

X70M 管线钢管高温拉伸性能研究

孙 宏, 宗秋丽, 周 晶, 王 慧
(渤海装备华油钢管有限公司, 河北 青县 062658)

摘 要: 为了探究管线钢管在高温条件下的强度及塑性, 采用 X70M 管线钢管进行了室温 (20 ℃) 与高温 (300~600 ℃) 条件下的拉伸试验, 用 Boltzmann 函数对强度折减系数进行了 S 曲线拟合。试验结果表明: 随着温度的升高, X70M 管线钢的屈服强度、抗拉强度均呈下降趋势, 屈服强度先于抗拉强度出现下降; 断后伸长率随着温度升高无明显变化, 但当温度升高至 600 ℃时明显升高; 均匀伸长率随着温度的升高呈下降趋势, 应力-应变曲线由圆屋顶型变为更加陡峭的形状, 形变强化和抵抗变形的能力随着温度的升高而下降。

关键词: 管线钢管; X70M; 高温性能; 拉伸试验; 强度

中图分类号: TG115.5

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.04.005

Research on High Temperature Tensile Properties of X70M Pipeline Steel Pipe

SUN Hong, ZONG Qiuli, ZHOU Jing, WANG Hui
(North China Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Qingxian 062658, Hebei, China)

Abstract: In order to explore the strength and plasticity of pipeline steel pipe at high temperature, X70M pipeline steel pipe was used for tensile test at room temperature (20 ℃) and high temperature (300~600 ℃), and the strength reduction coefficient was fitted by S-curve with Boltzmann function. The test results show that the yield strength and tensile strength of X70M pipeline steel decrease with the increase of temperature, and the yield strength decreases before the tensile strength. The elongation after fracture has no obvious change with the increase of temperature, but it increases obviously when the temperature rises to 600 ℃. The uniform elongation decreases with the increase of temperature, the stress-strain curve changes from a round-house shape to steeper shape, and the ability of deformation strengthening and resistance to deformation decreases with the increase of temperature.

Key words: pipeline steel pipe; X70M; high temperature properties; tensile test; strength

0 前 言

在石油、化工行业和危险品储运中, 存在大量的易燃易爆化学品, 一旦发生泄漏很容易引起火灾或爆炸^[1]。高温屈服强度决定了一定温度范围内材料许用应力, 而许用应力是材料强度设计的基础, 事关设备安全。例如钢材在火灾高温条件下由于强度与刚度急剧降低会使其承载力显著下降^[2-3], 因此材料高温拉伸性能具有重要意义^[4]。张华佳等^[5]研究了几种常用石油管材料的高温拉伸性能, 指出 12Cr2Mo1R 等石油管材都具有抗

拉强度和屈服强度随着温度升高而下降的规律。高温下钢材的力学性能研究表明^[6], 当温度小于 250 ℃时, 钢结构的力学性能变化不大, 弹性模量和屈服强度基本保持不变; 当温度大于 250 ℃时, 钢的力学性能开始逐渐下降, 塑性逐渐提高。吕俊利^[7]的研究表明, 超过 300 ℃后, 钢材的应力-应变曲线就没有明显的屈服极限和屈服平台, 强度和弹性模量明显减小。为了探索管线钢管在高温条件下的强度及塑性, 笔者研究了 X70M 管线钢管在 300 ℃及以上高温条件下的拉伸性能。

1 试验材料和方案

试验材料为 X70M 钢级 $\Phi 1\ 067\ \text{mm} \times 14.27\ \text{mm}$ 螺旋埋弧焊管, 制管用卷板采用低 C-Mn-Cr-Nb 的成分设计, 通过热机械控制轧制工艺 (TMCP)

生产, 其主要化学成分见表 1。使用体积分数为 3 % 的硝酸酒精溶液对试样母材进行腐蚀, 显微组织如图 1 所示。由图 1 可以看出, 试样母材组织为粒状贝氏体和铁素体、块状铁素体及少量珠光体。

表 1 试样母材的主要化学成分

$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{V})$
0.062	0.12	1.63	0.35	0.001 2	0.005 4	0.015	0.067	0.014	0.029



图 1 试样母材显微组织形貌 (500 \times)

沿管体纵向方向取样, 室温拉伸试样采用 $\Phi 10\ \text{mm}$ 圆棒试样, 标距长度为 50 mm; 高温拉伸试样采用 $\Phi 8\ \text{mm}$ 圆棒试样, 标距长度为 40 mm。虽然两种试样的标距和直径均不同, 但是比例系数相同, 即 $L_0=5d$, 因此试验结果具有可比性。拉伸试验温度为室温 (20 $^{\circ}\text{C}$)、300 $^{\circ}\text{C}$ 、350 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$ 、500 $^{\circ}\text{C}$ 、550 $^{\circ}\text{C}$ 和 600 $^{\circ}\text{C}$ 。每个温度均进行一组拉伸试验, 每组 2 个试样。室温拉伸试验按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》进行, 高温拉伸试验按照 GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法》进行。

2 试验结果及讨论

2.1 拉伸试验

X70M 管线钢室温与高温下的拉伸试验结果见表 2, 室温及高温拉伸试验曲线如图 2 所示, 高温拉伸试验应力-应变曲线如图 3 所示。

表 3 为高温拉伸强度的折减系数, 本研究定义的高温拉伸试验的折减系数等于高温拉伸性能与对应的室温拉伸性能的比值。对屈服强度折减

表 2 X70M 管线钢室温及高温拉伸试验结果

试样 编号	试验 温度/ $^{\circ}\text{C}$	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$R_{p0.2}/R_m$
0-1	20	579	654	20	0.89
0-2	20	578	659	21	0.88
1-1	300	557	685	20	0.81
1-2	300	567	708	21	0.80
2-1	350	530	654	22	0.81
2-2	350	522	654	20	0.80
3-1	400	514	629	21	0.82
3-2	400	510	613	21	0.83
4-1	450	460	544	22	0.85
4-2	450	457	532	21	0.86
5-1	500	416	479	21	0.87
5-2	500	430	490	19	0.88
6-1	550	364	419	22	0.87
6-2	550	368	421	20	0.87
7-1	600	286	297	23	0.96
7-2	600	267	322	24	0.83

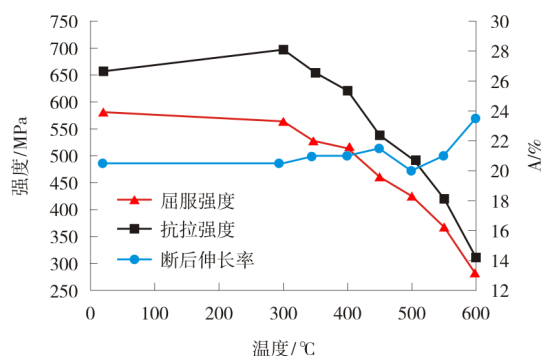


图 2 X70M 管线钢不同温度下的拉伸试验曲线

系数-温度和抗拉强度折减系数-温度的试验数据采用 Boltzmann 函数进行 S 曲线拟合。Boltzmann 函数模型为

$$\eta = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(t - t_0)/dt}} + A_2 \quad (1)$$

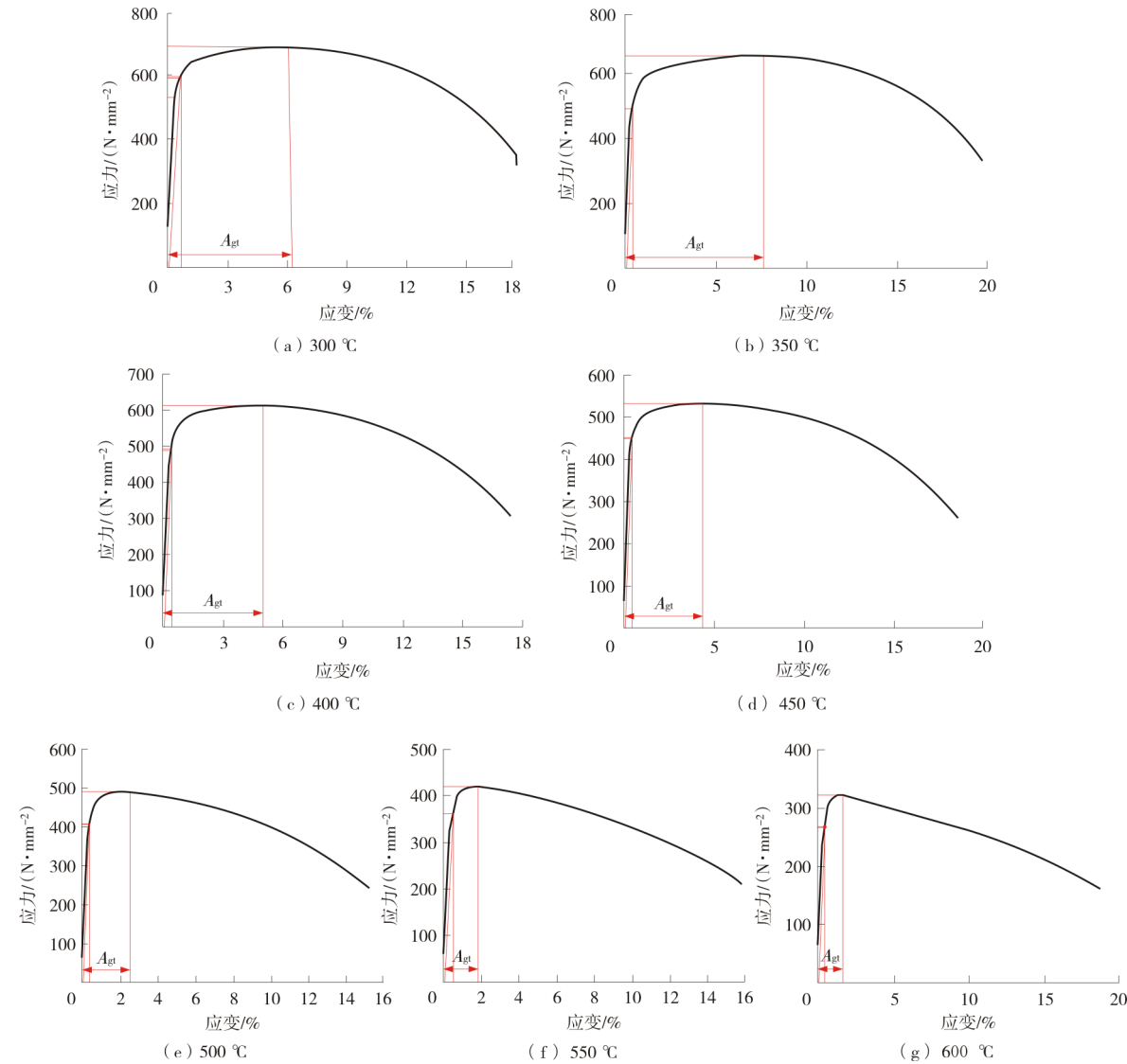


图3 X70M 管线钢高温拉伸试验应力-应变曲线

式中： η —折减系数；

t —温度。

屈服强度的拟合方程为

$$\eta = \frac{1.014\,27 - (-0.811\,44)}{1 + e^{\frac{(t-710.383\,73)}{124.183\,61}}} + (-0.811\,44) \quad (2)$$

由式 (2) 可以确定出屈服强度的折减系数 (R^2) 为 0.994。

抗拉强度的拟合方程为

$$\eta = \frac{1.037\,94 - 0.300\,73}{1 + e^{\frac{(t-526.651\,44)}{67.560\,09}}} + 0.300\,73 \quad (3)$$

由式 (3) 可以确定出抗拉强度的折减系数 (R^2) 为 0.977，两个方程拟合出的 R^2 均接近 1。

表3 X70M 管线钢高温拉伸强度折减系数

序号	试验温度/℃	屈服强度折减系数	抗拉强度折减系数
1	20	1.000	1.000
2	300	0.971	1.061
3	350	0.909	0.996
4	400	0.885	0.946
5	450	0.793	0.819
6	500	0.731	0.738
7	550	0.633	0.640
8	600	0.478	0.471

X70M 管线钢的屈服强度折减系数-温度拟合曲线和抗拉强度折减系数-温度拟合曲线分别如图 4 和图 5 所示。

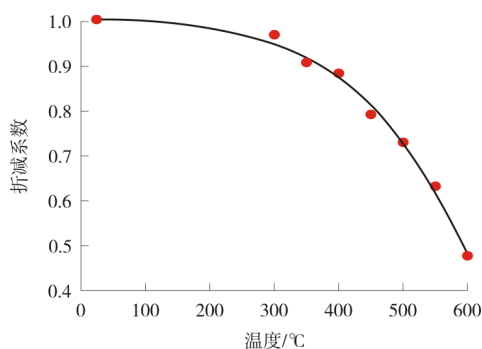


图 4 X70M 管线钢屈服强度折减系数-温度拟合曲线

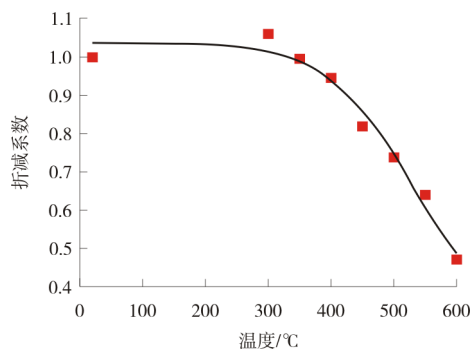


图 5 X70M 管线钢的抗拉强度折减系数-温度拟合曲线

2.2 试验温度对拉伸性能的影响

从表 2、表 3 以及图 2 可以看出, X70M 管线钢的屈服强度与抗拉强度总体上随试验温度的提高而降低, 断后伸长率在低于 600 °C 时总体上无明显变化。由于本研究未进行 300 °C 以下的高温拉伸试验, 所以根据折减系数的拟合公式和拟合曲线分析试验温度对管线钢强度的影响。对于屈服强度, 当试验温度大于室温时就开始出现下降的趋势, 且下降速率较均匀; 对于抗拉强度, 当试验温度大于室温时也开始出现下降的趋势, 但是下降速率不均匀。温度不超过 350 °C 时, 抗拉强度下降较慢, 温度大于 350 °C 时, 抗拉强度下降速率加快。屈服强度与抗拉强度随温度的变化不同步, 屈服强度随温度下降明显快于抗拉强度。因此, 温度对屈服强度的影响大于对抗拉强度的影响。

另外, 在 300 °C 时的抗拉强度明显高于 20 °C 和 350 °C。研究发现, 碳钢和低合金钢的抗拉强度在某一温度范围内会出现一个反常峰值, 峰值温度与蓝脆温度相当, 如图 6 所示^[9]。屈立军等^[9]对 Q420 钢在高温下的强度进行了研究, 发现 Q420 钢在 250~400 °C 温度下出现蓝脆现象, 抗拉强度

升高, 但屈服强度的蓝脆现象并不明显。从本研究的试验结果可以看出, X70M 管线钢的高温拉伸性能也具有类似特性。

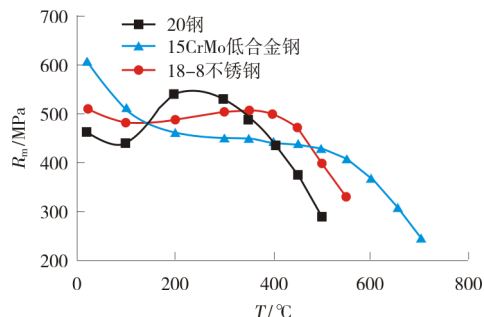


图 6 碳钢、低合金钢和不锈钢的抗拉强度-温度曲线

从表 2 可以看出, X70M 管线钢的断后伸长率总体变化不大, 直至 600 °C 时才出现明显提高。由图 3 可以看出, 从 400 °C 开始, 均匀伸长率 (或最大力总延伸率) 随着温度的升高呈现出了下降趋势, 在 A_{gt} 处应力-应变曲线形状发生显著变化, 由圆屋顶型逐渐变为更加陡峭的形状。这意味着 X70M 管线钢颈缩后的变形量总体上随着温度的提高而增大, 并且从 400 °C 开始, 其屈服比随着温度的升高也呈现出下降趋势 (20 °C 的屈服比结果除外)。均匀伸长率和屈服比通常被认为代表了材料的变形能力和应变强化能力, 材料的均匀伸长率越大, 其强化能力和变形能力就越高; 材料的屈服比越低, 其强化能力和变形能力就越高^[10-11]。X70M 管线钢的断后伸长率这一塑性指标总体上没有随温度变化而变化, 在 600 °C 时出现较明显增大, 但是由于均匀变形段随温度的提高而减小, 因此其抵抗变形的能力随着温度的提高呈下降趋势。

综上所述, 该 X70M 管线钢的强度总体上随温度的提高而降低, 且对构件承载有利的均匀变形段随温度的提高而减小, 其抵抗变形的能力随温度的提高而下降。

3 结 论

(1) 随着温度的升高, X70M 管线钢的屈服强度、抗拉强度均呈下降趋势, 两者下降不同步, 屈服强度随温度下降显著快于抗拉强度, 温度对屈服

(下转第 34 页)