

# 套管钻井技术

——套管钻井钢力学性能表征

许天旱◎著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

# 套管钻井技术

## ——套管钻井钢力学性能表征

许天早 著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了套管钻井技术中的材料性能表征方法,利用透射电镜(TEM)、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDX)及疲劳试验机等设备,研究了三种典型套管钻井钢级 K55 钢、N80 钢、P110 钢的力学性能,包括硬度、拉伸性能、冲击性能、断裂韧性、疲劳裂纹扩展性能及硬化指数等性能及其断裂机制,并分析了断裂表面特征和显微组织之间的关系及各种力学性能之间的联系。主要目的是避免套管钻井钢在服役过程中发生失效,并为分析断裂失效的原因提供理论依据,从而解决钻井过程中的稳定性及降低钻井成本问题,使得套管钻井技术获得更为广阔的应用前景。

本书可供油气管道工程、材料科学与工程、工程力学、安全工程相关专业工程技术人员和管理人员参考,也可作为有关大专院校师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

套管钻井技术:套管钻井钢力学性能表征 / 许天早著.  
—北京:中国石化出版社,2016.9  
ISBN 978-7-5114-4271-0

I. ①套… II. ①许… III. ①套管钻井-钢结构-力学性能-性能分析 IV. ①TE249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 215450 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 255 千字

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

## 序

随着世界经济的飞速发展，对材料性能的评估提出了越来越高的要求，尽管前人对各种材料的性能已经进行了大量研究和探索，但很少有人对套管钻井钢的力学性能进行系统的研究和表征。预计在未来 10~15 年内，石油天然气的需求量将增加一倍。套管钻井技术作为石油和天然气的一种新的钻采技术得到广泛的应用。但钻井套管所面临的环境越来越苛刻，特别是在长周期钻井过程中的高压和高负荷，以及管柱与钻具间的扭矩不合适，使得套管经常发生损伤、断裂。

套管是一次下井长年使用的石油专用管材，套管柱在油井中作为一个整体结构，起加固井壁、保护井眼、保证正常钻进的作用，油层套管是油气田开发全过程出油产气的唯一通道。套管钻井技术的出现打破了“钻井需要钻杆”这一传统思想共识，使得钻井工艺及其装备出现了革命性的变化，套管钻井不使用钻杆，大大减少了起下钻时间和预料外事故（如划眼、打捞钻具和起下钻时发生的井涌等）所浪费的时间，增强了井眼的稳定性，节约了大量的钻井成本（约 30% 甚至更高），呈现出良好的发展前景。

本专著首次借助透射电镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线能谱分析(EDX)及疲劳试验机等仪器和设备系统地研究了套管钻井钢的力学性能，包括拉伸性能、冲击韧性、断裂韧性、疲劳性能等，同时借助多种材料力学性能表征方法，对不同断裂机制之间的关系进行了分析和研究，其中部分建立了定量关系。研究发现，在三种典型套管钻井钢级中，P110 钢不仅具有更高的疲劳极限，而且在失效发生之前，允许出现最深的疲劳裂纹，这使得选用 P110 钢不但能节约更多材料，降低成本，而且易于监控和测量裂纹扩展深度。K55 钢则具有最高的应变硬化指数，能够避免由于温度发生变化和偶然过载引起的局部开裂。N80 钢的综合性能介于 P110 钢和 K55 钢之间，疲劳性能低于 P110 钢、优于 K55 钢；冲击性能与 P110 钢相近，抗偶然过载性能低于 K55 钢、优于 P110 钢。这使得 N80 钢在一定条件下展示出优良的综合性能。

本专著重视理论与实践的密切结合，为避免套管钻井钢在服役过程中发生失效，并为分析断裂失效的原因提供理论基础，从而使得套管钻井技术获得更

为广阔的应用前景，同时该专著在材料力学性能的理论 and 实践方面都有较大的创新和发展，内容丰富。且在附录中作者将自己从事该领域相关研究所获得的专利汇集在一起，供广大研究者参考。本书适合石油化工等领域的人员和工程技术人员阅读，也可作为相关工程院校高年级学生、研究生和教师的参考用书。本书的出版将对工程材料的表征研究及工程应用起到重要的推动和促进作用。希望广大科技工作者共同努力，为我国工程技术的发展做出新的贡献。



2016.6

# 前 言

套管钻井技术是指在钻井过程中用套管代替传统的钻杆,通过套管向井下传递水力和机械能量的一种新型钻井技术。套管钻井作为一种新技术,主要用于解决钻井过程的稳定性及降低钻井成本问题。

随着套管钻井技术的日益发展,也对套管提出了越来越高的要求,尤其是套管不再单纯承受静态载荷,需要将扭矩通过套管传送到钻具,且在钻井过程中,地质环境复杂多变,都对套管的性能提出了越来越高的要求。

同时在附录中汇集了作者多年从事该项研究总结出的试验及研究方法。

由于套管钻井技术直接采用套管向井下传递机械能量和水力能量,且边钻边下套管,因此不再需要常规的起下钻作业。该技术的出现及发展是钻井工业的一场变革,已经展现出了强劲的发展势头。套管钻井技术因不使用钻杆,大大减少了起下钻时间和由于突发事件(如划眼、打捞钻具和起下钻时发生的井涌等)所浪费的时间,增强了井眼的稳定性,节约了大量的钻井成本,呈现出良好的发展前景。由于该技术处于初级发展阶段,目前尚没有套管钻井钢相关专著出版,因此,本专著除了呈现相关的试验结果外,同时在附录中公开了作者多年从事该项研究总结出的试验及研究方法,这些方法大部分已申请国家发明专利,并已经授权,供广大研究者参考。

本书中引用的试验数据大部分是作者亲自完成的,其中的研究成果得到中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目“石油管应用基础研究”(2008A-3005)、国家863项目套管钻井技术项目(2006AA06A107)、中国石油天然气集团公司项目“管材研究所钻井套管用钢疲劳寿命研究”(H07175)、教育部留学基金委(CSC)(201408615003)及西安石油材料加工优势学科资助基金的资助。本书的成功完成,得益于前人研究基础的启发,我的导师金志浩和冯耀荣教授的指导,宋海洋教授和王党会博士的通力协作以及各个方面的支持和帮助,作者在此谨致谢意。

本书由西安石油大学许天早副教授负责撰写,西安交通大学金志浩教授、中国石油集团石油管工程技术研究院总工程师冯耀荣教授、西安石油大学高惠临教授都曾提出宝贵建议,美国俄亥俄州立大学 Peter Anderson 教授和 Yunzhi Wang 教授也提供有益的帮助。本书实际上是集体智慧的结晶。

中国石油集团石油管工程技术研究院总工程师冯耀荣教授在百忙之中详细审阅了本书的每个章节，并为本书作序，在此表示衷心的感谢！

本书在撰写过程中参考了大量国内外有关教材、科技著作和学术论文，在此特向有关作者表示深切的感谢！同时，在出版过程得到了西安石油大学“材料计算创新团队”基金的资助，在此一并提出感谢。

由于作者学识所限，疏漏和不妥之处在所难免，敬请同行和读者指正。

许天早

2016年6月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	( 1 )
1.1 引言 .....	( 1 )
1.2 断裂力学研究进展 .....	( 4 )
1.2.1 断裂力学的发展 .....	( 4 )
1.2.2 裂纹扩展的判据 .....	( 6 )
1.2.3 影响断裂韧性的因素 .....	( 7 )
1.2.4 I/III 复合型断裂韧性的研究 .....	( 8 )
1.2.5 断裂韧性的定量公式 .....	( 9 )
1.3 疲劳性能的发展和研究 .....	( 11 )
1.3.1 疲劳裂纹的扩展过程 .....	( 11 )
1.3.2 疲劳裂纹扩展速率的研究及应用 .....	( 13 )
1.4 环境对材料力学性能的影响 .....	( 14 )
1.4.1 应力腐蚀的影响 .....	( 14 )
1.4.2 腐蚀介质对疲劳裂纹扩展性能的影响 .....	( 15 )
1.4.3 氢对材料性能的影响 .....	( 15 )
1.5 断裂韧性及疲劳裂纹扩展性能的试验方法 .....	( 16 )
1.5.1 断裂韧性的试验方法 .....	( 16 )
1.5.2 疲劳裂纹扩展性能的试验方法 .....	( 16 )
1.5.3 疲劳裂纹扩展数据的处理方法 .....	( 17 )
1.6 套管钻井钢存在的问题及分析思路 .....	( 18 )
1.7 主要研究进展 .....	( 20 )
第 2 章 三种套管钻井钢的拉伸和冲击性能 .....	( 22 )
2.1 引言 .....	( 22 )
2.2 试验材料与方法 .....	( 22 )
2.3 试验结果与分析 .....	( 23 )
2.3.1 三种套管钻井钢显微组织及硬度 .....	( 23 )
2.3.2 三种套管钻井钢的拉伸性能和冲击性能 .....	( 26 )
2.3.3 套管钻井钢的硬化指数 .....	( 31 )
2.4 小结 .....	( 40 )
第 3 章 三种套管钻井钢的 I/III 复合型断裂韧性 .....	( 41 )
3.1 引言 .....	( 41 )



3.2	I/Ⅲ复合断裂韧性的研究进展和方法	(41)
3.2.1	断裂韧性的研究进展及理论基础	(41)
3.2.2	断裂韧性的研究方法	(46)
3.3	测量 I/Ⅲ复合型断裂韧性试验中横向位移分量的测试装置	(49)
3.4	试验材料与方法	(50)
3.5	试验结果与分析	(53)
3.5.1	三种套管钻井钢的 I/Ⅲ复合型断裂韧性及机制	(53)
3.5.2	氢对三种套管钻井钢 I/Ⅲ复合型断裂韧性的影响	(61)
3.5.3	Ⅲ型载荷分量对 P110 钢断裂韧性断口表面的影响	(67)
3.6	小结	(69)
<b>第4章</b>	<b>三种套管钻井钢的疲劳裂纹扩展性能</b>	<b>(70)</b>
4.1	引言	(70)
4.2	套管钻井技术中套管钻井钢疲劳性能的研究	(70)
4.2.1	套管钻井钢疲劳性能研究的目的和意义	(70)
4.2.2	套管受力分析和疲劳失效的控制	(71)
4.2.3	疲劳的分类及特点	(72)
4.2.4	疲劳断裂过程	(73)
4.2.5	疲劳裂纹研究的进展	(73)
4.2.6	疲劳裂纹扩展的一般规律及机理	(74)
4.3	试验材料与方法	(75)
4.4	试验结果与分析	(75)
4.4.1	应力比对三种套管钻井钢疲劳裂纹扩展性能的影响	(75)
4.4.2	三种套管钻井钢疲劳裂纹扩展性能和拉伸性能的定量关系	(84)
4.4.3	应力比与裂纹失稳区起始点对应的 $\Delta K$ 值之间的关系	(86)
4.4.4	决定裂纹疲劳裂纹扩展性能的本质参量	(89)
4.4.5	应力比对门槛区裂纹扩展速率及断裂机制的影响	(93)
4.5	小结	(96)
<b>第5章</b>	<b>三种套管钻井钢断裂机制的比较</b>	<b>(98)</b>
5.1	引言	(98)
5.2	试验材料与方法	(98)
5.3	试验结果与分析	(98)
5.3.1	三种套管钻井钢的断裂机制	(98)
5.3.2	不同加载方式下断裂机制的比较	(107)
5.4	小结	(112)
<b>第6章</b>	<b>不同钢级套管钻井钢力学性能的综合比较</b>	<b>(113)</b>
6.1	引言	(113)
6.2	钻井套管钢性能要求	(113)

6.2.1	成分分析 .....	(113)
6.2.2	强度及伸长率分析 .....	(113)
6.2.3	冲击韧性分析 .....	(114)
6.2.4	疲劳裂纹扩展性能分析 .....	(115)
6.2.5	断裂韧性分析 .....	(115)
6.3	小结 .....	(115)
附录	.....	(117)
附录 I	: 套管钻井钢化学成分、性能要求及检测方法 .....	(117)
附录 II	: 专利 .....	(128)
参考文献	.....	(147)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

套管钻井技术是指在钻井过程中用套管代替传统的钻杆，通过套管向井下传递水力和机械能量的一种新型钻井技术。它采用可回收式井底钻具组合进行钻进，井底钻具组合接在套管柱的下面，边钻进边下套管。套管钻井作为一种新技术，主要用于解决钻井过程的稳定性及降低钻井成本问题<sup>[1-3]</sup>。

随着套管钻井技术的发展，套管所面临的环境条件越来越苛刻<sup>[4]</sup>。常体现出的问题包括更长钻井周期中存在的高压和高载荷。同时，在套管钻井过程中，管柱把扭矩和动力传递给钻具<sup>[5]</sup>。或者因为扭矩不合适，或者因为套管性能的降低，套管经常损伤、断裂<sup>[6]</sup>。

套管钻井技术作为一种正在发展中的新技术，正日益引起国内外石油工程界的关注。套管钻井是指在钻进过程中，直接采用套管（取代传统的钻杆）向井下传递机械能量和水力能量，井下钻具组合接在套管柱下面，边钻进边下套管，完钻后作为钻柱而用的套管留在井内作固井套管用<sup>[5]</sup>。套管钻井技术将钻进和下套管合并成一个作业过程，钻头和井下工具的起下在套管内进行，不再需要常规的起下钻作业。套管钻井技术的出现及发展是钻井工业的一场变革，已经展现出了强劲的发展势头<sup>[7,8]</sup>。

钻井套管作为石油专用管材，代替传统的钻杆及专作固井用的套管，大大减少了起下钻时间和事故，同时增强了井眼的稳定性，节约了钻井成本，高达 30%，甚至更多，使得套管钻井技术呈现出良好的发展前景<sup>[9-11]</sup>。

套管钻井原理图如图 1-1 所示，钻井装置构成及各部分功能如下：

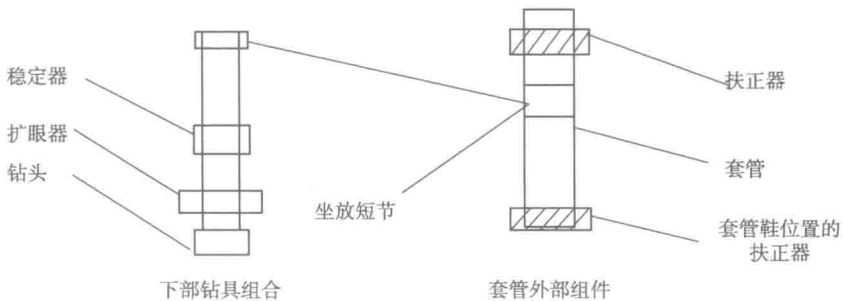


图 1-1 套管钻井技术结构示意图

钻头：也称领眼钻头，用于钻孔；

扩眼器：也称伸缩式扩眼器，用于使得所钻井眼直径大于套管外径，使得套管下井；

钻头和扩眼器都被安装在下部钻井组合上，该组合被安装在套管下部的一个部件内（坐放短节），连接在套管的下端。该钻井组合既可以用绳索下入，也可以用泵送入；

稳定器：用以减少底部钻具组合在套管内横向运动；

套管扶正器：使套管在井眼内居中，防止偏磨。

套管钻井技术是将钻进和下套管合并成一个作业过程<sup>[12]</sup>。套管由顶部驱动装置带动旋转，由套管传递扭矩，带动安装在套管端部的钻头旋转并钻进<sup>[13]</sup>。Tesco 套管钻井系统在钻头上方装有扩孔钻头。钻进时，由最下部的钻头钻领眼，扩眼钻头将井眼扩大到大于套管外径。泥浆自套管当中进入，由套管与井眼之间的环形空间返回。钻头固定在一个专门设计的工具组前端，工具组锁定在套管端部，并通过钢丝绳与一部专门用于起下钻头的绞车相联接。当需更换钻头时，将锁定装置松开，利用绞车通过套管将工具组起出。换上新钻头后，再用绞车通过套管将工具组送入，锁定在套管端部，十分快捷。钻头的钻进过程也就是下套管的过程。套管一根根地打下去，不再提起。完钻后即可开始固井。

目前，套管钻井技术方面的研究主要集中于钻井技术和相关的装备方面，如解决套管的丝扣，密封等方面问题<sup>[14-16]</sup>。保证钻井安全采取的措施主要是选用高强度大壁厚套管，但这无疑浪费了材料、提高了成本，在 API Spec 5CT 套管和油管规范中，虽然对于套管材料的屈服强度、抗拉强度及伸长率给予了明确规定，但对套管材料的疲劳裂纹扩展性能并没有给出强制性规定，这主要是因为套管过去仅仅用于固井，一般不考虑动态载荷和疲劳裂纹扩展。而现在，随着套管钻井技术的出现，套管由(准)静态载荷变为动态载荷，包括钻井过程中的各种冲击、振动和疲劳载荷等。例如：在钻进过程中，由于地貌复杂，尤其是地质结构为粘性构成的作用下，钻具不能连续稳速的钻进，而是发生振动，速度快慢相间，极易产生疲劳。严重情况下，每钻进 100 米导致 13 根钻具因疲劳而失效<sup>[17]</sup>。目前套管钻井用钢兼有钻杆钻进和套管固井二者的功能，因此，同样的疲劳问题也会发生在钻井套管上<sup>[4,18]</sup>。同时由于套管在钻井过程中直接与井壁接触，管壁上经常会产生一定深度的划痕<sup>[6]</sup>，这些划痕在套管承担传递扭矩的过程中会发生纵向扩展，导致套管失效或使用性能降低。尤其传统固井用套管现在作为钻柱构件用于钻井过程中，造成的各种损伤缺陷也是不可避免的，更何况这些钻井用套管本身是经过冶炼和各种冷热加工处理的机械产品，不可避免的存在各种宏观和微观缺陷，所以，在设计过程中应该将其当作缺陷体或裂纹体来对待<sup>[19]</sup>。对于有缺陷体，当低于一定载荷，裂纹小于一定长度，材料可以放心的使用，使用则相对比较安全。当然载荷越小，允许的裂纹可以越长；载荷越大，裂纹要求要越小。这是疲劳设计总寿命法无法实现的，因为疲劳设计总寿命法无法确定有缺陷的材料的寿命，更不能根据材料实际情况灵活运用，材料实际存在缺陷通常是难免的，在使用过程中也不可避免产生新的缺陷。因此，研究套管钻井用钢的疲劳裂纹扩展性能具有十分重要的意义。

套管钻井技术是将钻进和下套管合并成一个作业，在套管钻井系统中由于在套管钻井过程中套管所处环境一般都有腐蚀介质<sup>[20-22]</sup>，在海上钻井，海水会产生腐蚀作用；在陆地上钻井，由于钻井过程中需要使用钻井液，钻井液会产生腐蚀作用，尤其许多油气田所处环境都具有 H<sub>2</sub>S 气体。因此环境介质对断裂韧性产生的影响也是必须考虑的。

套管钻井这种钻井和下套管同时进行的创新工艺，尽管 20 世纪 50 年代就有人提出这样的想法，但直到 1998 年六月中旬，加拿大 Tesco 公司才在其研发中心院内钻了第一口套管钻井试验井，证明了套管钻井的可行性。

到目前为止的经验已经证实，套管钻井可以减少钻井和水泥胶结表层套管的时间。较大尺寸的表层套管旋转更加平稳，带有专用喷嘴的井下扩眼器工作更稳定。这一点对与松软地

层常规钻井工艺过程中的钻速相匹配很重要。一旦达到了一个可比较的钻速，就可以不用进行井眼调整，不用进行常规的起下钻柱和下钻铤，从而节省了整个钻井时间。套管钻井工艺还减少了下表层套管的井眼钻完后套管下不到底的风险。加拿大 Tesco 公司的 Tesco 套管钻井系统由于使用专门设计的回收系统，因此在直井中效果更好。而美国的 Weatherford 套管钻井系统不需要回收钻具，因此无论是钻直井还是定向井都有比较好的效果。

目前从事套管钻井技术研究推广的国外公司主要有加拿大的 Tesco 公司以及美国的 Weatherford 和 Baker Hughes 等公司。虽然国内很多油田和单位也在相关领域进行了研究和试验，但尚未推广应用。

2003 年 11 月，吉林石油集团有限责任公司在中国石油天然气集团公司科技局的大力支持下，开始了套管钻井的先导性实验工作，并取得成功。图 1-2 为吉林的套管钻井现场，2004 年 10~11 月，吉林石油集团有限责任公司在总结先导性应用的基础上，在吉林油田扶余采油区进行了两口井的油层套管钻井试验，试验井号为：扶北 2-1 井和扶北 2-3 井。

根据国外及我国前期套管钻井经验，套管钻井目前在我国油气资源埋藏较浅的地区应该比较大的应用前景，例如在我国的渤海湾地区和松辽地区。另外，针对新疆准噶尔盆地彩南油田地区存在严重的易漏失地层，江汉平原地区存在大面积的松软地层，也可以考虑采用常规钻井与套管钻井相结合，在某些井段使用套管钻井技术来保证顺利通过这些松软易漏地层，从而达到安全钻进及经济效益最大化的目的。

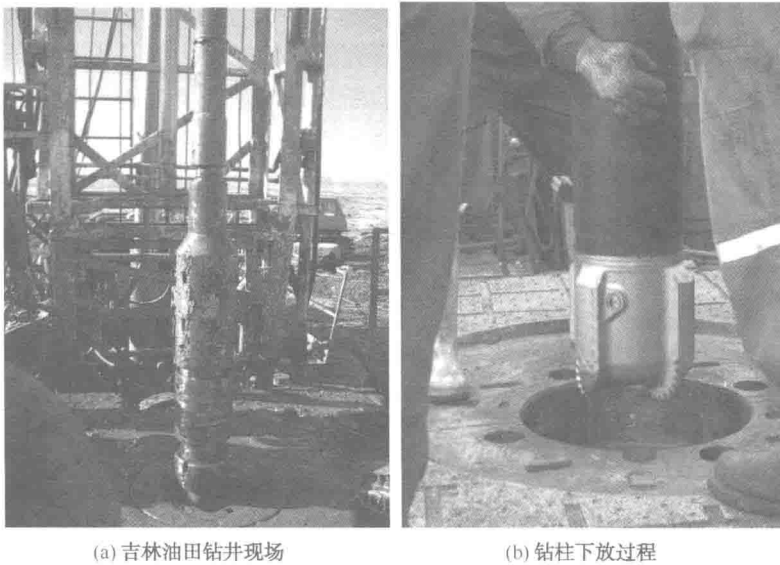


图 1-2 套管钻井油田现场

综上所述，套管钻井技术尽管应用前景广阔，但仍有诸多技术问题亟待研究。尤其是套管在新的服役条件下，应力状态更为复杂，既要传递扭矩，又要承受弯曲载荷和拉伸载荷，不可避免地在复合型载荷作用下发生损伤失效。此外，工程上的许多其他构件失效也是在复合载荷的作用下发生的，如丝扣连接传递力矩的杆件，其承受载类型就属于 I/III 复合型载荷。因此，从工程意义上来说，研究 I/III 复合载荷下的断裂性能，对实际构件进行安全评估，对构件寿命进行预测也是非常有意义的。

## 1.2 断裂力学研究进展

材料力学的基本任务是建立失效准则,即各种强度理论。材料破坏的推动力是拉应力 $\sigma$ 。抵抗材料破坏的抗力是极限强度 $\sigma_b$ 和屈服强度 $\sigma_s$ 。断裂力学的基本任务是确立裂纹扩展的条件和规律,建立断裂准则。断裂准则,当 $K \geq K_c$ ,材料失稳发生断裂。 $K_c$ 为断裂韧性,表征材料抵抗裂纹扩展的抗力。断裂韧性值强烈的依赖于裂纹的应力状态。

### 1.2.1 断裂力学的发展

弹性力学属于强度学科,弹性理论所研究的对象是均匀连续的无缺陷理想弹性体。而断裂力学属于新的强度学科,断裂力学研究含有裂纹的结构和零部件的强度以及裂纹在其中的扩展规律。断裂力学认为结构和零件中存在缺陷和微裂纹,这些缺陷和微裂纹破坏了材料的均匀连续性。断裂力学着重于研究裂纹的扩展和结构的破坏等方面的规律,即属于宏观范畴的研究。断裂力学分为:线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学。线弹性断裂力学把裂纹体中的裂纹看作边界条件,利用弹性力学的基本方程,分析材料和构件的低应力脆断。当构件在断裂之前,除了裂纹尖端附近很小区域之外,裂纹体都处于弹性状态中。那么就可以应用线弹性断裂力学来分析。

#### 1) 线弹性断裂机制(LEFM)

要研究结构在复杂载荷条件下断裂行为,研究线弹性断裂力学是很有必要的。断裂力学主要是研究结构在一定应力和缺陷裂纹尺寸下的断裂方式。只要工程设计人员能够知道材料的韧性、材料所受的正应力、结构中的缺陷尺寸,不需要借助于实际经验就可以在应力分析的基础上进行断裂力学分析。断裂力学分析的成果是将应力水平和缺陷尺寸进行综合考虑,目的是防止出现断裂。

多年来,线弹性断裂力学是分析含缺陷结构断裂行为的主要方式。在LEFM中,经常将结构中的应力强度因子 $K_I$ 和实验室中测试的临界应力强度因子 $K_{Ic}$ 进行比较。

许多文献都给出了应力强度因子 $K$ 的计算公式<sup>[23]</sup>:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1-1)$$

式中  $K$ ——应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;

$\sigma$ ——无限远处施加的正应力,  $\text{MPa}$ ;

$f(a/W)$ ——修正函数;

$a$ ——半裂纹的长度,  $\text{m}$ ;

$w$ ——试样的宽度,  $\text{m}$ 。

但这个公式属于理论公式,而实际上受到塑性区的影响,裂纹长度需要进行修正如下:

$$a_{\text{eff}} = a + r_y \quad (1-2)$$

式中  $a_{\text{eff}}$ ——有效半裂纹长度,  $\text{m}$ ;

$a$ ——半裂纹长度,  $\text{m}$ ;

$r_y$ ——因塑性变形,使得应力分布移动引起的塑性修正量,  $\text{m}$ 。

将式(1-2)代入式(1-1)

$$K_{\text{eff}} = \sigma \sqrt{\pi a_{\text{eff}}} \cdot f(a_{\text{eff}}/w) \quad (1-3)$$

式中  $K_{\text{eff}}$ ——有效应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;

$\sigma$ ——无限远处施加的正应力,  $\text{MPa}$ ;

$f(a_{\text{eff}}/W)$ ——是修正函数;

$a_{\text{eff}}$ ——有效半裂纹的长度,  $\text{m}$ ;

$w$ ——试样的宽度,  $\text{m}$ 。

在平面应力条件下, 裂纹尖端发生屈服时, 裂尖塑性区半径可通过公式(1-4)计算<sup>[24]</sup>:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1-4)$$

式中  $r_y$ ——裂尖塑性区半径,  $\text{m}$ ;

$\sigma_{ys}$ ——材料屈服强度,  $\text{MPa}$ ;

$K_I$ ——裂尖 I 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

对于平面屈服条件(即平面应变), 屈服范围被三轴应力状态所压缩, 塑性区范围更小, 是平面应力的 1/3, 由公式(1-4), 得下式:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1-5)$$

式中  $r_y$ ——裂尖塑性区半径,  $\text{m}$ ;

$\sigma_{ys}$ ——材料屈服强度,  $\text{MPa}$ ;

$K_I$ ——裂尖 I 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

有效应力强度因子允许发生少量屈服的裂纹尖端附近的应力和位移特性用简单的 LEFM 去处理。

## 2) 弹塑性断裂机制(EPFM)

如果塑性区相对于裂纹长度和几何尺寸很小, 那么线弹性断裂机制确实是有效的。然而, 在失效之前, 如果裂纹尖端发生了大的塑性变形, 那么应力强度因子将失去它最初的意义。对于延性材料诸如中低强度结构钢, 断裂之前, 在裂纹尖端附近将发生明显的塑性变形。如果塑性区相对较大, 那么进行弹塑性分析就是很有意义的。

(1) 裂纹尖端张开位移(*CTOD*) 在失效之前, 相对于几何尺寸发生了明显塑性变形的情况下, 用裂纹面(即裂纹前缘)的位移作为断裂准则。塑性变形能够钝化一个初始的尖锐裂纹这个现象被注意到。裂纹钝化的程度随材料韧性的增加而增加。这个观察最终导致了一个参数的发展——裂纹尖端张开位移。

在实际材料中, *CTOD*、 $K_I$  和能量释放率  $G$  之间的关系依赖于应力状态和应变强化的程度<sup>[25]</sup>。

(2) *J* 积分 Rice(1968)发展了另外一个参数用于表征裂纹尖端前面的非线性材料行为特征。它提出, *J* 积分值独立于包围裂纹的积分路径, 数值为非线性应变能的释放率。

$K$  准则用于判断失稳, *J* 用于确定起裂和较小的稳态扩展, *CTOD* 则应用于伴有较大塑性变形的大的裂纹扩展。在线弹性或小范围屈服条件下,  $K$ 、 $G$ 、*CTOD*、*J* 是等效的。在小范围屈服条件下, 对裂纹体进行弹性分析将不会导致太大的误差。

## 1.2.2 裂纹扩展的判据

欧文(Irvine)认为当物体内存在裂纹时,裂纹尖端的应力在理论上为无穷大,因此不能用理论应力集中系数 $K_t$ 来表达,而必须用应力场强度因子 $K$ 来表达。 $K$ 的大小反映了裂纹尖端附近区域内弹性应力场的强弱程度,可以用来作为判断裂纹尖端是否发生失稳扩展的指标。在 $K$ 主导区内,对于每种加载模式(I型、II型、III型),不论构件的几何形状和载荷方式如何,只要具有相同的 $K$ 值,则应力、位移、应变的分布都完全相同,且它们的大小都与 $K$ 成正比。因此 $K$ 是度量线弹性体裂纹尖端应力场强度的一个量。应力强度因子的物理意义是由物体存在裂纹而引起的,是反映裂纹尖端应力强度的一个有效力学参量。

裂纹扩展的判据有多种,主要有: $K$ 判据、 $J$ 积分以及 $CTOD$ 等。各种裂纹扩展判据理论都涉及到应力应变场及应力强度因子:

### 1) 裂纹尖端的应力应变场及应力强度因子 $K$

在线弹性条件下,应力强度因子 $K$ 是描述裂纹尖端应力场强度的主要控制参量,当 $K$ 达到临界值时,材料就发生脆断。无论试件或构件的几何形状及加载方式如何不同,只要应力强度因子相同,那么裂纹尖端附近的应力场分布就是相同的。

应力强度因子 $K$ 是断裂力学中一个最基本的物理量,反映了裂纹尖端弹性应力场的强弱,也正是因为这个量能够反映裂纹尖端应力场强度分布,命名为应力强度因子。应力强度因子越大,裂尖受到的应力越大,裂纹越容易扩展。由于裂纹扩展是从其尖端开始向前进行的,所以分析裂纹尖端的应力、应变状态,是建立裂纹扩展的力学条件的前提。

在建立裂纹扩展的力学条件之前,首先需要对裂纹进行分类,不同类型的裂纹在相同的载荷条件所承受的应力状态具有显著的差异。通常一个固体中的裂纹有三种不同的扩展模式,如图1-3所示。拉应力引起的裂纹扩展称为模式I或拉伸张开型(简称张开型)。在模式I中,裂纹表面的位移(一个表面上,一个表面向下)是垂直于裂纹平面(裂纹尖端扩展轨迹形成的平面)如图1-3(a)所示。在平面剪切条件下,裂纹扩展称为模式II或剪切滑开型(简称滑开型)。在模式II中,裂纹表面的位移就在裂纹平面内,垂直于裂纹的前缘(一条线)如图1-3(b)所示。模式III是通过反平面剪切引起的,也称为剪切撕开型(简称撕开型),裂纹表面的位移就在裂纹平面内,平行于裂纹的前缘,如图1-3(c)所示。实际裂纹的扩展模式并不局限于这三种形式,往往是它们的组合,如I/II、I/III、II/III, I/II/III型等复合形式。

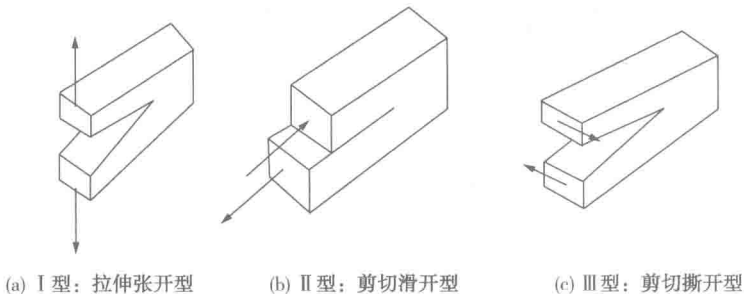


图 1-3 基本断裂形式

这三种模式综合在一起,可以描述大部分承载的情况。不同类型开裂的 $K$ 值确定方法在文献<sup>[26,27]</sup>中给予了详细阐述。



对于大多数材料来说,受到正应力相对于剪应力更容易断裂。因此模式 I 加载方式在实际应用中显得更为重要。

I 型裂纹在平面应变条件下的临界应力强度因子称为平面应变断裂韧性,用  $K_{Ic}$  表示。由于在平面应变条件下三向受拉,材料最容易脆断,因此  $K_{Ic}$  代表材料断裂韧性的最低值,是反映材料韧性的一个最主要的指标。平面应变是指材料厚度足够大时,沿厚度方向的变形可以忽略不计,变形被约束在垂直于厚度方向的平面内。

另外,对于工程应用而言,高强度钢选用尺寸不太大的试样即可满足  $K_{Ic}$  测试的要求,而对中低强度高韧性的钢材而言,如果直接测试有效的  $K_{Ic}$  值,则试样尺寸往往要求非常之大而无法实现。因此必须研究弹塑性状态下的断裂韧性及判据。 $J$  积分和裂纹尖端张开位移就是两个主要的弹塑性判据或延性断裂判据。

## 2) $J$ 积分及断裂韧性 $J_{Ic}$

$J$  积分包围裂纹前缘,从一个裂纹表面至另一个裂纹表面的线积分或面积分的数学表达式,以用于表征裂纹前缘周围的局部应力应变场。

$J$  积分的临界值  $J_{Ic}$  也称为断裂韧度,但它是表示材料抵抗裂纹开始扩展的能力,其单位与 I 型临界裂纹扩展能量释放率  $G_{Ic}$  相同,也是  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  或  $\text{MJ}/\text{m}^2$ 。

根据  $J_1$  和  $J_{Ic}$  的相互关系,可以建立断裂  $J$  判据:

$$J \geq J_{Ic} \quad (1-6)$$

式中  $J_1$ ——I 型裂纹  $J$  积分,  $\text{kJ}/\text{m}^2$ ;

$J_{Ic}$ —— $J_1$  的临界积分,  $\text{kJ}/\text{m}^2$ 。

只要满足上式,机件就会开裂。

但测出  $J_{Ic}$  后,还可以借助公式(1-7)间接算出  $K_{Ic}$  [24],然后再按  $K$  判据去解决中、低强度钢大型件的断裂问题。

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2}} \sqrt{J_{Ic}} \quad (1-7)$$

式中  $K_{Ic}$ ——I 型临界应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;

$E$ ——弹性模量, GPa;

$\nu$ ——泊松比;

$J_{Ic}$ —— $J_1$  的临界积分,  $\text{kJ}/\text{m}^2$ 。

Rice 所提出的  $J$  积分是以小变形和形变理论为前提的。当裂纹大量扩展时,  $J$  积分不再适用,应该用  $CTOA$ 。

$J$  积分的优点在于它是基于塑性形变理论建立起来的断裂控制参量,因此与加载过程无关,且便于计算,已经在工程上显示了很大的实用价值,  $J$  积分现已被普遍接受作为裂纹起始扩展的准则,同时,也可用于分析有限的稳态裂纹扩展。

## 1.2.3 影响断裂韧性的因素

### 1) 化学成分的影响

细化晶粒的合金元素因能够提高材料的强度和塑性,从而使得材料  $K_{Ic}$  提高,强固溶强化的合金元素因降低塑性使  $K_{Ic}$  明显降低,并且随合金元素含量的提高,  $K_{Ic}$  降低越多。S、P 元素则是导致韧性降低的重要因素,特别是当它们偏聚在晶界时,能极大的降低晶界结合