

38CrA 钢的 $T-\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 冷脆 断裂控制图和机制图的研究

钟群鹏 张峥 田永江 陈昌麒

(北京航空航天大学第八研究室, 北京, 100083)

THE RESEARCH OF $T-\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ COLD BRITTLE FRACTURE CONTROLLING DIAGRAM AND MECHANISM'S DIAGRAM FOR 38CrA STEEL

Zhong Qun-peng, Zhang Zhen, Tian Yong-liang, Chen Chang-qi

(Eighth institute of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 从理论和实验上研究了 38CrA 钢光滑拉伸试样的韧脆转移温度 T_{NDT} , A ($A = \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon})$ 和 $D^{-1/2}$ 之间的关系。得到其屈服应力 σ_{YS} 与 A 之间具有指数关系, 其 T_{DNT} 与 $D^{-1/2}$ 之间具有线性关系, 并且得到 T_{DNT} 与 $\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon})$ 乘积为一材料常数等关系。建立了三维冷脆断裂控制图和机制图, 它们不仅可以用于冷脆断裂的分析、诊断、预测、控制和预防, 而且可以用于低温构件的设计、选材和安全评估。

关键词 钢, 冷脆断裂, 控制图, 机制图

Abstract In this paper, the comprehensive relationship among T_{NDT} , A ($A = \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon})$ and $D^{-1/2}$, are researched in theory and experiment in smooth tensile specimen of 38CrA steel. The following relations are obtained: the relation between the yield stress σ_{YS} and A is an exponential one, the relation between ductile brittle transition temperature T_{NDT} and grain size $D^{-1/2}$ is linear, and the multiplier of T_{NDT} and $\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ is a constant of material. According to the formulae mentioned above, three dimension $T-\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ cold brittle fracture controlling diagram and fracture mechanism's diagram are established. They can be used not only in analysis, diagnosis, prediction, controls and prevention of cold brittle fracture, but also in design, choice of materials and safe evaluation of structural parts in low temperature.

Key words steel, cold brittle fracture, controlling diagram, mechanism's diagram

目前已有的断裂分析、评定、控制图, 由于均为二维, 未考虑应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的影响, 没有直接显示显微组织特征参数的影响, 多数也未表现温度(特别是低温)的影响, 因此不能有效地用于分析、评定和控制材料(钢)多因素的冷脆断裂的安全性

1991年12月29日收到, 1992年5月6日收到修改稿

国家自然科学基金、航空科学基金和材料疲劳断裂国家重点实验室资助课题

和断裂机制的转移。虽然 $\sigma - T\ln(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon}) - D^{1/2}$ 三维冷脆断裂控制图和机制图部分弥补了上述不足, 但是由于应力 σ (特别是裂尖应力 σ_f) 的计算比较困难、断裂应力 σ_f 与 $T\ln(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon})$ 的关系比较复杂, 使它的应用受到了一定的限制^[1], 为此有必要建立更为直观的三维冷脆断裂控制图和机制图。

1 实验材料和方法

研究材料为 38CrA 钢 (0.38%Cr, 0.5%Mn, 0.25%Si, 0.01%S, 0.016%P, 0.92%Cr, 0.08%N, 0.08%Cu, 其余 Fe)。热处理规范如表 1 所示。

表 1 热处理规范

系列号	奥氏体化		珠光体转变	
	温度/℃	时间/h	温度/℃	时间/min
1	860	1	炉冷	
2	860	1	炉冷	
3	910	1	炉冷	
5	860	1	690	30
6	860	1	535	30

采用在不同温度和不同加载速率下进行光滑拉伸试验。选用温度为 77K、133K、203K、223K、243K、293K, 用无水乙醇与甲醇配制成低温保温液或用液氮作冷却剂, 试样保温时间一般为 10~15min, 加载速率分别为 0.2mm/min、2mm/min、20mm/min、200mm/min、2 000mm/min。

2 实验结果和讨论

已知^[1]

$$\sigma_{YS} = \sigma_{\mu} + \sigma^* = \sigma_i + K_Y D^{-1/2} + \sigma_p \exp(-A/T_0) \quad (1)$$

式中 σ_{YS} 为屈服强度; σ_{μ} 为非热激活分量。

$\sigma_{\mu} = \sigma_i + K_Y D^{-1/2}$, 其中 σ_i 、 K_Y 为材料常数, D 为晶粒尺寸, $\sigma^* = \sigma_p \exp(-A/T_0)$ 为热激活分量, 又称有效应力, 其中 σ_p 为绝对温度为零时的有效应力, A 为综合热激活参量, $A = T\ln(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon})$, T 为温度, $\dot{\epsilon}_0$ 为频率因子, 对钢而言 $\dot{\epsilon}_0 = 10^8 \sim 10^9$ 1/s, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; T_0 为材料常数。

对 38CrA 钢的实验结果作图(图 1), 并按式(1)拟合得到

$$\sigma_{YS} = 91.19 + 943.55D^{-1/2} + (2\ 293.07 - 2\ 253.69D^{-1/2})\exp(-A/2\ 032) \quad (2)$$

用式(2)对 38CrA 钢 1 系列屈服强度的计算值与实测值进行对照(见表 2), 式(2)是相当精确的。

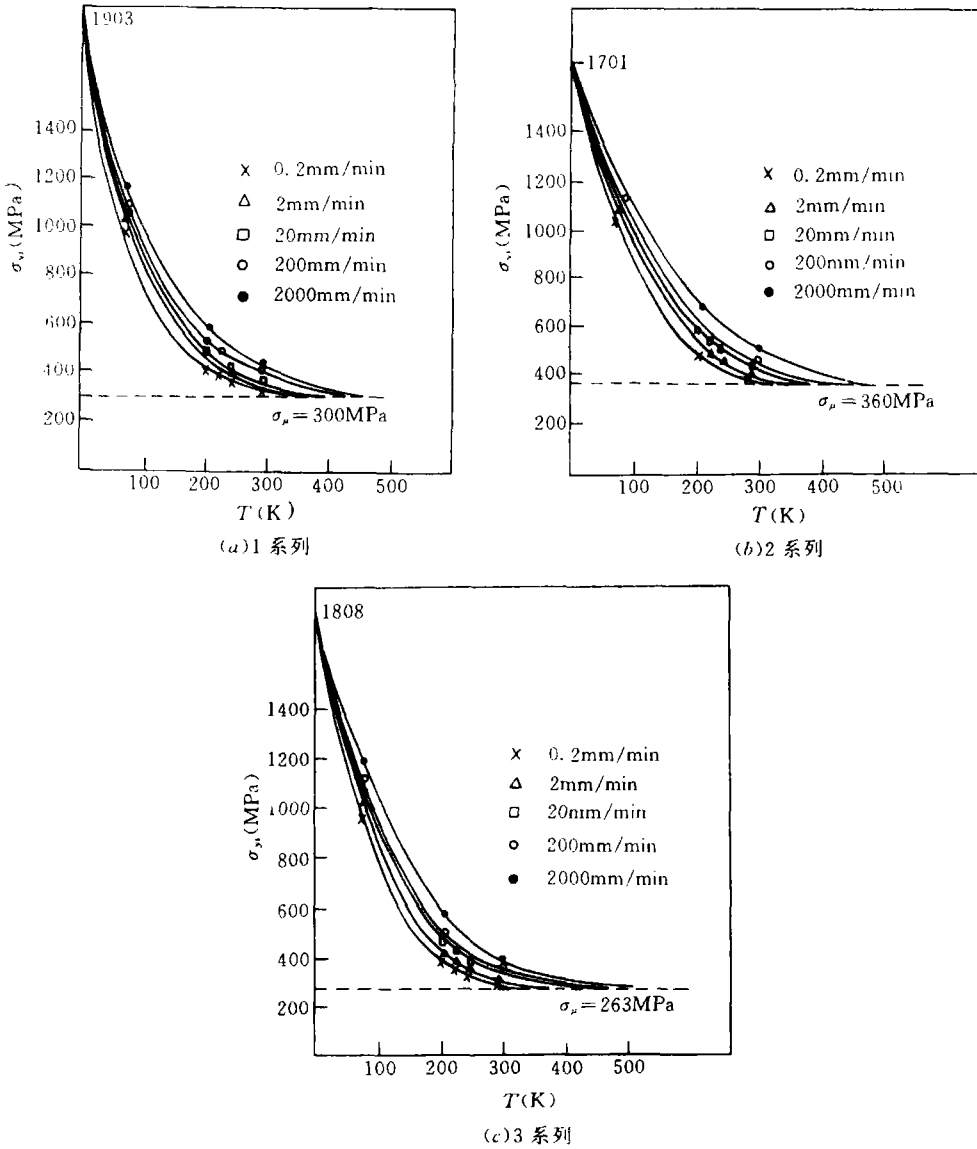


图 1 38CrA 钢光滑拉伸试样的屈服强度与温度及应变速率的关系

(a) 1 系列; (b) 2 系列; (c) 3 系列

根据式 (2), 可以作图 (见图 2)。从图 2 看出, 无塑韧脆转移温度 T_{NDT} 是有效应力 σ^* 为某一定值时的温度。而晶粒尺寸则影响 T_{NDT} 的坐标位置 (见图 3)

已知^[3]

$$\Delta H = -KT \ln \frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \tag{3}$$

式中 ΔH 为激活能; K 为波兹曼常数。

表 2 -38CrA 钢 1 系列的屈服强度的计算值与实测值对照

T° / K		77	203	223	243	293
9.5238×10^{-5}	$\sigma_{YS测} \text{ MPa}$	970.25	406.53	375.08	366.30	327.72
	$\sigma_{YS计} \text{ MPa}$	941.51	415.52	387.99	367.03	333.95
	相对误差%	0.030	0.022	0.034	0.002	0.019
9.5238×10^{-4}	$\sigma_{YS测} \text{ MPa}$	1027.51	415.21	386.6	393.62	317.55
	$\sigma_{YS计} \text{ MPa}$	999.93	445.30	413.22	388.22	347.55
	相对误差%	-0.0027	0.072	0.067	-0.014	0.094
9.5238×10^{-3}	$\sigma_{YS测} \text{ MPa}$	1037.28	496.56	463.09	413.14	354.79
	$\sigma_{YS计} \text{ MPa}$	1063.67	482.91	445.78	416.20	365.90
	相对误差%	0.025	-0.027	-0.037	0.007	0.031
9.5238×10^{-2}	$\sigma_{YS测} \text{ MPa}$	1080.13	527.56			408.02
	$\sigma_{YS计} \text{ MPa}$	1133.21	530.15			391.82
	相对误差%	0.049	0.005			-0.040
9.5238×10^{-1}	$\sigma_{YS测} \text{ MPa}$	1159.86	578.50			432.33
	$\sigma_{YS计} \text{ MPa}$	1209.09	589.60			427.92
	相对误差%	0.042	0.019			0.010

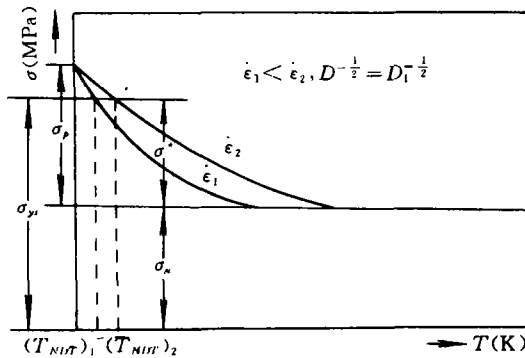


图2 应变速率对初脆转移温度 T_{NDT} 影响示意图

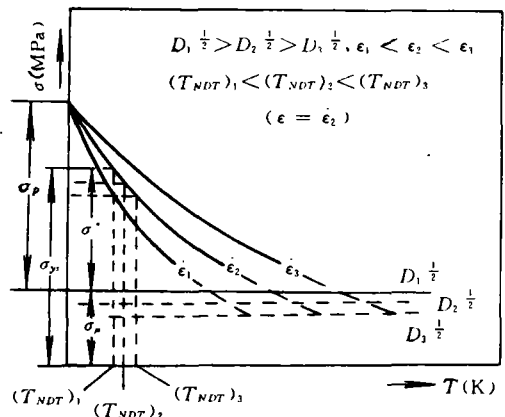


图3 晶粒尺寸 $D^{-1/2}$ 对初脆转移温度 T_{NDT} 影响示意图

试验表明, 激活能 ΔH 是有效应力 σ^* 的函数 (图 4), 而与试验时应变速率无关 (图 5)。

当初脆转移温度 T_{NDT} 时, $\Delta H = \Delta H^*$, ΔH^* 为材料初脆转移时的临界激活能, 它是材料常数。

故有

$$\Delta H^* = -KT_{NDT} \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) = \text{常数}$$

或

$$T_{NDT} \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) = -\Delta H^* / K = \text{常数}^{[4]} \quad (4)$$

因此, T_{NDT} 与 $\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon})$ 之间有具有双曲线关系。

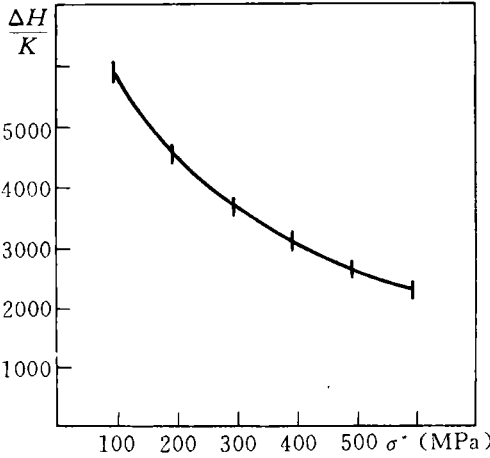


图4 38CrA钢的 $\Delta H / K$ 值
与有效应力 σ^* 之间的关系

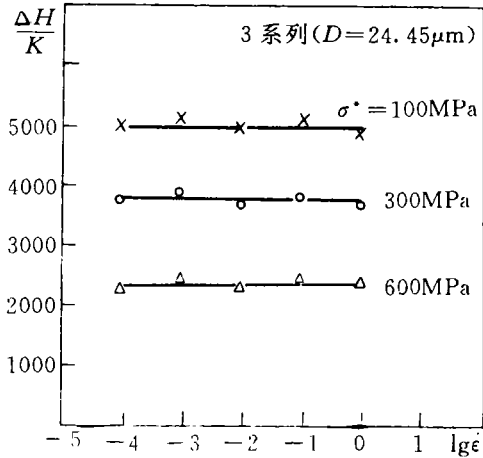


图5 38CrA钢的 $\Delta H / K$ 值
与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 之间的关系

已知^[1]

$$T_{NDT} = K_1 + K_2 D^{-1/2} \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 相结合, 就可在 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维坐标系中, 画出 $T_{NDT} - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 空间曲面 (图 6)。显然, 在这一双曲面以下的区域为脆性断裂区域或称为不安全区域; 在这一双曲面以上为 (脆性 + 韧性) 混合断裂区域或韧性断裂区, 统称为安全区。这就是 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 冷脆断裂控制图。

已知^[6], 当 $T < T_{NDT}$ 时为解理断裂; 而当 $T = T_{FTP} > T_{NDT} + 6.961b^{-1}$ 时, (b 为与韧脆转移温度间隔有关的系数; T_{FTP} 为断裂完全转移为韧性断裂的温度) 为韧窝断裂; 而当 $T_{NDT} < T < T_{NDT} + 0.691b^{-1}$ 时, 则呈现 (解理 + 韧窝) 混合断裂。这样, 在图 6 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 冷脆断裂控制图的基础上, 就可以建立 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 冷脆断裂机制图 (图 7)。

由上述分析可以看出, $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维冷脆断裂控制图和断裂机制图, 可以用于低温构件的设计、选材和安全评估, 也可以用于冷脆断裂的分析、诊断、预测、控制和预防。

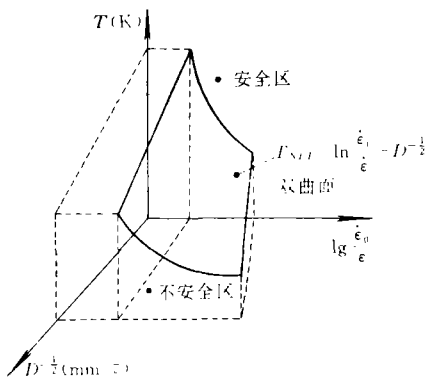


图6 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维

冷脆断裂控制图(示意)

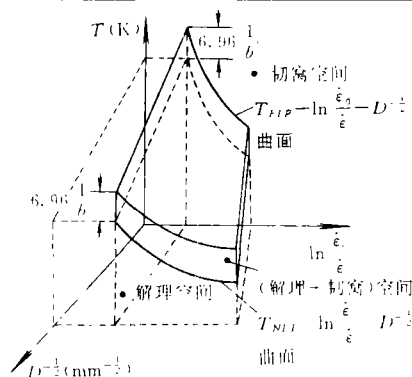


图7 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维

冷脆断裂机制图(示意)

3 结 论

(1) 从理论和实践证明, 在材料、晶粒大小和应力状态一定的条件下, 有

$$T_{NDT} + \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) = \text{常数}$$

即 T_{NDT} 与 $\ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon})$ 之间具有双曲线的关系。

(2) 实验表明, 有 $T_{NDT} = K_1 + K_2 D^{-1/2}$ 关系 (式中 K_1 、 K_2 均为常数), 因此在 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 坐标系中, 可建立具有双曲面形状的冷脆断裂控制图, 在这一双曲面以下为脆性断裂区或称不安全区, 曲面上方为脆断 + 韧断区, 又称为安全区。

(3) 考虑到 $T < T_{NDT}$ 时为解理断裂, $T > T_{NDT} + 6.961b^{-1}$ 为韧窝断裂, 因此 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维空间划为三个区, $T < T_{NDT}$ 时为解理断裂区; $T > T_{NDT} + 6.961b^{-1}$ 为韧窝断裂区; $T_{NDT} < T < T_{NDT} + 6.961b^{-1}$ 为解理 + 韧窝混合断裂区。这样就建立了 $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维冷脆断裂机制图。

(4) $T - \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维冷脆断裂控制图和机制图, 不仅可以用于冷脆断裂的分析、诊断、预测、控制和预防。而且可以用于低温构件的设计、选材和安全评估。

参 考 文 献

- 1 钟群鹏等, $\sigma - T \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) - D^{-1/2}$ 三维冷脆断裂控制图和机制图的研究, 机械工程学报, 1992, (5) :
- 2 初飞, 钢的低温力学行为及其冷脆控制方法的研究, 北京航空航天大学硕士论文, 1987.
- 3 李少华, 低合金高强度钢动态屈服与动态断裂特性和机理的研究, 清华大学工学博士学位论文, 1989.
- 4 钟群鹏, 张峰, 田永江. 关于临界激活综合参量 A^* 为材料常数的证明及其应用. 北京航空航天大学科学研究报告 BH-B4017, 1991.
- 5 Petch N J. Metallographic aspects of fracture, Chapter 5. Fracture, Academic Press, 1986,1: 369~393
- 6 钟群鹏, 张峰, 李洁, 田永江, 陈昌麒. 材料韧脆转移过程的数学模拟和定量分析. 机械工程学报, 1992,(5):