合、材料の靱性の一部が失われる可能性があります。応力集中によって現れる空洞は、加工状態が悪いことによって作り出されます。高い加工温度は、熱劣化を引き起こし、その結果衝撃特性を低下させる可能性があります。また、加工条件が不適切な場合、溶接線が弱くなり、衝撃エネルギーが全体的に低下します。圧縮成形した試験片は通常、射出成形したものより衝撃耐性が低い傾向にあります。

負荷速度

試験片またはその一部をストライカーで打つ速度は、衝撃荷重を受けるポリマーの挙動に大きな影響を及ぼします。低速衝撃では、比較的硬い材料は依然として良好な衝撃強度維持できます。しかし、高い衝撃速度では、ゴムさえも脆性破断することがあります。全ての材料は限界速度を持ち、それ以上ではガラス状で脆性材料の挙動を示します。これはとても重要なポイントです。なぜなら最終製品で試験を行う時は、実使用とはかなり離れた速度で実施されるからです。

負荷方法

試験片が衝撃を受ける負荷装置の方式は、衝撃結果に大きく影響します。振子式衝撃試験機の衝撃荷重は

落錘式または高速の落球衝撃荷重によって得られる試験では結果が異なります。前の章では、例えば、慣性ピークが振子式衝撃試験機衝撃荷重にのみ存在することが示されています。

試験片クランプ

過剰なクランプ(必要な場合)荷重の場合、試験片内のノッチまたは鋭角部分は衝撃エネルギーを大幅に低下させる。

ノッチ感度

試験片内のノッチ、あるいは製作された部品内の鋭い角は衝撃エネルギーを大幅に低下させる。ノッチは、局所的な応力集中を作り、その結果として、衝撃荷重を受ける破断箇所を作り出すために使用されます。すべてのプラスチック材料はノッチに敏感で、感度の度合いはプラスチックの種類によって異なります。ノッチ深さと曲率半径は、材料の衝撃挙動に影響を与えます。この議論については、次章で詳しく説明します。例えば、一般的にノッチベース部におけるより大きな曲率半径は、より低い応力集中を有し、その結果、ベース部材料により高い衝撃エネルギーが見られます。上述の議論から、応力集中の全ての要因は、プラスチック製部品又はコンポーネントを設計する際には避けられるべきであることは明らかです。

5 試験変数が振子式衝撃試験に及ぼす影響

前半では、衝撃強度値に影響を及ぼす一般的要因について述べました。ここで各種試験に対する種類と規定をより具体的な方法でご紹介します。

温度

先に述べたように、温度は結果に大きな影響を及ぼします。衝撃値は温度の増加と共に増大し、その逆も同様です。

試験片の準備

射出成形した試験片は通常圧縮成形したものよりも高い衝撃強度値を有するようです。これは射出プロセスによって生じる分子配向に起因します。

また、試験結果、とくに繊維強化試験片では、ゲート位置は大きな影響を与えます。

充填剤・添加剤

充填材および補強材は、衝撃試験結果に当然大きな影響を及ぼします。その影響は異なった方向に進み、必ずしも強化材料の挙動の予測を容易にするものではありません。例えば、強化(30%のガラス繊維を含みます)ポリカーボネート試験片は、非強化のものより約4倍低いアイゾット衝撃強度を有します。対照的に、強化ポリスチレン(ガラス繊維の30%を含む)は、無強化材料に関して2倍以上の衝撃強度を有します。充填剤や顔料は、一般的に衝撃強度の数値を下げます。

試験片厚さ

報告された衝撃値は4mm(ISO)厚さ試験片に基づいていますが、試験で使用した厚さの実績値が結果に影響します。

ノッチ

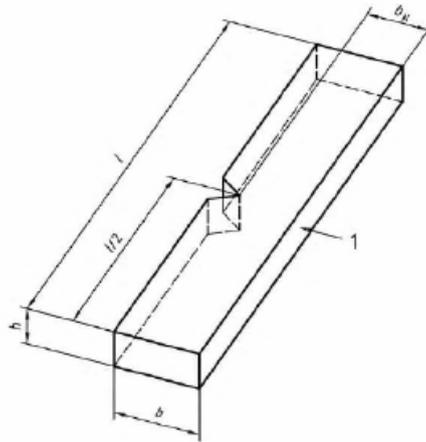
このパラメータは結果に大きな影響を与え、その重要性から次章で論じます。

限界

シャルピーまたはアイゾット衝撃試験から得られた結果は、設計に直接的には適用できません。これらの試験では、試験片を破断するのに必要な真のエネルギーを測定していないためです。ノッチありアイゾット衝撃試験は、実際には異なった材料のノッチ感度であり、靱性ではありません。

6 ノッチの影響

ポリマーの衝撃強度を大きく左右する係数の一つにノッチがあります。特に試験片の衝撃強度を下げるために作用します。最も一般的な国際標準によって推奨されているように、応力を集中および局所化するために、従って、それは、衝撃荷重下での試料の破断を可能にするために、作成されます。最も重要な規格はすべて、試験片とノッチの両方の幾何学的寸法を定義しています。ここでは、ISO規格とASTM規格の両方、およびアイゾット試験とシャルピー試験の両方について議論を再開します。以下の図において、寸法を認識するのに役立つものを報告します。



ISO standard		
ISO 179		Charpy
Specimen dimensions		
$l = 80 \text{ mm}$	$b = 10 \text{ mm}$	$h = 4 \text{ mm}$
Notch dimensions		
Angle = 45°	$b_n = 8 \text{ mm}$	radius = $0,25 \text{ mm}$ (A)
Angle = 45°	$b_n = 8 \text{ mm}$	radius = $1,00 \text{ mm}$ (B)
Angle = 45°	$b_n = 8 \text{ mm}$	radius = $0,10 \text{ mm}$ (C)

ISO standard		
ISO 180		Izod
Specimen dimensions		
$l = 80 \text{ mm}$	$b = 10 \text{ mm}$	$h = 4 \text{ mm}$
Notch dimensions		
Angle = 45°	$b_n = 8 \text{ mm}$	radius = $0,25 \text{ mm}$ (A)
Angle = 45°	$b_n = 8 \text{ mm}$	radius = $1,00 \text{ mm}$ (B)

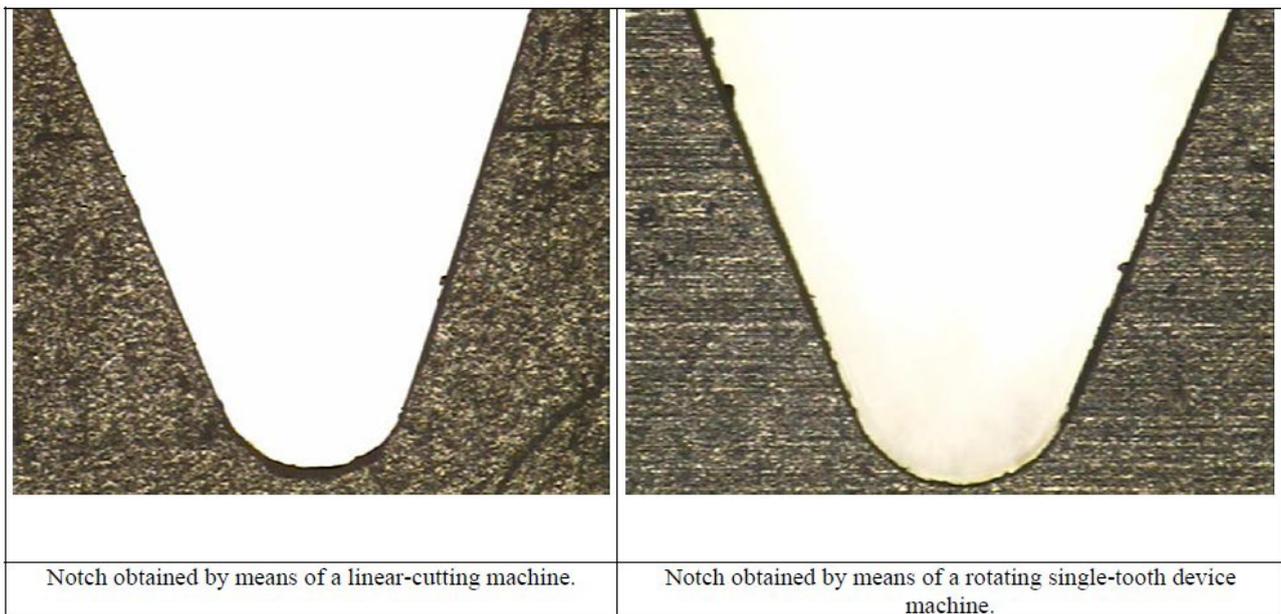
ASTM standard		
ASTM D6110		Charpy
Specimen dimensions		
$l = 127 \text{ mm}$	$b = 12,7 \text{ mm}$	$h = 6,35 \text{ or } 3,17 \text{ mm}$
Notch dimensions		
Angle = 45°	$b_n = 10,2 \text{ mm}$	radius = $0,25 \text{ mm}$ (A)

ASTM standard		
ASTM D256		Izod
Specimen dimensions		
$l = 63,5 \text{ mm}$	$b = 12,7 \text{ mm}$	$h = 6,35 \text{ or } 3,17 \text{ mm}$
Notch dimensions		
Angle = 45°	$b_n = 10,16 \text{ mm}$	radius = $0,25 \text{ mm}$ (A)

試験片は、成形または板から切断することによって調製することができ、一方、ノッチの規定形状は、フライス盤または旋盤によって非常に注意深く試験片に切断されます。また試験片にノッチ加工を施すための専用機があり、直線カット式と回転カット式が存在します。

インストロンは、直線カット式(ブローチング加工法)の分野における世界的リーダーの一つです。決まった形状のナイフが試験片を移動し、任意の速度で通過すると、設定した試験方法に適した形状に加工することができます。

ノッチ可能において、単一歯回転カット式装置を使用することによって得られたデータの再現性に関する正確な研究が、現在インストロンの試験室で研究されています。ここで詳細を述べませんが、回転カット式装置によって得られたノッチはかなりよい側面を示しますが、試験から得られた衝撃強度は基準値から得られたものよりも全般的に高いことが指摘できます。このことは、この種の動作がノッチ切断中に試験片上に残る残留応力によるものと思われる。以下の画像は、両方のカット方法で得られたノッチの実例を示します。



ノッチパラメータ

衝撃試験は破断試験の一種であるため、ノッチ加工時の精度が極めて重視されます。これは試験において重要な側面の1つであり、不正確なノッチ加工から得られる不備は、データのバラつき増大に影響します。ノッチ加工中に不正確なパラメータを用いた場合、見かけの衝撃強度値の増加に反映されるであろうノッチ頂点周辺に残留応力または局所的な靱性の増加が見られます。

全てのプラスチックはノッチ加工速度に敏感であり、残念ながら材料ごとに異なるため、この影響を一般化することは難しいと考えられます。幾何学的観点からは、試験片内のノッチ深さとノッチ半径の両方が、材料の衝撃挙動に影響を及ぼします。

例えば、ノッチベース部におけるより大きな曲率半径は、より低い応力集中係数を有し、結果として、ベース部材料のより高い衝撃エネルギーが期待されます。このパラメータのわずかな変動、またはノッチ深さの別の数値は、数パーセントの衝撃強度の結果に影響します。ノッチ半径についての基準によって定義される許容差は0,1mmであり、得られたノッチが前述の範囲の内側にあっても、衝撃強度値は感覚的に変化し得ると結論づけるに至ります。

切削速度、ノッチ深さ通過、ナイフの切れ味、送り速度、使用するプラスチックの種類(すべての前変数はこの機能のパラメータです)など、他の多くの変数も結果に重大な影響を及ぼすように思われます。このケースでは、すべてが関係しているように見えるため、それぞれのパラメータが衝撃強度に及ぼす影響を別々に区別しようとするのは容易ではありません。それにもかかわらず、通常、これらのパラメータの影響はノッチ半径とノッチ深さのそれに二次的であることを指摘できます。実際には、このような変動は制御が難しく、ロット間の不均一性は極めて一般的ですが、ノッチ半径は顕微鏡によって非常に良好に測定することができます。

また、感熱性ポリマーの中には、材料の熱劣化に寄与すると思われる高切削速度にも影響されるものがあります。この場合、切削プロセス中にナイフを冷却しながら加工すると便利です。

試験片のノッチは応力集中域を作り出す傾向があるとされてきました。このことは、とりわけ結晶性プラスチックにおいて、非現実的に低い衝撃値を生み出します。

ナイフの形状は定期的に点検する必要があり、規格では500回操作後に再研磨して形状を確認することを推奨しています。また、ノッチ加工後、実際の衝撃試験までに時間を置くことを推奨しています。通常、試験前に約40時間の間隔をあけてノッチ加工を施します。

7 破断の解析

前の章では、さまざまな種類の衝撃測定について簡単に説明しました。その後、計装化ストライカーによる測定方法と収集方法を分析しました。試験の種類ごとに最も一般的な衝撃曲線の形であり、曲線全体を構成する異なったゾーンであることを示しました。その後、最終的な結果に影響を及ぼすパラメータを提示し、振子式衝撃試験の衝撃強度に及ぼすノッチの影響を詳述しました。ここで、荷重対変形曲線のさまざまな種類の破断と最も一般的な挙動を解析することが残されています。

衝撃試験

高分子材料の衝撃特性は材料の全体的な靱性に直接的に関係します。靱性は、材料が衝撃的な荷重に抵抗する能力として定義されます。荷重対たわみ曲線下面積は材料靱性に直接的に関係することが以前に示されています。他方では、いくつかの条件下でのいくつかの材料が脆性挙動を示すことも紹介しました。それは何を意味するのか。

ポリマーの脆性と靱性の背後にある理論は非常に複雑で、理解するのは簡単ではありません。材料の相対的脆性あるいは靱性を決定する上で、微視的観点から分子の柔軟性は非常に重要な役割を果たします。

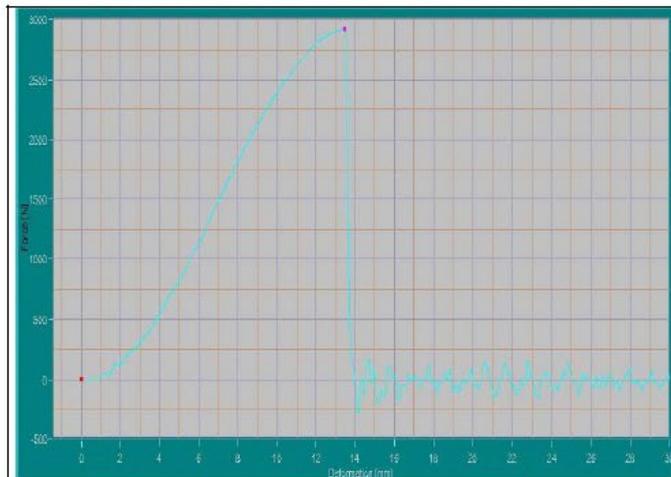
大部分のポリマーは、衝撃荷重を受けると、特徴的な方法で破壊するのに見え、クラックが衝撃荷重によりポリマー面上で開始されます。このような亀裂を発生させるのに必要なエネルギーの大きさを亀裂発生エネルギーと呼びます。衝撃エネルギー値が亀裂発生値より高い場合、亀裂は伝搬し続けます。衝撃エネルギーが亀裂伝播より高い場合に荷重が寄与すると完全な破断が生じます。通常、衝撃荷重には4種類の破断スタイルが存在します。

*脆性:*この種の破断では、部品は広範囲に破断されますが、降伏することはありません。壊滅的な機械的破断が観測されます。

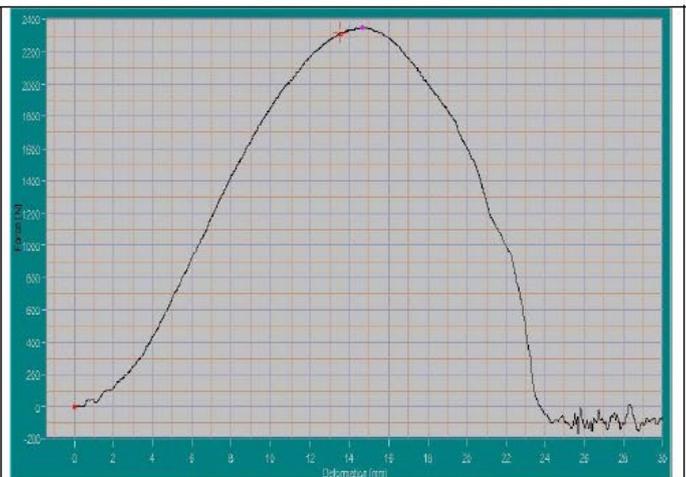
*わずかな亀裂:*ここでの試験片は、わずかな亀裂と降伏の形跡を示しますが、試験後には完全に形を失いません。

*降伏:*試験片は実際には変形と応力白化を示しますが、亀裂はすべての面に沿って伝播するわけではありません。

*延性:*この種の破断は、亀裂と共に材料が完全に降伏するのが特徴です。4種類の破断の違いは、時にはあまり明確ではなく、何らかの重複が間違いなく起こります。以下の図では、いくつかの例を報告します。



An example of a material with a brittle behaviour.



An example of a material with a ductile behaviour.

しかし、それぞれの国際規格は破断の種類を定義しようとします。シャルピー非計装化試験(ISO179-1)では、例えば、試験後の試験片を分析することによって定義することができます:

完全破断:試験片が2つ以上のピースに分離する破断。

ヒンジ破断:残留剛性が非常に低いヒンジ状の薄い周縁層だけで両部分と一緒に保持されるような不完全な破断。

部分破断:ヒンジ破断の規定を満たさない不完全な破断。

非破断:破断が無く、試験片が曲がって、支持ブロックまで達する(プルスルー効果)を通して押し出されるだけで、場合によっては応力の白化と組み合わせられます。

シャルピー計装試験(ISO179-2)では、破断の種類は、荷重を時間経過による変位によって分析することによって定義される:

破断なし:破断はなく、降伏に続いて、たわみ限界までプラスチック変形が生じます。たわみ範囲は、試験片の長さや幅、およびサポート間のスパンによって決まる、現象の始まりです。

部分的:降伏に続いて安定した亀裂が発生し、その結果、最大荷重の5%を超えるたわみ制限で荷重が発生します。

強靱:降伏に続いて安定した亀裂が発生し、その結果、最大荷重の5%以下のたわみ範囲の荷重が生じます。

脆性:降伏に続く不安定な亀裂。

ブラシ状破壊:不安定な亀裂とそれに続く降伏。

線形弾性破壊力学

これまでに、機械的特性を理解するために、計装化試験についてご説明しました。これらの測定により、材料の靱性と破断特性を研究することができます。

この破断解析は、試験後の試験片の外観の解析または荷重対変形曲線の研究に基づいています。明らかにこの議論は試験片の解析に満足できる方法ですが、その方法を製造プロセスで一般化することは非常に困難です。

ポリマーから作られた製品は、使用条件において数多くの種類の機械的負荷を受けます。多くの影響因子(ノッチの設計、多軸応力状態等)は脆性破断に影響します。これらは、材料科学の確立されたパラメータを有する試験および測定方法を開発するための幾つかの理由です。

現在、ポリマーを製造・加工する産業は、靱性特性を評価するための非常に限られたメソッドを用いています。形状依存性があるため、従来のパラメータとの互換はありません。

破壊力学は、コンポーネント、ひいては材料においても、亀裂の進展の結果として、破壊が発生すると仮定しています。

それは、亀裂伝播のための条件を調べ、それは、亀裂伝播に対する材料の耐性と同様に、試験片またはコンポーネント(公称応力)に作用する外部荷重と亀裂の形との間の定量的関係を確立することを可能にします。LEFM理論は、き裂先端近傍の応力状態を応力拡大係数 K として表現したもので、Irwinによって初めて導入され、次式で表されます。

$$K = \sigma_N (\pi a)^{1/2}$$

σ_N の公称応力と亀裂長さが含まれます。試験片の長さを W とすると、形状修正関数 $f(a/W)$ を導入することにより、亀裂形状と同様に、コンポーネント、試験片ごとの有限形状に対しても余裕を持たせることができます。:

$$K = \sigma_N (\pi a)^{1/2} f(a/W)$$

この関数 $f(a/W)$ は大量の破壊力学試験片に対して計算されます。

不安定亀裂伝播の開始では、応力拡大係数は臨界値 K_{IC} に達し、破壊または亀裂靱性とも呼ばれます。索引Iとは、下図に示すように、き裂面に垂直に荷重が作用する開口き裂のモードIをいいます。

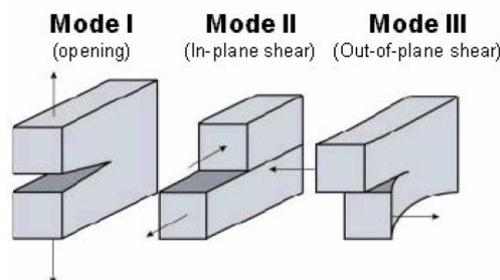


Figure: the different mode of crack opening on the specimens.

この最初のモードでは、技術的に最も大切な荷重の場合の破壊基準は、以下の通りです。

$$K_I \leq K_{IC}$$

臨界値を超えない限り、破壊伝播に対するコンポーネントの安全が確保される場合。

モードII,IIIはせん断またはねじり荷重の場合に生じます。試験片形状に依存して、多くの異なった多軸応力状態がき裂チップの前面に形成されます。垂直応力破壊の観測可能な巨視的増大は、平面応力から平面ひずみ状態への移行から生じます。き裂先端が平面ひずみを受けている全ての場合において、破壊靱性は試験片形状に依存します。靱性に及ぼす材料組織、負荷速度、環境温度の影響を反映しています。

それにもかかわらず、この強力な理論にはいくつかの限界があります。第1の制約は、LEFMは線形弾性材料を必要とし、その中で塑性は亀裂チップの周りの小さな領域に閉じ込められることです。第2の制約は、高速破壊力学を懸念するものである:本理論は準静的近似(材料への波動伝播は無視)に基づいているので、速度が高ければ(1m/秒以上)、KCの評価は煩わしくなります。

線形弾性破壊力学導入への大きな衝撃は、ジョージ・レンジ・アイルウインの寄与によるものであることを覚えておかなければなりません。彼は、1950年代に一般的な問題の1つであった、1つのピースで作られた、リバティーボート本体に生じた亀裂伝播を説明し、予測することができるこの理論を紹介しました。現在では、その基本的な考え方は、航空機、原子炉容器、および他の破壊上重要なアプリケーションの破壊制御のために世界中で使用されています。

亀裂開口変位試験(CTOD)のコンセプト

このメソッドは、延性材料挙動の場合、破壊過程は亀裂開口の重要なプラスチック変形(δ と命名)または亀裂開口変位(CTOD)によって決定されるという仮定に基づいています。

プラスチックゾーンの生成は微細構造に依存し、従って、一般的に有効な形で例証することはできません。

ノッチのない試験片のたわみ量をノッチのある試験片の最大たわみ f_{max} から差し引くことにより、重要なCTODの計算をノッチ先端の全領域に低減しました。

LEFMの概念には、単純な関係式が存在します。

$$K_{IC}^{CTOD} = (m \sigma_y \delta E)^{1/2}.$$

拘束係数 m は実験をして決定した値で材料に依存しています。

J-積分のコンセプト

J-積分は、破壊過程に対するそのエネルギーに基づく手法により、ポリマーに対して有力な意味があります。経路に依存しない線積分は、亀裂先端周辺の弾性変形領域における塑性変形領域とその積分領域を包み込みました。

曲線積分を用いて、取得した荷重対荷重線変位曲線から、異なった亀裂長さの変形エネルギーAGを決定します。AG/B(Bは試験片の厚さ)関係をパラメータの機能として示しました。図式微分法を用います。

$$J = \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial A_G}{\partial a}$$

そして、Jは、荷重線の変位またはたわみの機能として結果をもたらします。

弾性材料挙動の場合、J-積分はエネルギー解放率G(LEFMによって導入された)と同一です。

$$J_I = G_I = \frac{K_I^2}{E} \text{ for plane stress state or}$$

$$J_I = G_I = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) \text{ for plane strain state.}$$

ν は材料のポアソン比です。これらの式は、JIC値からKJ IC値を推定するために使用されます。

J-積分と変位(CTOD)コンセプトの間にも関係が存在します。

$$J = m \cdot \sigma_y \cdot \delta_{IC}$$