

基于小冲杆试验的管道钢断后伸长率研究^{*}

STUDY ON PERCENTAGE ELONGATION AFTER FRACTURE OF PIPELINE STEEL BASED ON SMALL PUNCH TEST

任辰一^{**} 曹宇光^{***} 甄莹 祖毅真 张玉

[中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 青岛 266580]

REN ChenYi CAO YuGuang ZHEN Ying ZU YiZhen ZHANG Yu

[College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China),
Qingdao 266580, China]

摘要 断后伸长率是表征管材塑性的典型指标,管道局部如焊接接头处受尺寸限制无法开展单轴拉伸试验,需要借助微试样试验方法完成取样及测试。小冲杆试验作为一种微试样试验方法,能够用于获取多种力学性能参数。当前研究中,主要通过经验关联方法将载荷-位移曲线中最大位移、最大载荷对应位移及试样断后弧长等关键参量关联至材料断后伸长率。然而,上述方法对管道钢的适用性不明确,使其对管道钢材料无法直接应用。针对这一问题,首先讨论了上述基于不同特征参量的经验关联方法对管道钢的适用性,之后提供了一种断后弧长简化计算方法,并形成了适用于管道钢的基于断后弧长的经验关联公式。在此基础上,进行厚度效应修正,建立了基于小厚度试样确定管道钢材料断后伸长率的经验公式并进行可靠性验证。结果表明,基于断后弧长简化计算方法的经验关联公式确定的断后伸长率最大误差为 5.08%,厚度效应修正公式对小厚度试样计算结果的最大误差为 5.53%,证明建立的经验关联公式拟合效果好且对管道钢具有良好的适用性,可为其他钢级管道局部区域断后伸长率的计算提供理论基础。

关键词 小冲杆试验 单轴拉伸试验 断后伸长率 管道钢 断后弧长 厚度效应

中图分类号 TG115.5

Abstract Percentage elongation after fracture is a typical index to characterize the plasticity of the pipe, and the partial size of the pipe such as the welded joint can not carry out a single-axis tensile test, and it is necessary to complete the sampling and testing with the help of micro-specimen test methods. As a micro-specimen test method, the small punch test can be used to obtain a variety of mechanical property parameters. In the current study, the key parameters such as the maximum displacement, the corresponding displacement of the maximum load and the arc length after fracture are correlated to the percentage elongation after fracture of the material mainly through the empirical correlation method. However, the applicability of the above method to pipeline steel is not clear, making it impossible to directly apply to pipeline steel materials. In view of this problem, firstly, the applicability of the above-mentioned empirical association method based on different characteristic parameters to pipeline steel was discussed, and then a simplified calculation method for arc length after fracture was provided, and an empirical association formula based on the arc length after fracture for the pipeline steel was formed. On this basis, the thickness effect correction was carried out, and the empirical formula for determining the percentage elongation of pipeline steel material after fracture was established based on small thickness specimens and the reliability was verified. The results show that the maximum error of the percentage elongation after fracture determined by the empirical association formula based on the simplified calculation method of arc length after fracture is 5.08%, and the maximum error of the thickness effect correction formula for the calculation result of small thickness specimen is 5.53%, which proves that the established empirical association formula has good fitting effect and good applicability to pipeline steel, which can provide a theoretical basis for the calculation of percentage elongation after fracture in the local area of other steel grade pipelines.

Key words Small punch test; Uniaxial tensile test; Percentage elongation after fracture; Pipe steel; Arc length after fracture; Thickness effect

^{*} 20221019 收到初稿, 20230107 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (12272412, 12202502), 山东省自然科学基金项目 (ZR2020ME093, ZR2022QE039) 资助。

^{**} 任辰一, 女, 1998 年生, 山东潍坊人, 汉族, 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院硕士研究生, 主要研究方向为管材性能多尺度表征。

^{***} 曹宇光 (通信作者), 男, 1979 年生, 湖南湘潭人, 汉族, 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为管道完整性、海洋工程结构设计、断裂失效分析等。

Corresponding author: CAO YuGuang, E-mail: cao_yuguang@qq.com, Fax: +86-532-86981822

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 12272412, 12202502), and the Shandong Provincial Natural Science Foundation (No. ZR2020ME093, ZR2022QE039).

Manuscript received 20221019, in revised form 20230107.

0 引言

管线钢是油气输送管道最常用的材料,长期在高压、腐蚀等环境中服役,难免出现开裂等现象^[1-2]。断后伸长率作为金属材料最基本力学性能指标之一,反映金属材料断裂前发生不可逆永久形变的能力,通常通过单轴拉伸试验获取^[3-4]。受尺寸限制,管道局部区域无法开展单轴拉伸试验,需要借助微试样试验方法来获取金属材料的断后伸长率。

小冲杆试验作为一种微试样试验方法,能提供相对准确的材料性能,在 20 世纪 80 年代由美国 Handford 实验室提出^[5-7]。试验时,冲头以一定速度来冲压试样圆片,传感器记录冲头载荷和冲头位移,构成载荷-位移曲线,以此分析得到材料各项力学性能参数。

目前通过小冲杆试验确定材料断后伸长率的方法主要有三类。第一类方法是将小冲杆试样载荷-位移曲线中的最大位移与断后伸长率进行经验关联,该方法首先由关凯书等^{[8]209-215}提出,并将十几种材料的小冲杆试样载荷-位移曲线中的最大位移与断后伸长率进行关联,按屈强比 0.67 将材料分成两类,分别构成了两个线性经验公式。第二类方法是将小冲杆试样载荷-位移曲线中的最大载荷对应的位移与断后伸长率进行经验关联,该方法首先由 RODRIGUEZ C 等^{[9]188-192}提出,DÍEZ P M B 等^[10]发现他提出的关联形式限制了材料的适用性,在此基础上加入截距。LECLERC N 等^{[11]116501}用改进后的关联形式验证 SS316、Cu、Al6061 等 9 种材料标准厚度小冲杆试样载荷-位移曲线中最大载荷对应的位移与断后伸长率之间的关系,发现两者之间的线性关系较差。第三类方

法是将小冲杆试样的断后弧长与断后伸长率进行经验关联,此方法由邹晓慧^{[12]38-40}提出,并且对 Q370R、2.25Gr1Mo 等 9 种材料的断后弧长与断后伸长率进行关联,发现对于这 9 种材料,两者具有明显线性关系。然而,上述方法存在特征参量与断后伸长率的关联程度及对管道钢适用性不明确等问题,需对其关联公式进行调整,且上述经验关联均基于标准厚度小冲杆试样(0.5 mm±0.005 mm),对于管道环焊缝区域等无法取得标准厚度小冲杆试样的区域,计算断后伸长率时需考虑厚度效应的影响。

针对上述问题,本文首先对不同钢级管道钢分别开展单轴拉伸试验和标准厚度试样的小冲杆试验,利用试验结果对现有基于标准厚度小冲杆试样的断后伸长率预测公式适用性进行讨论,同时提供了一种简化计算断后弧长的方法,通过系数修正,形成了适用于管道钢的基于断后弧长的经验关联公式。在此基础上,以 X80 钢为研究对象,对厚度为 0.250、0.300、0.350、0.400、0.450 mm 的小厚度试样进行小冲杆试验,系统分析厚度效应对管道钢断后伸长率的影响。基于分析结果,对受厚度影响的适用于管道钢的基于断后弧长的断后伸长率经验关联公式进行修正,得到适用于计算小厚度试样断后伸长率的经验公式并进行适用性验证。

1 试验材料及方法

选用 X80、X70、X65 及 X56 管道钢的母材区域材料开展单轴拉伸试验和小冲杆试验,其中,根据壁厚、管径等要素将不同批次 X80、X70 钢材料进一步细分,其化学成分如表 1 所示。

表 1 X56、X65、X70 和 X80 化学成分
Tab. 1 Chemical composition of X56, X65, X70 and X80

	C	Mn	Si	S	P	Nb	Mo	V	Ti	Cr	Cu
X80-1	0.043	1.870	0.230	0.003	0.010	0.060	0.270	0.006	0.017	0.025	0.130
X80-2	0.060	1.810	0.270	0.002	0.011	—	0.310	—	0.015	0.020	0.280
X70-1	0.080	1.650	0.200	0.003	0.015	0.040	0.100	—	0.012	0.180	—
X70-2	0.061	1.53	0.24	0.001	0.011	—	0.234	0.005	—	0.031	0.012
X65	0.090	1.350	0.220	0.003	0.001	0.030	—	0.035	0.025	—	—
X56	0.130	1.30	0.500	0.015	0.020	0.055	0.030	0.080	0.030	0.100	0.150

根据标准 GB/T 228.1—2021,从管材上使用电火花线切割板状单轴拉伸试样,如图 1(a)所示,试样的标距段长度为 60 mm。同时从单轴拉伸试样取样位置附近取下直径为 10 mm,厚度为 0.700 mm 的圆片形

小冲杆试样,用砂纸对加工好的试样进行打磨,消除热影响区和加工硬化影响区,最终得到标准厚度 t 为 0.5 mm±0.005 mm 的小冲杆试样^[13-14]。

对每种管材分别进行 3 次单轴拉伸试验,取其

断后伸长率的平均值进行后续分析。单轴拉伸试验通过万能试验机进行,用恒定的加载速率对每种管材试样进行试验,与传统打点测量断后伸长率方法不同的是,本次试验使用数字图像相关(Digital Image Correlation,DIC)测量系统记录试验应变,同时使用虚拟引伸计测量断后伸长率。同样对每种管材进行3次小冲杆试验。小冲杆试验装置如图1(b)所示,由上夹具、下夹具、试样和头部半径 r 为1.25 mm的冲杆4部分组成。下夹具的孔径为4 mm,下夹具的倒角为 $0.5\text{ mm}\times 45^\circ$ 。试验在室温下进行,冲杆同样以恒定加载速率下压试样,当载荷下降至最大载荷的80%时,试样确定断裂并停止试验,试验过程中记录冲头载荷和冲头位移数据,以构成小冲杆试样的载荷-位移曲线。

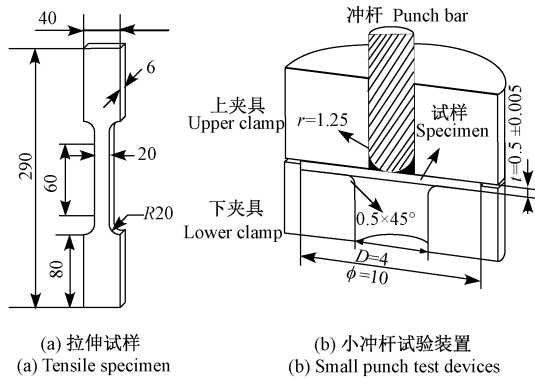


图1 拉伸试样与小冲杆试验装置
Fig. 1 Tensile specimen and small punch test device

不同等级管材单轴拉伸试验所得的断后伸长率平均值如表2所示。图2给出了小冲杆试样载荷-位移曲线最大载荷对应的位移 d_m 与最大位移 δ 的示意图。小冲杆试验获得的钢材标准厚度试样的载荷-位移曲线如图3所示。由图3可以获得小冲杆试验的特征参数,包括最大载荷下的位移、最大位移等数据,均列于表3。

表2 不同等级管道钢拉伸试验的断后伸长率

Tab. 2 Percentage elongation after tensile test fracture of different grades of pipe steel

	试验材料 Test material					
	X80-1	X80-2	X70-1	X70-2	X65	X56
伸长率 Percentage elongation A	21.95	21.84	21.32	21.58	22.28	21.57

2 小冲杆试验确定材料断后伸长率方法对管道钢的适用性讨论

2.1 基于最大位移的断后伸长率确定方法

关凯书等^{[8]209-215}以屈强比0.670为分界线,将抗拉强度小于600 MPa的材料分为两类,通过关联小冲

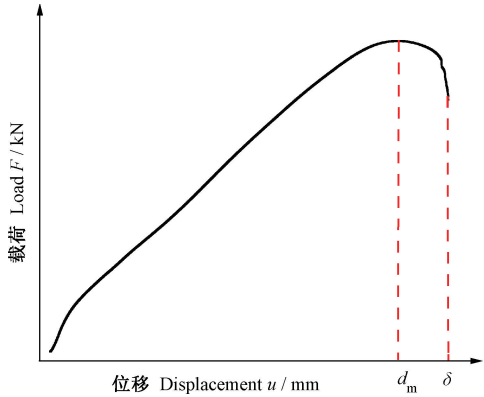


图2 d_m 和 δ 取值示意图

Fig. 2 Schematic diagram of d_m and δ values

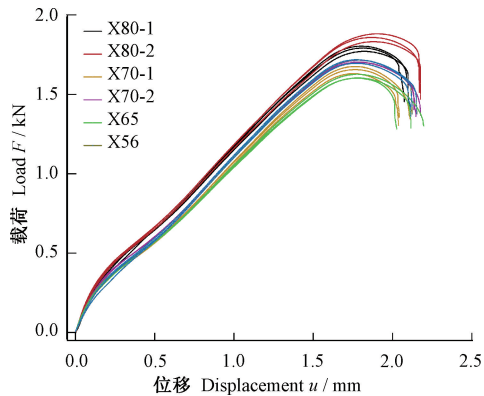


图3 小冲杆试样载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of the small punch specimen

表3 不同等级管道钢小冲杆试样参数

Tab. 3 Specimen parameters of small punches of different grades of pipe steel

试验材料 Test material	t	d_m	δ
X80-1	0.504	1.814	2.074
	0.502	1.819	2.107
	0.505	1.808	2.087
X80-2	0.502	1.895	2.169
	0.498	1.868	2.176
	0.503	1.858	2.162
X70-1	0.501	1.706	2.134
	0.500	1.794	2.177
	0.499	1.792	2.147
X70-2	0.497	1.687	2.029
	0.497	1.742	2.009
	0.500	1.756	2.183
X65	0.500	1.771	2.197
	0.499	1.770	2.027
	0.497	1.780	2.116
X56	0.499	1.826	2.152
	0.501	1.771	2.115
	0.500	1.777	2.123

杆试样的最大位移与拉伸断后伸长率,分别提出了两种预测材料断后伸长率的线性公式。对于屈强比 $R_{eL}/R_m > 0.670$ 和 $R_{eL}/R_m < 0.670$ 的材料,经验拟合公式分别为

$$A_{sp} = 12.630 \frac{\delta}{t} - 19.700, R_{eL}/R_m > 0.670 \quad (1)$$

$$A_{sp} = 48.450 \frac{\delta}{t} - 159.62, R_{eL}/R_m < 0.670 \quad (2)$$

式中, A_{sp} 为经验拟合公式计算的材料断后伸长率; t 为试样厚度, mm; δ 为小冲杆试样载荷-位移曲线中的最大位移, mm。

基于单轴拉伸试验结果, 分析得到试验管材屈服强度与抗拉强度, 同时计算材料屈强比, 均列于表 4。由表 4 可以看出, 试验管材屈强比均大于 0.670, 且管材的断后伸长率在其研究材料断后伸长率的范围之内, 因此利用式(1)基于小冲杆试样最大位移参量对材料断后伸长率进行计算, 计算结果同样列于表 4。由表 4 可以发现, 公式预测值与拉伸试验实测值误差均在 50 % 以上, 可以认为式(1)对试验所用管材并不适用。

表 4 由式(1)计算的不同等级管道钢的断后伸长率

Tab. 4 Percentage elongation after fracture of different grades of pipe steel calculated by formula (1)

钢材 Steel	屈服强度 Yield strength R_{eL}/MPa	抗拉强度 Tensile strength R_m/MPa	屈强比 Yield ratio R_{eL}/R_m	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{Asp}/\%$
X80-1	585.666	689.303	0.850	32.27	46.76
				33.31	54.65
				32.50	45.59
				34.87	57.44
X80-2	545.01	655.730	0.830	35.49	65.83
				34.59	57.40
				34.21	55.34
				35.29	65.53
X70-1	563.074	623.919	0.902	34.53	59.73
				31.86	40.92
				31.35	38.24
				35.44	57.94
X70-2	579.333	644.667	0.899	35.80	63.08
				31.61	42.36
				34.07	50.10
				34.66	60.83
X65	553.41	626.773	0.883	33.73	56.28
				33.93	57.22
X56	531.173	625.733	0.849		

$$A_{sp} = \gamma_1 \frac{d_m}{t} + \gamma_2 \quad (4)$$

式中, γ_1 、 γ_2 为相关系数。

LECLERC N 等^{[11]116501} 用式(4)验证 SS316、Cu、Al6061 等 9 种材料标准厚度小冲杆试样载荷-位移曲线中最大载荷对应的位移与断后伸长率之间的关系, 并得到式(4)中相关系数 γ_1 、 γ_2 , 即

$$A_{sp} = 8.6320 \frac{d_m}{t} - 1.6940 \quad (5)$$

式(5)拟合材料的断后伸长率的范围为 10%~55%, 本文研究管材的断后伸长率值包含在此范

2.2 基于最大载荷对应位移的断后伸长率确定方法

RODRIGUEZ C 等^{[9]188-192} 为了得到以 30CrMo5-2 板作为基材、奥氏体不锈钢 EN 1600 188 Mn B22(ER 307-15 MOD)作为填充金属的焊接接头热影响区材料的断后伸长率, 提出了预测材料断后伸长率的相关方程, 为

$$A_{sp} = \gamma \frac{d_m}{t} \quad (3)$$

式中, γ 为相关系数; d_m 为小冲杆试样载荷-位移曲线中最大载荷对应的位移, mm。

GARCIA T E 等^[15]使用该方程预测钢的断后伸长率, 发现预测的断后伸长率与拉伸断后伸长率误差大。LECLERC N 等^{[11]116501} 发现上述相关性限制了材料的适用性, 为了提高相关方程的适用性, 在式(3)中添加了截距, 即

围内, 因此讨论式(5)对管材的适用性, 结果如表 5 所示。由表 5 可以看出, 计算值与单轴拉伸试验值的误差在 20 % 以上, 可以认为, 式(5)不适合预测本文研究管材的断后伸长率。

2.3 基于断后弧长的断后伸长率确定方法

邹晓慧^{[12]38-40} 为测得 4034 钢、N35696 等材料小冲杆试样的断后伸长率, 提出了用小冲杆试样断后弧长确定材料断后伸长率的相关方程, 即

$$A_{sp} = 31.979S - 169.31 \quad (6)$$

式中, S 为小冲杆试样的断后弧长, mm。

文献[12]³⁸⁻⁴⁰ 中计算断后弧长是先利用显微镜扫描

切割后的试样,后用线性积分的方法测量材料的断后弧长。本文提出了一种简化计算断后弧长的方法,近似地将其看成椭圆周长的一半,如图 4 所示,椭圆周长的计算式为^[16]

$$S=\frac{L}{2 \pi} \theta-\sin 2 \theta / 4 \pi\left[\frac{\sin ^2 \theta}{\left(2 \alpha \pi-L\right)^{13 / 3}}+\frac{\cos ^2 \theta}{\left(L-2 \delta \pi\right)^{13 / 3}}\right]$$

(7)

$$L=\pi(a+\delta)\left[1+3 h^2 /\left(10+\sqrt{4-3 h^2}\right)\right]$$

(8)

$$h=\frac{a-\delta}{a+\delta}$$

(9)

式中, L 为椭圆周长,mm; θ 为离心角, $\theta \in[0,2 \pi]$; a 为受压区最大半径,mm; δ 为最大位移,mm。

因为本文研究计算断后弧长的方法与文献^[12]³⁸⁻⁴⁰的方法不同,所以直接对式(6)进行调整,调整结果如式(11)所示,通过式(7)得到的钢材断后弧长如表 6 所示。

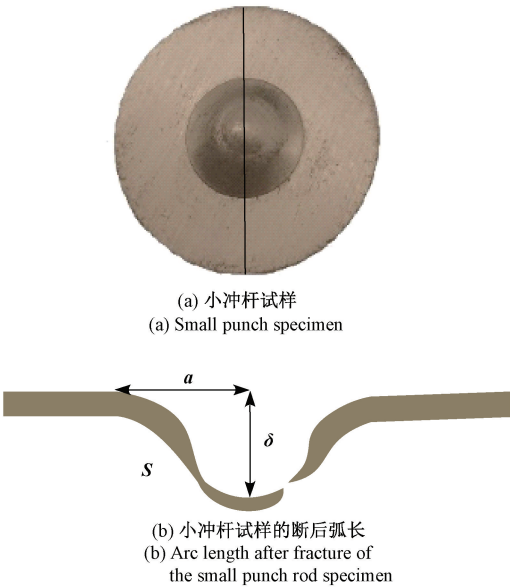


图 4 小冲杆试样及其断后弧长

Fig. 4 Small punch specimen and its the post-break arc length after fracture

表 5 由式(5)计算的不同钢级管道钢小冲杆试样的断后伸长率

Tab. 5 Percentage elongation after fracture of small punch rod specimens of different steel grade pipes calculated by formula (5)

钢材 Steel	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{A_{sp}}/\%$	钢材 Steel	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{A_{sp}}/\%$
X80-1	39.87	33.82	X70-2	34.07	22.2
	40.56	34.78		37.20	26.51
	39.33	33.08		37.40	26.78
	44.85	41.44		38.25	29.61
X80-2	44.18	40.49	X65	38.40	29.80
	42.56	38.23		39.37	31.14
	34.57	27.92		41.37	38.59
	39.56	35.21		38.25	33.61
X70-1	39.44	35.34		38.59	34.37

表 6 不同钢级管道钢的断后弧长

Tab. 6 Arc length after fracture of post-break arc of different steel grade pipes' steel

钢材 Steel	断后弧长 Arc length after fracture S/mm	钢材 Steel	断后弧长 Arc length after fracture S/mm
X80-1	7.231	X70-2	7.122
	7.240		7.191
	7.211		7.357
	7.335		7.254
X80-2	7.347	X65	7.118
	7.326		7.379
	7.234		7.094
	7.177		7.152
X70-1	7.147		7.106

3 基于小冲杆试验的管道钢断后伸长率确定方法研究

3.1 标准厚度小冲杆试验确定管道钢断后伸长率

基于上述研究可以发现,现有公式计算得到的断

后伸长率与单轴拉伸试验得到的值相比误差在 20% 以上,分析其主要原因是拟合公式时考虑的材料不包含本文研究的管材,因此文献中的公式对管道钢的适用性低。因为式(5)拟合系数低且对本文研究管材计算误差大,所以主要调整式(1)、式(6)的系数,调整结

果如下:

$$A_{sp} = 11.928 + 2.3701\delta/t \quad (10)$$

$$A_{sp} = -5.3633 + 3.7622S \quad (11)$$

基于本文研究管材小冲杆试样载荷-位移曲线中的最大位移, 及小冲杆试样断后弧长与断后伸长率的关联关系, 如图 5、图 6 所示。

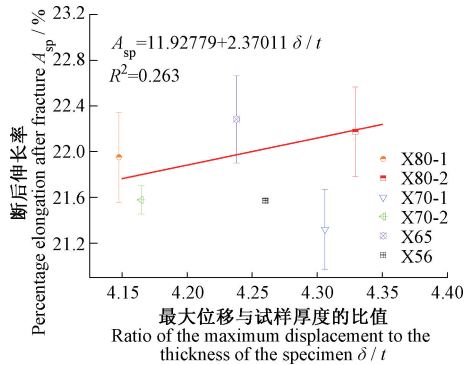


图 5 断后伸长率与最大载荷对应的位移之间的关系

Fig. 5 Relation between the percentage elongation after fracture and the displacement corresponding to the maximum load

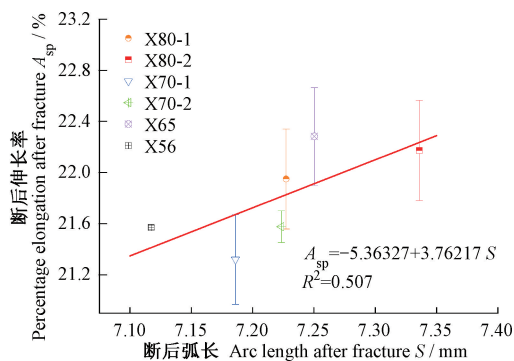


图 6 断后伸长率与断后弧长之间的关系

Fig. 6 Relation between the percentage elongation after fracture and arc length after fracture

由图 6 可以发现, 小冲杆试样断后弧长与断后伸长率的相关性最强, 误差如表 7 所示。由表 7 可以看

到, 最大误差只有 5.08%, 说明对于本文研究的管道钢, 可以用断后弧长来预测其断后伸长率。

3.2 厚度效应研究

由于尺寸限制, 有时无法取到标准厚度的小冲杆试样, 如对于管道钢焊缝区域, 因此有必要开展基于小厚度试样的小冲杆试验来表征管材的断后伸长率。

以 X80 钢为研究对象, 对厚度分别为 0.250、0.300、0.350、0.400、0.450 mm 的小冲杆试样进行小冲杆试验, 试验所得载荷-位移曲线如图 7 所示, 小冲杆试样最大位移和断后弧长参量列于表 8。首先用式 (10) 计算管材断后伸长率, 验证式 (10) 对管材小厚度小冲杆试样的适用性, 计算结果如表 9 所示。由表 9 可以看到, 随着试样厚度减小, 计算值与试验值的误差逐渐增大, 在厚度为 0.250 mm 时, 误差达到最大值 23.26%, 已严重偏离单轴拉伸试验值, 说明需要考虑厚度效应对断后伸长率的影响。

对断后伸长率经验公式进一步修正, 首先直观观察小冲杆试样厚度对现有经验关联公式中断后弧长的影响, 取不同厚度小冲杆试样的断后弧长, 探究与试样厚度之间的关联关系, 如图 8 所示。图 8 中断后弧长与试样厚度有良好的线性关系, 基于此关系, 对现有经验公式 (11) 进行进一步修正。在式 (11) 中加入一个与试样厚度相关的函数, 以此来消除厚度效应对断后伸长率经验公式的影响, 为

$$A_{sp} = -5.3633 + 3.7622 \frac{S}{f(t)} \quad (12)$$

式中, $f(t)$ 为与试样厚度相关的函数。

考虑 X80 钢单轴拉伸试验结果及图 8 中断后弧长与试样厚度的线性关系, 确定函数 $f(t)$ 的基本形式, 式 (12) 修正为

$$A_{sp} = -5.3633 + 3.7622 \frac{S}{0.415t + 0.755} \quad (13)$$

表 7 用断后弧长计算不同钢级管道钢小冲杆试样的断后伸长率

Tab. 7 Percentage elongation after fracture of small punch rod specimens of different steel grades of pipeline steel calculated by arc length after fracture

钢材 Steel	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{A_{sp}}/\%$	钢材 Steel	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{A_{sp}}/\%$
X80-1	21.84	0.50	X70-2	21.43	5.08
	21.88	0.34		21.69	3.93
	21.77	0.84		22.32	1.16
	22.23	1.79		21.93	1.60
X80-2	22.28	2.00	X65	21.42	3.89
	22.20	1.64		22.40	0.52
	21.85	0.92		21.33	1.13
X70-1	21.64	0.07	X56	21.54	0.12
	21.53	0.59		21.37	0.92

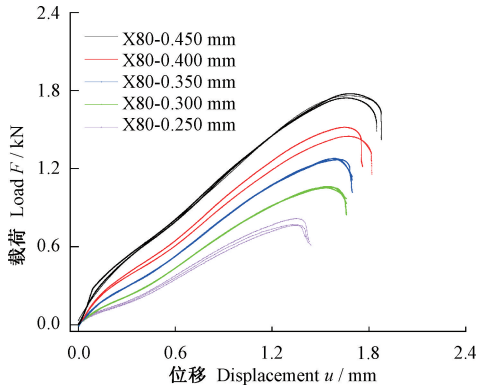


图 7 X80 钢小厚度试样的载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of a small thickness specimen of X80 steel

表 8 X80 钢小厚度试样参数

Tab. 8 Parameters of small thickness specimens of X80 steel

试样厚度 Specimen thickness t	mm				
	0. 250	0. 300	0. 350	0. 400	0. 450
δ	1. 426	1. 661	1. 697	1. 761	1. 877
	1. 432	1. 522	1. 677	1. 818	1. 848
	1. 441	1. 661	1. 649	1. 795	1. 877
S	5. 903	6. 294	6. 463	6. 557	6. 730
	5. 911	6. 091	6. 433	6. 642	6. 687
	5. 924	6. 294	6. 392	6. 608	6. 730

表 9 由式 (10) 计算的 X80 钢试样的断后伸长率

Tab. 9 Percentage elongation after fracture of X80 steel specimens calculated by formula (10)

试样厚度 Specimen thickness t/mm	试验值 Experimental value $A_{sp}/\%$	计算值 Calculated value $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{Asp}/\%$
0. 250	21. 95	16. 85	23. 26
		16. 88	23. 12
		16. 92	22. 90
		18. 32	16. 56
0. 300	21. 95	17. 55	20. 04
		18. 32	16. 56
		18. 95	13. 66
		18. 84	14. 17
0. 350	21. 95	18. 69	14. 88
		19. 31	12. 05
		19. 63	10. 59
		19. 50	11. 18
0. 400	21. 95	19. 96	9. 08
		19. 79	9. 82
		19. 96	9. 08
		19. 96	9. 08

由此建立了利用小厚度试样断后弧长确定本文研究管材断后伸长率的经验公式。用式 (13) 对不同厚度小冲杆试验结果和不同钢级管道钢小冲杆试验结果重新处理,得到断后伸长率如表 10、表 11 所示。

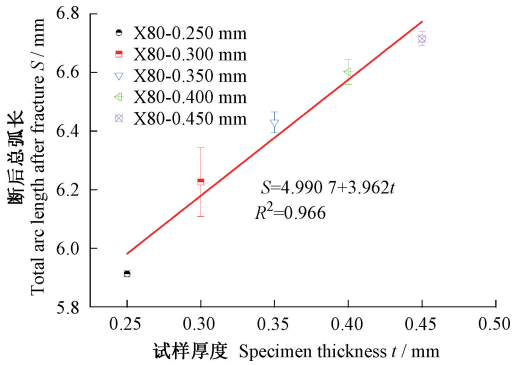


图 8 试样厚度与断后弧长之间的关系

Fig. 8 Relation between specimen thickness and the arc length after fracture

表 10 由式 (13) 计算的 X80-1 钢试样的断后伸长率

Tab. 10 Percentage elongation after fracture of X80-1 steel specimens calculated by formula (13)

试样厚度 Specimen thickness t/mm	试验值 Experimental value $A_{sp}/\%$	计算值 Calculated value $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{Asp}/\%$
0. 250	21. 95	20. 50	6. 62
		20. 53	6. 46
		20. 59	6. 20
		21. 56	1. 78
0. 300	21. 95	20. 69	5. 73
		21. 56	1. 78
		21. 65	1. 39
		21. 52	1. 96
0. 350	21. 95	21. 35	2. 74
		21. 42	2. 41
		21. 77	0. 83
		21. 63	1. 46
0. 400	21. 95	21. 52	1. 95
		21. 35	2. 73
		21. 52	1. 95
		21. 52	1. 95

表 11 由式 (13) 计算的不同钢级管道钢试样的断后伸长率

Tab. 11 Percentage elongation after fracture of steel specimens with different steel grades calculated by formula (13)

钢材 Steel	断后弧长 Arc length after fracture S/mm	断后伸长率 Percentage elongation after fracture $A_{sp}/\%$	断后伸长率误差 Percentage elongation error after fracture $e_{Asp}/\%$
X80-1	7. 231	22. 85	3. 92
	7. 240	22. 91	6. 37
	7. 211	22. 76	1. 98
X80-2	7. 335	23. 28	5. 12
	7. 347	23. 38	9. 25
	7. 326	23. 24	5. 74
X70-1	7. 234	22. 91	4. 05
	7. 177	22. 69	6. 43
	7. 147	22. 57	4. 41
X70-2	7. 122	22. 51	0. 44
	7. 091	22. 39	1. 28
	7. 357	23. 39	4. 25
X65	7. 254	22. 99	4. 74
	7. 118	22. 47	1. 22
	7. 379	23. 52	3. 60
X56	7. 094	22. 37	3. 78
	7. 152	22. 59	4. 69
	7. 106	22. 41	3. 86

预测值与试验值相比最大误差为 9.25%, 证明修正后的经验关联模型对于 X80 钢小厚度试样和 X80、X70、X65、X56 钢标准厚度试样具有良好的适用性。

3.3 考虑厚度效应的公式的验证及讨论

为验证经验关联公式的适用性, 再用 X80-2 批次的小厚度试样对经验公式进行验证, 分别进行单轴拉伸试验以及试样厚度 0.250~0.500 mm 的小冲杆试验, 载荷-位移曲线如图 9 所示, 试验结果如表 12 所示。计算值与试验值的最大误差为 5.53%, 进一步说明本文建立的经验关联公式对于小厚度试样适用性良好。

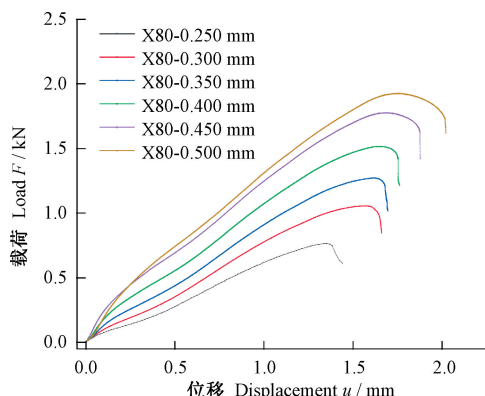


图 9 不同厚度 X80 钢验证组载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of X80 steel verification groups with different thicknesses

表 12 式 (13) 适用性验证结果 (X80-2)

Tab. 12 Applicability verification results of formula (13) (X80-2)

试样厚度 Specimen thickness t/mm	断后弧长 Arc length after fracture S/mm	试验值 Experimental value $A_{sp}/\%$	计算值 Calculated value $A_{sp}/\%$	断后伸长率 误差 Percentage elongation error after fracture $e_{Asp}/\%$
0.250	5.934	21.84	20.63	5.53
0.300	6.275		21.48	1.66
0.350	6.438		21.54	1.37
0.400	6.624		21.70	0.67
0.450	6.690		21.36	2.19
0.500	6.950		21.80	0.18

4 结论

本文对 X80、X70、X65 和 X56 标准小冲杆试样及 X80 小厚度试样通过小冲杆试验表征材料断后伸长率可行性进行了研究, 研究结果表明:

1) 通过验证现有经验公式对管道钢的适用性发现, 断后伸长率的计算值与试验值误差在 20% 以上, 说明现有公式不能预测管道钢的断后伸长率。

2) 通过对现有经验公式系数进一步调整, 发现用小冲杆试样的断后弧长确定管材断后伸长率的方法拟合效果最好且最大误差只有 5.08%, 说明修正后的基于断后弧长的经验关联公式对管道钢具有良好的适

用性。

3) 考虑厚度效应的影响, 对经验关联公式进一步修正。修正后针对不同厚度试样的断后伸长率计算误差最大为 6.62%, 利用不同批次 X80 钢对修正后公式的准确性进行验证, 最大误差为 9.25%, 证明本文建立的经验关联公式拟合效果良好且对管道钢具有良好的适用性, 有望应用于其他钢级管道局部区域断后伸长率的计算。

参考文献 (References)

- [1] 高惠临, 董玉华, 冯耀荣. 油、气管线钢的焊接局部脆化及其预防 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 14-19.
GAO HuiLin, DONG YuHua, FENG YaoRong. Welding local embrittlement and its prevention of pipeline steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(3): 14-19 (In Chinese).
- [2] 张莉, 徐宏, 郭良辉, 等. 高温长期运行 Cr-Mo 钢断裂性能微试样测试实验研究 [J]. 机械强度, 2007, 29(3): 468-472.
ZHANG Li, XU Hong, GUO LiangHui, et al. Small punch test for determining the material properties of Cr-Mo steel after long-term serve at high temperature [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(3): 468-472 (In Chinese).
- [3] 束德林. 工程材料力学性能 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 4.
SHU DeLin. Mechanical properties of engineering materials [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2007: 4 (In Chinese).
- [4] 宋明, 李旭阳, 曹宇光, 等. 小冲杆试验评估 X80 管线钢的拉伸性能 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(7): 74-78.
SONG Ming, LI XuYang, CAO YuGuang, et al. Evaluating tensile properties of X80 pipeline steel by small punch test [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(7): 74-78 (In Chinese).
- [5] 王玉成, 徐宏, 刘阿龙, 等. 小冲杆试验方法评价 1.25Cr0.5Mo 珠光体钢的蠕变性能 [J]. 机械强度, 2006, 28(2): 211-215.
WANG YuCheng, XU Hong, LIU ALong, et al. Small punch test to estimate the creep property of 1.25Cr0.5Mo pearlitic steels [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(2): 211-215 (In Chinese).
- [6] BAIK J M, KAMEDA J, BUCK O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel [J]. Scripta Metallurgica, 1983, 17(12): 1443-1447.
- [7] 刘刚, 关凯书, 钟继如, 等. 用于金属材料单轴本构关系估算的长条形试样小冲杆试验方法研究 [J]. 机械强度, 2021, 43(4): 808-813.
LIU Gang, GUAN KaiShu, ZHONG JiRu, et al. Research on estimation of uniaxial constitutive relationship of metal material by small punch test of strip-type specimen [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4): 808-813 (In Chinese).
- [8] 关凯书, 徐彤, 宋明, 等. 小冲杆试验确定材料拉伸断后伸长率的研究 [J]. 实验力学, 2011, 26(2): 209-215.
GUAN KaiShu, XU Tong, SONG Ming, et al. An assessment of the elongation of fractured specimen subjected to tensile testing based on small punch testing [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(2): 209-215 (In Chinese).
- [9] RODRIGUEZ C, CABEZAS G J, CARDENAS E, et al. Mechanical

- properties characterization of heat-affected zone using the small punch test[J]. Welding Journal, 2009, 88(9): 188-192.
- [10] DíEZ P M B, CALZADA M P, GONZALO D C, et al. Change of mechanical properties of AM60B alloy with heat treatments and its correlation with small punch tests[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016, 86: 101-108.
- [11] LECLERC N, KHOSRAVANI A, HASHEMI S, et al. Correlation of measured load-displacement curves in small punch tests with tensile stress-strain curves[J]. Acta Mater, 2021, 204(6): 116501.
- [12] 邹晓慧. 小冲杆试验法评价材料力学性能的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012: 38-40.
- ZOU XiaoHui. Study on the evaluation of mechanical properties of materials by small punch rod test method[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012: 38-40(In Chinese).
- [13] 徐 彤, 寿比南, 关凯书, 等. 小冲杆试验方法标准化研究(一): 通用要求[J]. 压力容器, 2010, 27(7): 37-46.
- XU Tong, SHOU BiNan, GUAN KaiShu, et al. Study on standardization of small punch test (1): general requirements[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(7): 37-46(In Chinese).
- [14] 关凯书, 王志文, 徐 彤, 等. 小冲杆试验方法标准化研究(二): 材料室温拉伸性能的确定[J]. 压力容器, 2010, 27(8): 40-46.
- GUAN KaiShu, WANG ZhiWen, XU Tong, et al. Study on standardization of small punch test (2): tensile properties of materials at room temperature[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(8): 40-46(In Chinese).
- [15] GARCÍA T E, RODRÍGUEZ C, BELZUNCE F J, et al. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 582: 708-717.
- [16] 冯有宽. 椭圆弧长的级数表达式及其近似计算[J]. 大学数学, 2018, 34(1): 106-110.
- FENG YouKuan. Series expansion and approximate treatment for elliptic arc length[J]. College Mathematics, 2018, 34(1): 106-110(In Chinese).