

小冲孔微试样材料 性能测试技术及应用

凌祥 郑杨艳 周建新 编著



科学出版社

南京工业大学学术专著出版基金资助

小冲孔微试样材料性能测试 技术及应用

凌祥 郑杨艳 周建新 编著

科学出版社

北 京

前 言

小冲孔试验（又称小冲杆试验，small punch test, SPT）技术诞生至今已近30年，期间在理论和应用研究等方面都发展迅速，并逐渐成为相关领域国际研究的热点之一，受到国内外众多学者的广泛关注。

石油化工、热电、航空航天和核电等行业中金属构件的服役环境恶劣，如高温、辐射、腐蚀等，安全性要求很高，使得在役构件寿命评价的研究日益重要。传统的无损检测方法和取样试验方法都具有不足之处：前者简单、易操作，但所得数据不够精确；后者方法可靠，但由于取样尺寸较大必然导致设备遭受巨大损伤，引起使用年限的缩短甚至直接报废，反而得不偿失。

小冲孔试验技术是一种采用微小试样评定材料力学性能的新测试方法。与传统拉伸试样方法不同，该方法兼具“取样方便”和“几乎无损”的双重优势，非常适用于那些无法取出传统试样或取样不经济的场合，使通过取样无损评价在役构件的剩余寿命成为可能。小冲孔试验技术在屈服强度、抗拉强度、韧-脆转变温度、断裂韧性和高温蠕变等领域都取得了长足发展，并推动了相关学科的发展。因此，小冲孔试验技术不仅仅是一种简单的测试方法，也是一种重要的科学研究手段。可以预见，随着计算机技术及测试技术的发展，小冲孔试验技术的研究将会取得更多的成果，并将对科技发展发挥重要作用。虽然小冲孔试验技术在理论和应用等方面已经取得了重要进展和成绩，但仍处在快速发展阶段，与传统拉伸试验等其他测试方法相比理论体系还不完善，而且在一些领域的应用尚处在探索和发展阶段。因此，小冲孔试验技术的研究和发展需要更多的关注和支持。

近年来，国内越来越多的学者对小冲孔试验技术产生了浓厚兴趣，但目前国内外未见相关参考书籍，在与同行交流时，我们深深感到该领域迫切需要一本专著。本书紧紧结合国内外的材料测试技术发展方向和国内的社会战略需求，针对SPT的研究现状，结合作者多年来在该技术领域所积累的研究心得与研究成果，详细阐述了SPT（常温、高温蠕变）的试验系统、试样制备、试验操作、试验结果处理及应用，并指出目前该技术存在的主要问题及解决方案；分析了该技术在各个工业领域的应用并预测了该技术的发展方向。

本书适用于从事材料力学性能研究相关工作的各大专院校和科研单位的科研工作者、工程技术人员和研究生使用和参考，也可作为相关领域培训教材和有关专业教学参考书。对小冲孔试验技术感兴趣的人员，本书可以作为入门的学习材

料，帮助初学者快速上手。

本书汇集了笔者在小冲孔微试样测试技术领域十几年的研究成果。南京工业大学郑杨艳、周建新、杨正、杨思晟参与编写了本书相关章节。全书的统稿、审稿和定稿工作由凌祥教授完成。本书的出版得到了华东理工大学、北京大学和东南大学等单位有关专家的大力支持和帮助，同时，南京工业大学陈玉新、尤英俊、钱珍梅、胡若美、周志祥、杜鹏及江苏省产品质量监督检验研究院袁彪教授级高工等对本书相关内容的研究做出了贡献，在此一并表示衷心感谢！

本书内容的研究得到了国家自然科学基金面上项目（50275072）资助，同时本书的出版得到了南京工业大学学术专著出版基金的资助，在此表示衷心感谢！

尽管在本书编写过程中倾尽全力，但由于小冲孔微试样测试技术还处在研究和发展阶段，同时由于作者水平及学识有限，书中不足和疏漏之处在所难免，欢迎广大读者提出宝贵意见，以期共勉！

凌祥

2012年2月于南京工业大学

E-mail: xling@njut.edu.cn

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 小冲孔试验技术原理	2
1.2 小冲孔试验技术的发展状况	3
1.2.1 基本力学性能	3
1.2.2 韧-脆转变温度	6
1.2.3 断裂韧性	7
1.2.4 蠕变性能研究及寿命预测	11
1.3 数值模拟在小冲孔测试技术研究中的应用	14
1.3.1 直接有限元法	14
1.3.2 反向有限元法	15
1.3.3 有限元结合反方法	15
1.3.4 人工神经网络结合反向识别	16
参考文献	17
2 小冲孔试验系统	22
2.1 小冲孔常温试验系统	22
2.1.1 夹具和冲杆	22
2.1.2 冲头	23
2.1.3 万能材料试验机	24
2.1.4 位移传感器	25
2.1.5 数据采集处理	26
2.1.6 电加热炉及温控系统	26
2.1.7 高温惰性气体保护系统	27
2.2 小冲孔蠕变试验系统	27
2.2.1 加载部分	28
2.2.2 加热及温控部分	30
2.2.3 高温气体保护部分	33

2.2.4	测量部分设计	33
2.2.5	数据采集和信号处理	36
2.2.6	小冲孔蠕变试验系统台架	37
2.2.7	小冲孔蠕变试验系统的调试	38
2.2.8	小冲孔蠕变试验系统的操作	39
	参考文献	39
3	小冲孔试样制备	41
3.1	小冲孔试样取样	41
3.1.1	取样方法	41
3.1.2	取样要求	45
3.2	小冲孔试样制备	45
	参考文献	49
4	小冲孔常温试验研究	50
4.1	常规拉伸试验	50
4.1.1	应力-应变曲线	50
4.1.2	屈服强度的确定	52
4.1.3	抗拉强度的确定	53
4.2	小冲孔试验	54
4.2.1	试验材料	54
4.2.2	试验条件及结果	57
4.2.3	试验重复性分析	62
4.3	屈服强度测试	63
4.3.1	双斜率法	64
4.3.2	偏移法	65
4.3.3	能量法	67
4.4	抗拉强度测试	73
	参考文献	74
5	小冲孔常温试验有限元分析	75
5.1	塑性损伤基本理论	76
5.1.1	塑性损伤的定义	76
5.1.2	塑性损伤分析方法	76
5.1.3	塑性损伤模型	77
5.2	有限元数值模拟	82
5.2.1	真实应力-应变数据	82
5.2.2	GTN 模型参数	83

5.2.3 有限元模型	83
5.3 有限元模型的合理性分析	84
5.3.1 试验与模拟载荷-位移曲线比较	84
5.3.2 f_N 对载荷-位移曲线的影响	85
5.3.3 网格划分分析	85
5.3.4 试样杯突和破断位置比较	87
5.4 损伤在试样中的演化和分布	88
5.4.1 损伤在试样中的演化	88
5.4.2 孔洞率和等效塑性应变之间的关系	90
5.5 影响因素分析	93
5.5.1 摩擦系数对试验结果的影响	93
5.5.2 试样厚度对试验结果的影响	95
5.5.3 压球直径对试验结果的影响	98
5.5.4 下模孔径对试验结果的影响	100
5.5.5 加载速度对试验结果的影响	102
5.6 影响因素优化分析	104
参考文献	105
6 小冲孔蠕变试验研究	108
6.1 蠕变的基本理论	109
6.1.1 蠕变的概念	109
6.1.2 蠕变的机制	111
6.1.3 蠕变断裂的类型	113
6.1.4 常规高温蠕变试验	115
6.1.5 常规蠕变寿命预测方法	117
6.2 小冲孔蠕变试验理论模型	118
6.3 小冲孔蠕变试验	119
6.3.1 试样中心挠度曲线	121
6.3.2 试样中心蠕变挠度曲线	123
6.3.3 试样蠕变变形过程	124
6.3.4 蠕变试验的可重复性	126
6.3.5 氩气流量的影响	127
6.3.6 试样断口形貌及金相组织	133
6.4 基于小冲孔蠕变试验的寿命预测	135
6.4.1 Norton 方程	135
6.4.2 Monkman-Grant 方法寿命预测	136

6.4.3	Larson-Miller 参数法	137
6.4.4	基于损伤的寿命预测	140
	参考文献	145
7	小冲孔高温蠕变试验有限元分析	146
7.1	蠕变损伤本构模型	146
7.1.1	Kachanov-Rabotnov 方程	147
7.1.2	有限元模拟	149
7.1.3	材料雅可比矩阵的确定	150
7.1.4	时间步长的控制	152
7.1.5	表征点的选取	153
7.1.6	失效点的处理	153
7.2	有限元模型	153
7.3	有限元模拟结果分析	154
7.3.1	试样中心挠度与时间的关系	154
7.3.2	试样应力分布	155
7.3.3	应变与时间的关系	157
7.3.4	载荷与应力之间的关系	159
7.3.5	蠕变损伤与时间、位置的关系	159
7.3.6	蠕变应变速率与破断时间的关系	160
7.4	影响因素分析	161
7.4.1	试样厚度的影响	161
7.4.2	压头球径对小冲孔试样模拟结果的影响	166
7.4.3	试样直径对小冲孔试样模拟结果的影响	169
7.4.4	摩擦系数的选取	170
7.4.5	网格无关性	172
	参考文献	173

1 绪 论

在石油、化工、航空航天和核电等行业中有许多金属设备在高温、辐射、腐蚀等恶劣环境下工作，无疑对这些构件的安全性要求很高，也使得高温构件寿命评价技术的研究日益重要^[1]。

国内外学者针对高温构件剩余寿命提出了多种预测方法，归纳起来可大致分为非破坏性检查和破坏性检查两大类^[2]。非破坏性检查主要包括基于表面覆膜的金属组织测定法、硬度测定法、超声波测定法、数值模拟法等，见表 1-1。破坏性检查主要包括拉伸试验方法、冲击试验方法、材料密度法、高温蠕变试验法等，见表 1-2。

表 1-1 材料非破坏性检查方法

方法	检查手段
金属组织测定法	测定金属组织的变化
硬度测定法	测定由于组织变化而引起的材料软化现象
超声波测定法	测量材料内部产生的细微缺陷
数值模拟法	通过有限元法建模，计算构件应力、损伤

表 1-2 材料破坏性检查方法

方法	检查手段
拉伸试验方法	测定材料的屈服强度、抗拉强度和延伸率等
冲击试验方法	测定材料的冲击韧性及蠕变裂纹扩展速率
材料密度法	测定材料的密度变化
高温蠕变试验法	测定蠕变裂纹扩展速率

非破坏性检查具有无损的优势，其主要是根据高温条件下长期运行的材料会发生特性变化的特点，在已经建立所测物理量与材料寿命相关性的基础上，依据所测物理量的变化评定材料的寿命。但这种检查存在很大的局限性：一方面，物理量与材料寿命之间有效的关联性非常难于建立，而且这种关联性可能随着材料

使用条件的不同而发生变化；另一方面，不同材料物理量的变化不同，测定时所测物理量的评价也存在较大差异。相对来讲，破坏性取样检查方法历经多年应用已比较成熟，所测信息准确可靠。但明显的不足之处在于试验所需试样尺寸较大，取样时会对构件产生较大的破坏，且有时由于构件取样处尺寸的限制而无法取样。如在中子辐射材料的损伤研究中，因粒子加速器产生的损伤区域很窄，试样的尺寸必然受到严格限制。

此外，许多贵重金属材料因为其优异的材料性能被广泛应用，如锆材、钛材、钼材等，如果通过传统的试验方法来获得这些材料的力学性能势必因为其昂贵的价格造成巨大的经济浪费；同时设备的焊缝及其热影响区等重要部位，需要定期对其力学性能和寿命进行评价，这些部位无法满足常规试验方法试样的所需尺寸；有些设备的工作环境比较特殊，传统试样模拟实际工作环境因为其体积大造成费用很高，如辐照等^[3]。小冲孔试验（又称小冲杆试验，small punch test, SPT）技术所采用的试样体积微小（圆形试样直径或方形试样边长尺寸为 3~10mm、厚度为 0.25~0.5mm），是一种既有效又经济、快速的检测手段。该技术的出现无疑为解决以上问题提供了极大的方便。

1.1 小冲孔试验技术原理

20 世纪 80 年代初，由于核工业领域材料研究的需要，Ames 实验室提出了小冲孔试验技术，成功地利用该技术检查了材料回火和辐射脆性、辐射后固溶引起的边界弱化以及晶界的变形和断裂性能^[4]。

事实上，同期甚至稍早于小冲孔试验技术之前，就有很多试验原理与之相似的微型试验方法。例如，Huang 等^[5]以及 Manahan 等^[6,7]设计的微型圆片弯曲试验（miniaturized disk bend test, MDBT）、Okada 等^[8,9]的微型凸出试验（micro-bulge test）和 Lucas 等^[10]的剪切冲孔试验（shear punch test）。

小冲孔试验技术的基本原理如图 1-1 所示，冲杆以恒定速度（载荷）冲压薄片试样，记录试样从弹塑性变形到断裂失效整个过程中的载荷（时间）-位移（蠕变变形）数据，并借此分析材料强度、塑性、断裂韧性和蠕变性能等一系列所需性能数据^[11]。需要指出的是，施加恒定变形速度（constant deflection rate, CDR）的小冲孔试验主要用来评价材料的低温、常温和高温性能；而施加恒定力（constant force, CF）的小冲孔试验主要用来评价材料的蠕变性能，并习惯称之为小冲孔蠕变试验技术。就试验耗时而言，后者远长于前者。

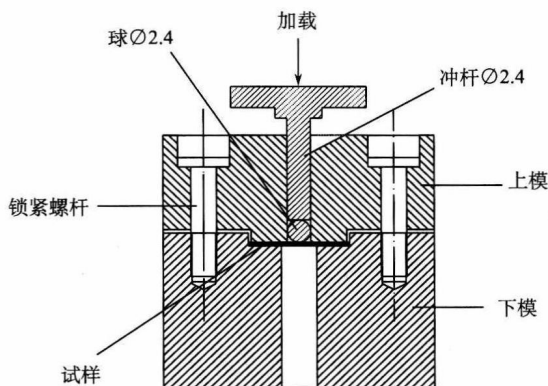


图 1-1 小冲孔试验原理示意图

小冲孔试验得到的典型载荷-位移曲线如图 1-2 所示，可以看出，试验曲线前后经历四个变形阶段：弹性变形阶段、塑性变形阶段、薄膜伸张阶段、塑性失稳阶段。而小冲孔试验研究运用各种理论和分析方法，将图 1-2 中的信息转化为试样材料的强度、塑性、韧性等数据。目前已经得出材料屈服强度 σ_y 、抗拉强度 σ_b 和图中 P_y 、 P_{max} 之间的线性关系，建立了小冲孔试验和材料力学性能试验之间的联系等。

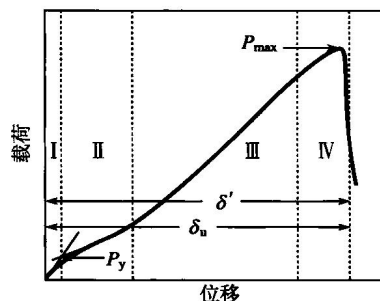


图 1-2 小冲孔试验载荷-位移曲线

1.2 小冲孔试验技术的发展状况

1.2.1 基本力学性能

Huang 通过试验得到载荷-位移（圆片挠度）曲线并且采用圆板弯曲理论，将载荷-位移曲线转化为应力-应变数据，把圆片断裂时的挠度转化为有效断裂应变，将其作为与传统拉伸试验中的伸长率相对应的弯曲延性指标，实现了用小圆片试样测试材料延性的目的。

Manahan 建立了一种带摩擦边界条件的有限元模型来分析试片受力后所呈现出来的不均匀的二向应力场，在有限元分析中引入了材料、几何以及边界三重非线性，从载荷-试样中心挠度曲线中成功获取了试片从弹性变形直至产生裂纹而失效这一整个过程中的应力-应变行为和材料的延性信息。同时，Manahan 还

开创性地将载荷-位移曲线分为几个典型区域, 分别对应试验过程中试片的几个变形阶段 (见图 1-2): 弹性变形阶段 (I)、塑性变形阶段 (II)、薄膜伸张阶段 (III) 和塑性失稳阶段 (IV)。其中 P_y 为第 I 阶段和第 II 阶段过渡点所应的纵坐标值; $P_{\max}$ 为曲线峰值点所对应的纵坐标值。 P_y 和 $P_{\max}$ 分别与传统拉伸试验的屈服点载荷和抗拉极限载荷相对应。 δ_u 是与 P_y 对应的试样挠度, δ' 是试样断裂时的试样挠度。

Okada 通过假设得到应力与载荷的关系, 再将二维状态下的应力与试样单轴拉伸应力等价, 从而得到试样最大载荷与抗拉强度、屈服载荷与屈服强度、位移与拉伸应变之间的相互对应关系, 证明了通过微凸试验测试材料基本力学性能的可行性。同时, 还指出了试样所能承受的最大载荷与摩擦情况无关。

Mao 等^[12] 通过对规格为 $\varnothing 3\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 的 HT260、PCA、HT29、SUS304、A533B 5 种材料以及规格为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times (0.3 \sim 0.5)\text{mm}$ 的 HT260、A508、HT29、SUS304、A533B 5 种材料的小冲孔试验分别得到了屈服强度 σ_b 与 P_y 和抗拉强度 σ_b 与 $P_{\max}$ 之间的经验关系:

$$\sigma_y = 0.36 P_y / t_0^2 \quad (1-1)$$

$$\sigma_b = 0.13 \left(\frac{P_{\max}}{t_0^2} \right) - 320 \quad (1-2)$$

式中: t_0 为试样的初始厚度。

作者^[13]曾针对经过时效处理后的 Inconel718 合金进行拉伸试验和常温小冲孔试验, 并且对上述试验获得的结果进行分析, 建立了 Inconel718 合金的屈服强度 σ_y 、抗拉强度 σ_b 与小冲孔试验数据 P_y 、 $P_{\max}$ 以及试样初始厚度 t_0 之间的关系:

$$\sigma_y = 340 \frac{P_y}{t_0^2} + 10 \quad (1-3)$$

$$\sigma_b = 40 \frac{P_{\max}}{t_0^2} + 1030 \quad (1-4)$$

Wang 等^[14]针对 20g 的小冲孔试验数据, 除了试样初始厚度外, 还考虑了压球的半径 r , 提出了如下关系式:

$$\sigma_y = \frac{P_{\max} - 202.17}{0.644 \times 2\pi r t_0} \quad (1-5)$$

Milicka 等^[15]除了压球直径 d 以外, 甚至还考虑了下模中心孔径 D , 得到以下关系式:

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{[2.23d - 0.9(D - d - 2t_0) + 0.56]t_0} \quad (1-6)$$

关凯书等^[16]用有限元分析软件对 2.25Cr1Mo、16MnR、20#、1.25Cr0.5Mo 4 种材料试样的小冲孔试验过程进行了模拟,结合常规拉伸试验获得的材料屈服强度 σ_y ,拟合出 P_y 和 σ_y 之间的线性关系:

$$\sigma_y = 1.94P_y - 92.556 \quad (1-7)$$

要玉宏等^[17]提出了小冲孔试样断裂挠度率 δ_f ($\delta_f = \frac{d_f - t_0}{t_0} \times 100\%$, d_f 为试样断裂时对应的挠度)这一概念,并借此通过以下关系式来估算材料的伸长率 δ_5 :

$$\delta_5 = 0.338\delta_f - 80.08 \quad (1-8)$$

2009 年 Isselin^[18]将小冲孔试验曲线中弹性部分的能量 Energy 和材料的屈服强度 σ_y 联系起来(图 1-3),通过试验证明其准确度高达 90%,并通从理论上得出相应解析关系:

$$\text{Energy} = \sigma_y^2 \times \frac{2(1-\nu^2)a^2t_0}{3E\pi(1+\nu)^2} \quad (1-9)$$

式中: ν 是泊松比; a 是下模孔径; t_0 是试样厚度; E 是杨氏模量; δ_y 为屈服强度。

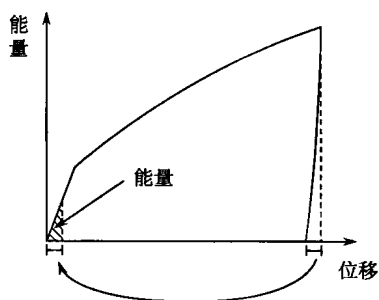


图 1-3 小冲孔试验能量法评价屈服强度

作者^[19]在 Isselin 工作的基础上,针对 SUS304 不锈钢材料,利用小冲孔试验能量法预测了 20℃、100℃、200℃、300℃ 温度条件下的屈服强度。试验结果表明小冲孔能量法试验技术在常温条件下测量屈服强度时具有较高的准确性,修正 Isselin 常温基于能量法的屈服强度计算公式,使其适用不同温度条件下的屈服强度预测:

$$\sigma_y^2 = \text{Energy} \times \frac{3E\pi(1+\nu)^2}{2(1-\nu^2)a^2t_0} \times 0.3152 \times e^{353/T} \quad (1-10)$$

综上所述,材料屈服强度 σ_y 、抗拉强度 σ_b 与小冲孔试验曲线上的 P_y 、 $P_{\max}$ 存在线性关系,也就是说小冲孔试验存在取代常规拉伸试验的潜质。但是,从式

(1-1)~式(1-6)不难发现,试样初始厚度 t_0 、压球半径 r (直径 d)和下模孔径 D 等诸多因素都会对材料强度最终数值的确定造成影响,如果采用式(1-6)来确定材料的强度,除了繁琐复杂以外,显然会因为众多因素的影响作用的叠加而对结果造成潜在误差。在此,作者建议可以通过建立小冲孔试验技术标准和规范来统一试样的初始厚度、上下模和压球等试验装置的尺寸,以便消除各个因素对确定材料强度时造成的影响,最终采用如式(1-10)的关系式来确定材料的强度。

1.2.2 韧-脆转变温度

工程上以断裂前是否发生显著的宏观塑性变形来区分脆性和韧性,总是希望构件在韧性状态下工作,避免发生危险的脆性断裂。一般金属材料会随着温度降低而韧性下降,各种钢都有由韧性变为脆性的韧-脆转变温度(ductile-brittle transition temperature, DBTT)。当钢在环境温度低于韧-脆转变温度下服役时,极易发生脆性断裂。国内外已多次报道因金属材料冷脆而造成的灾害性事件,如:1995年1月17日发生的阪神大地震中,兵库县南部箱形钢柱在非焊接区发生冷脆断裂;我国哈尔滨加格达奇机务段和大兴安岭林业机械曾多次发生低温脆断事故。

当试验温度低于某一温度时,材料由韧性状态变为脆性状态,冲击吸收功明显下降,断裂机制由微孔聚集型变为穿晶解理,断口特征由纤维状变为结晶状,这就是低温脆性。该温度称为韧-脆转变温度,它决定了材料的低温韧性,是衡量材料脆性转变倾向的重要指标,直接影响材料的应用范围。研究人员都在致力于降低材料的韧-脆转变温度,同时在开发新材料时准确地确定其韧-脆转变温度非常必要。

有资料表明,低温脆性是材料屈服强度随温度降低急剧增加的结果。GB/T229—1994标准规定了三种测定韧-脆转变温度的方法。

最常用的是使用标准V形缺口夏比冲击试验来测定,但由于V形缺口夏比冲击试样的尺寸应力集中状况及所受载荷情况等与材料实际的服役状况不同,所以测定结果往往与材料实际的断裂状态存在一定差异。

致力于材料韧-脆转变温度的研究者主要有 Baik^[4]、Kohse^[20]、Misawa^[21]、Kameda^[22]、Matsushia^[23]、Foulds^[24]、Bulloch^[25]等。关于DBTT的研究思路基本一致:即从能量的角度入手,首先采用SP试验得到不同温度下的载荷-位移曲线,然后对曲线积分将之转化为如图1-4所示的温度 T_{SP} -能量曲线,并引入同种材料的温度 T_{CVN} -金属夏比缺口(Charpy V-notch, CVN)冲击能量曲线,通过比较分析最后得出两者关联性。

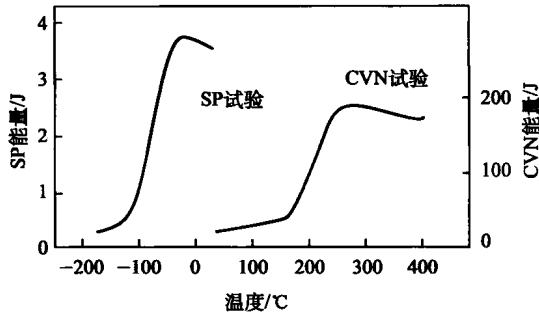


图 1-4 典型的 SP 温度-能量转变曲线及与 CVN 转变温度曲线的比较

由于 SP 试样的实际受力情况高度复杂且 CVN 冲击试验本身不完善, 因此, 很大程度上, 两者的比较分析依赖于试验结果, 即所得到的关系式为经验式而非解析式^[11]。

Matsushia 根据 Cr0.5Mo、Cr-Mo 和 Cr-Mo-V 钢的 SP 试验数据, 考虑了材料化学成分、晶粒尺寸、硬度和贝氏体与珠光体百分比等诸多因素, 利用多元回归分析法评定了 T_{CVN} 与 SP 试样的 T_{SP} 之间的关系, 最后发现 T_{SP} 和晶粒尺寸 d 两者对 T_{CVN} 值的影响具有较高的显著性并归纳出如下关系式:

$$T_{CVN} = 1.35T_{SP} - 0.84 \times 10^2 d^{-0.5} + 326 \quad (1-11)$$

综合前人得出的一系列关于 T_{SP} 和 DBTT 的数据, Bulloch 提出另一种非线性关系式:

$$DBTT = \frac{1.92 \times 10^6}{(T_{SP})^2} \quad (1-12)$$

并通过比较, 证明非线性关系式比线性关系式更合理。其他人基本上均认为 T_{CVN} 与 T_{SP} 呈线性关系, 即:

$$T_{CVN} = \alpha T_{SP} + \beta \quad (1-13)$$

式中, α 、 β 为常数。

Misawa 同时采用 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 和 $\varnothing 0.3\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 两种形状的试样进行 SP 试验, 发现得到的 T_{SP} 值非常一致, 从侧面证明了 SP 试验结果对试样的形状并不敏感。

由于能量方法简单而且物理意义明确, 通过小冲孔试验分析方法已被公认为最适于分析材料的冲击性能^[26], 并且后续的关于 T_{SP} 的研究均沿用这一思路。

1.2.3 断裂韧性

断裂是工程构件最危险的一种失效方式, 尤其是脆性断裂, 它的破坏是突然

发生的,断裂前没有明显的征兆,这常常会引起灾难性的破坏事故。自 20 世纪四五十年代以来,脆性断裂的事故明显增加。这是因为设计的工程构件尺寸越来越大,应用材料的强度也越来越高,此外,焊接工艺的使用也更加普遍。例如,美国在第二次世界大战期间有 5000 艘全焊接的“自由轮”,其中有 238 艘完全破坏,有的甚至断成两截。发生破坏的自由轮,其断裂源多半是在焊接缺陷处,且当气温降至 -3°C ,水温降至 -4°C ,破坏处的冲击韧性也较低。20 世纪 50 年代,美国发射的北极星导弹其固体燃料发动机壳体采用了超高强度钢 D6AC,屈服强度为 1400MPa,按照传统的强度设计与验收时,其各项性能指标包括强度与韧性都符合要求,设计时的工作应力远低于材料的屈服强度,但发射点火不久就发生了爆炸。这两起重大破坏事故引起了世界各国研究材料强度学者的震惊,因为这是传统力学设计无法解释的。按照传统力学设计,只要求工作应力 σ 小于许用应力 $[\sigma]$,即 $\sigma < [\sigma]$,就认为安全。而对于 $[\sigma]$:

$$\text{塑性材料}[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$$

$$\text{脆性材料}[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n}$$

经典的强度理论无法解释为什么工作应力远低于材料屈服强度时会发生所谓低应力脆断的现象。原来,传统力学是把材料看成均匀的、没有缺陷和裂纹的理想固体,但是实际的工程材料在制备、加工及使用过程中,都会产生各种宏观缺陷乃至宏观裂纹。像上述的两个例子,经焊接的“自由轮”在焊接处就有微裂纹,北极星导弹事后在破坏处也发现有小于 1mm 的裂纹。再比如 1965 年英国的一个氨合成塔,设计压力为 36MPa,水压试验压力为 49MPa,材料的屈服强度为 460MPa,此容器在试压过程中加压到 35.2MPa 时就突然爆破,其中有一块重达 2t 的碎片竟飞出数十米远。事后检查,发现在焊缝区内埋藏有一长为 10mm 的内部裂纹,容器的爆破就是从这个裂纹开始的。这些事实都说明,低应力脆断总是和材料内部含有一定尺寸的裂纹相联系的,当裂纹在给定的作用应力下扩展到临界尺寸时,就会发生突然破裂。因此传统力学或经典的强度理论解决不了带裂纹构件的断裂问题。

在冶炼、热加工或冷加工过程中,由于工艺技术上的原因,在材料或半成品中会形成裂纹或裂纹式的缺陷,在无损检测中又未能发现;在构件服役过程中,由于力学、温度和介质等环境因素的作用,在构件中也会形成裂纹,为防止裂纹体的低应力脆断,不得不对其强度-断裂抗力进行研究,从而形成了断裂力学这样一个新学科。断裂力学的研究内容包括裂纹尖端的应力和应变分析;建立新的断裂判据;断裂力学参量的计算与试验测定,其中包括材料的力学性能新指标——断裂韧性及其测定,断裂机制和提高材料断裂韧性的途径等。

高温长期服役的材料都会由于各种情况导致固态相变而发生脆化。早在 20 世纪初就开始利用小冲孔试样来检验材料发生脆化的状况。90 年代初期 Bulloch^[25]、Joo^[27]、Mao^[28,29] 以及 Fould^[30] 等把研究重心转向求取材料的断裂韧性 K_{IC} 或 J_{IC} 值。最初的研究思路就是利用小冲孔试验找出 SP 韧-脆转变温度 (SP-DBTT)，再与传统冲击试验得到的转变温度 (DBTT) 对照，找出两者的关系，再根据以往的累积的 DBTT 与断裂韧性 K_{IC} 的经验关系便可得到由 SP-DBTT 换算的 K_{IC} 。这种方法理论上完全可行，但是依据的全是经验关系式，因此，复杂而并不精确。鉴于此，众多学者尝试避开中间过渡变量 DBTT，进而将研究方向转向直接寻求 SP 试验数据与 K_{IC} 或 J_{IC} 之间的关系，后来，这一思路也成为通过 SP 试验技术来评价材料断裂韧性的主流研究方法。

Mao^[28] 将材料分为延性和脆性 2 种，针对延性材料提出 SP 试样有效断裂应变 ϵ_{qt} 的概念并将之视为断裂参量。然后，提供了 3 种可以得到 ϵ_{qt} 的方法：

- (1) 将通过再结晶蚀刻技术估算失效试样近裂纹处的应变作为有效断裂应变；
- (2) 用完全刚塑性模型分析得到的有效断裂应变半分析半经验式；
- (3) 有效断裂应变的完全经验公式。

最终，通过试验证明了有效断裂应变 ϵ_{qt} 与延性断裂韧性 J_{IC} 之间存在如下线性关系：

$$J_{IC} = k\epsilon_{qt} - J_0 \quad (1-14)$$

式中： k 与 J_0 为通过试验确定的常数。

随着研究的深入，Mao^[29] 进一步针对脆性材料提出了 SP 断裂应力 σ_t 的概念并提出如下经验关系式：

$$K_{IC} = C(\sigma_t)^{2/3} \quad (1-15)$$

式中： C 为由试验确定的常数。

Joo 等^[27] 假设 SP 试样的边界条件为固支约束，载荷则均布在以某个尺寸为半径的圆面积内，利用轴对称圆板弯曲理论计算出中心最大弯曲应力，并将其视为对脆性材料 SP 试样的断裂应力。

Chakrabarty^[31] 总结了压头球部接触区的等效应变 $\bar{\epsilon}$ 与试样厚度之间的关系式：

$$\bar{\epsilon} = \ln(t_0/t) \quad (1-16)$$

式中： t_0 、 t 分别为变形前后的厚度。

郭良辉^[32] 通过拟合得到试样形变前后的厚度比 (t_0/t) 与试样挠度、下模孔径比 (δ/H) 之间的关系：

$$t_0/t = \exp[-4.2241(\delta/H)^{1.6217}] \quad (1-17)$$