韧脆转变临界事件的探讨

陈 航,杨 莉

(兰州理工大学 石油化工学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:通过对裂纹 COD 试样和缺口试样在韧脆转变温度下断裂韧性的测试, 宏微观断口和力学 参数的测量, 结合断口、金相观察分析, 对裂纹试样和缺口试样解理断裂临界事件和韧一脆转变机 理进行了研究。结果表明:在缺口试件中, 临界事件是铁素体尺寸的微裂纹扩展进入周围的基体 中。在裂纹试样中, 临界事件发生转变同缺口试样具有相同的临界事件, 造成了纤维裂纹扩展到最 终解理断裂。

关键词:断裂机理;临界事件;纤维裂纹;韧一脆转变

中图分类号: TG407

在低温解理断裂的物理模型中,最重要的是确 定解理裂纹形成中的临界事件。文献明在低合金钢 缺口断裂实验中解理断裂的临界事件是铁素体晶粒 尺寸的微裂纹扩展进入周围的基体组织。裂纹试样 的临界事件是第二相尺寸的微裂纹扩展进入铁素体 基体中。但在韧脆转变区裂纹试样的解理断裂临界 事件尚不清楚,因此本文进行进一步的研究。

1 实验

1.1 **实验材料**

试验材料为 ¹⁶MnR 压力容器钢,其化学成分 如表 ¹ 中所示:

耒	1	16MnR	钢的化	受成分
11	-	- ~ ~ IVII II I	TF1 H 2 FL	

合金元素	С	Mn	Si	S	Р
百分含量(%)	0.16	1.34	0.33	0.012	0.023

为了获得不同尺寸的晶粒,分别将试样毛坯进 行了如下的热处理:

将试样毛坯加热到 1250℃, 保温 3 小时后, 随 炉冷却到室温,得到分布均匀的铁素体、少量珠光体 和晶界碳化物组织。把上面处理过的毛坯加热到 1250℃, 保温 50 分钟, 随炉冷却到室温,得到粗壮的 晶粒, 即粗晶组织; 铁素体晶粒的最大尺寸为 80mm。

1.2 断口和金相截面观察

两种试样断口在扫描电子显微镜下进行仔细观察,根据放射状河流花样寻找解理起裂源,测量起裂点距钝化裂纹尖端的距离X。测量出纤维裂纹的长

度。对裂纹和缺口卸载试样在垂直于裂纹方向截 剖,磨样,制成金相试样在扫描电镜下观察研究裂纹 前端高应力,应变区内形成的微孔和解理裂纹。

1.3 解理断裂微观力学参数的测量

用 ABAQUS 有限元软件模拟钝化裂纹前端最 大正应力、三向应力度和应变分布的结果,结合本文 测定的解理起裂点距钝化裂纹前端的距离 X 和临 界 COD 值,求出横坐标值,在对应的纵坐标上测 出解理起裂源处解理起裂时的局部断裂应力,临界 三向应力度 和临界塑性应变。

2 实验结果与分析

2.1 裂纹试样卸载图和断口分析

在载荷为 2.94KN 和 3.72KN 时,由于载荷很 小,裂纹尖端仅仅发生了微小的钝化,此处也没有发 现任何小裂纹和孔洞。这时,裂尖附近的应力和应 变都很小,因此,裂纹也无法在脆性第二相粒子处形 核,裂纹尖端保持其完整性。随着载荷的逐渐增加, 当载荷达到 7.35kN 时,裂纹尖端的塑性应变达到 300%,但这个应变也不足以使裂尖在铁素体晶粒中 产生塑性开裂。此时,裂尖已经发现了孔洞,但是三 向应力度不足以防止形核的裂纹钝化,因此,形核的 裂纹被钝化。当载荷为 8.43KN 时,塑性应变已经 足够使得裂纹形核,同时,三向应力度也达到防止裂 纹钝化,但是此时拉应力强化的正应力不足以使形 核的裂纹继续扩展。结果,裂纹尖端延伸出了一条 纤维裂纹,宽度有 60mm,同时在距离裂纹尖端 100

目钟化裂纹尖端的距离 X_{em} 测量出纤维裂纹的长Publishmg House: Alphi的前端发现了许多微孔洞积小裂纹。et

裂纹尖端此时钝化的宽度达到了 100 多微米,从外 观上同缺口试样的宽度基本一致,并且解理断裂距 离纤维裂纹尖端大概在 100-200mm。这说明前端 的高应力应变区已经远远超过了 100 mm。

2.2 缺口试样卸载图和断口分析

当载荷在 4.5KN 时,缺口附近没有孔洞和微裂 纹产生,这时缺口附近的应力应变都还很小,不足以 使得铁素体晶粒开裂。当载荷在 6.86KN 时,缺口 根部出现了形核的小裂纹和孔洞,说明此时的塑性 应变已经足以使得根部的小裂纹能在周围铁素体晶 粒中形核,从断口上观察能发现宽度 900um 的塑性 纤维带和韧窝。孔洞的形成是由于高的塑性应变 sp 大于碳化物粒子的形核应变 spc ,使得碳化物粒 子脱离基体形成孔洞。当载荷在 9.8KN 后,缺口根 部出现了许多孔洞和几条小裂纹,说明由于前端正 应力的作用,使得铁素体晶粒尺寸的裂纹向周围的 基体扩展,由于高的塑性应变区在缺口根部的不断 扩大,在缺口根部到前端0-200 mm 之间出现了很 多孔洞。由于微观断裂在切应力作用下,产生位错 滑移形成位错积塞,使得第二相或夹杂物开裂,同 时,在切应力引起的位错堆积而产生的正应力作用 下,微裂纹穿过第二相铁素体晶粒边界而形成了铁 素体晶粒尺寸的微裂纹,这一裂纹在外加正应力超 过局部解理断裂应力时,穿过晶体界面,扩展导致解 理断裂。

2.3 裂纹试样和缺口试样解理起裂点,纤维带长度,COD 韧性值的分布比较

图 1 展示了两种试样的起裂点的分布:Xf 代表 起裂点距离裂纹尖端或者是缺口根部的距离,Y代 表起裂位置距试样一侧的距离。由图可以分析得 出:无论是裂纹试样还是缺口试样,解理起裂点都是 随机分布的。但是缺口试样的起裂点距裂尖的距离 普遍大于裂纹试样。由于纤维裂纹的长度决定了韧 脆转变区的韧性值。对于缺口试样而言,产生的纤 维裂纹大于裂纹试样,缺口根部的三向应力度和由 于三向应力度造成的应力强化均小于裂纹试样。对 于裂纹试样,由于前端的三向应力度和应力强化不 仅取决于纤维裂纹的长度,还与裂纹尖端的钝化宽 度有关。当纤维裂纹扩展时,裂纹尖端的宽度也在 随机的变化。这样就造成了三向应力度和最大主应 力的随机变化,最终造成起裂点的随机变化。纤维 长度不同,韧性值分散不同,材料中组织不均匀,组 织中薄弱环节的随机分布也是造成起裂点随机分布



图 1 两种试样的起裂点的分布

3 试验结果讨论

3.1 纤维裂纹扩展转变为脆性解理断裂的机理

图 2 展示了裂纹试样在外载荷为 4.312KN 时 的应力、应变和三向应力度的分布图。这时,强化的 正应力比较小,所以正应力达不到局部解理断裂应 力,裂纹尖端只发生钝化。随着载荷增加,当载荷达 到 8.42KN,如图 3(a)(b)该载荷下的应力应变三向 应力度分布 [线以左区域塑性应变足够使裂纹形 核,P 线以右区域三向应力度已经能够防止形核的 裂纹钝化,两个区间已经在这个载荷下互相重叠。 但是,在韧脆转变区内应力强化低,由三向应力度强 化的正应力 wy 达不到由二相粒子决定的局部断裂 应力 q (1626MPa), 此时的 q 是在-110℃下测得 的。裂纹尖端钝化宽度超过了100mm,并且延伸的 小裂纹的宽度达到 60um,此时的裂纹试样自身变 成了缺口试样。对于缺口试样,在载荷达到 12. 45KN时,形核区与扩展区已经重合,解理断裂的临 界事件是晶粒尺寸的裂纹扩展到相邻周围的晶粒 中,此处就是扩展进入相邻的铁素体晶粒,因此 q 显然由铁素体晶粒尺寸决定的。



图 2 裂纹试样在 4.321KN 的应力应变三向应力的的分布图



图 3 裂纹试样在 8.42KN 下的应力应变和三向应力度的分

图 4 不同裂纹试样裂纹扩展的临界事件原理图



⁽a) 缺口试样铁素体晶粒尺寸裂纹

裂纹试样根部延伸出一条纤维裂纹,这样的延 性扩展最终转变成解理断裂,造成这种韧脆转变的 机理是:控制裂纹扩展的裂尖前端的正应力从 €1 (1626MPa)(由二相粒子决定)转变成 €2 (1196MPa)(由晶粒尺寸决定)。当然,在纤维裂纹 扩展中,前端逐渐增加的塑性应变和正应力也起到 了很重要的作用。在以上两种因素的共同作用下, 在钝化的裂纹尖端,使得裂纹的形核区和扩展区重 叠。

由图 4 由晶粒尺寸决定的局部解理断裂应力 q 相对较低,图中用水平线画出。对于缺口试样而言, 由三向应力度强化的正应力 σ_{vv} 也低, 在 X1 点达 到 q,此时的 X1 点相对裂纹试样离峰值应力较近。 由实验观测,缺口试样的起裂点都在峰值应力的右 侧,在此处,缺口试样塑性应变满足形核条件,因此 可以产生一条形核的晶粒尺寸的裂纹。从缺口金相 断口也观察到了残留的铁素体晶粒尺寸的裂纹,因 此只要晶粒尺寸的微裂纹能够穿越铁素体晶粒的边 界,就发生解理断裂。这时实验测量到的局部解理 断裂应力 q 是由晶粒尺寸决定的,而与碳化物粒子 大小无关,解理断裂的临界事件是铁素体晶粒尺寸 的裂纹扩展进入周围相邻的铁素体晶粒中。对于裂



缺口峰值应力,已经达1196MPa,因此,当达到由晶 粒大小决定的 \mathfrak{q} 时, 对应的横坐标 X_2 点相对于裂 纹试样离峰值应力就较远。可以推断,如果在X₂ 点,同时满足塑性应变,产生形核的裂纹,那么,解理 断裂机理就完全同缺口试样相同。因此,裂纹试样 具有同缺口试样相同的临界事件。

结论 4

通过以上工作,可以得到如下结论:

(1)三个判据,即 $\epsilon_{\rm PC}$ \Laple 以保证裂纹形核,应变 大于临界应变; $\sigma_m/\sigma_a \ge T_a$ 确保形核后的微裂纹不被 钝化,保证三向应力度大于临界三向应力度; $\sigma_{vv} \ge q$ 保证微裂纹能够扩展,正应力大于临界断裂应力。 可以被认为是解理断裂的充分条件。

(2)对于裂纹试样和缺口试样,在未达到临界载 荷之前,裂纹尖端只发生钝化,并且在裂尖附近,在 相互分离的不同区域满足了这三个判据,所以形核 的裂纹不能扩展,只能钝化。

(3)对于缺口试样,只要满足三判据中的 ς ≥ ε_m以保证裂纹形核,应变大于临界应变;保证微裂 纹能够扩展,正应力大于临界断裂应力。解理断裂 就能发生。

(4)裂纹试样临界事件的变化(下转第110页) 纹试样而言,由三向应力度强化的正应力远远高于

助教学的工作实践中,遵循以下原则:

a、辅助性原则。不能为使用电教而用电教,也 不能变"传统满堂灌"为"电教满堂灌"。"辅助"两字 很重要。应该有利于突出重点和难点,学生将抽象 知识和微观现象具体化、显现化。

b、科学性原则。课件的制作不可违背知识和 认知的科学性,不能杜撰一些不合事实的媒体软件。

c、实验优先原则。应该处理好现代教育技术 装备与理科实验教学仪器之间的关系,充分利用那 些科学实用、现象直观、性能稳定可靠、能正确反映 科学规律和自然现象、体现教学思想的实验仪器,决 不可用计算机的虚拟技术替代实验仪器。在理科教 学中,有很大一部分实验,尤其是微观实验和理想化 实验是无法实现的或较难实现的;实验中现象不明 显的、反应过于剧烈或历时太长的:场面太大,不能 去参观的(如卫星发射过程等),不做实验就会影响 学生对知识的理解和掌握,影响教学效果的实现。 利用计算机则可以化小为大,化远为近,化机械抽象 为生动具体,使本来看不见或看不清的东西变为具 体、形象。从而可以给学生提供大量的感性材料,丰 富教学内容,帮助学生形成科学概念,深刻理解抽象 和复杂的内容。但并不等于所有的实验都要由计算 机来完成。

d、注意性原则。课件的设计,除了吸引学生的 无意注意外,最主要的是要保持有意注意。对此,制 作课件时,不要过分的装饰背景、声音及对教学帮助 不大的动画应尽量少出现。同时,如果不是特别重 要,尽量避免四五十分钟全程计算机教学,否则学生 的视觉疲劳、心理疲劳将会抑制大脑对信息的接受。

e、实效性原则。无论什么手段和方法的选用, 都须考虑实际效果,不能一味去追求"先进"或形式 "多样化",不能为电教而电教,为多媒体而多媒体。 为此应该做到:充分利用传统教学的优点,什么媒体 效果最好,就用什么媒体。

f、高效率原则。素质教育对教学的其中一个要

(上接第90页)导致了纤维裂纹的扩展,在韧脆转变区内,裂纹试样钝化到100um以后,同缺口试 样具有相同的解理断裂机理。

参考文献:

 Chen J H, Wang GZ, Ma H. Fracture Behavior of C — Mn Steel and Weld Metal in Notched and Pre —cracked Specimens: Part II Micro — mechanisms of Fracture [J]. Metal Trans, 21A:321-330. 求是:"课内大运动量,课外减轻负担"。运用电教多 媒体辅助教学时,媒体和软件的穿插安排要紧凑、合 理、信息量大,比传统教学能节省时间,使学生能更 快地理解和掌握重点、难点知识,真正提高学习效 率。

(4)正确处理好现代教育技术装备与传统教育 技术装备之间的关系。现代教育技术装备,特别是 计算机是一种优秀的教学媒体,它在教学上的广泛 使用,使学校大力开展素质教育成为可能,对干提高 教学质量和教学水平推动教育改革都具有非常重要 的意义。在当前教学中,计算机已经表现出可以替 代或部分替代一些传统的教学媒体,但在使用中不 要过分强调计算机媒体的作用,计算机可以代替传 统的教学媒体,不等于传统的教学媒体的在教学中 就不再有它的使用价值和存在的必要。计算机应用 于教学领域也应该是目前教学媒体的一个补充和发 展。对这些信息技术的选择和使用,应根据教学的 实际需要加以选择。既要有效地使用多媒体计算 机、互联网络等高科技:还要在可以取得良好效果的 条件下,积极使用常规的音像技术,如录音、幻灯、电 视、投影、录像等。教育媒体理论强调指出各种教育 媒体无高低贵贱之分,在实现一定的教学目标方面 各有优势与不足,没有不好的媒体,只有用不好的媒 体。

现代教育技术应用于教学过程,给教育带来了 深刻的变革,教育技术装备作为教育改革和发展的 物质基础,为实践教学和教育手段现代化提供了重 要的物资、技术保证,但仍须不断完善。在未来的岁 月中,它将继续为推进教育改革做出巨大的贡献。

参考文献:

- [1] 南国农·电化教育学(M)北京:高等教育出版社,1998.
- [2] 何抗抗,李文光:教育技术学(M).北京:北京师范大学 出版社,2002.
- [3] 李康·教育技术学若干理论问题述评(J)·中国电化教育,2001(11).
- [2] Chen J H, Wang GZ. Micromechanism of the transition of fibrous cracking to cleavage of C — Mn base and weld steel [J]. Metal & Mater . Trans., 1994, 25A: 1381-1390.
- [3] Chen J H, Wang GZ · Study of Mechanism of Cleavage Fracture at Low Temperature [J] · Metal Trans, 1992, 23A:509-517.