

断裂力学在焊接结构中的应用

(译文集)

第一机械工业部哈尔滨焊接研究所

机械工业出版社

断裂力学在焊接结构中的应用

(译文集)

第一机械工业部哈尔滨焊接研究所

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 15 · 字数 367 千字

1980 年 3 月北京第一版 · 1980 年 3 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,000 · 定价 1.55 元

*

统一书号: 15033 · 4579

编者的话

断裂力学的研究虽然可以追溯到二十年代，但它的广泛应用，特别是在焊接结构上的应用，仅仅是近十多年来的事情。

用断裂力学方法来评价材料和结构安全性的主要优越性在于：在实验室试样上所得到的试验数据，可直接和定量地用于工程设计和材料选择。

如果已知平面应变断裂韧性 K_{Ic} 和附加到构件上的应力，就可以计算出足以引起脆性破坏的缺陷的大小；反之，已知存在于构件中的缺陷的尺寸和取向，就可以计算出脆性断裂时的应力。在工程结构中更常见的是疲劳断裂，应用断裂力学方法，可以定量地估算出含缺陷结构的疲劳寿命，为焊接接头的疲劳强度分析提供了有效的手段。

由于断裂常常发源于应力集中或高应变地区，对于工程焊接结构断裂分析中最需要的，是在弹塑性和全塑性条件下，在有角变形、错位、残余应力条件下为了确定裂纹容限所需要的理论分析和断裂实验。

对于设计工作应力很低的某些大型焊接结构（例如船体），由于所用的钢板质量较差，加上户外、高空作业，焊缝质量一般很难保证。从韧度极低的熔合线和热影响区（该处有很高的焊接残余应力）裂纹起始扩展很难免。此外，一些军用结构在承受弹击时起裂也不可避免。这时，必须根据高速传播裂纹的止裂（包括选用具有高动态断裂韧度的母材和使用各种止裂结构，如加肋板等）进行断裂控制。例如，美国在二次大战中全焊接“自由轮”大量脆断事故的一个非常重要的研究结果是：由焊缝高残余应力脆性区即使在很低的工作应力下裂纹起始扩展都是不可避免的。但是，只要所用半镇静 C-Mn 钢板在最低使用工作温度下动态韧度 C_r 冲击值大于 20 英尺·磅，高速传播裂纹就能止裂，该“自由轮”就没有脆断事故发生。这些经验很值得我们注意。近年来这些经验已有理论上的总结和发展。大型焊接结构中裂纹的动态传播和止裂的断裂力学分析已构成断裂力学理论的一个重要领域。

针对上述几方面工程应用的需要，本文集共收集二十四篇文章，其中有些文章比较全面地综述了断裂韧性参量 $\left(K_{Ic}, K_{IIc}, \delta_c, J_{Ic}, \frac{da}{dN}\right)$ 等试验分析方法的新进展；有些文章介绍了动态断裂韧度的测试方法的一些进展。当然，动态断裂试验结果要有工程上的实用价值，这一点还有许多问题有待于研究。例如，不同结构和工作条件下，要求的加载或应变速率是不同的，应如何选定。关于这一问题，本文集中收集的国际焊接学会文献 X-813-76 已有了初步论述，但还不够充分。

本文集可供从事断裂力学研究和应用的广大科技工作者学习参考。由于水平所限，加之断裂力学是一门迅速发展的学科，在编译中难免有不妥之处，敬希广大读者提出批评指正。

参加本文集译校及编辑工作的同志付出了辛勤的劳动，在这里一并致谢。

目 录

编者的话

确定金属断裂韧性的试验方法	1
裂纹的生成和扩展判据	10
受载超过全面屈服的板材的允许缺陷	21
日本对脆性开裂传播的新近研究	27
从三点弯曲试样的载荷-位移单曲线计算 J 积分的不同方程的比较	44
关于动态韧性测量的一些建议	49
关于动态 COD 试验的一些结果	64
如何进行 COD 试验以及在实际中如何应用这些结果	66
评价残余应力场中脆性断裂始发的 COD 方法	76
测定动态 J_0 和 δ_0 值的方法及其在塑性钢中的应用	84
焊接结构的断裂力学分析特点	92
三维焊接结构中疲劳裂纹引起的脆断启裂	97
角焊接头疲劳行为的断裂力学分析	109
热应变脆化对焊接钢板脆性断裂的影响	127
缺口尺寸、角变形和残余应力对高强钢焊接接头脆性断裂起始行为的影响	137
焊接钢结构的脆性断裂始发	140
断裂力学在动力工程中的某些应用	149
核反应堆压力容器钢焊缝热影响区的残余应力松弛和局部脆化	156
断裂力学在锅炉汽包——接管接头上的应用	170
断裂力学在薄壁结构中的应用	176
焊接桥梁结构中缺陷的断裂分析	188
高强钢焊件断裂控制	194
研究结构钢母材、焊缝金属和热影响区得到的疲劳裂缝扩展数据	208
始于焊接熔合线表面缺口的脆性断裂研究	219

确定金属断裂韧性的试验方法

H. T. Corten

【编者按】 本文比较全面地综述了断裂韧性(K_{Ic} , K_c , δ_c , J_{Ic} 等)试验分析方法的新进展, 特别强调测定和应用 R 曲线方法来进行分析的必要性。指出, 在平面应力断裂情况下, 应测出整个 R 曲线来, 才能正确地预测工程结构的断裂。并且, 在平面应变断裂条件下, 应用小型试件测定 J_{Ic} 时, 对如何确定测量点才能正确地预测工程结构平面应变失稳断裂的问题进行了讨论。指出, 选取载荷最高点作为测量点并不成熟和必须注意测量点的工程实用定义。

前 言

当结构件或机械零件在标称应力(毛截面应力)低于或接近屈服极限下使用时, 断裂即为“低应力断裂”。这种断裂起始于构件中的“缺陷”或“裂缝”处。虽然标称应力小于或等于屈服极限, 靠近裂缝前缘的应力和应变却达到最高值, 其数值足以引起快速裂缝扩展的发作。

“断裂韧性”是评价构件抗快速裂缝扩展发作的一种尺度。在快速裂缝扩展发作之前, “亚临界裂缝扩展”常伴随着重复载荷、介质侵蚀或单调地增长的载荷出现。裂缝尖端上的应力强度和应变区, 随着“缺陷”或“裂缝”缓慢扩展而增大。当裂缝尖端的应力和应变区达到临界值时, 快速裂缝扩展发作。断裂韧性试验的目的, 是测定诸如载荷、变形、能量、断裂状态、 K_{Ic} 、 K_c 、 COD 、 J_{Ic} 等参数, 试验最好用小试件进行, 这个试件能反映出实际结构件的快速裂缝扩展。

观察断裂表面引出像“脆性状态”这样的术语, 意即基于宏观观察所确定的垂直于公称拉应力的平面上的分离(平断裂); 如果用显微镜观察, 则指“解理”分离。此外, 如果断裂前通过载荷变形曲线未测出塑性变形, 可以说这种构件则为“脆性行为”。虽然铁素体-珠光体组织“低应力断裂”在状态和行为两方面通常都是“脆性”的, 但这个术语对于高强度(马氏体钢)和有色金属往往是不适用的。

同样, “延性断裂状态”意味着与公称拉应力成 45° 平面分离(斜面断裂), 或者宏观上的“纤维状态”和微观上的“波纹状断裂”。“塑性行为”意味着, 在断裂前的载荷-变形曲线上可观察到塑性变形。

这些术语都是有用的, 并且与“低应力断裂”有关, 但是, 它们与“低应力断裂”并不是同义语。本文对“断裂韧性”中最关心的是它和“低应力断裂”之间的关系。

与常规机械性能的关系

“断裂韧性”在性质上与常规机械性能有关, 特别与强度、塑性和应力-应变曲线下的面积有关。“断裂韧性”与常规机械性能的不同点是: 缺陷或裂缝在裂缝前缘引起严重的应力

和应变集中,这就使“标距”降到最低值,并且(因为高应力和(或)应变梯度)引起接近裂缝边缘区域中的拉应力和应变的多轴状态。“平均正应力”比裂缝所引起的“应力偏量”增加得多。把这种现象称为横向“拘束”。与普通拉伸试验时的延性相比,拘束使延性显著下降。由于难以分析缺陷和裂缝周围的、特别是塑性区中的应力,以及对这些条件下降低延性知识的缺乏,大多数工程技术人员多喜欢采用在不同程度上模拟有缺陷和有裂缝的部件的试件来测定“断裂韧性”。

与使用时断裂构件的关系

当在使用和验证试验中出现“低应力断裂”时,往往发现,除上述因素外,还存在下述一些因素:

- (1) 可以附加到载荷引起的应力上的残余应力;
- (2) 由与制造、热处理或使用有关的某一机理(回火脆性、氢、反复应变或应变时效、辐照等)引起的材料脆化;
- (3) 周围环境的影响,如低温、高的应变速度(特别对于铁素体-珠光体组织)以及有害介质等。

对上述大多数特点已有所认识并研究了多年。断裂韧性试验对于评价和控制材料脆性和周围环境的影响,是特别需要的。虽然这些因素影响着“断裂韧性”,并且在某一项研究中可以成为变量,但其中大多数可以与断裂韧性的测量方法问题分开。

断裂韧性的测量参数

虽然提出了很多参数作为评定断裂韧性的尺度,但这些参数可分为两类。第一类是经验的,它包含一个数量,这个数量可在一个特定的试验中观测到,并且与断裂韧性有关。这一类例子有:构件断裂(却贝、Izod、动载撕裂试验以及其它等)的总能量、断裂外观(纤维状百分数或“结晶状”百分数)、横向膨胀(或收缩)以及相应于能量特定值、断裂外观或横向膨胀的“转变温度”。

对有预缺陷的大型宽板拉伸试件,测量了毛的和净的截面应力以及快速裂缝扩展发作的总能量。根据在一系列温度范围所得的这类结果,可以确定出一个“转变温度”。

有关的一系列试验,可以确定出各种载荷条件下的“止裂”温度。这一类中的首批试验,罗伯逊和埃索止裂试验,首先对特定公称应力下的止裂温度进行了测定。较小的有限变形弯曲试验,即“无塑性转变”试验(NDT),可以确定最高的温度,在这种温度下,始于脆性焊道的小裂缝(引弧尺寸)贯穿NDT试件的母材。

第二类断裂韧性参数,包括在对结构和试件裂缝尖端区域的应力、应变或能量分析基础上确定的参数。如果有一个单独的参数能唯一地说明结构和试件这两种裂缝前缘应力或应变场,这一参数在快速裂缝扩展发作时的临界值对于说明断裂韧性是理想的。这种研究途径,称之为断裂力学方法,已最广泛地应用于小范围屈服(线弹性)状态。 K_{Ic} 的临界值,即表明裂缝尖端应力场的应力强度因子(或裂缝扩展力 G_{Ic}),是测量断裂韧性的一种尺度。当小范围屈服和最大的横向拘束都存在时,单一的参数 K_{Ic} 足以衡量断裂韧性。小范围屈服和

最大的横向拘束，是依“塑性区”的容许尺寸分别与包括裂缝长度在内的试件平面内尺寸和试件厚度相比较而确定的。在下一节中将定量地确定出这些关系。

在韧性较高的情况下，常观察到大范围屈服和极限载荷行为，甚至在存在最大的横向拘束时仍然如此。断裂韧性参数包括：裂缝张开位移（ COD ）或伸长（ COS ） δ （靠近初始裂缝前面出现的现象）和 J 积分。初步试验表明，规定试件的尺寸对于保证这些试件的最大横向拘束是必要的。从钝化裂缝滑移线场中，已找出一个紧靠裂缝前面深埋在塑性区内的“强塑性应变”区作为一个重要的尺寸参量。即使这种“强塑性应变”区深埋在塑性区中，裂缝前面的高塑性应变梯度在这个区域内仍引起了横向拘束。这种强塑性应变区的尺寸大致为 2δ 。初步试验结果表明， $25\delta \sim 50\delta$ 的试件厚度即使对于全塑性屈服仍足以保持最大的横向拘束。此外，初步数据表明，只有当平面内试件尺寸被调节得使控制塑性变形也位于平面内时，才可以测出最小的断裂韧性。

J 积分为 G （裂缝扩展力）的推广。 J 用于研究非线性弹性材料行为（相当于形变塑性理论）。在所研究的一些情况中，从小试件确定的临界值 J_{Ic} ，大体上与采用足以满足 K_{Ic} 尺寸要求的试件所获得的 G_{Ic} 值是相同的。

回到断裂时标称应力低于屈服应力的情况，参数 K_{Ic} 已广泛地作为衡量横向拘束松弛时断裂韧性的一种尺度。由于薄板材料的厚度小于塑性区尺寸及结构或试件（包括裂缝）平面尺寸，其横向拘束接近一低值。塑性区尺寸随横向拘束的减少而加大。类型 I 裂缝，裂缝的少量扩展导致 45° 倾斜开裂。观察得知，尽管裂缝扩展出一增量 Δa ，比先前更长了一些，但裂缝仍能被止住，这可能是因为新的 45° 倾斜裂缝结构比初始的类型 I 裂缝结构更强韧的缘故。在加载试验过程中，在快速裂缝扩展发作之前，对不同材料观察到不同程度的亚临界裂缝扩展。对加载试验过程中亚临界裂缝扩展量很大的材料来说，通常发现，几何形状相似的不同尺寸（厚度相同）的试件，在快速裂缝扩展发作时的 K 值是不同的。 K 的临界值与试件尺寸，特别是与裂缝尺寸的关系还很乱，但是它并不难理解。断裂韧性取决于裂缝尖端前面的塑性变形形式（平面内的与 45° 横向滑移关系）。在亚临界裂缝扩展过程中，横向拘束缩小，变形形式从平面内的变向 45° 横向滑移。断裂韧性受变形形式的这种变化而提高，程度至少与 K 因子因裂缝较长而增加的程度相近。这种讨论直接把 R 曲线作为一种评述断裂韧性的尺度来考虑。

阻力曲线和快速裂缝扩展的发作

“阻力曲线”或 R 曲线并不是新的概念，只是现在才进行定量研究。断裂韧性参数，如 G 、 K 或能量，是裂缝长度的一个函数，用作衡量裂缝扩展阻力的一种尺度。图 1 示有一组三条 R 曲线。这三条曲线表示韧性略微不同的三种不同的材料，或者表示三种厚度（拘束）很不相同的同一试验材料。在后一种情况下，曲线 1 或 1' 适合于具有最大裂缝尖端横向拘束的厚试件，而曲线 3 或 3' 适合于薄材料。

现研究一下具有小的中心裂缝（长度 $2a_0$ ）的大型板试件。为了简便起见，用相当于特殊裂缝长度的 G 值来测定 R 。因 G 为 a 的线性函数，通过原点画短直线与 R 曲线于不同点相交，这些短线表示裂缝长度（在恒定载荷下）少量增长时的 G 变化。对于裂缝扩展超过 a_0 的小的增量 Δa 来说，当这些 G 线很低于 R 曲线时，亚临界裂缝扩展是很有限的。当载荷提高时，

G 线在高 R 值处与 R 曲线相交,最后 G 线恰好与 R 曲线相切。此时,裂缝扩展的任何小的增量 Δa 均导致 G 值大于相当新裂缝长度($a + \Delta a$)的 R 值。因而, G 线与 R 曲线的相切点,标志着快速裂缝扩展的发作和 G_c 值。

在这里再研究一下同材料、同厚度,但在所有平面内尺寸上大两倍的第二个试件。横座标为初始裂缝半长度曲线 $2a_0$,即第二组 R 曲线的开始点。图1所示的第二组 R 曲线,是把第一组曲线沿横座标从 a_0 向右移到 $2a_0$ 绘成的。试验结果表明,平面内尺寸(厚度相同)几何形状相似的试件求得的 R 曲线与水平位移后的曲线几乎重合。当试验第二个试件时, G 线和 R 曲线间的相切点表示快速裂缝扩展的发作。把这两个试验的 G 临界值作一比较可以看出,由于 R 曲线转角处的急速变化, R 曲线1和1'的 G 值几乎相同。反之,对于 R 曲线3和3',材料和厚度相同的两个试件的临界值会有很大的差别。

对于两种不同形状的铝合金薄板试件,采用一种双顺法所得出的典型 R 曲线示于图2。海爾和麦凯布选用 K 值来衡量 R 。因为裂缝扩展 Δa (恒载下)时 K 值下降,裂缝线楔加载试件(Crack line wedge loaded specimen)可以在很宽的 Δa 值范围内测量 R 值。中心开口的拉伸试件(CCT)数据,恰好与CLWL数据类似。用形状不同或尺寸不同(形状相同)的试件所获得的大多数 R 曲线是极其一致的,但是,还需要对 R 曲线进行更多的试验。

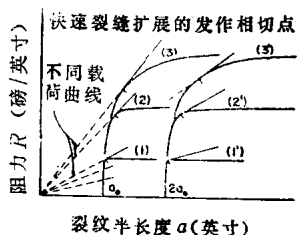


图1 R 曲线简图

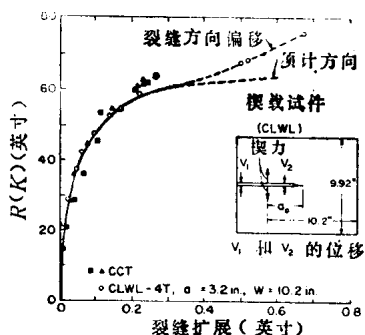


图2 厚1.6毫米7075-T6铝的 R 曲线(RW 方向)

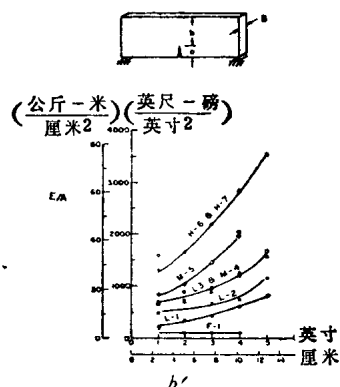


图3 确定表1所列钢种 R 曲线的 b 函数 E/A 简图

第二种类型的 R 曲线示于图3。佩利尼和贾弟选用上限试验的动载撕裂试件完全断裂的单位面积平均能量来衡量 R 值。试件厚度和裂缝形状相同,而试件的未断裂韧带(深度)则是变化的。图3中的数 b 是未断裂韧带。纵座标值 E/A ,为通过未断裂韧带 b 的整个裂缝路径的平均值。试验用钢的机械性能列于表1。F-1钢呈平直断裂,随着未断裂韧带的增加,平均断裂能 E/A 并没有提高;L-1钢呈混合型断裂(接近50%为斜断面),平均值 E/A 略有提高。H-6钢和H-7钢呈100%剪切破坏, R 曲线随着 b 的提高而急速上升。 $E/A-b$ 曲线的斜率随着标准的25.4毫米D.T.试件的上限值的提高而提高。 E/A 的提高,引起剪切唇的增长。此外,剪切唇的增长是试件深度与厚度比的函数。

根据给定材料和厚度的“单一” R 曲线,快速裂缝扩展的发作点,一般来说是构件几何形状(包括裂缝长度、试件的厚度和深度)的一个函数。为了详细说明这一点,符合 K_{Ic} 尺寸要求(小范围屈服和最大横向拘束)的试件行为,是按照图1的曲线1或1'进行的。快

表 1

钢 种	屈 服 强 度 (公斤/毫米 ²)	抗 拉 强 度 (公斤/毫米 ²)	断 面 收 缩 率 (%)	延 伸 率 (%)	DTE 等 级 (公斤·米)
F-1	84	104.3	30	12	41.5
L-1	113.4	129.5	48	14	200.1
L-2	77.7	81.9	53	16	290.8
L-3	127.4	140.7	66	18	400.2
M-4	68.6	75.6	43	17	375.4
M-5	87.5	98.7	61	19	605.8
H-6	100.8	111.3	61	18	917.7
H-7	58.1	68.6	68	24	1006.6

速裂缝扩展是突然发作的,并且几乎与裂缝长度无关。在这种情况下,单一参数 K_{Ic} 足以表征断裂韧性。对于大范围屈服同时保持最大横向拘束的全塑性行为区来说,裂缝扩展的发作是相当突然的。曲线 1 和 2 (图 1) 之间的 R 曲线可以说明这种行为。此外,单一参数 J_I 或 δ_{Ic} 也足以表征断裂韧性。当横向拘束下降时, R 曲线按 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ (图 1) 方向变化。对于这种普遍性的唯一例外,显然是对温度和应变速度敏感的材料,如铁素体-珠光体钢是在低于转变温度或在转变温度范围内试验。快速裂缝扩展的突然发作是应变速度的敏感性所引起的,因为在裂缝扩展的前面的材料所承受的应变速度增加时,断裂韧性就明显下降。对于高强钢(马氏体钢)、某些不锈钢、铝合金和铁素体-珠光体钢(上限值试验),横向拘束的降低使 R 曲线按照 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 方向变化。

现研究一下 R 曲线位于曲线 2 $\rightarrow$ 曲线 3 (图 1) 范围内的钢种,即 L-1 一直到 H-7 (图 3) 诸钢种。在这类钢的大型平板结构中, R 曲线取决于材料韧性和板材厚度;裂缝路径将使全部 R 曲线发展到图 1 中的相切点。相切点的位置取决于开裂构件的深度和载荷(拉伸、弯曲及混合等)情况。为了进行能反映使用条件下的韧性的断裂韧性试验,在实验室试件中要求合理地模拟使用部件的行为。要求 R 曲线从材料的实际使用厚度的试件中获得。为了达到有效的目的,对于所用的形状,要求所获得的 R 曲线必须达到相切点。从 25.4 毫米板厚的图 3 数据来看,用冲击弯曲试件获取适宜 R 曲线可能需要 102~127 毫米“裂缝路径”(亚临界裂缝扩张)。佩利尼和贾弟所作的其它“低能量冲击”试验表明,在“裂缝路径”等于或大于 76.2 毫米时, L-1 和 H-6 钢的 R 曲线开始变得平直。如果进行试验的试件“裂缝路径” b 小得无法适当地模拟结构形状(假设厚度相同),断裂韧性值(不管采用何种韧性参数)将低于实际应用中能实验的数值。对于特殊的用途和材料,为了控制质量而采用的这类试验,很适于预定的目的。但是,当试验的目的是为同一任务选择和鉴定高强度金属的适用性时,如果采用的试件不能适当地模拟结构形状的 R 曲线时,就容易得出不可靠的结论。

表 1 和图 3 中的 L-1 和 M-5 钢,只是热处理不同。为了比较,假设在一种结构中出现的快速裂缝扩张,对这两种材料来说“裂缝路径” b (未断裂韧带)都相当于 102 毫米。同样,假定用“裂缝路径” b 为 25.4 毫米的试件测量韧性,从图 3 可知,从实验室试验求得, M-5 和 L-1 钢的单位面积能量分别约为 17.13 公斤·米/厘米² 和 5.35 公斤·米/厘米²。M-5 和 L-1 钢结构的实际韧性,将分别达到 42.84 公斤·米/厘米² 和 12.85 公斤·米/厘米²。虽然实验室测定的韧性比值与实际使用韧性比值几乎相等,但是很难规定必要的质量控制标准来保证在使用时不发生断裂的相同安全性。

至于“裂缝路径”，未断裂韧带小于厚度的标准却贝 V（或小孔）缺口试件，对于测量旨在模拟快速裂缝扩展发作为在 R 曲线上部的大型板结构的断裂韧性，是不适宜的。对于很多韧性金属来说， R 曲线位于图 1 中曲线 2 和曲线 3 之间的区域。有裂缝的结构，可能是呈大剪切唇或全倾斜断裂面的 45° 全厚度塑性变形。与此相反，却贝试件的变形主要是在平面内，并趋向于平面应变滑移线型。此外，根据断裂板结构厚度的不同，却贝试件中的横向拘束程度不可能与快速裂缝扩展发作为时结构的拘束程度相同。如果炼钢和轧钢的方法不同所引起的全厚度（短横向）的不均匀性在确定平板韧性中起着重要作用，则结构的行为（ 45° 全厚度变形）和小试件行为（平面内变形）之间的差别可能是相当重要的。 R 曲线测量断裂韧性的某些重要概念示于图 4。

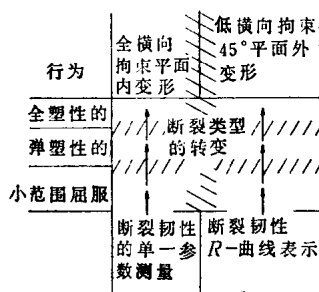


图 4 断裂行为简示图

测 量 点

讨论 R 曲线时， G 曲线和 R 曲线之间的相切点，被记作快速裂缝扩展发作为点。在低横向拘束情况下（图 4），最好采用能得出大范围 R 曲线的试件。根据开裂结构的分析，可以把 G 曲线附加到 R 曲线上，来估计结构件中将出现的断裂韧性。

现在来讨论全拘束的情况，结构在低应力和接近屈服极限下断裂时快速裂缝扩展的发作为是相当突然的。当采用小试件测量韧性金属的断裂韧性时，这种金属的行为为弹-塑性的，常常是全塑性的。随着小型弹-塑性试件的快速裂缝扩展，许多变形型试验机的高刚度导致快速卸载和止裂。当试验继续进行，这个过程可以反复出现几次。这就有一个问题，在缓慢上升的载荷-变形曲线中的这些小的不规则变化中间究竟哪一个对结构断裂是起作用的。对于曲线 1 和曲线 2（图 1）之间的 R 曲线，裂断前缘的一部分常常向前移动，为裂缝的亚临界扩展提供一个微小增量。当与裂缝扩展和止裂有关的载荷变形曲线的不规则性较小，其大小相当于记录系统中的电干扰时，载荷-变形曲线本身所提供的数据不适于确定裂缝扩展的发作为。这个问题要求用其它方法确定快速裂缝扩展的发作为，要注意测量点的“工作定义”。

当采用引起最大横向拘束和一般全塑性铰链试件试验高韧性的金属时，快速裂缝扩展的发作为可能延迟到最大载荷点或超过最大载荷点之后。从图 5 所示 1T-CT 试件的载荷-变形曲线（或 $M-\theta$ 曲线）可以看出，当变形为弹性位移达到 2~10 倍的位移时载荷趋向一个恒定的最大值。这些曲线是从原始的记录中仔细地复制的。位移再增大时，载荷稍有降低。对于紧凑拉伸试件或带缺口的梁试件，应变硬化会提高弯曲力矩，但是，当变形增加时是以低速增加。膨胀（压缩侧）和收缩（拉伸侧）改变缺口截面的形状并且使中性轴移动，但是，对弯曲力矩不应该有影响。对于带裂缝或尖缺口的梁，其全塑性弯曲力矩拘束度，因缺口变钝而下降。如采用格林和亨德试验结果并假定裂缝开口伸长 δ 等于根部半径的两倍，则力矩可能降低到 5%。拘束度的降低

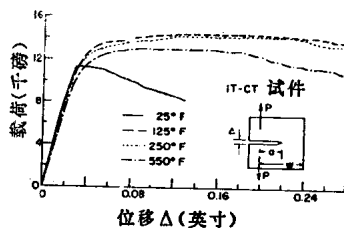


图 5 A 533 B 钢 1T-CT 试件在四种温度下的载荷-变形曲线

可能是造成几条曲线水平部分较长的原因,并有可能导致图5中载荷的初期下降。此外,明显的可能性是裂缝扩展的微小增量使载荷保持恒定,而最终是使载荷下降。

对锻钢的观察表明,梁试件的开裂恰好在圆形曲线的最大载荷点之后发生,或恰好在超越顶部平直的载荷-偏斜曲线的水平部分时发生。对中心开裂的拉伸构件(平面应变)来说,裂缝扩展大约在超出最大载荷点时发生。1T-CT结构钢试件的最近试验表明,对于 $a/W=0.5$ 的试件裂缝扩展的发作,在最大载荷点之后;而对于 a/W 在 $0.6\sim 0.9$ 范围内的试件,则发生在载荷-偏斜曲线上上升部分上的较小位移侧。这些情况表明,选择最大载荷点作为测量点尚不成熟。

尺寸参数

对断裂试验中的尺寸效应,已观察了多年。对于小范围屈服,通过应力强度因子 K (或 G)引入裂缝长度 a ,说明了主要的尺寸作用(裂缝长度)。下面便是厚度 B 的合理值,因为影响着横向拘束。欧文在没分析弹-塑性三维应力的情况下,采用了尺寸参数概念。欧文把塑性区尺寸 $2r_y$ 作为小范围屈服的一个重要尺寸。确定塑性区尺寸的公式为:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1)$$

式中 K_I 为应力强度因子, σ_y 为相当的屈服极限。平面应力条件,采用 0.2% 屈服极限 $\sigma_{y,0}$ 。对于平面应变条件,拘束使屈服极限整个厚度的平均值提高到约为 $\sqrt{3}\sigma_{ys}$ 。

欧文指出,当塑性区尺寸 r_y 比裂缝尺寸 a 小时, K 可能成为一个有效的断裂韧性参数。此要求可以只用一个“线弹性应力分析”术语,来说明裂缝尖端应力区。美国材料试验学会用这个概念来确定平面应变 K_{Ic} 试验的裂缝长度经验性条件:

$$a \geq 2.5(6\pi)r_y = 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2)$$

欧文用类似方法鉴定了“厚度断裂形式转变”的中间范围发生在:

$$2r_y = B \quad (3)$$

一种钢和一种铝合金的 (K_c/σ_{ys}) 具有的 $\left[\frac{B}{(K_c/\sigma_{ys})^2} \right]$ 比率的变化情况,示于图6。

由于各向异性的不同,对薄截面($4B \sim 2r_y$)断裂韧性 K_c 增至 K_{Ic} 以上,并不一定达到图6所示的数值。

为获得全横向拘束,厚度 B 必须大于美国材料试验学会试验确定的方程式(3)给出的数值。

$$B \geq 2.5(6\pi)r_y = 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (4)$$

在方程式(2)和(4)中, r_y 为塑性区尺寸,与全拘束引起的平均屈服极限有关。

克拉夫特等认为必须采用与裂缝前缘断裂过程有密切关系的、因而比塑性区小得多的附

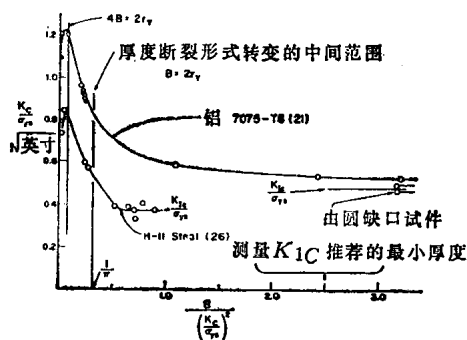


图6 小范围屈服行为的厚度断裂形式转变

加尺寸参数。力学分析证明, 求定弹-塑性材料的韦尔斯参数 (裂缝开口伸长 δ) 的公式为:

$$\delta = \alpha \frac{G}{\sigma_y} = \alpha \frac{K^2}{E \sigma_y} \approx \alpha \frac{J}{\sigma_y} \quad (5)$$

虽然精确的分析证明, $\alpha \rightarrow 0.5$, 但是对这里采用的尺寸考虑, α 将为 1.0。 δ 不仅表明靠近裂缝尖端的裂缝面的分离, 也表征在“钝化”裂缝路径内的“强应变”区的尺寸。因为在此区内存在大的平面内应变, 因而有一个剧烈的厚度收缩倾向。经受着小的塑性应变的周围的材料, 拘束着横向收缩并增加着平均正应力。

对于全塑性平面应变行为, 裂缝周围的滑移线场表明不同的试件形状, 其平均正应力的提高差别很大。因而, 甚至对于平面应变条件, 当平均正应力变化时, 为了充分地说明构件的断裂韧性, 除断裂韧性参数之外, 料想还需要一个“平均正应力参数”。采用厚的中心开裂拉伸试件和有缺口的梁时, 锻钢的数据并未表明需要第二个参数证明: 每个试件均在基本上相同的 J_{1c} 值时在全塑性条件下断裂。这个问题需要进一步弄清。

断裂韧性行为的定性模型示于图 4。采用塑性区尺寸 r_y 和试件尺寸, 划出具有全横向拘束的小范围屈服区。下一步显然需划出图 4 中的其它区域。

图 4 中的最初划分是在变形和分离的两个裂缝尖端类型之间, 即平面内塑性变形 (类型 I) 和综合了类型 I 及 III 的 45° 平面外塑性变形。试件的重要尺寸是厚度 B 和未断裂韧带 b 。对于加载到弹-塑性及全塑性区的有缺口的梁试件和拉伸试件, 在 $B \approx b$ 范围内便发生转变。 $B > b$ 促进了平面内塑性变形和类型 I 裂缝扩展。梁试件和拉伸试件的初步试验数据证明, $B = 2b$ 足以造成基本上是平面内变形类型 I 断裂行为。相反, $B < b$ 则助长着 45° 平面外塑性变形和 I 和 III 综合类型的裂缝扩展。为了造成全倾斜断裂, 可能要求 $3B \sim \Delta a$ 。式中 Δa 为亚临界裂缝扩展。因此, 为了在全塑性区中形成完整的 R 曲线, 一般要求 $B \ll b$ 。

对于平面内弹-塑性和全塑性行为, 全横向拘束是以 B 和 δ_{1c} , 即以强应变的裂缝尖端部尺寸来说明的。用小范围屈服进行类推, 帕里斯认为, 当

$$25\delta_{1c} \leq B \leq 50\delta_{1c} \quad (6)$$

在弹-塑性和全塑性范围内将获得全横向拘束。进一步证实这个条件的工作正在进行中。

疲劳预裂却贝试件 ($a/W = 0.5$, $B/b = 2$) 和 1T-CT 试件 ($a/W = 0.5$, $B/b = 1$) 在小范围屈服和全塑性区内, 测量全横向拘束的能力示于图 7。很明显, 当容许全塑性行为和采用 δ_{1c} 或 J_{1c} 作为断裂标准时, 这两种试件测量横向拘束的能力有了明显的增高。对于高于图 7 测量能力的韧性, 这些试件所给出的韧性值偏高。值得提出的是, 图 7 中所采用的 $\alpha = 50$, 也许是保守的 α 值。看来, 甚至在采用低屈服强度高韧性金属时, 其中一个试件能够测出足以保证大多数结构安全的断裂韧性。

由于却贝试件试验的新发展: ①有较深裂缝 ($a/W \rightarrow 0.5$)

的疲劳开裂试件; ②记录载荷和变形与随时间的变化关系的仪器, 使得类型 I 全横向拘束断裂韧性的定量测量有希望取得重大进展。看来, 放大二、三倍的疲劳预裂却贝型试件, 有可能包括低强度高韧性金属的整个韧性范围。对于低于和处于转变温度范围的测量, 冲击试验仍

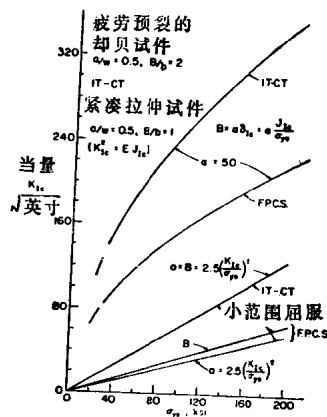


图 7 疲劳预裂却贝试件和紧凑拉伸试件全横向拘束的测量能力

然是测量铁素体-珠光体和低强度回火马氏体钢的韧性和“转变温度”的一个重要方法。对于应变速度不敏感的金属（有色金属、奥氏体不锈钢、沉淀硬化钢等等），在转变温度以上的铁素体-珠光体钢以及马氏体钢，缓慢弯曲和拉伸试验似乎是更合适的。

对于 45° 平面外变形范围（具有低横向拘束的类型 I 和 III），发展了适于从小范围屈服到全塑性行为的整个范围测量 R 曲线的方法，以便对不同厚度的若干金属广泛地研究 R 曲线。海尔和麦凯布在全塑性范围内观察到用特定尺寸的试件可测量的 R 曲线平顶的高度有一个界限。甚至当 $b \gg B$ 时，曲线平顶的高度因 b 的提高而提高。目前， R 曲线测定是相当成熟的。研究的另一个目的，应该是：一旦确定了行为的类型，拟制测定 R 曲线的简化方法。

根据小范围屈服结果预计，低拘束断裂韧性在某些厚度范围内，将出现峰值韧性。对于小范围屈服，这种峰值大约 $4B = 2r_y$ 时出现。应研究弹-塑性和全塑性区内的峰值位置和宽度。

从断裂韧性观点来看，相应于这种峰值韧性的厚度范围，是采用某一特定金属的最有效的厚度范围。在设计中可以考虑峰值韧性的厚度范围，其中包括某一特定金属材料 and 截面厚度的选择。

将韧性测量至少分作两类，即平面内全横向拘束（类型 I）和平面外低横向拘束（类型 I 和 III），显然，结构上的应用必须指导适宜的测量方法的选择。模拟机器或结构在使用时预期的变形和断口分离的特征来设计试件，是一个进步。再则，用成熟的技术（装有测试记录仪表的试验）和断裂韧性参数（ R 曲线、 δ_{1c} 和 J_{1c} ）扩大定量分析。与此同时，为解释更简单、更廉价的质量控制试验打下一个良好的基础。

（黄静文译自《Dritte Internationale Tagung über den Bruch》；田锡唐校）

裂纹的生成和扩展判据

〔匈牙利〕 LESLIE F. GILLEMOT

【编者按】 本文试图用拉伸试验得出的断裂区中断裂前消耗的临界比断裂能 W_c 来统一地给出拉伸、压缩、应变疲劳以及裂纹起始扩展的临界条件。认为：当反映材料特性的这个临界比断裂能 (W_c) 被吸收后，上述各种情况下的断裂即开始。这曾经是早期断裂力学工作者多次设想的简单图象。但是，拉伸时的塑性断裂是由塑性孔坑形成和会合决定的，而应变疲劳是微裂纹形成和扩展过程，这种疲劳裂纹的扩展一般并不由塑性孔坑形成和会合引起。因而两种断裂的机理完全不同。用光滑试件或钝切口试件测出的临界比断裂能 W_c 并不能用来预测裂纹的扩展。因为两种情况下断裂区中的应力状态并不相同，而应力状态对 W_c 有显著的作用。特别是由于应力状态不同，断裂机理也会发生根本变化。例如，在转变温度区间，用光滑拉伸可能得到塑性孔坑形成和会合引起的塑性断裂，而在裂纹尖端三轴张应力状态下，则将发生准解理断裂，后者 W_c 要低得多。即使同是塑坑型断裂，由于应力状态对塑坑的扩大和会合有显著影响，因而两种情况下的 W_c 也很难总是相等。

摘 要

在拉伸试验的条件下所测定的真应力-真应变图的面积，等于在断裂点单位体积吸收能。在拉伸的情况下，以及其他加载测试，如压缩，低周疲劳等，当反映材料特性的临界比断裂能 (W_c) 被吸收后，一个扩展的裂纹开始生成，从而可以推导缺口试样的比例定律。缺口拉伸试样的比断裂能为温度的函数，它将能描述材料的脆性断裂敏感性。从缺口试样的比断裂能，可以求出断裂韧性和临界能量释放率。本文所述方法，也可以用来确定焊接接头的脆性断裂敏感性。

符号

A —— 面积
 F —— 力
 δ —— 真应力
 ϵ —— 真应变
 R —— 断面收缩率
 Δl —— 伸长量

$A \dots R$ 的注解

O —— 起始条件
 m —— 在最大载荷下 F_m
 F —— 在断裂点
 Y —— 屈服
 W —— 单位体积功

W_c —— 直到断裂所吸收的比断裂能 (功)
 W_m —— W 的平均值
 K_c —— 断裂韧性
 G_c —— 临界能量释放率
 ρ —— 缺口半径
 L —— 塑性区的高度
 b —— 塑性区的尺寸
 u —— 试验机的加载速率
 $\dot{\epsilon}$ —— 应变速率
 k —— 常数
 c —— 常数
 ΔE —— 内能增量

前 言

最初, 断裂力学只应用于高强材料, 所以对于屈服强度小于70公斤/毫米²的钢材, 线弹性断裂力学的概念不能沿用。这就是为什么要寻找一个扩展的裂纹何时起始的判据和线弹性断裂力学认为裂纹总是存在的这一出发点稍有不同, 必须假定在低强和中强钢中扩展裂纹的起始是关键的过程。在材料中没有出现裂纹之前, 吸收能显然与体积有关, 与表面无关。本文的目的是要演示: 扩展裂纹起始的判据就是单位体积吸收能达到了反映材料特性的临界值。如此定义的比断裂能 W_c , 就是裂纹起始扩展的判据。断裂力学中所用的其他材料特性值, 如能量释放率的临界值、断裂韧性和裂纹张开位移 (G_{Ic} , K_{Ic} , COD) 都可以从临界比断裂能 W_c 很容易地求得。

由于本文要论及若干互相联系的现象, 所讨论的试验的定向在一定程度上受 A. M. Freudenthal 教授一本著作的影响。

“研究可变形物体力学的途径取决于结构元集聚所处的水平, 针对这一水平分析其力学行为。元的集聚可分为三个级, 研究途径可以针对其中任何一种, 即:

(1) 大范围的或唯象 (工程的) 级: 在这一级材料被认为是连续的和均质的, 是由具有有限尺寸的等同体积元所组成的。

(2) 结构级: 在这一级材料仍被认为是连续的, 但是非均质的, 是由具有不同性质和有限 (宏观的或微观的) 尺寸元所组成, 这些元连续地布满空间。

(3) 原子级或分子级: 在这一级材料被认为是不连续的……。”

“不同级上的行为互相联系, 只有通过一种概念才有可能, 即在牛顿和统计力学, 相同的尺度和相同的张量级这两方面在所有级上具有同样的意义。

这个概念就是能量。它是一个标量, 即零级的张量, 它是一个代数相加的数量, 并且在集合形成的各种级上都具有相同的意义。”

在材料的试验中, 材料通常是用应力、应变或断面收缩率等指标来表征的。虽然早在20世纪的初叶就引进了单位体积吸收能这种类型的指标, 但从来没有被普遍接受过。

用拉伸试验测定比断裂能

在变形中, 单位体积吸收能是

$$W = \int \frac{F \cdot dl}{V} = \int \frac{F \cdot dl}{A \cdot l} = \int \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中 F 是力, dl 表示试样标距的变化, 而 V 指明与能量相关的那个体积。选择一个 A 横截面和拉伸试样颈缩区的长度 l , 如图 1 所示。以此体积代入方程 (1), 就会发现: 如果方程

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2a)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2b)$$

考虑进去的话, 单位体积吸收能就是以真应力-真应变作拉伸图所围的面积。图 2 是一种钢的真应力-真应变所作的拉伸图, 式中注脚 F 标明在断裂点的应力和应变, 注脚 m 标明在最大作用力时的应力和应变, σ_y 则是在屈服极限的应力。假如体积元是选择在断裂横截面, 而且根据方程 (2) 测定那里的断裂应变 ε_F ,

定义 (1) 的积分是在 $0 - \varepsilon_F$ 范围内, 达到断裂所吸收的比能可以通过下式得到:

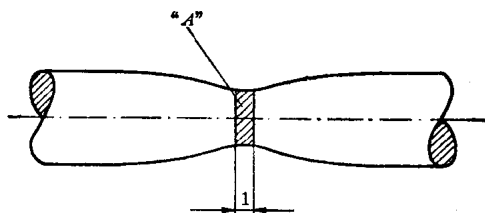


图 1 单位体积吸收能的测定

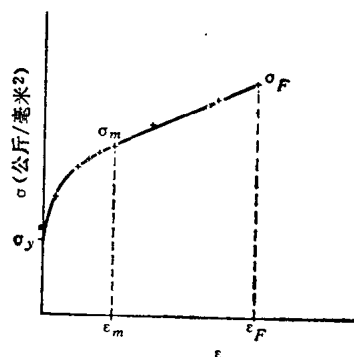


图 2 碳钢的真应力-真应变图

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_F} \sigma d\varepsilon \quad (3)$$

因此, 比断裂能等于以真应力-真应变作拉伸图所围的面积, 以后将用 W_c 表示之, 因为, 将在以下证明, 它就是伴随着扩展裂纹起始的临界值。

更进一步, 如上面所定义的, 在测定达到断裂所吸收的比能中, 真应力和真应变是通过所选择的横截面测定直径求得的, 在方程式 (2 b) 中的应变测量长度可以作为无限小, 因此, 由方程 (3) 所定义的比断裂能是与一个无限小的体积相关。

比断裂能的一种测量方法, 就是作出真应力-真应变图。这就需要测定在拉伸试验中试样每一个时刻的最小横截面。这个图的面积等于达到断裂所吸收的比能。代替这种冗长程序的更可取方法是计算比断裂能的数据可以从拉伸图中读出, 而且应变可以在断裂之后用直径和面积测量确定。计算可以从两个稍为不同的假定出发。

MacGregor 认为, 从最大作用力 σ_m 直到断裂应力 σ_F 区间真应力-真应变是一条直线关系, 如图 2 所示; 而 Körber 和 Rohland 则认为在同样范围内, 真应力与断面收缩呈直线关系。这两种假定实质上是相同的, 因为从体积不变原理, 得出断面收缩率 (R) 和达到同样变形的应变 (ε) 之间的关系是:

$$R = 1 - e^{-\varepsilon} \quad (4)$$

将指数项用级数展开, 就看出当 ε 值小时, Körber-Rohland 和 MacGregor 假定是相等的。根据我们自己的测量, 对于断裂应变 (ε_F) 和在断裂点的断面收缩率 (R_F) 都颇大的材料, Körber-Rohland 假定看来更为可取。由图 2 不需要任何特别证明, 可以清楚地看出, 如果真应力对真应变的函数关系为一条直线, 在 $\varepsilon_m - \varepsilon_F$ 范围内的最大强度将按照下面公式:

$$W_c = (\sigma_y + 2\sigma_m) \frac{\varepsilon_m}{3} + \left(\frac{\sigma_m + \sigma_F}{2} \right) (\varepsilon_F - \varepsilon_m) \quad (5)$$

如果 ε_F 小于 1.3, 那么方程 (5) 可以相当准确地用下式代替:

$$W_c \cong \frac{\sigma_y + \sigma_F}{2} \cdot \varepsilon_F \quad (6)$$

在方程 (5) 中, 由 $0 - \varepsilon_m$ 这一段的计算假定了二次抛物线的形式, 而在 ε_m 和 ε_F 之间, 真

应力对真应变的函数是一条直线。另一方面, 如果真应力对断面收缩率的函数假定是一条直线, 则我们得到

$$W_c = \left(\frac{\sigma_y + 2\sigma_m}{3} \right) \epsilon_m + 2\sigma_m (\epsilon_F - \epsilon_m) + \sigma_m (e^{\epsilon_F - \epsilon_m} - 1) \quad (7)$$

式中 在 $0 - \epsilon_m$ 这一段也和方程 (5) 一样用抛物线来代替。当断裂载荷 F_F 可以相当准确地测量, 从而 σ_F 能够求得时, 方程 (5) 和 (6) 是最好用的。但是, 即使断裂点的载荷不能确切地确定, 方程 (7) 还是可采用的, 因为在方程 (7) 中从出现最大载荷起直到断裂点这一段的方向正切是根据这样的假定确定的, 即在前一点有

$$(d_F = 0)_{\epsilon = \epsilon_m}$$

按照方程 (7) 计算的比断裂能和用图解法所确定的值相差最大为 2.5%, 用方程 (5) 和 (6) 所得到的值与方程 (7) 计算的值之间的差别, 如果 ϵ_F 小于 1.3, 也是不明显的。达到断裂所吸收的比能在很大的范围内不取决于试样的尺寸, 但是却取决于试样表面光洁度。计算或图解法必须考虑到, 有些材料对真应变或断面收缩率的真应力图都会有某些偏离直线, 在断裂前的瞬间曲线呈现向上弯的特征。Körber 和 Rohland 也曾发表这样的图。这些图的向上弯曲的特征是由于拉力试验机的硬度不够, 但是假如拉力试验机的弹簧系数是 $f = 6000 \sim 8000$ 公斤/毫米, 颈缩区的载荷测量将同样是正确的。另一方面, 在断裂点具有过高断裂应变 ϵ_F 的材料, 即使拉力试验机的弹簧系数是满意的, 这种向上弯曲的特征也会出现。

MacGregor 指出, 在拉伸试验中, 在试验机的加载速率为常数时, 比应变速率不是均匀的。根据 Czoboly 的测量, 试样的伸长量 (Δl) 起初实际上是均匀的, 但是这种均匀变形在达到最大载荷 (F_m) 之前就完成了, 接着就是在某一点开始颈缩, 而其他地方, 试样的几乎是均匀的应变仍在继续。这第二个过程是很短的, 而且试样的伸长仅由颈缩的应变引起。测量表明, 颈缩产生的伸长与试样的原始直径 (d_0) 以及断面收缩率 R 有如下关系:

$$\Delta l_n = C d_0 \frac{R - R_m}{1 - R_m} = K d_0 (R - R_m) \quad (8)$$

在拉伸试验中所引起的情况如图 3。如果垂直轴表示在拉伸中测量的力 (F), 或试样的伸长量, 横轴表示同一个试样每一时刻最小直径所计算的断面收缩。图 3 显示出在均匀应变完成之后和纯粹收缩开始之前, 有一个过渡区, 它的位置多少与最大载荷点重合。这意味着适应于最大载荷的应变 ϵ_m 并不总是恒等于均匀应变。因此, 在方程 (6) ~ (8) 中, ϵ_m 总是和最大载荷相联系的, 如果离开断裂点还远确定了一个 A_m 横截面, 则 ϵ_m 可用下式确定

$$\epsilon_m = \ln \frac{A_0}{A_m}$$

图 3 还同时示出方程 (8) 的关系。

假如在拉伸试验中可运动的夹头的速度

是一个常数 U , 在均匀应变阶段 (译者注: 此处应变指颈缩之后) 应变速率 $\dot{\epsilon}$ 决定于原始的

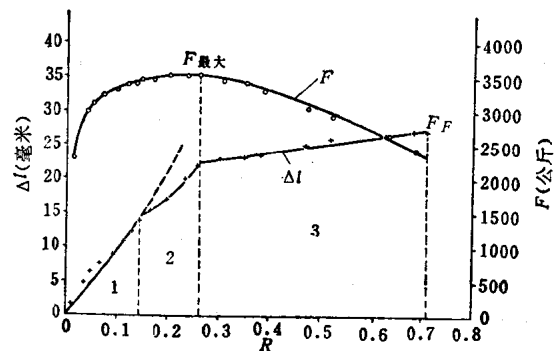


图 3 拉伸试样的力和伸长量作为断面收缩率的函数