doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.12.004

设计计算

材料韧脆转变行为的加权拟合算法研究

李　阳[1],李海舰[1],姚呈祥[1],李俊汉[1],贾海东[2],尤景泽[3,4,5]

(1.中国石油天然气股份有限公司 长庆油田长北作业分公司,陕西榆林 719000;2.国家管网集团 西部管道有限责任公司,乌鲁木齐 830000;3.中国特种设备检测研究院,北京 100029;4.低碳热力发电技术与装备全国重点实验室,北京 100029;5.国家市场监督管理总局技术创新中心(页岩气采输系统质量安全与智能检测技术),四川内江 641000)

摘　要:材料韧脆转变曲线的拟合多依赖传统算法,存在拟合模型不统一、对试验数据分布特性考虑不足等问题,导致拟合结果易受人为因素影响、曲线形态不合理,难以客观反映材料性能。针对这一问题,提出一种基于加权最小二乘法的系列温度夏比冲击试验数据拟合算法。该方法通过拟合函数的一阶导数构建权函数,并结合原始数据方差动态分配拟合权重,通过迭代优化获取拟合参数。研究采用双曲正切函数与Logistic函数进行拟合对比,结果表明,加权拟合能有效提升上下平台数据权重,降低转变区离散数据对拟合结果的影响,在试验数据量有限的前提下获得更加符合物理规律的拟合曲线,显著改善下平台参数取值为负等不合理现象。研究为加氢反应器步冷试验数据处理与材质劣化评估提供了更可靠的方法参考。

关键词:系列温度夏比冲击试验;韧脆转变;回火脆化;步冷试验

中图分类号:TH142;TG113.254　　**文献标志码:**A

Study on weighted fitting algorithm for material ductile-to-brittle transition behavior

LI Yang[1],LI Haijian[1],YAO Chengxiang[1],LI Junhan[1],JIA Haidong[2],YOU Jingze[3,4,5]

(1.Changqing Oilfield Changbei Operation Branch,PetroChina Company Limited,Yulin 719000,China;2.PipeChina West Pipeline Co.,Ltd.,Urumqi 830000,China;3.China Special Equipment Inspection & Research Institute,Beijing 100029,China;4.State Key Laboratory of Low-carbon Thermal Power Generation Technology and Equipments,Beijing 100029,China;5.Technology Innovation Center of Quality Safety and Intelligent Inspection on Shale Gas Extraction,Gathering and Transportation System,State Administration for Market Regulation,Neijiang 641000,China)

Abstract: The fitting of material ductile-to-brittle transition curves often relies on traditional algorithms,which suffer from issues such as inconsistent fitting models and insufficient consideration of the distribution characteristics of experimental data.This leads to fitting results that are easily influenced by human factors,unreasonable curve shapes,and difficulty in objectively reflecting material performance.To address this problem,a fitting algorithm based on weighted least squares for series temperature charpy impact test data is proposed.This method constructs a weight function through the first derivative of the fitting function and dynamically allocates fitting weights combined with the variance of the original data,obtaining fitting parameters through iterative optimization.The study compares fitting using the hyperbolic tangent function and the Logistic function.The results show that weighted fitting can effectively increase the weight of data in the upper and lower shelf regions,reduce the influence of scattered data in the transition region,make the fitted curve more consistent with the physical laws of material ductile-to-brittle transition,and significantly improve unreasonable phenomena such as negative parameter values in the lower shelf.This research provides a more reliable methodological reference for the data processing of step cooling tests and material degradation assessment in hydrotreating reactors.

Key words:series temperature charpy impact test;ductile-to-brittle transition;temper embrittlement;step cooling test

收稿日期:2025-07-07　**修回日期:**2025-11-09

基金项目:中国特种设备检测研究院重点项目(2025重点01);国家重大专项(2024ZD0601800)

0 引言

材料韧脆转变曲线是加氢反应器、反应堆压力容器和高钢级管线等重要承压设备用材的基础数据。通过该曲线可获得材料的韧脆转变温度、韧性储备等参数。工程上，材料韧脆转变曲线通过系列温度夏比冲击试验获得，即先测得材料在不同温度下的冲击吸收能量，再对试验数据进行拟合而得到。由于夏比冲击试验结果离散性较大，目前针对韧脆转变曲线的试验流程与拟合算法尚未形成统一标准。我国金属材料夏比摆锤冲击试验标准GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》附录D给出了韧脆转变曲线的示意图（见图1）。可以看出，完整的韧脆转变曲线包含下平台、转变区和上平台3个部分；附录注释说明，最常用的拟合模型为双曲正切模型，但未对夏比冲击试验的温度、试验数量及拟合算法作进一步规定。ASME SA-542 *Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Quenched-and-Tempered, Chromium-Molybdenum, and Chromium-Molybdenum-Vanadium* 要求CrMo钢在步冷热处理后通过系列温度夏比冲击试验确定材料的韧脆转变温度，试验温度应覆盖下平台、转变区和上平台，其中转变区至少需完成4个温度点的试验，每个温度下试样数量为3个，但该标准未对拟合算法提出要求。管线钢DEC文件《国家管网集团设计与工程建设准则》规定了X80钢系列温度夏比冲击试验应包含的6个温度点，同样未明确数据拟合算法。

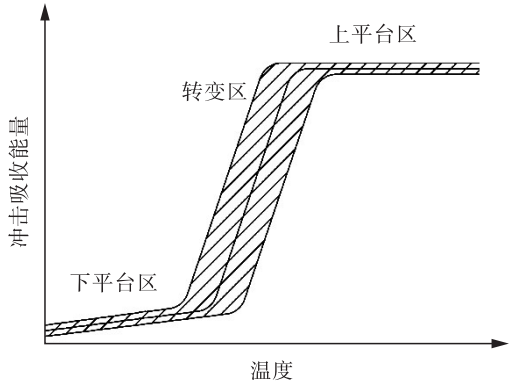


图1 GB/T 229—2020中的韧脆转变曲线

Fig.1 Ductile-to-brittle transition curve in GB/T 229—2020

对系列温度夏比冲击试验结果采用拟合算法进行处理，可得到材料的韧脆转变曲线，其中拟合算法对曲线的准确性具有关键影响。早期材料的韧脆转变曲线多采用手工绘制，其结果受人为因素影响较大、拟合精度较低，所获曲线难以准确、客观地反映材料脆化程度。随着计算机技术的发展，材料韧脆转变曲线逐步过渡为采用计算机软件进行自动分析。然而，不同试验机构所使用的拟合算法多样，拟合模型及模型参数的确定方法不统一，导致同一组系列温度夏比冲击试验数据在不同机构间可能得到不同的曲线，从而影响结果的横向可比性。拟合算法的差异影响了韧脆转变曲线的客观性，尤其对存在材质劣化的容器安全评估工作造成了直接影响。

拟合算法主要包括拟合函数与函数参数的确定方法两部分，其中拟合函数通常选取具有“S”形曲线特征的函数。GB/T 229—2020附录D注释中给出的双曲正切函数即为一种具有“S”形曲线特征的函数，其他类似函数还包括Logistic函数、Boltzmann函数、Burr函数和Gompertz函数等[1]。函数参数的确定方法则有最小二乘法、极大似然法等。常用的最小二乘法默认各数据点具有相同的拟合权重，通过优化算法获取拟合参数值[2]。统计理论表明，合理的加权处理可基于小样本数据达到通常需大样本数据才能获得的统计精度[3]。加权最小二乘法通过对数据赋予拟合权重来实现这一目的，合理的拟合权重能使所得转变曲线更符合实际情况，但拟合权重的确定方法正是系列温度夏比冲击试验加权拟合中的难点[4]。

针对承压设备安全评估中系列温度夏比冲击试验的数据处理问题[5]，文中提出材料韧脆转变曲线拟合函数的一般表达式。该表达式将拟合函数分解为具有实际物理意义的4个参数与1个具有“S”形曲线特征的核函数。基于拟合函数的一阶导数构建权函数，并利用该权函数结合原始数据的均方差对拟合权重进行修正。所构建的权函数在考虑原始数据离散特性的同时，能够赋予上下平台区离散性较小的数据以较大权重，而赋予转变区离散性较大的数据以较小权重。最后，采用双曲正切函数与Logistic函数对CrMo钢和X80钢的系列温度夏比冲击试验数据进行加权拟合，并通过与未加权拟合结果的对比表明，验证拟合算法的有效性。

1 拟合算法

1.1 拟合函数

金属材料的韧脆转变行为是其本征属性[6]，该属性与试验方法及试验数据所采用的单位无关。因此，材料的韧脆转变曲线应表达为无量纲的函数形式，其冲击吸收能量E与测试温度T的无量纲化形式可表示如下：

$$\frac{E(t)-E_0}{\Delta E}=f\left(\frac{t-T_0}{\Delta T}\right) \tag{1}$$

式中，t为温度；E_0为韧脆转变曲线下平台对应的冲击吸收能量；ΔE为上、下平台之间的能量差；T_0为拟合曲线中心点对应的温度；ΔT为温度归一化参量。

该材料韧脆转变曲线的一般表达式可进一步简化：

$$E(t)=E_0+\Delta E f\left(\frac{t-T_0}{\Delta T}\right) \tag{2}$$

令$x=(t-T_0)/\Delta T$，代入表达式可得：

$$E(t)=E_0+\Delta E f(x) \tag{3}$$

式中，$f(x)$为拟合核函数。

由系列温度夏比冲击试验数据分布规律可知，拟合选用的核函数$f(x)$应具有“S”形特征[7]，且$0<f(x)<1$。当转变温度t接近−273 ℃时，$f(x)$趋近于0，此时$E(t)=E_0$；当转变温度t接近无穷大时，$f(x)$趋近于1，此时$E(t)=E_0+\Delta E$（$E_0+\Delta E$表示韧脆转变曲线上平台对应的冲击吸收能量）。

具有“S”形特征的常见函数包括双曲正切函数、Logistic函数、Burr函数及Gompertz函数等[1]。根据GB/T 229—2020附录D，最常用的拟合函数为双曲正切函数，以其构建的核函数可表示如下：

$$f(x)=\frac{1}{\pi}\left[\tan^{-1}(x)+\frac{\pi}{2}\right] \tag{4}$$

Logistic函数是另一种常见的具有“S”形特征的函数，其对应的核函数可表示如下：

$$f(x)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-x}} \tag{5}$$

两种核函数的曲线如图2所示，图中实线代表双曲正切函数，虚线代表Logistic函数。从拟合核函数的曲线形态可以看出，核函数为单调递增函数，且具有中心对称特征，对称中心位于$x=0$，对应的温度为$t=T_0$。在对称中心处，曲线斜率取得最大值。

对式(3)求导可得：

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\Delta E}{\Delta T}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}x}\bigg|_{x=0} \tag{6}$$

可以看出，拟合曲线的最大斜率与ΔE成正比，与ΔT成反比。若选用双曲正切函数作为核函数，最大斜率为$\Delta E/(\pi\Delta T)$；若选用Logistic函数作为核函数，最大斜率为$\Delta E/(4\Delta T)$。最大斜率点位于韧脆转变区内，对应的吸收能量为$E_0+0.5\Delta E$；曲线斜率随其与对称中心距离的增大而减小，当转变温度趋近上、下平台时，曲线斜率趋于0。

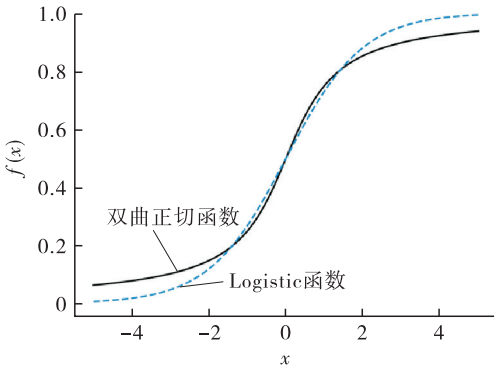


图2 拟合核函数曲线

Fig.2 Fitting kernel function curve

1.2 拟合权重

材料的韧脆转变曲线可分为下平台、转变区和上平台3个部分，各部分的试验数据具有不同的特征[7]。下平台的试验温度较低，试样呈脆性断裂，吸收能量与剪切断面率均较小，数据离散性小；转变区的试验温度介于上、下平台之间，试样断裂特征随机性强，可能出现脆性断裂、韧性断裂或脆韧混合断裂，数据离散性大；上平台的试验温度较高，试样表现为韧性断裂，冲击吸收能量大，剪切断面率接近100%，数据离散性相对较小[8]。

为评估不同试验温度下数据的分散性，可采用统计学中的标准差进行分析。计算各试验温度下冲击吸收能量的标准差，可见标准差随温度变化呈现整体规律：下平台区较小、转变区较大、上平台区又较小[9-11]。由于“S”形拟合函数的一阶导数具有“中间大、两边小”的特征，该函数形态与标准差随温度的变化规律相似，因此可基于拟合函数的一阶导数构建权函数。双曲正切函数对应的权函数可表示如下：

$$g(x)=\frac{a}{1+x^2} \tag{7}$$

Logistic函数对应的权函数可表示如下：

$$g(x)=\frac{ae^{-x}}{(1+e^{-x})^2} \tag{8}$$

式中，a为常数，即权函数$g(x)$的待拟合参数。

权函数曲线如图3所示，其中，实线表示a=1，虚线表示a=3。该函数具有中间大、两边小的特点。当x=0时，权函数$g(x)$取最大值，该点对应于拟合函数的对称中心，位于转变区正中位置，此处数据离散性最大；当x>0时，$g(x)$随x的增大而减小，数据离散性逐步降低，对应转变曲线由转变区中心向上平台过渡；当x<0时，$g(x)$随x的减小而减小，数据离散性逐步降低，对应转变曲线由转变区中心向下平台过渡。参数a仅调整$g(x)$的绝对值大小，不改变其“中间大、两边小”的相对分布特征。

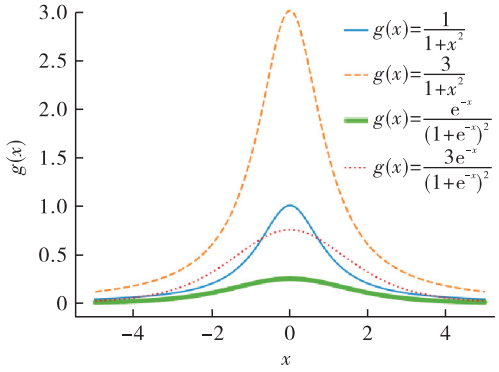


图3 权函数曲线

Fig.3 Weight function curve

1.3 拟合过程

采用加权最小二乘法确定拟合参数，其中包括拟合模型的4个参数（E_0，ΔE，T_0和ΔT）及权函数的1个参数a。加权最小二乘法的目标函数：

$$\varepsilon(E_0,\Delta E,T_0,\Delta T)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j}^{M}\frac{1}{\omega_i^2}[E(t_i)-E_{ij}]^2 \quad (9)$$

式中，ε为目标函数；N为温度点数；M为温度t_i下的试验次数；t_i为系列温度夏比冲击试验的测试温度；E_{ij}为温度t_i下第j次夏比冲击试验测得的冲击吸收能量。

在常见的系列温度夏比冲击试验中，通常以3个试样为一组进行1个温度点的测试，共完成8个不同温度点的试验，即M=3，N=8，可用于拟合的数据点有$M\times N$=24个。$1/\omega_i^2$为温度t_i所对应的拟合权重，ω_i为权函数在温度t_i处的取值，其计算公式如下：

$$\omega_i=g\left(\frac{t_i-T_0}{\Delta T}\right) \quad (10)$$

采用迭代法求解拟合函数与权函数的参数，迭代流程如图4所示。

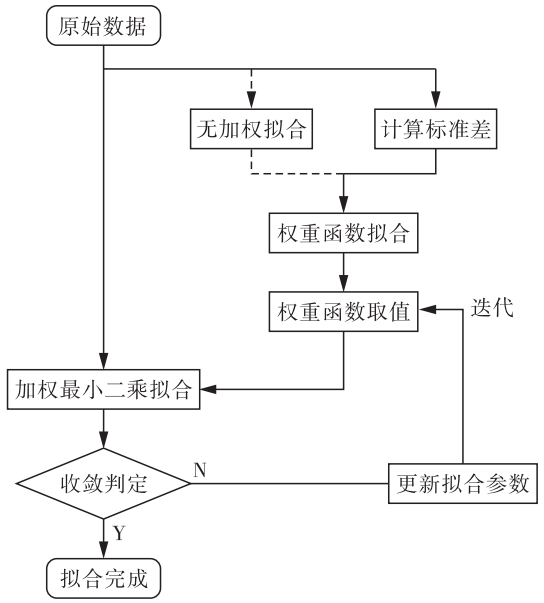


图4 韧脆转变曲线迭代加权拟合流程

Fig.4 Flowchart for iterative weighted fitting of ductile-to-brittle transition curve

计算过程分为以下7个步骤：

（1）对原始数据进行常规拟合，即w_{ij}=1（无加权处理），获得T_0和ΔT的初始值；

（2）计算各温度下原始数据的标准差，得到温度–冲击吸收能量标准差数据；

（3）利用已知的T_0、ΔT及权函数对温度–标准差数据进行拟合，得到权函数参数a；

（4）计算各温度t_i对应的权函数值ω_i；

（5）利用加权最小二乘法求解拟合参数E_0，ΔE，T_0和ΔT；

（6）判断结果是否收敛，若收敛则结束计算；

（7）若不收敛，利用第（5）步得到的T_0和ΔT更新参数，返回第（3）步进行下一轮迭代，直至满足收敛条件。

迭代收敛的判据为：

$$\eta=[T_0^{(s)}-T_0^{(s-1)}]^2+[\Delta T^{(s)}-\Delta T^{(s-1)}]^2 \quad (11)$$

式中，$T_0^{(s)}$，$\Delta T^{(s)}$为第s次迭代的拟合参数；$T_0^{(s-1)}$，$\Delta T^{(s-1)}$为第$s-1$次迭代的拟合参数。

当相邻两次迭代得到的拟合参数变化量小于设定阈值时，即认为迭代收敛。文中取收敛判据为$\eta<10^{-5}$。

2 拟合结果

采用Python语言编程实现了加权拟合算法，其中统计计算（如平均值、方差等）调用statistics库，加权最小二乘、权函数拟合及插值计算调用

scipy库，图形绘制则使用matplotlib库。

2.1 CrMo钢

文中选取在建加氢反应器的筒节锻件作为夏比冲击试样来源，材料牌号为12Cr2Mo1V，筒节外径为2 160 mm、壁厚为320 mm，在1/2壁厚处取样。材料经过705 ℃、8 h的最小模拟焊后热处理。系列温度夏比冲击试验数据见表1，双曲正切函数拟合结果见图5，Logistic函数拟合结果见图6。由拟合结果可知，基于双曲正切函数，55 J对应的温度：−72.5 ℃（无权重），−55.5 ℃（有权重）；基于Logistic函数，55 J对应的温度：−73.4 ℃（无权重），−72.6 ℃（有权重）。

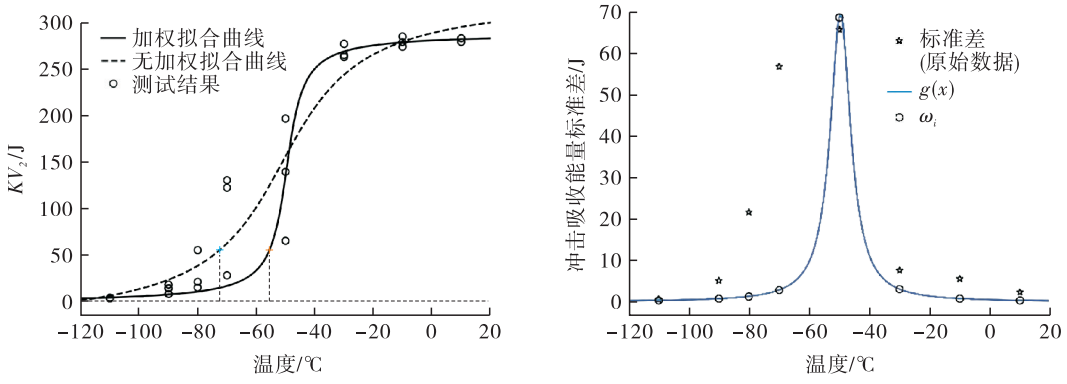
2.2 X80钢

采用系列温度夏比冲击试验测定材料韧脆转变温度，可对不同批次管线钢的质量进行评估。试验所用夏比冲击试样取自X80螺旋焊管，钢管外径为1 219 mm，壁厚为18.4 mm，取样方向为轴向。系列温度夏比冲击试验数据见表2。双曲正切函数与Logistic函数的拟合结果分别如图7、图8所示，CrMo钢与X80钢的拟合结果如表3所示。

表1 CrMo钢系列温度夏比冲击试验数据

Tab.1 Series temperature charpy impact test data of CrMo steel

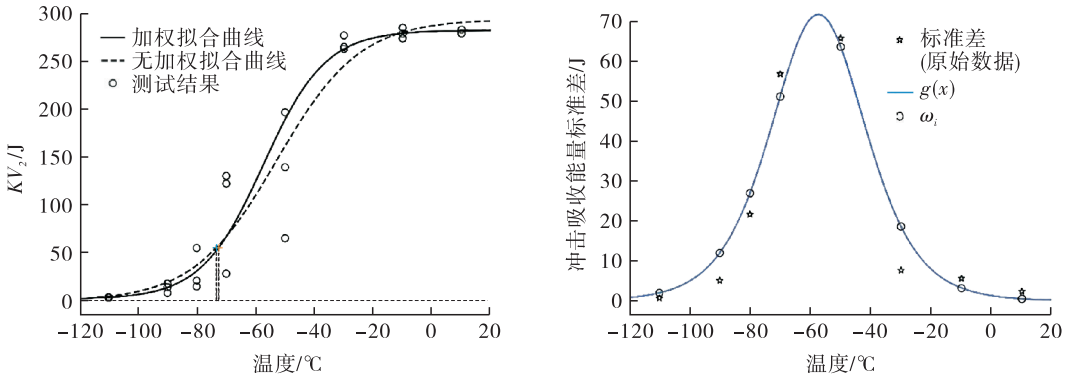
温度/℃	冲击吸收能量KV_2/J				
	测试1	测试2	测试3	平均值	标准差
10	278	282	282	281	2
−10	273	278	284	278	6
−30	264	262	276	267	8
−50	65	139	196	133	66
−70	130	28	122	93	57
−80	15	55	21	30	22
−90	8	14	18	13	5
−110	3	3	4	3	1



（a）冲击吸收能量−温度曲线　　（b）权函数曲线

图5 CrMo钢双曲正切函数拟合曲线

Fig.5 Hyperbolic tangent function fitting curve for CrMo steel



（a）冲击吸收能量−温度曲线　　（b）权函数曲线

图6 CrMo钢Logistic函数拟合曲线

Fig.6 Logistic function fitting curve for CrMo steel

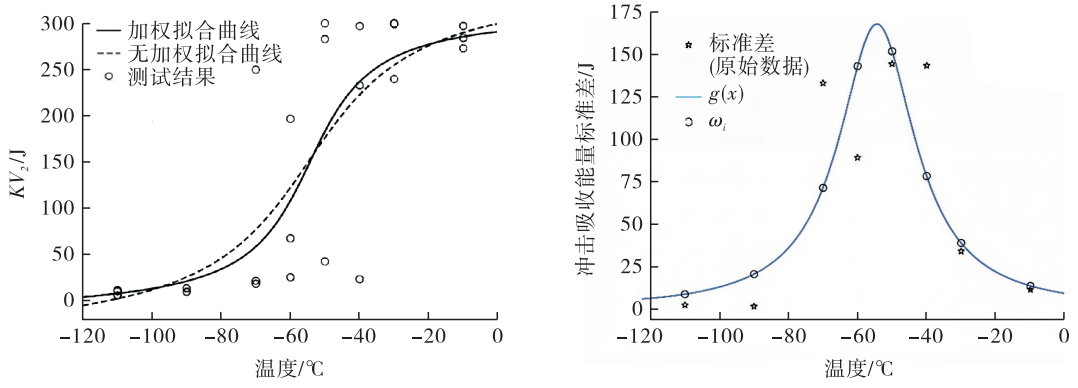
表2 X80钢系列温度夏比冲击试验数据

Tab.2 Series temperature charpy impact test data of X80 steel

温度/℃	冲击吸收能量KV_2/J				
	测试1	测试2	测试3	平均值	标准差
−10	296	283	272	284	12
−30	299	239	298	279	34
−40	296	232	23	184	143
−50	42	299	282	208	144
−60	25	196	67	96	89
−70	18	21	249	96	133
−90	13	9	10	11	2
−110	11	6	10	9	3

3 分析讨论

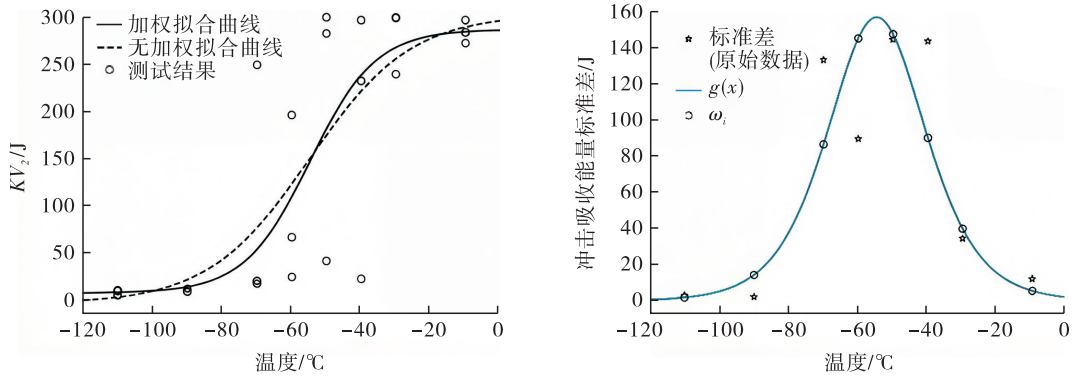
从表1、表2可以看出，系列温度夏比冲击试验中冲击吸收能量的平均值与标准差在整个温度范围内呈现明显的规律性变化。冲击吸收能量的平均值随试验温度降低而逐渐减小：CrMo钢的平均值从281 J下降至3 J，X80钢的平均值从284 J下降至9 J。尽管X80钢在个别相邻温度下的结果可能存在波动，但从整体温度范围来看，这种局部波动并不影响其下降趋势。冲击吸收能量的标准差随试验温度下降则呈现先增大后减小的规律：CrMo钢的标准差从2 J增至−50 ℃时的66 J，随后降至1 J；X80钢的标准差从12 J增至−50 ℃时的144 J，随后降至3 J。



（a）冲击吸收能量−温度曲线　　（b）权函数曲线

图7 X80钢双曲正切函数拟合曲线

Fig.7 Hyperbolic tangent function fitting curve for X80 steel



（a）冲击吸收能量−温度曲线　　（b）权函数曲线

图8 X80钢Logistic函数拟合曲线

Fig.8 Logistic function fitting curve for X80 steel

测试结果表明，数据分布呈现以下规律：下平台区域平均值小、标准差小；转变区区域平均值居中、标准差大；上平台区域平均值大、标准差小。

利用拟合函数的一阶导数构建权函数，能够反映数据标准差随温度变化的特征。文中CrMo钢的冲击吸收能量最大标准差为66 J，X80钢的最大标准差为144 J。拟合得到的双曲正切权函数参数为a=218（CrMo钢）和a=525（X80钢），

Logistic 权函数参数为 a=286（CrMo 钢）和 a=623（X80 钢）。参数 a 反映出 X80 钢的数据离散性更大。由图 3、图 5~8 中的权函数曲线可知，权函数始终在拟合曲线的中心点取得最大值，在曲线两端取得较小值，其取值符合“小-大-小”的分布规律。对权函数取值求倒数可知，拟合曲线中心对应的转变区数据拟合权重较小，而曲线两端的上、下平台对应的拟合权重较大。

表 3 参数拟合结果

Tab.3 Parameter fitting results

材料牌号	拟合方法	E_0	ΔE	T_0	ΔT	a	决定系数 R^2	最大斜率值
12Cr2Mo1V	双曲正切-无权重	−31.5	362.0	−51.0	20.0	—	0.928 58	5.8
	双曲正切-有权重	−2.3	289.6	−49.6	4.2	218	0.892 63	22.0
	Logistic-无权重	−0.6	294.3	−52.8	14.1	—	0.930 83	5.2
	Logistic-有权重	1.4	279.7	−57.4	10.6	286	0.916 13	6.6
X80	双曲正切-无权重	−48.4	397.7	−54.7	23.2	—	0.615 37	5.6
	双曲正切-有权重	−17.9	333.7	−54.4	13.5	525	0.608 63	7.9
	Logistic-无权重	−3.2	305.5	−54.9	14.6	—	0.616 27	5.2
	Logistic-有权重	8.0	278.2	−54.7	9.5	623	0.605 54	7.3

系列夏比冲击试验的加权拟合在权重计算中利用了原始数据的分布特征，并在最小二乘拟合时再次利用了原始数据；而无加权拟合仅使用原始数据进行拟合。决定系数 R^2 是评价拟合效果的一项指标，其值越接近 1，表明模型拟合越好。从表 3 可以看出，无加权拟合算法的决定系数 R^2 虽更接近 1，但其拟合结果存在上下平台拟合不足、转变区斜率偏小的问题。对于同一组夏比冲击试验数据，无加权拟合得到的下平台冲击吸收能量 E_0 均为负值，且曲线在上、下平台末端仍保持较大斜率，这与材料韧脆转变的物理规律不符。因此，在相同数据条件下，加权拟合算法能得到更优的拟合曲线。

权函数具有“中间大、两边小”的特点，利用其计算拟合权重，可使离散性较小的上下平台数据获得较大权重，而离散性较大的转变区数据获得较小权重。经加权处理后，虽然拟合决定系数 R^2 较未加权结果略有下降，但拟合曲线的下平台能量 E_0 数值得到改善，且曲线末端的斜率减小。加权拟合所得的曲线更符合物理意义。

加权拟合是在数据量有限条件下改善拟合效果的一种处理手段，它仅能在一定程度上弥补夏比冲击试验数据量不足的局限。由表 3 可见，对于文中的 CrMo 钢和 X80 钢试验数据，当采用双曲正切函数作为核函数时，即使经过加权拟合，所得下平台 E_0 仍为负值，该结果与该参数本身的物理意义不符。与 Logistic 函数相比，双曲正切函数拟合得到的下平台 E_0 更容易出现负值，且拟合结果受权重设置的影响更为显著。因此，以双曲正切函数为核心进行拟合时，需要更多的试验数据才能获得较为合理的拟合结果。

4 结论

针对系列温度夏比冲击试验确定材料韧脆转变温度的问题，提出了一种加权拟合算法。该算法依据转变曲线的变化规律与试验结果的离散特性分配拟合权重，为离散性较小的上、下平台数据赋予较大权重，为离散性较大的转变区数据赋予较小权重。利用 Logistic 函数和双曲正切函数，分别对 CrMo 钢与 X80 钢的系列温度夏比冲击试验数据进行无加权拟合与加权拟合处理，并通过对比拟合结果，得到以下结论：

（1）针对系列温度夏比冲击试验，通过建立拟合函数的一般形式，将待定参数从函数形式中分离，得到具有明确物理意义的 4 个参数。利用拟合函数的一阶导数构建权函数，实现了对试验结果方差较小的上、下平台赋予较大权重，而对结果方差较大的转变区赋予较小权重的加权拟合方法。基于下平台参数应满足 E_0>这一物理约束对拟合结果进行合理性判定，结果表明：对同一拟合函数而言，加权拟合能够改善下平台参数 E_0 的取值，所得结果更为合理。

（2）利用 4 种拟合算法分别对 CrMo 钢和 X80 钢的系列温度夏比冲击试验结果进行拟合，结果

表明：采用加权Logistic函数得到的拟合结果，其下平台参数为正值，且曲线末端斜率最小，在4种算法中获得的曲线最符合实际。

参考文献：

[1] 孙永辉，刘凯，商学欣，等.一种系列冲击试验数据拟合方法[J].理化检验（物理分册），2020，56（12）：22-25.
SUN Y H，LIU K，SHANG X X，et al. A date fitting method for series impact tests [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)，2020，56(12)：22-25.

[2] 赵建平，张秀敏，沈士明.材料韧脆转变温度数据处理方法探讨[J].石油化工设备，2004，33(4)：29-32.
ZHAO J P，ZHANG X M，SHEN S M. On the method of data processing for ductile-brittle transition temperature [J]. Petro-Chemical Equipment，2004，33(4)：29-32.

[3] 贾志刚，寿比南.加氢反应器步冷试验数据处理方法研究[C]//中国机械工程学会压力容器分会.第五届全国压力容器学术会议论文集.合肥：合肥工业大学出版社有限责任公司，2001：73-76.
JIA Z G，SHOU B N. Study on the method of step cooling test data fitting for hydrogenation reactors [C]//The Pressure Vessel Division of the Chinese Mechanical Engineering Society. Proceedings of the Fifth National Conference on Pressure Vessels. Hefei：Hefei University of Technology Press Co.，Ltd.，2001：73-76.

[4] 周昌玉，夏翔鸣.CrMo钢材料韧脆转变温度曲线的回归分析[J].压力容器，2003，20(6)：13-18.
ZHOU C Y，XIA X M. Regression analysis of ductile-brittle transition temperature curve for CrMo steel [J]. Pressure Vessel Technology，2003，20(6)：13-18.

[5] 王汉奎，商学欣，柳旺，等.高钢级油气管线环焊缝应变时效脆化研究[J].压力容器，2021，38(5)：8-13.
WANG H K，SHANG X X，LIU W，et al. Study on strain aging embrittlement of the girth weld of the high strength oil and gas pipeline [J]. Pressure Vessel Technology，2021，38(5)：8-13.

[6] 杨坤，王俊，李鹤，等.液态乙烷管道的韧脆转变及环焊接头可靠性研究[J].石油管材与仪器，2024，10(4)：55-59.
YANG K，WANG J，LI H，et al. Ductile-brittle transition and reliability of welded joints for liquid ethane pipelines [J]. Petroleum Tubular Goods& Instruments，2024，10(4)：55-59.

[7] 柯杨，刘仕伟.压力容器材料韧脆转变温度曲线拟合分析及应用研究[J].冶金与材料，2019，39(5)：60-61.
KE Y，LIU S W. Fitting and analysis of the ductile-brittle transition temperature curve of pressure vessel materials and application research [J]. Metallurgy and Materials，2019，39(5)：60-61.

[8] 唐振廷.冲击试样断口与力-位移曲线之间的关系[J].物理测试，2004(4)：1-5.
TANG Z T. Relationship between fracture and force-displacement curve of impact specimen [J]. Physics Examination and Testing，2004(4)：1-5.

[9] 王汉奎，李阳，姚呈祥，等.不同药芯焊丝工艺条件下X80管线钢焊缝组织与性能对比[J].压力容器，2024，41(1)：12-17.
WANG H K，LI Y，YAO C X，et al. Comparison of microstructure and properties of X80 girth weld joints welded by different flux-cored wire process conditions [J].Pressure Vessel Technology，2024，41(1)：12-17.

[10] 刘加高，饶谋生，左上军.材料韧脆转变温度数据处理方法[J].化学工程与装备，2010(4)：90-91.
LIU J G，RAO M S，ZUO S J. Data processing method for ductile brittle transition temperature of materials [J]. Chemical Engineering & Equipment，2010(4)：90-91.

[11] 罗晓蓉，陈晨枫，丁欲晓，等.基于Origin软件正确评定韧脆性转变温度[J].物理测试，2010，28(3)：37-43.
LUO X R，CHEN C F，DING Y X，et al. Evaluation of ductile-brittle transition temperature based on origin software [J]. Physics Examination and Testing，2010，28(3)：37-39.

作者简介：李阳（1984），男，高级工程师，主要从事天然气开采、输送方向的工作，通信地址：719000陕西省榆林市开发区轻工路中石油长庆油田长北作业分公司，E-mail：lyang1_cq@petrochina.com.cn。

通信作者：尤景泽（1995），男，工程师，主要从事材料微损评价、特种设备材料失效分析方向的工作，通信地址：101300北京市顺义区顺兴路1号中国特种设备检测研究院顺义院区，E-mail：13811513478@163.com。

本文引用格式：

李阳，李海舰，姚呈祥，等.材料韧脆转变行为的加权拟合算法研究[J].压力容器，2025，42(12)：32-39.

LI Yang，LI Haijian，YAO Chengxiang，et al. Study on weighted fitting algorithm for material ductile-to-brittle transition behavior [J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(12)：32-39.