

X70 管线钢的室温蠕变及其对流变应力的影响

Room Temperature Creep and Its Effect on Flow Stress in X70 Pipeline Steel

聂德福, 赵 杰, 莫 涛

(大连理工大学 材料系, 辽宁 大连 116023)

NIE De-fu, ZHAO Jie, MO Tao

(Department of Materials Engineering, Dalian

University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

摘要: 利用 MTS 万能试验机研究了 X70 管线钢在不同应力加载速率和不同加载过程下的室温蠕变现象, 以及室温蠕变对流变应力的影响。结果表明, X70 管线钢有明显的室温蠕变现象存在, 应力加载速率和加载过程对室温蠕变变形量有明显的影响, 而且室温蠕变显著提高了材料的流变应力。并根据位错理论对实验结果进行了分析解释。

关键词: 室温蠕变; 流变应力; 应力加载速率; 加载过程

中图分类号: TG111.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)06-0058-04

Abstract: The phenomenon of room temperature creep (RTC) deformation and its effect on subsequent flow stress under various loading stress rate (Lsr) and loading process in a X70 pipeline steel were studied. The experiments were performed on a MTS 810 testing machine by using standard round tension specimens. According to the results, significant time-dependent deformation under constant load was observed in this steel at room temperature, and the deformation was strongly dependent on loading stress rate and loading process. It was also found that the occurrence of room temperature creep obviously enhanced the subsequent flow stresses. Model based on dislocation theory was applied to explain the mechanism responsible for the behavior.

Key words: room temperature creep; flow stress; loading stress rate; loading process

室温蠕变是低碳钢、高强钢和不锈钢等金属材料中存在的普遍现象^[1-4]。对于结构钢而言, 一般认为室温蠕变具有非热激活特点, 经过一段时间后, 蠕变变形趋于饱和状态, 之后不会再有明显的室温蠕变变形产生。单独的室温蠕变变形一般不会直接导致构件的失效, 但由于室温蠕变改变了材料内部、特别是裂纹尖端区域的应力应变分布, 可能对工程构件的应力腐蚀行为产生影响; 并且这种时间相关的变形是精密零部件制造过程中所必须考虑的因素之一。因此, 有关室温蠕变的研究近来受到关注^[3-5]。

X70 是西气东输工程中主要使用的管线钢, 由于工程跨越的地区多, 沿途环境复杂多变, 有关 X70 管线钢的应力腐蚀等的研究已有许多报道^[6-8]。室温蠕变可能影响裂纹尖端局部钝化膜, 也可能影响 H 的扩散, 从而对应力腐蚀行为产生影响。虽然国外对 X 系列钢中的室温蠕变现象有些研究^[9-13], 而有关国产

X70 钢室温蠕变以及室温蠕变对流变应力的影响的研究尚未报道。本工作针对国产 X70 管线钢, 研究了室温蠕变现象以及对屈服点流变应力的影响。

1 实验材料及方法

实验材料采用国产 X70 钢, 组织为针状铁素体及少量贝氏体如图 1 所示。实验使用的试样为标准光滑圆棒拉伸试样, 直径为 8mm, 标距为 56mm, 试样轴线方向平行于管线的纵向。相关实验全部在 MTS 810 试验机上进行, 实验温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。室温蠕变变形采用标距为 25mm 的引伸计测量。实验全部过程采用计算机控制。

图 2 比较了在应力控制和应变控制条件下, X70 钢的应力应变曲线。X70 钢的抗拉强度为 630MPa, 屈服强度为 530MPa, 延伸率 $\geq 12\%$, 没有明显的屈服

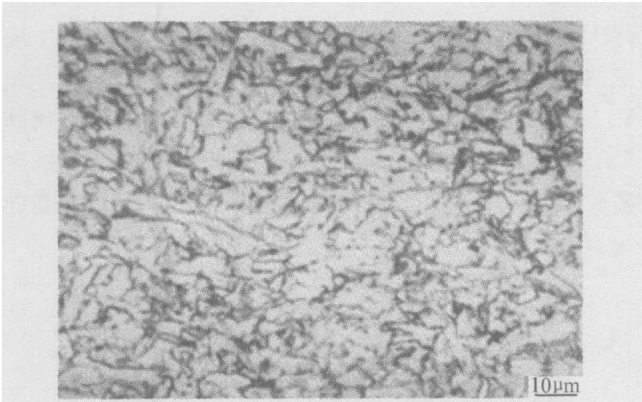


图 1 X70 管线钢组织形貌

Fig. 1 Microstructure of the X70 pipeline steel

现象。从图 2 可以看出,不同的控制方式对弹性阶段影响不大,而在应力控制加载方式下,塑性阶段的流变应力较大。为了便于控制室温蠕变实验时的应力值以及保载前的应力加载速率,本研究采用应力控制方式进行实验。分别采用了改变应力加载速率,设计加载卸载过程等,研究加载方式对室温蠕变变形的影响,以及几种条件下,流变应力的变化。

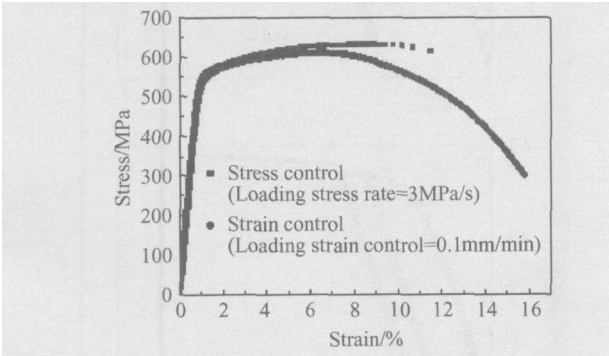


图 2 应力和应变控制条件下的拉伸曲线

Fig. 2 Tensile curves under stress control and strain control patterns

2 结果与讨论

2.1 X70 钢的室温蠕变现象

图 3 和图 4 是在几种加载方式下, X70 管线钢所呈现的室温蠕变变形量随着时间变化的曲线,实验结果表明, X70 管线钢存在明显的室温蠕变现象。图 3 是直接加载到设定的应力水平下的室温蠕变结果,室温蠕变变形量随着恒载时的应力水平的提高而增大,随着应力加载速率增加,室温蠕变变形量增大。图 4 为试样加载到设定的应力后,按加载速率完全卸载,再以相同加载速率加载到设定的应力值的室温蠕变实验结果,并与直接加载后的室温蠕变现象进行了比较,可以看到经过加载、卸载过程后的室温蠕变变形

量明显小于直接进行室温蠕变的变形量。

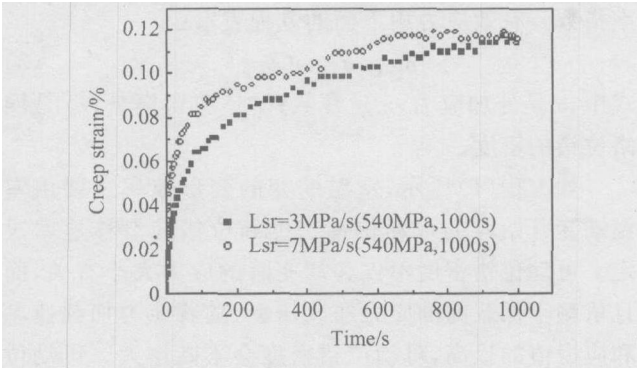


图 3 不同应力加载速率下的室温蠕变曲线(无卸载过程)

Fig. 3 Curves of RTC under various loading stress rate (no unloading)

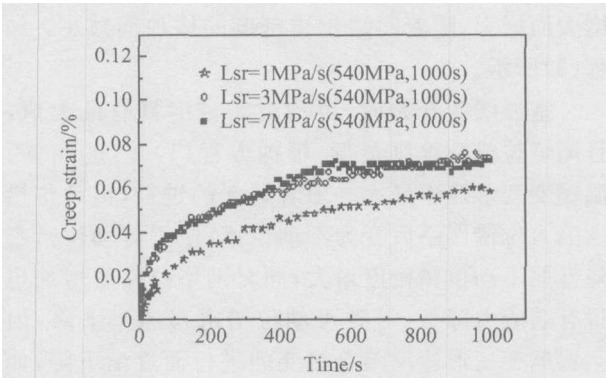


图 4 不同应力加载速率下的室温蠕变曲线(有卸载过程)

Fig. 4 Curves of RTC under various loading stress rate (unloading g)

由于蠕变实验是在室温的条件下进行的,不具有高温蠕变的热激活特性,是位错随时间滑移的结果^[14]。位错可分为两种,分别是可动位错和不动位错(网络位错),可动位错在外力作用下滑移,经过位错运动自由行程平均长度后,被网络位错捕获变为不动位错。可动位错随时间的滑移在宏观上表现为室温蠕变现象。而不动位错不仅不能进行滑移,而且对可动位错的滑移具有阻碍作用,同时也是材料产生加工硬化现象的原因。材料随着变形量的增大,其内部网络位错密度不断增加,这些增加的不动位错进一步阻碍了可动位错的滑移,宏观上表现为材料的对外抗力随着变形量的增大而不断增加^[1, 14, 15]。

蠕变速率用以下方程表示:

$$\dot{\epsilon} = \rho_m b v \tag{1}$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 是室温蠕变应变率; ρ_m 是可动位错密度; b 是柏氏矢量; v 是位错运动速率。可动位错运动的速率依赖于作用在位错上的有效应力 σ_e 。

$$v = \left[\frac{\sigma_e}{\tau_0} \right]^n \tag{2}$$

式中: τ_0 是基体对位错拖拽作用的常数; n 是应力-速率指数。有效应力用下面的方程表示:

$$\sigma_e = \sigma - aGb\rho_n^{1/2} \quad (3)$$

式中: σ 是外加应力; a 是常数; G 是剪切模量; ρ_n 是网络位错的密度。

如方程(1)所示, 室温蠕变的变形速率主要由室温蠕变开始时的可动位错密度和位错的滑移速率决定。可动位错密度不仅和蠕变时的应力大小有关, 而且依赖于保载前的应力加载速率, 随着应力加载速率和应力值的提高, 可动位错密度会不断增大。可动位错的滑移速率则由作用在位错上的有效应力决定, 如方程(2)所示。有效应力不仅取决于外加应力的大小, 而且和网络位错密度密切相关。随着外加应力的增大而增大, 随着网络位错密度的增加而减小, 如方程(3)所示。

室温蠕变开始时, 可动位错密度具有最大值, 而且网络位错密度则最低, 根据方程(1) - (3)可知, 室温蠕变变形速率最大。随着蠕变的进行, 可动位错逐渐陷入位错网络后变为不动位错, 使得可动位错密度降低而不动位错密度增大, 同时网络位错的增加也使得有效应力降低, 导致可动位错滑移速率下降, 因此室温蠕变变形速率随着蠕变的进行而逐渐下降, 如图4所示。

当以相同的应力加载速率进行实验时, 可动位错密度随着保载应力的增加而增大; 在相同的保载应力条件下, 可动位错密度会随着应力加载速率的增加而增加, 因此在宏观上表现为室温蠕变变形量随着保载应力和应力加载速率的增加而增加。而在保载应力和应力加载速率相同的情况下, 加载到设定应力值后直接进行蠕变实验和加载到设定应力值后卸载, 再加载到原设定应力值后进行蠕变实验, 比较二者会发现室温蠕变变形量会有明显差别。由于直接进行室温蠕变实验, 开始时网络位错密度较低, 可动位错的滑移速率较高, 具有较大的室温蠕变速率; 卸载后再加载进行蠕变实验时, 由于开始时已经有较大的塑性变形, 网络位错密度相对较高, 导致再进行蠕变实验时, 可动位错的滑移速率降低。宏观上表现为具有卸载过程时, 室温蠕变变形量较没有卸载过程时有显著降低。

2.2 室温蠕变对流变应力的影响

图5a是在应力加载速率为3MPa/s的条件下, 加载到540MPa(超过名义屈服强度)后, 完全卸载和再加载后的应力-应变曲线, 由于形变强化的作用, 再加载后材料的名义屈服强度提高, 但流变曲线基本遵循图2所示应力-应变曲线。图5b是加载到540MPa进

行1000s室温蠕变后, 完全卸载和再加载后的应力-应变曲线, 与图5a比较, 名义屈服强度有明显提高。图5c是在应力加载速率为3MPa/s的条件下, 加载到540MPa后完全卸载, 然后加载到540MPa进行蠕变实验1000s后, 完全卸载后再加载后的应力-应变曲线, 与图5b相似, 名义屈服强度有明显提高。

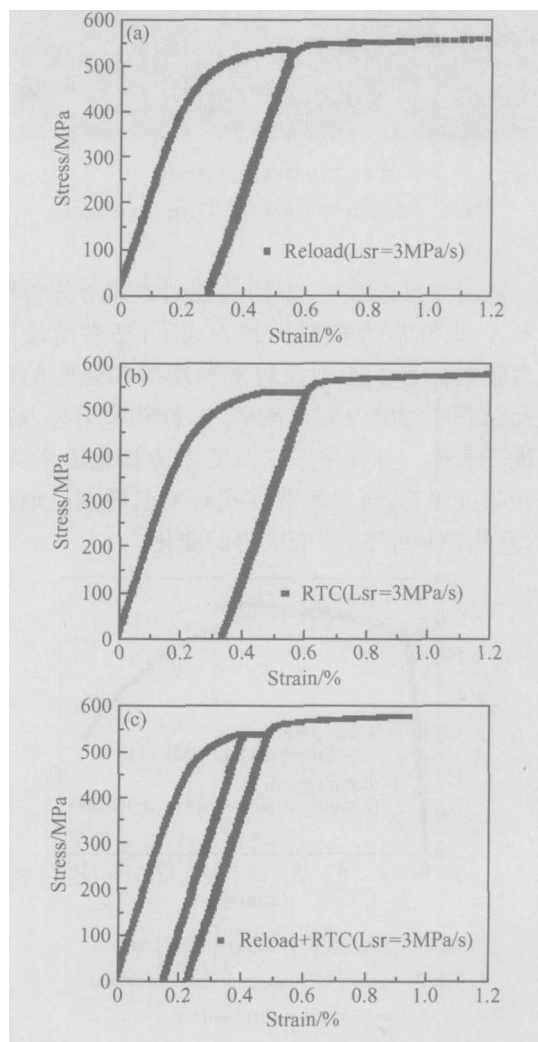


图5 室温蠕变、加载过程对流变应力的影响
(a) 加载过程; (b) 室温蠕变; (c) 室温蠕变和加载过程
Fig. 5 The effect of RTC and loading process on the subsequent flow stress (a) loading process; (b) RTC; (c) both RTC and loading process

图6对几种加载条件下的应力-应变曲线进行了比较, 图6a是图5a和图5b实验的比较, 而图6b是图5b和图5c实验的比较, 可以看到经过室温蠕变后, 屈服点的流变应力以及整个流变曲线均有提高, 说明空气中室温蠕变的产生对材料产生应变强化。

X70 管线钢在室温条件下发生塑性变形时, 主要是由于位错滑移的结果。随着变形量的增大, 材料内部网络位错密度不断增大, 使得可动位错滑移速率下

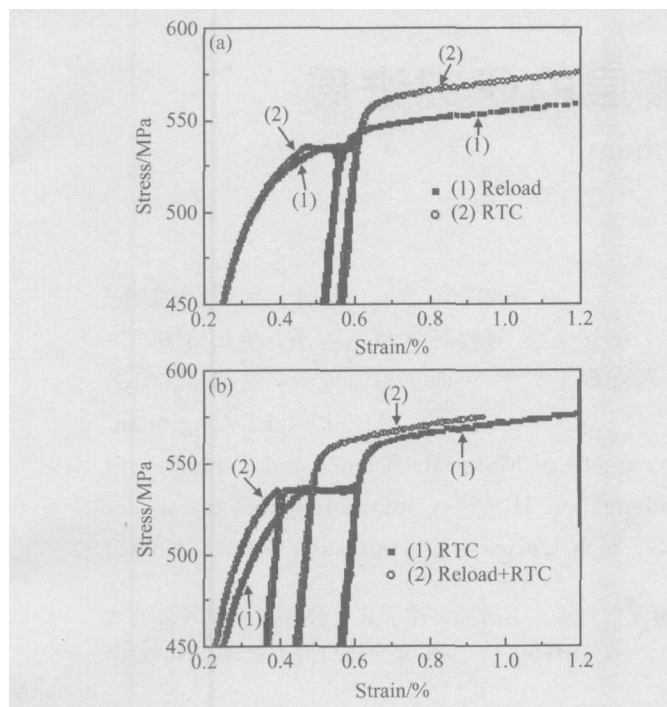


图6 综合比较室温蠕变和加载过程对流变应力的影响

(a) 加载过程和室温蠕变对流变应力影响的比较;

(b) 室温蠕变和室温蠕变、加载过程对流变应力影响的比较

Fig. 6 Comparison of the effect of RTC and loading process on the subsequent flow stress (a) compare RTC to loading process; (b) compare RTC to both RTC and loading process

降,同时缩短了位错运动自由行程平均长度,导致材料继续产生塑性变形比较困难,即材料产生加工硬化现象。图5、图6均显示X70管线钢随着变形量的增加而对外抗力逐渐增大。

进行拉伸实验时,卸载后再加载继续进行拉伸实验,会发现材料屈服点的流变应力并没有明显的变化。因为卸载再加载过程,材料内部的网络位错没有明显的变化,所以屈服点的流变应力并没有明显的变化。当发生室温蠕变后再进行拉伸实验时,会发现材料屈服点的流变应力显著上升,其原因是,在室温蠕变过程中,可动位错不断地被网络位错捕获,陷入到位错网络中,明显提高了网络位错的密度,导致室温蠕变后再进行拉伸实验屈服点的流变应力显著提高。

3 结论

(1) 国产X70管线钢有明显的室温蠕变现象存在。在其他条件相同的情况下,室温蠕变变形量随着保载应力和应力加载速率的增大而增大;卸载和再加载后,室温蠕变变形量有所降低。

(2) 室温蠕变变形后,X70管线钢的流变应力显著提高,而单纯的卸载和再加载过程对流变应力影响

并不明显。

参考文献

- [1] WANG S H, ZHANG Y G, CHEN W X. Room temperature creep and strain rate dependent stress-strain behavior of pipeline steels [J]. Journal of Materials Science, 2001, 36: 1931-1938.
- [2] ZHAO Z B, NORTHWOOD D O, LIU C, et al. A new method for improving the resistance of high strength steel wires to room temperature creep and low cycle fatigue [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89-90: 569-573.
- [3] OEHLERT A, ATRENS A. Room temperature creep of high strength steels [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42 (5): 1493-1508.
- [4] TENDO M, TAKESHITA T, NAKAZAWA T, et al. Room temperature creep behavior of stainless steels [J]. Tetsu to Hagane-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1993, 79 (1): 98-104.
- [5] ASTM STP 665. Stress corrosion cracking-the slow strain-rate technique [S].
- [6] ZHAO M C, YANG K, SHAN Y Y. Comparison on strength and toughness behaviors of microalloyed pipeline steels with acicular ferrite and ultrafine ferrite [J]. Materials Letters, 2003, 57: 1496-1500.
- [7] LEE C H, BHADOSHIA H K D H, LEE H C. Effect of plastic deformation on the formation of acicular ferrite [J]. Mater Sci Eng, 2003, A360: 249-257.
- [8] DIAZ M, MADARIAGA I. Improvement of mechanical properties in structural steels by development of acicular ferrite microstructures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46: 413-414.
- [9] EVANS H E. Mechanisms of creep fracture [M]. New York: Elsevier Applied Science Publishers, 1984.
- [10] FINNIE L, HELLER W R. Creep of engineering materials [M]. London: McGraw-Hill Book Company, 1959.
- [11] SADANANDA K, VASUDEVAN A K, HOLTZ R L, et al. Analysis of overload effects and related phenomena [J]. Int J Fatigue, 1999, 21: S233.
- [12] SADANANDA K, VASUDEVAN A K. Fatigue crack growth mechanisms in steels [J]. Int J Fatigue, 2003, 25: 899.
- [13] ELBER W. Fatigue crack closure under cyclic tension [J]. Eng Fract Mech, 1970, 2: 37.
- [14] ALDEN T H. Theory of mobile dislocation density: application to the deformation of 304 stainless steel [J]. Metallurgical Transactions A, 1987, 18 (5): 51-62.
- [15] ALDEN T H. Theory of plastic and viscous deformation [J]. Metallurgical Transactions A, 1987; 18 (5): 811-825.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50271013)

收稿日期: 2005-05-31; 修订日期: 2005-09-28

作者简介: 聂德福(1979-),男,大连理工大学材料科学与工程学院在读博士,研究方向为材料的力学、疲劳性能研究,联系地址: 大连理工大学材料科学与工程学院(116023)。