

热处理避免和消除 20 钢厚壁高压管应变时效脆化实验研究

Experimental Study on Eliminating and Preventing 20 Steel Thick-wall High Pressure Pipes from Strain Aging Embrittlement with Heat Treatment

李梦丽^{1,2}, 王威强^{1,2}, 李爱菊^{2,3}, 崔好选^{1,2}, 陈忠友⁴

(1 山东大学 机械工程学院, 济南 250061; 2 山东省特种设备安全工程技术研究中心, 济南 250061; 3 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061; 4 浙江工业大学 化工设备厂, 杭州 310014)

LI Meng-li^{1,2}, WANG Wei-qiang^{1,2}, LI Ai-ju^{2,3}, CUI Hao-xuan^{1,2}, CHEN Zhong-you⁴

(1 School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2 Engineering and Technology Research Center for Special Equipment Safety of Shandong Province, Jinan 250061, China; 3 School of Material Science and

Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 4 Factory of Chemical Equipment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

摘要: 以 Charpy V 型缺口冲击吸收能量为应变时效脆化评价指标, 研究采用工程中常用的热处理方法对应变时效脆化避免和消除的效果, 使用光学显微镜、SEM 和 TEM 观察试样组织形貌, 探讨了各种热处理下的材料微观组织变化。结果表明: 采用的 20 钢厚壁高压管轧制过程中已发生应变时效脆化, 后续的预制更加加重了管子的应变时效脆化程度; 不同热处理方法避免和消除应变时效脆化效果不同, 其中以正火加高温回火效果最佳; 变形度对恢复材料的冲击性能影响显著, 预变形后是否时效对热处理的效果没有显著影响。

关键词: 热处理; 20 钢; 应变时效脆化; 性能恢复

中图分类号: TG113.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)01-0057-07

Abstract: Strain aging embrittlement of 20 steel thick-wall high pressure pipes is an important factor which has a great effect on the pipe long-term operating safety. Lots of heat treatments which were commonly used in engineering were adopted to eliminate or prevent the strain aging brittleness. The effect of the treatments was evaluated by Charpy V-notch impact absorption energy. Microstructure and fracture of specimen morphologies were observed by optical microscopy, scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. Microstructure change of materials after different heat treatments was also discussed. The results show that the strain aging embrittlement comes into being in rolling process and is enhanced during the bend-forming process of the pipes. Different heat treatments have different effects to eliminate or prevent the strain aging brittleness, among which normalizing plus high temperature tempering is most effective. The deformation degree has a significant effect on recovering the impact properties of materials and whether aging or not after pre-deformation does not have significant effect on the heat treatment efficiency.

Key words: heat treatment; 20 steel; strain aging embrittlement; property recovery

20 钢厚壁高压管在我国被广泛用于化肥、电力、石油化工等行业, 一旦出现质量问题覆盖面大、影响严重。首先, 依照我国现行标准 GB6479—2000《高压化肥设备用无缝钢管》的要求, 20 钢的含氮量应控制在

0.008% (质量分数, 下同) 以下, 这明显高于碳钢不发生应变时效的最高含氮量^[1], 存在发生应变时效脆化的成分条件。其次, GB6479—2000 允许“热轧管终轧温度符合正火温度时, 可以代替正火”, 如果轧制工艺

控制不严,很难保证钢管终轧时的温度达到正火条件,极易产生所谓的“高温动态应变时效脆化”现象。第三,H31—67《高压管、管件及紧固件通用设计技术条件》等要求弯曲半径小于管子外径 5 倍时,应对预制过的管子进行去应力退火,但在实际预制过程中,弯曲半径更小时也不进行去应力退火,甚至有时为了便于弯制,弯制过程中有伴热,这样做极易因所谓的温加工条件而发生应变时效脆化。尤其按照 GB/T 20801.4—2006《压力管道规范 工业管道 第 4 部分:制作与安装》的规定,冷成形或冷弯后,当成形应变率大于 5%时应按要求进行热处理,则更多的管子预制时未达到标准要求。最后,GB6479—2000 依然使用 U 型缺口冲击实验检测管材冲击吸收能量,这是在低冲击吸收能量下非常不敏感的实验方法。近几年我国发生多起 20 钢管道脆断事故,业已证明这些事故管发生了严重的应变时效脆化。目前全国合成氨和甲醇生产装置约有 670 套。每套装置中有 20 钢厚壁高压管 600 多米,全国仅这一行业就有 20 钢厚壁高压管 40 多万米。因此,避免和消除 20 钢厚壁高压管加工过程中引起的应变时效脆化具有重要意义。本工作采用工程中常用的热处理方法来避免和消除应变时效脆化,以夏

比 V 型缺口冲击吸收能量为应变时效脆化评价指标,使用光学显微镜、扫描电镜和透射电镜观察试样的组织形貌。

1 实验方法

实验材料为未预变形(此处“预变形”泛指管子的预制变形和实验中对试样施加的预拉伸变形)与未热处理处理的 $\phi 273\text{mm}\times 40\text{mm}$ 20 钢厚壁高压管直管和弯管(包括弯管的直边段、外弯侧和内弯侧)。弯管的弯曲半径为管外径的 2 倍。根据 GB/T 20801—2006 计算弯管外弯侧轴向最大应变率为 25%,内弯侧为-25%,考虑实际取样点的位置后,弯管外弯侧冲击试样取样点轴向应变率均值为 24%,内弯侧为-24%。

根据工程中常用的热处理方法,变换预变形前的热处理状态和是否预变形及预变形后的热处理状态,分别设置了 63 组实验,每组实验加工 3 个夏比 V 型缺口冲击试样,测得 3 个冲击吸收能量值。热处理详细参数见表 1,所有试样均沿管子或管件纵向取样。冲击实验完成后选取其中有代表性的试样进行金相、扫描和透射电镜观察分析。

表 1 热处理参数设置

Table 1 The parameters setting of heat treatment processes

Parameter	Heat treatment process					
	Aging	Stress relief annealing	Recrystallization annealing	Full annealing	Under annealing	Normalizing
Heating temperature/℃	250±2	590±2	635±2	890±2	775±2	910±2
Heating rate/(℃·h ⁻¹)	100	100	100	100	100	100
Holding time/min	60	120	120	90	90	90
Cooling	Air-cooled	Air-cooled after	Air-cooled after	Air-cooled after	Air-cooled after	Air-cooled
		furnace cooling to 200℃	furnace cooling to 200℃	furnace cooling to 300℃	furnace cooling to 300℃	

Note: The heat treatment temperature of the bend pipes is stress relief annealing 630-650℃, under annealing 750℃, and normalizing 900-930℃ respectively.

2 实验结果及分析讨论

2.1 冲击实验结果及分析

不同温度下 20 钢的标准冲击吸收能量值分别见

GB5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》、GB713—2008《锅炉和压力容器用钢板》和 GB6479—2000。下述各图中以 ST 表示 20 钢冲击吸收能量的标准规定值。热处理、预变形和时效的符号说明见表 2。

表 2 热处理、预变形与时效的符号说明

Table 2 The explanation of the symbols of heat treatment, pre-deformation and aging

Symbol	The sort of experiment	Symbol	The sort of experiment	Symbol	The sort of experiment
A	Full annealing	O	No heat treatment	s	Pre-deformation
a	Aging	o	No pre-deformation	*	Bend pipes
I	Under annealing	R	Recrystallization annealing		
N	Normalizing	S	Stress relief annealing ^b		

^b This heat treatment is high temperature tempering when it follows after other heat treatment.

2. 1. 1 预变形前不同热处理的影响

管子预变形前不同热处理方法对材料冲击吸收能量的影响如图 1 所示, T 为冲击实验温度, KV_2 为冲击吸收能量。由图 1 可见, 实测的未热处理直管 5℃ 的冲击吸收能量低于标准要求。根据 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》50% 上平台值确定的弯管直边段韧脆转变温度为- 6℃, 且冲击吸收能量只在- 10℃ 以上时符合标准要求。两段未热处理管子的冲击吸收能量远低于其正火和退火后的, 说明两管轧制后都没有按标准进行正火或终轧温度低于正火温度。冲击吸收能量很低的原因很可能是轧制过程中发生了高温动态应变时效脆化现象^[2]或加工硬化现象。直管正火后(No) 25℃ 冲击吸收能量为 146. 5J, 同样条件下 10% 预制变形后(NsO) 25℃ 冲击吸收能量为 130. 3J, 两者基本无差别, 可以排除加工硬化的影响。当前炼钢技术可控制含氮量在 0. 005% ~ 0. 006%^[1], 实测管材达 0. 009% 以上, 存在发生应变时效的成分条件; 在 20~ 300℃ 时, 温度升高, 时效过程加速^[3], 出现应变时效的时间缩短, 甚至在不到 1h 即出现最大的应变时效量^[4, 5], 管子轧制时存在发生应变时效的温度和时间条件。弯管直边段的冲击吸收能量高于直管的原因是由于两管的碳氮含量和终轧温度存在差异。

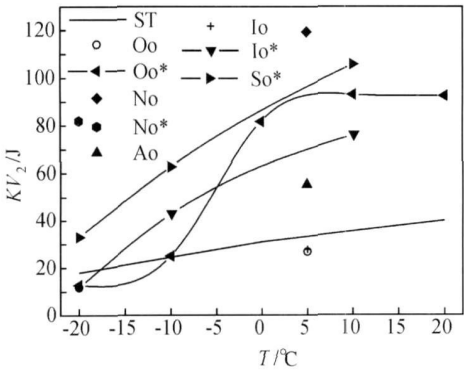


图 1 管子预变形前不同热处理方法对冲击吸收能量的影响

Fig. 1 Effects of different heat treatment methods on the impact absorption energy of the pipes before pre-deformation

此外, 从图 1 可以看出, 两管经完全退火、正火和去应力退火可以消除应变时效脆化, 热处理尤以正火为佳。

2. 1. 2 变形度和变形后不同热处理的影响

图 2 为管子预变形前未热处理, 不同变形度和热处理对冲击吸收能量的影响, e 为试样的变形度。预变形前未热处理管子随实验温度降低和变形度增大,

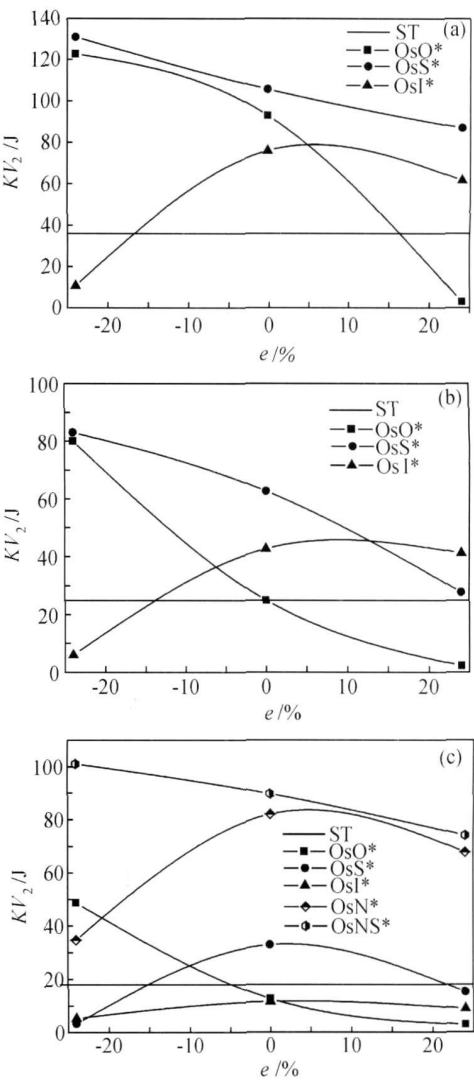


图 2 预变形前未热处理管子不同变形度和热处理方法下的冲击吸收能量

(a) $T=10^{\circ}\text{C}$; (b) $T=-10^{\circ}\text{C}$; (c) $T=-20^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 Effects of different pre-deformation degree and heat treatment methods on the impact absorption energy of the pipes without heat treated before pre-deformation (a) $T=10^{\circ}\text{C}$; (b) $T=-10^{\circ}\text{C}$; (c) $T=-20^{\circ}\text{C}$

冲击吸收能量逐渐降低, 10、- 10℃ 和- 20℃ 时冲击吸收能量符合标准要求的变形度分别小于 17%、0% 和- 5%。10℃ 和- 10℃ 时去应力退火可以提高整个变形度范围内的冲击吸收能量(见图 2(a), (b)), - 20℃ 时可以提高大于- 10% 变形度的冲击吸收能量(见图 2(c))。不完全退火效果不如去应力退火, 提高了大变形度的冲击吸收能量, 降低了小变形度的冲击吸收能量, 10℃ 和- 10℃ 在部分条件下满足标准要求, - 20℃ 时无法达到标准要求。预变形后正火与去应力退火的变化趋势相同, 在变形度约大于- 20% 时可以极大提高管子的冲击吸收能量; 在约小于- 20% 时, 管子的冲击吸收能量低于未热处理的, 但是都满足标准要求。

预变形后正火加高温回火更进一步提高了管子正火后的冲击吸收能量,尤其是明显提高了变形度为负值的冲击吸收能量。

预变形后去应力退火、正火和正火加高温回火都可以提高预变形前未热处理管子的冲击吸收能量。去应力退火的管子 KV_2 在 -10°C 以上时可以达到标准要求,但是在 -20°C 时只能在部分变形度范围内满足标准要求;正火和正火加高温回火的管子 KV_2 在实验范围内都可以满足标准要求。

2. 1. 3 应变时效前不同热处理的影响

管子预变形前不同热处理及随后应变时效对冲击吸收能量的影响如图 3 所示,实验温度为 5°C 。可以看出,预变形前未热处理管子虽然存在动态应变时效脆化现象,随后进一步应变时效的冲击吸收能量仍继续降低,说明轧制时的管子未达到脆化峰值;管子预变形前不完全退火与未热处理的冲击吸收能量基本没有差异,而完全退火和正火处理后的冲击吸收能量大幅度提高,远超过标准要求,说明必须保证管子轧制后处于后两种热处理状态;管子这两种热处理或不做热处理状态下应变时效的冲击吸收能量基本相同,说明管子后续应变时效脆化的发生不能只依赖于之前的热处理来完全避免,必须再次进行热处理才能保证其韧性。

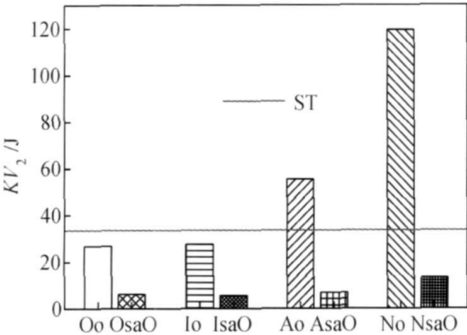


图 3 预变形前不同热处理及应变时效对冲击吸收能量的影响

Fig.3 Effects of different heat treatment methods before pre-deformation and strain aging on the impact absorption energy

2. 1. 4 变形度对未热处理管的影响

预变形前未热处理管子不同变形度对冲击吸收能量的影响如图 4 所示。可以看出,随实验温度 T 升高和变形度 e 减小,管子的冲击吸收能量逐渐提高,只是在 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 和变形度小于 -15% 时,冲击吸收能量不再是单调升高而是稍有降低。说明管子发生应变时效脆化的程度与变形度和实验温度直接相关。因此,提出避免管材应变时效脆化方法需要考虑管子的变形度和使用温度(即本工作的实验温度)。

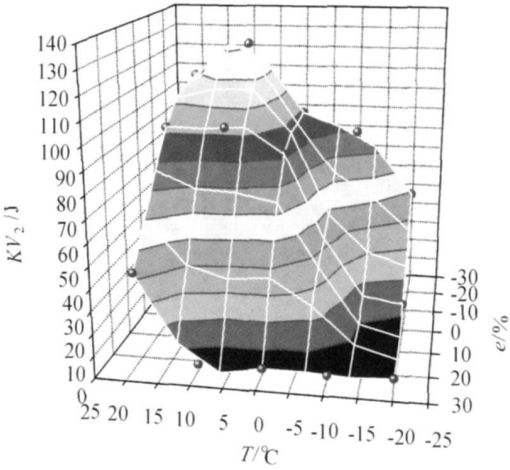


图 4 未热处理管子不同变形度对冲击吸收能量的影响
Fig. 4 Effects of different pre deformation degree on the impact absorption energy of the pipes without heat treated

2. 1. 5 高温回火前热处理和变形度的影响

图 5 所示为管子预变形前不同热处理和不同预变形后高温回火对冲击吸收能量的影响。可以看出,实验温度大于 -15°C 时,预变形前未热处理弯管的冲击吸收能量随变形度的增大而降低,这与图 4 所揭示的预变形前未热处理管子冲击吸收能量随实验温度和变形度的变化规律相同。预变形前未热处理 10% 变形度直管的冲击吸收能量与 24% 变形度弯管外弯侧的基本相同,再次说明弯管的性能要优于直管的。预变形前热处理为不完全退火或完全退火时,只会使预变形管子高温回火的冲击吸收能量降低而达不到标准要求。预变形前正火热处理,可以极大地提高预变形管子高温回火的冲击吸收能量。

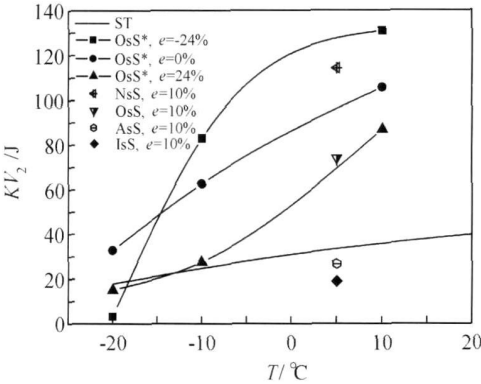


图 5 管子预变形前不同热处理和不同预变形后高温回火对冲击吸收能量的影响

Fig.5 Effects of stress relief annealing after different heat treatments before pre-deformation and different pre deformation degrees on the impact absorption energy of the pipes

2. 1. 6 变形前热处理和变形后退火温度的影响

图 6 为预变形前不同热处理管子经室温 10% 预变形,再经 590℃高温回火或 635℃再结晶退火后的冲击吸收能量。可以看出,预变形前热处理是影响预变形后经去应力或再结晶退火恢复材料冲击吸收能量的关键因素,其影响的优劣程度依次为正火、未热处理、完全退火和不完全退火,而且其中完全退火或不完全退火会潜伏后续预变形以及热处理无法恢复达到标准要求的冲击吸收能量的可能。

2. 1. 7 正火管预变形后不同退火及时效的影响

表 3 为正火管预变形后不同退火及时效的冲击吸收能量。可以看出,预变形后管子的冲击吸收能量没有显著下降,而高温回火或再结晶退火都可以使冲击吸收能量有所恢复,且时效后也不会发生脆化。该规律有待在更宽广的实验温度范围内得以证明。

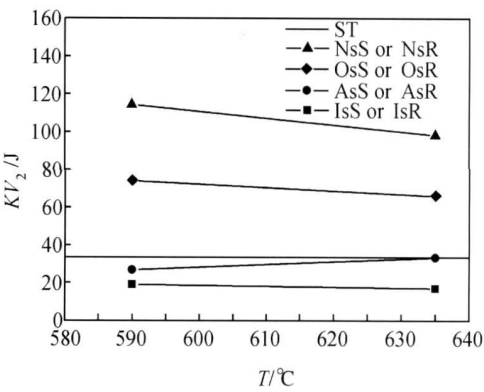


图 6 管子预变形前不同热处理和 10% 预变形后退火温度对冲击吸收能量的影响

Fig. 6 Effects of annealing temperature after different heat treatments before pre deformation and 10% pre-deformation on the impact absorption energy of the pipes

表 3 正火管预变形后不同退火及时效的冲击吸收能量/J

Table 3 The impact absorption energies of the pipes normalized before pre deformation and different annealing and aging after pre-deformation/ J

Test temperature/ °C	Heat treatment symbol					
	No	NsO	NsS	NsR	NsSa	NsRa
5	119. 3	—	114. 3	98. 3	—	—
25	146. 5	130. 3	—	—	138	136. 3

2. 1. 8 正火管应变时效后不同退火及时效的影响

表 4 为正火管应变时效后不同退火及时效的冲击吸收能量。可以看出,应变时效后管子的冲击吸收能

量显著下降,降至室温下标准要求值的 1/ 3 左右,高温回火或再结晶退火都可以使冲击吸收能量得到恢复,且时效后也不会发生脆化。同样,该规律有待在更宽

表 4 正火管应变时效后不同退火及时效的冲击吸收能量/ J

Table 4 The impact absorption energies of the pipes normalized before strain aging and different annealing and aging after strain aging/ J

Test temperature / °C	Heat treatment symbol						
	No	NsO	NsaO	NsaS	NsaR	NsaSa	NsaRa
5	119. 3	—	13. 3	—	—	—	—
25	146. 5	130. 3	—	136. 7	138. 7	149. 6	137. 3

广的实验温度范围内得以证明。

2. 2 微观结构分析

2. 2. 1 管子预变形前未热处理的金相组织

如图 7 所示,预变形前未热处理直管的组织为细晶粒铁素体及珠光体,珠光体分布不均匀,存在比较严重的带状偏析,导致性能不均。带状组织对钢的横向性能,特别是低温韧性、断口分离、止裂性能以及氢致开裂有重要影响^[6]。

2. 2. 2 管子预变形前不同热处理的金相组织

图 8 为管子预变形前正火、完全退火和不完全退火的金相组织。完全退火或正火温度对热处理效果的

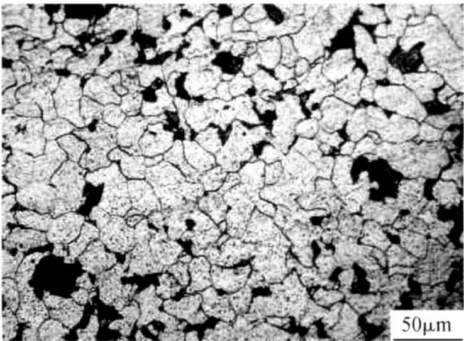


图 7 预变形前未热处理管子的光学金相

Fig. 7 The optical metallographic structure of the pipe without pre-deformed and heat treated

影响不明显, 所以完全退火温度 890°C 和正火温度 910°C 的不同可以忽略^[7]。正火保温 90min 时组织完全奥氏体化, 冷却过程中完全重结晶, 冷却速率快, 成核率高, 晶粒细小, 组织为均匀的铁素体和细小的层片状珠光体, 见图 8(a); 完全退火态组织中仍有带状组织, 见图 8(b), 说明加热保温时组织没有完全奥氏体

化, 冷却过程中部分再结晶, 与正火相比, 冷却速率慢, 再结晶过程中成核率低, 未溶解的铁素体晶粒继续长大。不完全退火时珠光体和部分铁素体再结晶, 这个过程中未溶解的那部分铁素体也会继续长大。如图 8(c) 所示, 晶粒极不均匀, 铁素体晶粒粗大。晶粒尺寸及均匀性对时效冲击性能有重要影响^[7]。

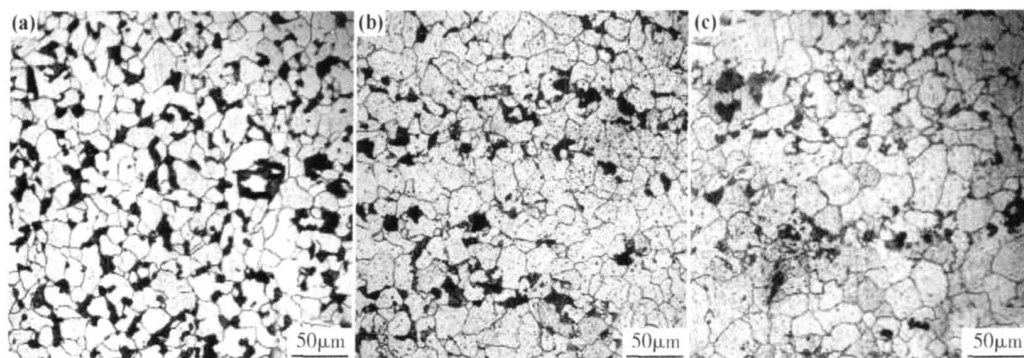


图 8 未预变形管子热处理后的光学金相组织 (a) 正火组织; (b) 完全退火组织; (c) 不完全退火组织

Fig. 8 The optical metallographic structures of the pipes without pre-deformed and alternately heat treated

(a) normalizing structure; (b) full annealing structure; (c) under annealing structure

去应力退火和再结晶退火松弛了预变形中的内应力, 晶粒相对比较均匀, 冲击吸收能有明显提高。

2.2.3 管子预变形前正火、正火后应变时效及应变时效后高温回火的结构演化

由图 2(c)、图 5、图 6、表 3 和表 4 可以看出, 变形管子辅以正火和高温回火几乎可以获得最好的冲击性能, 故而专注这一系列过程中管子材料组织尤其是珠光体的微观结构变化。

图 9 为管子预变形前正火态珠光体的微观结构, 呈现出较规则的层片状形貌。应变时效时铁素体中先有位错的运动及交互作用, 形成初期的位错缠结。随着预变形的增加, 在珠光体中渗碳体的界面上增殖位错, 已增殖的位错继续向前运动, 难以发生大变形量的珠光体承受的应力逐渐增大, 共析铁素体也在不断发生塑性变形并传递着这种应力集中, 位错不断地滑移塞积在渗碳体前面, 使渗碳体发生断裂^[8]。图 10 充分反映了这一形态。珠光体在塑性变形中另一种形变位错结构是共析铁素体中形成位错胞, 如图 11 箭头所指, 位错胞壁是萌生显微裂纹的有利位置。预变形中共析铁素体与珠光体的边界必然产生塑性变形的不协调现象。预变形 10% 可以使边界处出现的塑性变形不协调程度大到内应力集中能够使结合不强的界面分离, 出现微裂纹和微孔^[8]。

图 12 为应变时效后去应力退火的组织。去应力退火是在临界温度 A_1 以下, 珠光体内部球形化需要保温很长时间。预变形改变了内部球形化过程, 取消

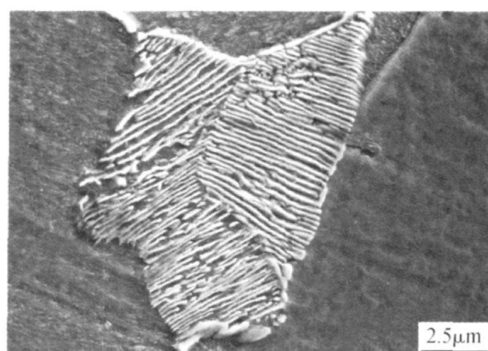


图 9 管子预变形前正火的珠光体(SEM)

Fig. 9 Pearlite normalized before pre-deformation (SEM)

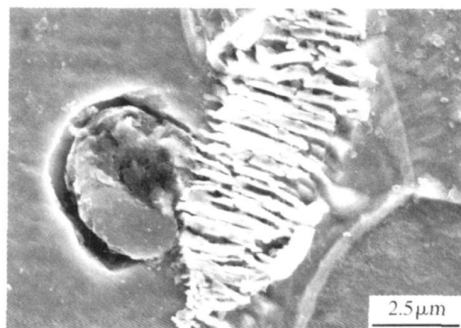


图 10 管子预变形前正火加应变时效后的珠光体(SEM)

Fig. 10 Pearlite of the pipe normalized before pre-deformation and strain aging (SEM)

了内部球形化过程的第一阶段, 即一些珠光体领域发生扭折, 渗碳体直接破断成小颗粒(见图 12), 这可以加快内部球形化速度达几个数量级。高温回火或再结

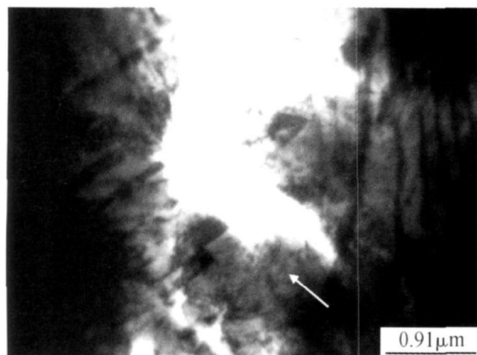


图 11 管子预变形前正火加应变时效后的位错胞和微孔洞(TEM)

Fig. 11 Dislocation cells and micro-holes in the pipe normalized before pre-deformation and strain aging(TEM)

晶退火保温 2h, 珠光体已经发生了轻度内部球形化, 内部球形化组织已经清晰可见, 发生扭转的珠光体领域中, 内部球形化十分不均匀, 某些部分已完全内部球形化, 某些部分仍然是片状珠光体(见图 12), 与未经预变形的相比, 内部球形化所需时间明显缩短。珠光体内部球形化后可以提高材料的塑性、韧性及切削加工性^[9]。

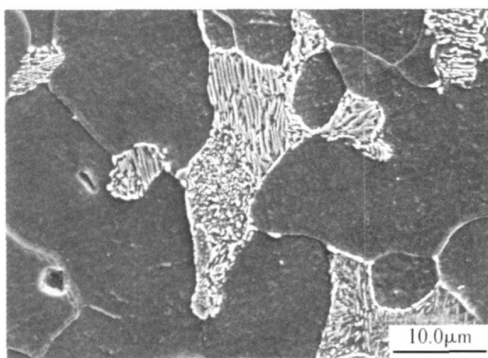


图 12 管子预变形前正火加应变时效并高温回火后的组织(SEM)

Fig. 12 Microstructure of the pipe normalized before pre-deformation and strain aged and high temperature normalizing (SEM)

2.2.4 消除应变时效持久性分析

铁中冷加工导致的某种特殊应力区中, 氮原子应力感生扩散引起的内耗峰称为斯诺克-科斯特峰(S-K 峰), 它是在经过形变的含氮 α 铁中 200~300℃之间观察到的一个弛豫内耗峰^[10]。文献[10]中退火 1h 后急冷, 退火温度从 20℃递增至 600℃, S-K 峰逐渐降低, 到 600℃退火 1h 后急冷不再出现 S-K 峰, 也就是氮原子不再扩散。本工作对正火加应变时效的试样进行去应力或再结晶退火后 250℃时效, 所测得的材料

冲击吸收能量不再发生脆化, 说明氮原子没有进行扩散, 本工作中实验方法达到了与文献[10]中 600℃退火 1h 后急冷同样的效果, 应变时效脆化的避免具有持久性。

3 结论

(1) 材料的应变时效脆化可以通过正火、完全退火、去应力退火、再结晶退火或两种热处理的组合来避免和消除, 但是不同的热处理方法效果不同, 正火加高温回火可以使材料获得最好的冲击性能。变形度对恢复材料的冲击性能影响显著, 预变形后是否时效对热处理的效果没有显著影响。

(2) 管子预变形前正火处理能获得均匀的珠光体和铁素体组织, 珠光体内部为均匀的层片状结构; 应变时效后层片状的珠光体结构将发生严重的破碎和扭曲, 同时在材料内部会出现大量位错胞、微孔洞甚至裂纹; 去应力退火后破碎扭曲的珠光体结构向均匀分布的球状结构转化, 这一转化显著提高材料的冲击性能。

参考文献

- [1] 孟繁茂, 孙卫华. 无应变时效倾向 20MnSiNb 400MPa 级热轧钢筋 [A]. 98 全国低合金钢学术年会论文集 [C]. 武汉: 中国金属学会特钢分会, 1998. 260-266.
- [2] 钱匡武, 李效琦, 萧林钢, 等. 金属和合金中的动态应变时效现象 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 8-23.
- [3] 宋维锡. 金属学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980. 331.
- [4] 潘家祯. 压力容器材料实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [5] 蒋智翔, 杨小昭. 锅炉及压力容器受压元件强度 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 11.
- [6] 李鹤林. 高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 59.
- [7] 徐洪庆. 正火工艺对 20g 钢板时效冲击性能的影响 [J]. 山东冶金, 1997, 19(3): 21-24.
- [8] 刘禹门. 结构钢与铝合金塑性变形的微观机制 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. 17-20.
- [9] 程怡萱, 郦剑, 陈理淳. 钢的相变显微组织 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989. 10-12.
- [10] 冯端. 金属物理学: 第三卷 金属力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 138-139.

基金项目: 山东大学研究生自主创新基金资助(yzc09061)

收稿日期: 2010-03-16; 修订日期: 2010-11-24

作者简介: 李梦丽(1984—), 女, 博士研究生, 从事承压设备安全保障与失效分析方面研究工作. 联系地址: 济南市经十路 17923 号山东大学机械学院过控所(250061), E-mail: miling001@163.com