

# 管道环焊缝可靠性的参数统计分布研究

任伟, 帅健\*

中国石油大学(北京), 北京 102249

\* 通信作者, sjclass@126.com

收稿日期: 2016-11-15

国家科技支撑计划项目(2015BAK16B02)资助

**摘要** 在管线实际运营过程中, 影响管线安全的不确定因素很多, 如果不能很好地考虑这些不确定性因素, 可靠性评定结果会产生较大偏差。本文首先对L415、L485、L555管道环焊缝的环焊缝拉伸强度、环焊缝冲击功和环焊缝断裂韧性等材料性能参数进行统计分析。采用常用的正态分布、对数正态分布、指数分布、Gumbel分布和Weibull二参数分布来描述这些参数的分布类型, 并对相应的分布类型进行参数估计。其次, 在给定的显著水平下, 分别利用K-S检验和 $\chi^2$ 检验对分布进行非参数检验。最后, 根据检验结果, 给出参数的最佳分布类型, 这对提高管道环焊缝可靠性分析的准确性有重要作用。

**关键词** 环焊缝; 可靠性; 参数估计; 非参数检验

## 0 引言

对于长输油气管线, 管线的建设实际上是一项工程浩大的焊接成型和长距离焊接安装过程。因此焊接质量是决定管线建成后能否安全、有效运行的关键因素。而在焊接过程中时常会出现各种各样的缺陷, 这些缺陷降低了管道强度, 严重威胁管道的安全运行。有必要对油气管道的环焊缝进行可靠性分析, 使其在管道设计及在役管道安全性评估中发挥重要作用。

在传统的可靠性评定方法中, 影响评定结果的各种因素一般都取定值, 然后根据经验取一个安全系数<sup>[1]</sup>。但是在实际工程应用中, 材料性能参数、缺陷几何尺寸以及外部载荷参数等基本变量都不是确定值, 这些基本变量通常情况下都不同程度地存在不确定性。通常情况下这些不确定性很小, 但是在分析过程中这些不确定性带来的误差有可能是不可接受的, 有时候甚至会得到矛盾或者很不合理的结果。这些不确定性主

要表现在随机性、模糊性以及未知性3个方面<sup>[2]</sup>。对于管道环焊缝可靠性分析来说, 影响其可靠性的基本变量本身的随机性、数据有限以及数据处理产生的误差等是造成不确定性的主要原因。由于制造年代、制造工艺以及技术程度的差异, 管道的直径和壁厚有了一定的变异性。另外, 由于管道材料组分和微观结构不同, 使得管道不可能是理想均质的, 因此材料性能参数也不可避免的带有随机性。受地区具体环境、焊接工艺和焊接技术的影响, 会产生各种各样的缺陷, 同时, 产生的缺陷的几何尺寸也会有相应的随机性。正常工况下压力是波动的, 也具有一定的随机不确定性。某些基本变量是通过实地测量或者实验方法得到的, 由于测量精度的限制、检测技术水平以及数据处理方法的差别, 造成这些变量有一定的误差, 这些也应该考虑到变量的不确定性当中。对于这些不确定性因素, 通常采用概率统计的方法来描述变量随机变化的性质, 这些变量往往服从一定的统计分布规律, 变

引用格式: 任伟, 帅健. 管道环焊缝可靠性的参数统计分布研究. 石油科学通报, 2016, 03: 484-492

REN Wei, SHUAI Jian. Research into the statistical distribution of reliability parameters for girth welds on pipelines. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 484-492. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.045

量取不同的概率分布函数,得到的分析结果可能会有较大变化,因此,确定随机变量的最佳分布类型是进行管道环焊缝可靠性分析的一个关键问题。

本文对于有的管道环焊缝相关数据进行整理,得到L415、L485、L555这3种钢级的管道环焊缝在不同温度情况下的抗拉强度、冲击功和断裂韧性。研究其统计分布规律,确定了最佳分布类型。

## 1 基本原理

### 1.1 概率分布

参与环焊缝可靠性分析的变量服从一定的统计分布规律,可靠性分析中常用的概率分布有正态分布、对数正态分布、指数分布、Gumbel分布、Weibull分布<sup>[3]</sup>。

#### (1) 正态分布

正态分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中,  $x$  表示随机变量,  $\mu$  表示随机变量的均值,  $\sigma$  表示随机变量的标准差。

正态分布的累积分布函数为:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2)$$

式中,  $x$  表示随机变量,  $\mu$  表示随机变量的均值,  $\sigma$  表示随机变量的标准差。

#### (2) 对数正态分布

对数正态分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $x$  表示随机变量,  $\mu$  表示对随机变量取自然对数后的均值,  $\sigma$  表示对随机变量取自然对数后的标准差。

对数正态分布的累积分布函数为:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (4)$$

式中,  $x$  表示随机变量,  $\mu$  表示对随机变量取自然对数后的均值,  $\sigma$  表示对随机变量取自然对数后的标准差。

#### (3) 指数分布

指数分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\lambda > 0$ , 是指数分布的参数,  $x$  表示随机变量。

指数分布的累积分布函数为:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\lambda > 0$ , 是指数分布的参数,  $x$  表示随机变量。

另外, 随机变量的均值为  $\frac{1}{\lambda}$ , 随机变量的方差为  $\frac{1}{\lambda^2}$ 。

#### (4) Gumbel分布

Gumbel分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right) \quad (7)$$

式中,  $x$  表示随机变量,  $\mu$  是随机变量的位置参数,  $\sigma$  是随机变量的尺度参数。

Gumbel分布的累积分布函数为:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right) \quad (8)$$

式中,  $x$  表示随机变量,  $\mu$  是随机变量的位置参数,  $\sigma$  是随机变量的尺度参数。

#### (5) Weibull分布

Weibull分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\alpha > 0, \beta > 0$ ,  $x$  表示随机变量,  $\alpha$  是随机变量的形状参数,  $\beta$  是随机变量的尺度参数。

Weibull分布的累积分布函数为:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\alpha > 0, \beta > 0$ ,  $x$  表示随机变量,  $\alpha$  是随机变量的形状参数,  $\beta$  是随机变量的尺度参数。

## 1.2 参数估计

如果要描述一系列数据的统计分布规律, 指定其分布类型, 需要确定分布类型中的具体参数值。这里用极大似然估计法进行参数估计<sup>[4]</sup>。

总体  $X$  的概率密度函数为  $f(x; \theta)$ ,  $x$  是  $X$  的样本值,  $\theta$  为待估参数。  $X_1, \dots, X_n$  的联合密度为  $\prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$ ,  $x_1, \dots, x_n$  是  $X_1, \dots, X_n$  的样本值。称  $L(\theta) = L(x_1, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)$  为样本的似然函数。

若  $L(x_1, \dots, x_n; \hat{\theta}) = \max L(x_1, \dots, x_n; \theta)$ , 则  $\hat{\theta}(x_1, \dots, x_n)$  为  $\theta$  的极大似然估计值, 称  $\hat{\theta}(X_1, \dots, X_n)$  为  $\theta$  的极大似然估计量。令  $\frac{dL(\theta)}{d\theta} = 0$ , 可求得  $\theta$ , 又因为  $L(\theta)$  与  $\ln L(\theta)$  在同一  $\theta$  处取极值, 因此也可令  $\frac{d}{d\theta} \ln L(\theta) = 0$ , 求得  $\theta$ 。以正态分布为例, 估计正态分布参数均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$ 。

X 的概率密度函数为:

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

似然函数为:

$$L(\mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

对似然函数取对数:

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln(2\pi) - \frac{n}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (13)$$

将对数似然函数对参数求偏导并令其为零:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial \sigma^2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2} \left( \sum_{i=1}^n x_i - n\mu \right) = 0 \\ -\frac{n}{2\sigma^2} + \frac{1}{2(\sigma^2)^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

整理可得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i - n\mu = 0 \\ n\sigma^2 - \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

最后求得所要参数:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{X} \\ \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \end{cases} \quad (16)$$

### 1.3 非参数检验

假设所得数据分别服从正态分布、对数正态分布、指数分布、Gumbel分布和Weibull分布, 由于总体分布形式并没有确定, 则利用非参数检验的方法检验总体是否服从指定的分布。常用的非参数检验方法有K-S检验和 $\chi^2$ 检验<sup>[5]</sup>。

#### (1) K-S检验

K-S检验也叫作D检验法, 主要是将理论分布下的累计频数分布与观察到的累计频数分布比较, 找出

最大的差异点, 并参照抽样分布, 决定这一差异是否处于偶然。其检验步骤如下:

①设定原假设:  $H_0$ : 总体X的分布函数为  $F(x)$ 。

②计算理论累计频数和观察到的累计频数。 $F_n(x)$  为样本量为n的随机样本观察值的累计分布函数, 且  $F_n(x) = i/n$  ( $i$  是等于或小于  $x$  的所有观察结果的数目),  $F(x)$  则为理论分布的累计概率分布函数。

③计算检验统计量  $D_n$ 。 $D_n$  为  $F(x)$  与  $F_n(x)$  间的最大偏差, 计算公式如下:

$$D_n = \max \{ |F(x) - F_n(x)| \} \quad (17)$$

若对于每一个  $x$ ,  $F(x)$  与  $F_n(x)$  都十分接近, 则实际样本的分布函数与理论分布函数拟合程度很高。

④查找临界值  $D_n$ , 并与计算所得  $D_n$  值比较, 当计算  $D_n$  值大于临界  $D_n$  值时拒绝原假设  $H_0$ , 当计算  $D_n$  值小于临界  $D_n$  值时接受原假设  $H_0$ 。

#### (2) $\chi^2$ 检验

利用  $\chi^2$  检验对总体分布进行检验, 首先应该设定原假设:  $H_0$ : 总体X的分布函数为  $F(x)$ 。然后根据样本的经验分布和假设的理论分布的吻合程度决定是否接受原假设。其检验步骤如下:

①把总体X的取值范围分为  $m$  个互不重叠的小区间, 记作  $A_1, A_2, \dots, A_m$ 。

②把落入第  $i$  个小区间  $A_i$  的样本值的个数记作  $f_i$ , 称为实测频数, 所有实测频数总和  $f_1 + f_2 + \dots + f_m$  等于样本容量  $n$ 。

③根据假设的理论分布, 算出总体X的值落入每个  $A_i$  的概率  $p_i$ , 则  $np_i$  就是落入  $A_i$  的样本值的理论频数。

④计算统计量  $\chi^2$  值。用实测频数减去理论频数, 即  $f_i - np_i$  表示经验分布与理论分布之间差异的大小。统计量  $\chi^2$  值的计算公式如下:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i} \quad (18)$$

若理论分布  $F(x)$  当中有  $r$  个未知参数需要用相应的估计量代替, 则当  $n \rightarrow \infty$  时, 统计量  $\chi^2$  值的分布渐近  $(m-r-1)$  个自由度的  $\chi^2$  分布。

⑤查找临界  $\chi^2$  值, 并与计算所得  $\chi^2$  值比较, 当计算  $\chi^2$  值大于临界  $\chi^2$  值时拒绝原假设  $H_0$ , 当计算  $\chi^2$  值小于临界  $\chi^2$  值时接受原假设  $H_0$ 。

## 2 变量拟合分布

对环焊缝的材料性能参数，包括抗拉强度、冲击功和断裂韧性的数据进行分布拟合。其中每个参数都选取L415、L485 和L555 这3种钢级的管道所对应的数据。

### 2.1 抗拉强度

采用极大似然估计法对抗拉强度数据进行参数估计，得到5种分布的分布参数，如表1所示。

根据已经得到的分布参数绘制概率密度函数，并与实际数据做比较。得到图1-图3。

表1 不同钢级的抗拉强度 (MPa) 对应不同分布的分布参数  
Table 1 Distribution parameters of girth weld tensile strength (MPa) in different steel grades

钢级		L415	L485	L555
正态	$\mu$	605.612	652.813	719.958
	$\sigma$	26.165	22.966	30.318
对数正态	$\mu$	6.405	6.481	6.578
	$\sigma$	0.044	0.035	0.043
指数	$\lambda$	1.651E-3	1.532E-3	1.389E-3
	$\mu$	617.929	664.352	734.070
Gumbel	$\sigma$	21.162	23.096	24.580
	$\alpha$	28.771	28.917	29.551
Weibull	$\beta$	617.534	663.939	733.630

分析图1-图3，L415管道的抗拉强度实际数据与拟合曲线比较，Gumbel分布和Weibull分布更符合实际数据，L485管道的抗拉强度实际数据与拟合曲线比较，正态分布和对数正态分布更符合实际数据，L555管道的抗拉强度实际数据与拟合曲线比较，Gumbel分布和Weibull分布更符合实际数据。

### 2.2 冲击功

采用极大似然估计法对抗拉强度数据进行参数估计，得到5种分布的分布参数，其中冲击试验的实验温度与试件尺寸会有所不同，如表2。

根据已经得到的分布参数绘制概率密度函数，并

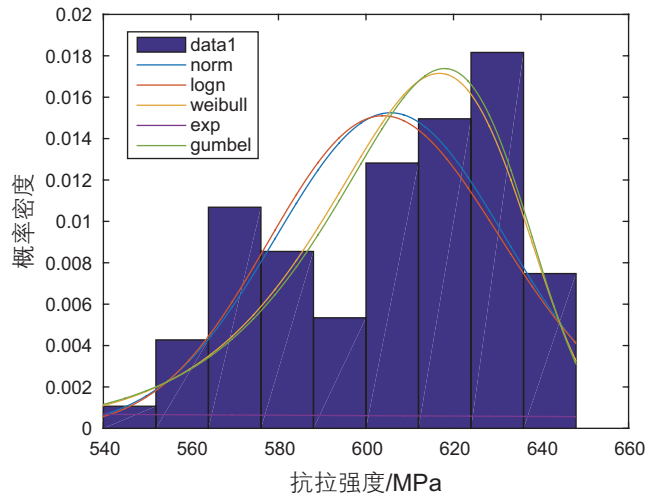


图1 L415 抗拉强度各分布类型拟合曲线  
Fig. 1 Fitting curve of girth weld tensile strength in grade L415

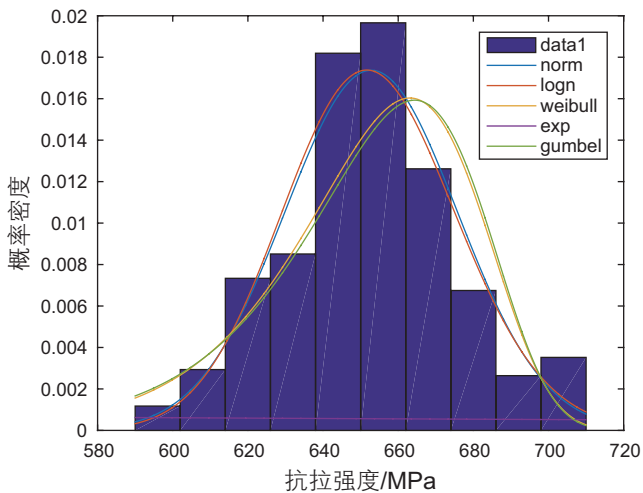


图2 L485 抗拉强度各分布类型拟合曲线  
Fig. 2 Fitting curve of girth weld tensile strength in grade L485

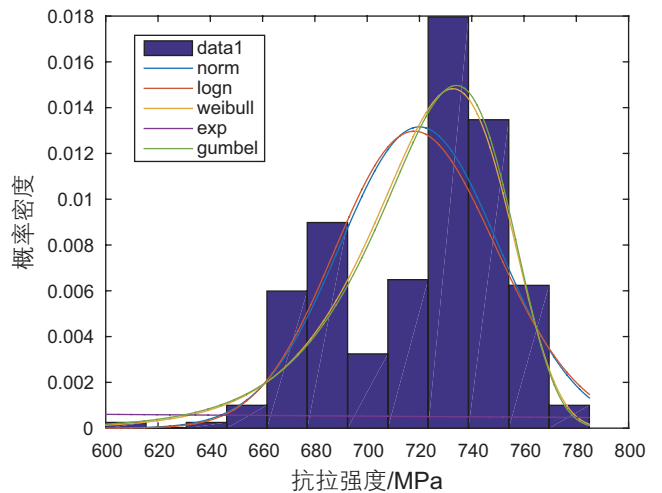


图3 L555 抗拉强度各分布类型拟合曲线  
Fig. 3 Fitting curve of girth weld tensile strength in grade L555

与实际数据做比较。得到图4-图7。

分析图4-图7, L415管道的冲击功实际数据与拟合曲线比较, 正态分布和Weibull分布更符合实际数

据, L485管道的冲击功实际数据与拟合曲线比较, 正态分布和Weibull分布更符合实际数据, L555管道的冲击功实际数据与拟合曲线比较, 正态分布和Weibull

表2 不同钢级的冲击功(J)对应不同分布的分布参数

Table 2 Distribution parameters of girth weld impact energy(J) in different steel grades

钢级	正态		对数正态		指数	Gumbel		Weibull	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\lambda$	$\mu$	$\sigma$	$\alpha$	$\beta$
L415(5-10-55,-20 °C)	147.042	35.907	4.955	0.283	6.801E-3	163.883	31.298	4.919	160.488
L485(7.5-10-55,-20 °C)	134.843	42.189	4.847	0.356	7.416E-3	155.745	42.661	3.568	149.753
L485(10-10-55,-20 °C)	167.104	53.526	5.062	0.351	5.984E-3	194.130	52.125	3.461	186.048
L555(10-10-55,-10 °C)	130.433	42.315	4.813	0.352	7.667E-3	152.171	46.282	3.324	145.259

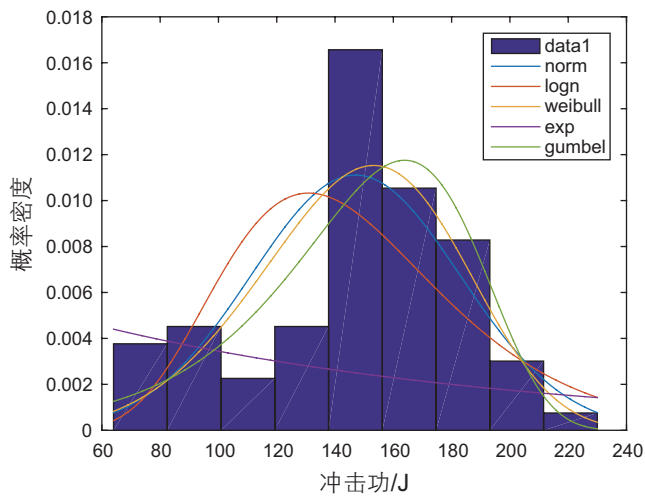


图4 L415(5-10-55,-20 °C) 冲击功各分布类型拟合曲线  
Fig. 4 Fitting curve of girth weld impact energy in grade L415(5-10-55,-20 °C)

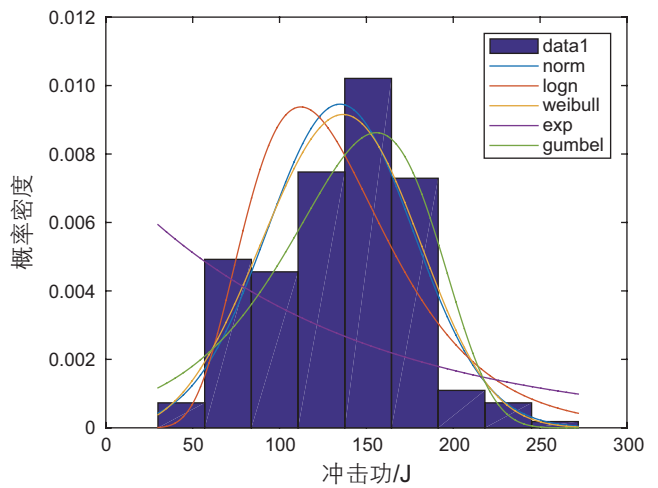


图5 L485(7.5-10-55,-20 °C) 冲击功各分布类型拟合曲线  
Fig. 5 Fitting curve of girth weld impact energy in grade L485(7.5-10-55,-20 °C)

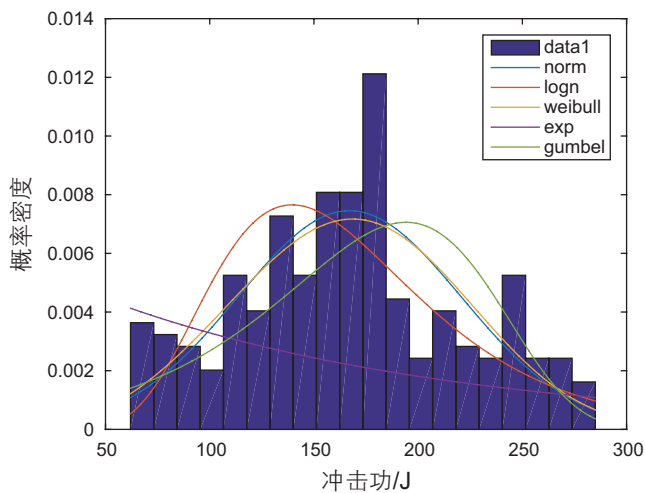


图6 L485(10-10-55,-20 °C) 冲击功各分布类型拟合曲线  
Fig. 6 Fitting curve of girth weld impact energy in grade L485(10-10-55,-20 °C)

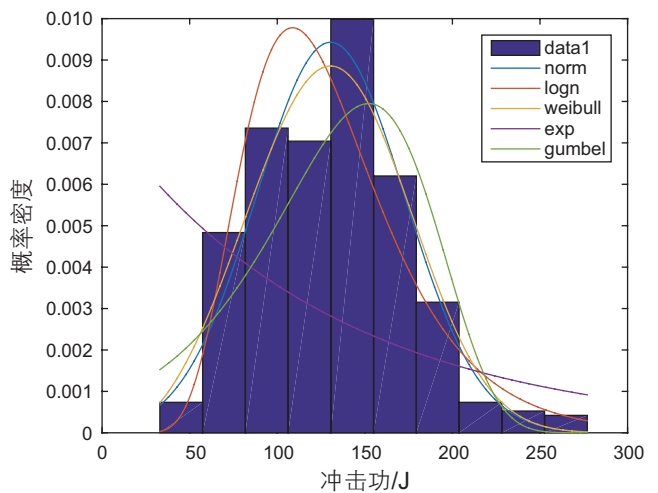


图7 L555(10-10-55,-10 °C) 冲击功各分布类型拟合曲线  
Fig. 7 Fitting curve of girth weld impact energy in grade L555(10-10-55,-20 °C)

分布更符合实际数据。

### 2.3 断裂韧性

环焊缝断裂韧性数据在不同钢级下，测试温度与焊接工艺都有所不同。L415 管线环焊缝是以药芯焊丝半自动焊焊接的，并在 0 °C 下测得其断裂韧性，L485 管线环焊缝是以自保护药芯焊丝半自动焊焊接的，并在 -20 °C 下测得其断裂韧性，L555 管线环焊缝是以脉冲气保护自动焊焊接的，并在 -20 °C 下测得其断裂韧

性。采用极大似然估计法对断裂韧性数据进行参数估计，得到 5 种分布的分布参数，如表 3。

根据已经得到的分布参数绘制概率密度函数，并与实际数据做比较。得到图 8-图 10。

分析图 8-图 10，L415 管道的断裂韧性实际数据与拟合曲线比较，正态分布、Gumbel 分布和 Weibull 分布更符合实际数据，L485 管道的断裂韧性实际数据与拟合曲线比较，对数正态分布更符合实际数据，L555 管道的断裂韧性实际数据与拟合曲线比较，

表 3 不同钢级的断裂韧性 (mm) 对应不同分布的分布参数  
Table 3 Distribution parameters of girth weld fracture toughness(mm) in different steel grades

钢级		L415	L485	L555
正态	$\mu$	0.481	0.263	0.303
	$\sigma$	0.193	0.098	0.046
对数正态	$\mu$	-0.833	-1.40	-1.205
	$\sigma$	0.503	0.370	0.153
指数	$\lambda$	2.078	3.801	3.301
	$\mu$	0.576	0.314	0.326
Gumbel	$\sigma$	0.186	0.100	0.044
	$\alpha$	2.782	2.951	7.360
Weibull	$\beta$	0.540	0.296	0.322

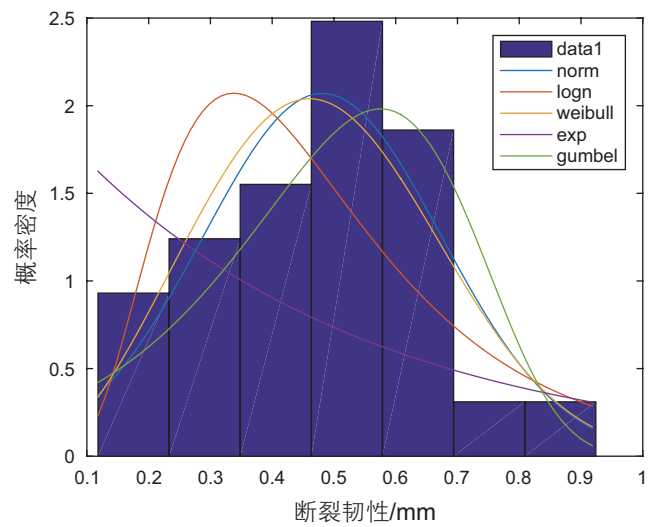


图 8 L415 断裂韧性各分布类型拟合曲线  
Fig. 8 Fitting curve of girth weld fracture toughness in grade L415

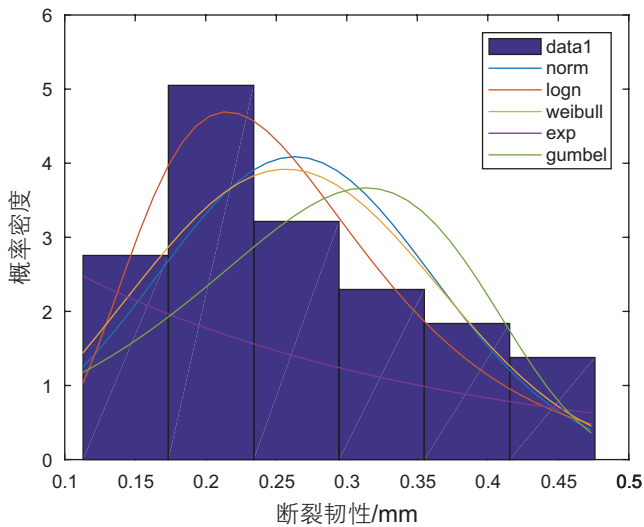


图 9 L485 断裂韧性各分布类型拟合曲线  
Fig. 9 Fitting curve of girth weld fracture toughness in grade L485

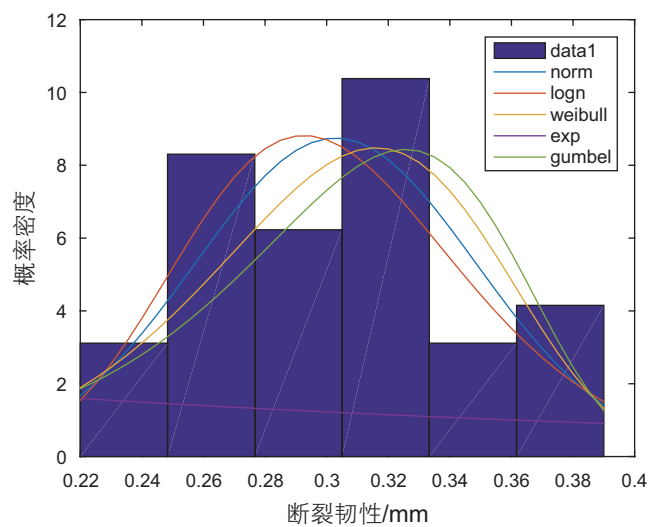


图 10 L555 断裂韧性各分布类型拟合曲线  
Fig. 10 Fitting curve of girth weld fracture toughness in grade L555

Weibull分布更符合实际数据。

### 3 变量拟合优度检验

根据拟合分布结果,确定了材料性能参数对应各个分布的分布参数值,利用K-S检验和 $\chi^2$ 检验来检验总体是否服从指定的分布。

#### 3.1 K-S检验

对L415、L485和L555这3种钢级管道抗拉强度、冲击功和断裂韧性3种材料性能参数的拟合分布结果进行K-S检验,得到总体服从的分布类型。设定原假设 $H_0$ :总体服从分布函数。给定显著性水平 $\alpha=0.05$ ,计算检验统计量 $D_n$ 与显著性水平 $\alpha=0.05$ 下的临界 $D_{n,0.05}$ ,比较 $D_n$ 与 $D_{n,0.05}$ 大小,若 $D_n$ 大于 $D_{n,0.05}$ 时拒绝原假设 $H_0$ ,若 $D_n$ 小于 $D_{n,0.05}$ 时接受原假设 $H_0$ ,总体服从对应的分布类型。总结结果如表4-表6。

从表4可以看出,对于L415管道抗拉强度服从正态分布、对数正态分布、Gumbel分布和Weibull分

布,对于L485管道抗拉强度服从正态分布和对数正态分布,对于L555管道抗拉强度服从Gumbel分布和Weibull分布。

从表5可以看出,对于L415管道冲击功服从正态分布、Gumbel分布和Weibull分布,对于L485管道厚度较小条件下的冲击功服从正态分布、Gumbel分布和Weibull分布,对于L485管道厚度较大条件下的冲击功服从正态分布、对数正态分布和Weibull分布,对于L555管道冲击功服从正态分布和Weibull分布。

从表6可以看出,对于L415管道断裂韧性服从正态分布、对数正态分布、Gumbel分布和Weibull分布,对于L485管道断裂韧性服从正态分布和对数正态分布,对于L555管道断裂韧性服从Gumbel分布和Weibull分布。

#### 3.2 $\chi^2$ 检验

对L415、L485和L555这3种钢级管道抗拉强度、冲击功和断裂韧性三种材料性能参数的拟合分布结果进行 $\chi^2$ 检验,得到总体服从的分布类型。设定原假设

表4 不同钢级的抗拉强度对应不同分布的K-S检验

Table 4 K-S test of girth weld tensile strength in different steel grades

钢级	$D_{n,0.05}$	正态	对数正态	指数	Gumbel	Weibull
		$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$
L415	0.154 0	0.083 6	0.090 4	0.541 8	0.079 1	0.078 2
L485	0.080 7	0.038 2	0.033 2	0.588 2	0.098 9	0.092 6
L555	0.084 3	0.136 1	0.143 7	0.578 2	0.082 3	0.084 4

表5 不同钢级的冲击功对应不同分布的K-S检验

Table 5 K-S test of girth weld impact energy in different steel grades

钢级	$D_{n,0.05}$	正态	对数正态	指数	Gumbel	Weibull
		$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$
L415(5-10-55,-20°C)	0.160 3	0.122 8	0.182 9	0.360 4	0.076 5	0.100 9
L485(7.5-10-55,-20°C)	0.095 2	0.054 3	0.113 5	0.324 6	0.074 3	0.050 8
L485(10-10-55,-20°C)	0.091 3	0.058 2	0.075 9	0.342 2	0.121 2	0.064 3
L555(10-10-55,-10°C)	0.068 9	0.033 6	0.082 4	0.338 1	0.103 1	0.026 7

表6 不同钢级的断裂韧性对应不同分布的K-S检验

Table 6 K-S test of girth weld fracture toughness in different steel grades

钢级	$D_{n,0.05}$	正态	对数正态	指数	Gumbel	Weibull
		$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$
L415	0.154 0	0.083 6	0.090 4	0.541 8	0.079 1	0.078 2
L485	0.080 7	0.038 2	0.033 2	0.588 2	0.098 9	0.092 6
L555	0.084 3	0.136 1	0.143 7	0.578 2	0.082 3	0.084 4

$H_0$ : 总体服从分布函数。给定显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 计算检验统计量  $\chi^2$  值与显著性水平  $\alpha = 0.05$  下的临界值  $\chi^2_{0.95}$ , 比较  $\chi^2$  与  $\chi^2_{0.95}$  大小, 若  $\chi^2$  大于  $\chi^2_{0.95}$  时拒绝原假设  $H_0$ , 若  $\chi^2$  小于  $\chi^2_{0.95}$  时接受原假设  $H_0$ , 总体服从对应的分布类型。总结结果如表 7-表 9。

从表 7 可以看出, 对于 L415 管道抗拉强度没有合适的分布类型, 对于 L485 管道抗拉强度服从正态分布和对数正态分布, 对于 L555 管道抗拉强度没有合适的分布类型。

从表 8 可以看出, 对于 L415 管道冲击功服从 Gumbel 分布, 对于 L485 管道厚度较小条件下的冲击功没有合适的分布类型, 对于 L485 管道厚度较大条件下的冲击功没有合适的分布类型, 对于 L555 管道冲击功没有合适的分布类型。

从表 9 可以看出, 对于 L415 管道断裂韧性服从正态分布、Gumbel 分布和 Weibull 分布, 对于 L485 管道断裂韧性服从正态分布、对数正态分布和 Weibull 分布, 对于 L555 管道断裂韧性服从正态分布、对数正态分布、Gumbel 分布和 Weibull 分布。

综合考虑拟合分布曲线比较与拟合优度检验结果,

可以得到材料性能参数对应不同钢级的最佳分布类型。对于抗拉强度, L415 管道抗拉强度服从 Gumbel 分布和 Weibull 分布, L485 管道抗拉强度服从正态分布和对数正态分布, L555 管道抗拉强度服从 Gumbel 分布和 Weibull 分布; 对于冲击功, L415 管道冲击功服从正态分布和 Weibull 分布, L485 管道冲击功服从正态分布和 Weibull 分布, L555 管道冲击功服从正态分布和 Weibull 分布; 对于断裂韧性, L415 管道断裂韧性服从正态分布、Gumbel 分布和 Weibull 分布, L485 管道断裂韧性服从对数正态分布, L555 管道断裂韧性服从 Gumbel 分布和 Weibull 分布。

### 4 结论

(1)通过拟合分布曲线比较与拟合优度检验, 推荐抗拉强度服从 Gumbel 分布和 Weibull 分布, 冲击功服从正态分布和 Weibull 分布, 断裂韧性服从 Gumbel 分布和 Weibull 分布。

(2)将推荐的材料性能参数的最佳分布类型应用于管道环焊缝可靠性分析中, 可以适当提高分析结果准确性。

表 7 不同钢级的抗拉强度对应不同分布的  $\chi^2$  检验

Table 7  $\chi^2$  test of girth weld tensile strength in different steel grades

钢级	$\chi^2_{0.95}$	正态	对数正态	指数	Gumbel	Weibull
		$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$
L415	11.070 5	16.064 9	17.156 7	1375.978	12.985 0	12.846 2
L485	14.067 1	9.395 6	9.441 1	6065.699	44.215 9	37.867 3
L555	12.591 6	68.948 4	73.517 1	5330.214	54.964 6	54.254 0

表 8 不同钢级的冲击功对应不同分布的  $\chi^2$  检验

Table 8  $\chi^2$  test of girth weld impact energy in different steel grades

钢级	$\chi^2_{0.95}$	正态	对数正态	指数	Gumbel	Weibull
		$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$
L415(5-10-55,-20 °C)	11.070 5	15.814 6	29.775 6	210.859 7	10.409 0	13.194 7
L485(7.5-10-55,-20 °C)	11.070 5	21.215 0	47.972 3	355.421 2	33.672 8	18.782 6
L485(10-10-55,-20 °C)	27.587 1	34.415 1	61.877 7	379.098 5	55.834 3	33.576 4
L555(10-10-55,-10 °C)	14.067 1	36.302 2	32.171 9	555.734 7	356.793 2	35.808 6

表 9 不同钢级的断裂韧性对应不同分布的  $\chi^2$  检验

Table 9  $\chi^2$  test of girth weld fracture toughness in different steel grades

钢级	$\chi^2_{0.95}$	正态	对数正态	指数	Gumbel	Weibull
		$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$	$\chi^2$
L415	7.814 7	1.707 6	8.083 1	34.535 0	2.366 5	2.146 6
L485	7.814 7	3.193 6	0.853 4	33.539 0	8.499 5	2.648 2
L555	7.814 7	3.346 5	2.805 6	144.588 1	7.344 5	5.102 4



## 参考文献

- [1] 钟群鹏, 金星, 洪延姬, 等. 断裂失效的概率分析和评估基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000. [ZHONG Q P, JIN X, HONG Y J, et al. Probabilistic analysis and evaluation basis for fracture failure [M]. Beijing: Beihang University Press, 2000.]
- [2] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996. [ZHAO G F. Theory and Application of Engineering Structure Reliability [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1996.]
- [3] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版, 2010. [SHENG Z, XIE S Q, PAN C Y. Probability theory and mathematical statistics (Fourth Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.]
- [4] 李时. 应用统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. [LI S. Applied statistics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.]
- [5] 吴翊, 李永乐, 胡庆军. 应用数理统计[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995. [WU Y, LI Y L, HU Q J. Applied mathematical statistics [M]. ChangSha: National University of Defence Technology Press, 1995.]

## Research into the statistical distribution of reliability parameters for girth welds on pipelines

REN Wei, SHUAI Jian

*China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102200, China*

**Abstract** During the actual operation of the pipelines, there are many uncertain factors affecting pipeline safety. If these uncertain factors are not well considered, the results of reliability analysis will have greater deviations. In this paper, we made a statistical analysis of material properties of L415, L485 and L555 pipeline girth welds, including girth weld tensile strength, girth weld impact energy and girth weld fracture toughness. Normal distribution, logarithmic normal distribution, exponential distribution, Gumbel distribution and two-parameter Weibull distribution were used to describe the distribution of these parameters and to estimate parameter distributions. Then K-S and  $\chi^2$  tests were used for a non-parametric test under the given significant level. Finally, according to test results, the best distributions of parameters were proposed, which is important to improve the accuracy of reliability analysis for girth welds on pipelines.

**Keywords** girth weld; reliability; parameter estimation; non-parametric test

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.045

(编辑 付娟娟)