

391

○ 1990第三届全国流变学学术会议论文集

流变学进展

○ ADVANCES IN RHEOLOGY

○ 江体乾 主编



○ 华东化工学院出版社

1 9 9 0

第三届全国流变学学术会议论文集

流 变 学 进 展

ADVANCES IN RHEOLOGY

江体乾 主 编

华东化工学院出版社

内容简介

本书是第三届全国流变学学术会议的论文集，每篇论文以简要的形式写出，概括了我国从 1987 年到 1990 年三年来流变学各个领域的最新进展。全书分专题报告、非牛顿流体力学、粘弹性理论和本构方程、固体流变学、生物流变学、流变测量学、工业流变学、食品流变学、多相体系流变学、高分子加工及流变学等共 10 章，共收集论文 149 篇，基本上囊括了流变学的基础理论和应用的各个方面。

本书对于从事流变学以及与流变学有关的各学科中从事教学、研究和应用的专家具有参考价值。对于想了解流变学和对流变学有兴趣的读者也是一本十分有益的参考用书。

2F 73/20 16

责任编辑 沈瑞祥

1990

第三届全国流变学学术会议论文集

流变学进展

Liubianxue Jinzhan

江体乾 主 编

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

华东化工学院捷成电脑排版部排版

上海市卢湾区业余大学印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张 34.5 字数 861 千字

1990 年 11 月第 1 版 1990 年 11 月第 1 次印刷

印数 1-1000 册

ISBN 7-5628-0120-7/TQ·14 定价 31.00 元

前 言

当您见到这本书时，第三届全国流变学学术会议已经在上海召开了。1990年金秋11月20-24日，来自全国各地的150余名代表云集于上海，交流流变学研究的最新成果和心得。这是我国流变学界的又一次盛会，它必将对这一学科在我国的发展和幅射，起推动作用。

回顾自1985年11月在长沙召开第一届流变学学术会议以来，时间过去了五年，这中间连同本届会议共召开了两次交流大会，充分说明流变学在我国的研究和应用取得了可喜的进步。流变学不再是个陌生的名词。为了进一步推动这一发展势头，中国化学会、中国力学会流变学委员会1987年成都会议决定于1990年在上海召开本届大会。受流变学委员会之托，华东化工学院化学工程研究所流变学研究室以它的有限人力和财力，担负起本届会议的筹备工作。

全国各条战线的流变学工作者以及与流变学有关的学者，热烈欢迎第三届全国流变学学术会议的召开。除此之外，苏联和德国等外国学者也参加交流，对此届会议表现出浓厚兴趣和积极的评价。

这次会议是在中国化学会、中国力学会的领导和支持下召开的。1990年4月流变学委员会在上海组织了审稿工作会议，对来稿进行了终审并决定公开出版论文集，开会时人手一册，以利交流。这就是本书的由来。

本书决定以简要形式反映我国流变学的最新进展，为了国际学术交流，还集中刊有各篇的英文摘要，共收录论文149篇，分为：邀请报告、非牛顿流体力学、粘弹性理论和本构方程、固体流变学、生物流变学、流变测量学、工业流变学、食品流变学、多相体系流变学、高分子加工及流变性质等10个部分。按地区统计的论文数，北京地区占24.8%，上海和四川各占10.7%，湖南占3.4%，以上四个地区合计仅占49.6%，而东北、广州、湖北、天津地区则比第二届流变学会议时有较大增长，这是十分可喜的。

浏览一下本书后可以发现，作为处于化学、力学和工程学科，尤其是材料学科之间的新兴边缘学科的流变学，已经幅射到各工业领域，形成了流变学的各个分支，如前述各章内容。近年来，我国在上述各方面的研究均有较大的发展。

流变学决不是可有可无的学科，它对当前我国的四化建设有密切的联系。比方，它对石油化工中聚合反应的分子量分布控制及聚合液脱单、塑料成型加工、陶瓷成型加工、原油及煤浆输送、食品加工、复合材料、生物工程以及新材料的开发、节能及健康工程产品开发有巨大的潜力。可以毫不夸张地说，大至航天材料及生物工程等高新技术领域，小至人民的衣、食、住、行均有涉及，因此，可以说它对促进社会生产力的进一步发展有巨大的现实意义和深远影响。

本书的出版工作系由当地编委会完成的，其成员有江体乾、褚家瑛、周承东、李健四人。根据出版社的要求，编委会对终审录用论文又进行了编辑加工，限于篇幅，作了必要的删改。

在本届学术会议的筹备和召开过程中，曾得到中国化学会、中国力学会、上海市化学化工学会、上海市力学会以及华东化工学院的大力支持和帮助，在此致以衷心地感谢。

由于时间仓促，在本书的出版和编辑加工过程中必有疏漏、不当甚至错误之处，敬请作者原谅，并请读者随时指正。

江体乾

1990年11月，上海

中国化学学会 中国力学学会

流变学委员会

第三届全国流变学学术会议组织委员会

主席：江体乾	教 授	(上海)
成员：袁龙蔚	教 授	(湘潭)
许元泽	研 究 员	(北京)
金日光	教 授	(北京)
韩式方	研 究 员	(成都)
吴大诚	教 授	(成都)
范 椿	副研究员	(北京)
范西俊	教 授	(杭州)
秦同洛	教 授	(北京)
唐国俊	教 授	(广州)
王振东	副 教 授	(天津)

目 录

90T 专题报告

90T01	流变断裂学的现状	袁龙蔚 (1)
90T02	关于计算解析法在粘弹流体力学中应用 (论计算解析流变学)	韩式方 (6)
90T03	关于用非线性群子统计理论研究多相高聚物合金材料粘弹表征与组成关系	金日光 (12)
90T04	高分子流变学的分子理论	吴大诚、古大治 (18)
90T05	高聚物加工流变学与工艺、机械关系的若干探讨	唐国俊 (21)
90T06	粘弹性流动数值模拟	范西俊 (27)
90T07	无弹性流体的一些触变模型	范 椿、罗哲鸣、汪建敏、梁宝修 (32)

90A 非牛顿流体力学

90A01	高聚物熔体在环形收敛流道中的流动分析	颜祝贤、唐国俊、赵良知 (38)
90A02	塑性液体螺旋流的研究	郑应人 (41)
90A03	溶质在做园管层流的双极流体中的弥散—均匀化学反应效应	郑广平 (45)
90A04	钛醋酸纤维素溶液结构及流变性	杨克董、黄继才、伍凤莲、毛润生、齐庆惠 (48)
90A05	非牛顿液体雾化机理分析	黄沐辉 (50)
90A06	判别纯粘性非牛顿流体流动状态的新准则—广义稳定性参数 Z	陈家琅、刘永建 (53)
90A07	水煤浆管内流动特性的研究	张中民、贾庆贤、孔 珑 (57)
90A08	橡胶润滑剂的润滑性能表征方法新探 ...	周彦豪、李东哲、吴卫东、孙芝红 (59)
90A09	钻井液在定向井环空内流场分布规律理论分析及实验研究	刘希圣、樊洪海 (62)
90A10	Oldroyd 流体径向轴承润滑分析	裘祖千、陈伯贤 (66)
90A11	极性非牛顿流体的壁面速度滑移问题	陆章基、郑广平 (69)
90A12	溶质在带微结构的非牛顿流体中的分散	陆章基、郑广平、唐立群 (72)
90A13	影响温度控制段塞流变性因素的研究 ...	徐桂英、毛宏志、刘木辛、曾利容 (74)
90A14	用激光多普勒法研究非牛顿流的流动增强现象 ...	路展民、范 椿、刘战存 (77)
90A15	魔芋溶液添加剂对湍流附面结构影响研究	韩式方、陈仕伟、王毓宾 (81)

90A16	泡沫泥浆流变特性的研究	王毓宾、韩式方 (84)
90A17	粘性泥石流触变性的研究	王毓宾、韩式方 (86)
90A18	非牛顿流体注入轴对称模腔内温度分布研究	韩式方、肖帆 (88)
90A19	粘弹流体纺丝拉伸流动研究	韩式方、何世斌 (91)
90A20	涂布流动的非线性阈值	王振东、宋如贵 (94)
90A21	共挤出胀大的研究	任鸿烈、刘奕迈 (96)
90A22	聚合物溶液通过突扩突缩管的流动研究	陆斌、范西俊 (99)
90A23	幂律流体的二维层流自由射流	蔡国琰、刘存芳 (103)
90A24	橡胶密炼流动研究 I. 密炼机月牙区流变分析	梁基照、唐国俊 (106)
90A25	流体弹性对复杂形状物体旋转转矩的影响	戴干策、董师孟、陈剑佩 (109)
90A26	幂律流体的轴对称层流自由射流	蔡国琰、刘存芳 (113)
90A27	粘弹性流体径波纹管流动的阻力特性	朱坚亭 (116)
90A28	湍流相干结构与减阻	王振东、张洪泉 (119)

90B 粘弹理论和本构方程

90B01	论耦合热粘弹性动力学中各种 Gurtin 型变分原理	罗恩 (120)
90B02	定常流中聚合物分子的取向	范西俊 (123)
90B03	某些聚氨酯的粘弹性能分析	余激扬、杨挺青 (126)
90B04	H(t) 和 $\delta(t)$ 函数乘积及其在粘弹体响应和能耗计算中的应用	刚芹果、杨挺青 (129)
90B05	应用 Kantorovich 变分法研究拉伸流动稳定性	韩式方、韩飞宇 (132)
90B06	非线性粘弹体的蠕变与应力松弛过程中李雅普诺夫稳定性与杜拉克公设间的关系	胡建阳 (135)
90B07	具有链间相互作用的大形变橡皮粘弹性分子理论	宋名实、袁平、林涵庆 (138)
90B08	具有链间相互作用的大形变橡皮粘弹性分子理论的验证	宋名实、袁平、林涵庆、闵永刚 (141)
90B09	颗粒材料径向流动的高效率数值解法	朱敦智、沈孟育、刘秋生 (143)
90B10	SIMPLE 方法在非牛顿流体流动与传热数值计算中的应用	马春元、蔡国琰 (145)
90B11	钢筋混凝土之类陈化型流变体的最优化设计	胡建阳、周师 (148)
90B12	随机载荷下粘弹性体稳定性的协同学分析	胡建阳 (151)
90B13	非线性流体挤出胀大的数值计算	庞久红、范西俊 (153)
90B14	单衣架机头共挤出和多重形象网络方法的研究	任鸿烈、杜松 (156)
90B15	流体的粘弹性对孤立涡传输的抑制机理	李兆敏 (160)
90B16	粘弹塑性圆筒结构的应力与蠕变	杨挺青、邓科涛、邓伟 (163)
90B17	泡沫流体的剪应力与法向应力差—理论分析 (I)	

- 周承东、褚家瑛、江体乾 (165)
- 90B18 泡沫流体的剪应力与法向应力差—实验研究 (II)
..... 周承东、褚家瑛、柳淑党、江体乾 (169)
- 90B19 论流变学中的松弛—微分型本构方程 韩式方 (172)
- 90B20 聚合物熔体的本构方程和物料函数的研究 宋名实、吴丝竹 (174)
- 90B21 热粘弹体中应力张量和热力学函数的泛函方程 胡建阳 (177)
- 90B22 疲劳蠕变共同作用下粘弹性板的宏观裂纹扩展分析 胡建阳、孟光霞 (178)
- 90B23 电流变效应的研究之一—电场下各种物料函数的变化规律
..... 梁瑞凤、许元泽、施良和 (180)
- 90B24 电流变效应的研究之二—影响电流变效应的主要因素
..... 梁瑞凤、许元泽、施良和 (183)
- 90B25 粘弹塑性流体田菁凝胶压裂液本构方程的研究 李健、江体乾 (185)

90C 固体流变学

- 90C01 一类软岩的流变本构方程及其数值分析 王来贵、徐曾和、章梦涛 (190)
- 90C02 冲击地压发生时间效应的数值模拟 潘一山、章梦涛、刘成丹 (193)
- 90C03 裂纹扩展过程中裂纹体的基本平衡方程 袁龙蔚 (196)
- 90C04 土工织物的拉伸流变特性实验研究 汤宝润 (199)
- 90C05 关于流变断裂理论的热力学断裂判据的讨论 寇智勇 (201)
- 90C06 金属热流变成形材料本构模型及工程应用 罗迎社 (204)
- 90C07 土的应力松弛特性 李佳川 (207)
- 90C08 玻璃弯钢化过程的理论和实践 王启宏、吕 锋 (210)

90D 生物流变学

- 90D01 红细胞压积对凝血过程中血液粘、弹性模量的影响
..... 黄益民、钟 伟、钱民全、周 荣、庄逢源 (216)
- 90D02 血液凝固过程中综合粘弹性模量 G^* 和弹性模量 G' 粘性模量 G'' 联合测量
..... 钱民全、彭荣蕤、周 蓉、黄益民、钟 伟 (213)
- 90D03 凝血参数与剪切率的相关 廖福龙、李 文 (217)
- 90D04 香烟烟雾中的一氧化碳对吸烟者血液流变学的影响
..... 黄益民、钟 伟、庄逢源、陈 洁、马培忠、纪楚云 (220)
- 90D05 微血管自律运动的血液流变学研究 郭仲三 (224)

90E 流变测量学

- 90E01 聚丙烯填充改性体系粘度测定—用转矩流变仪获取粘度数据
..... 龙宝珍、孙卫东 (227)
- 90E02 用不同方法测试聚合物熔体粘度的研究 陈栋荣、潘碧莲、苑会林 (230)
- 90E03 聚合物熔体压力传感器及测试精度 苑会林 (233)
- 90E04 聚氨酯快速聚合过程中流变测试方法研究
..... 潘碧莲、陈栋荣、姜志国、朱 萍 (236)
- 90E05 TV-1 气动式多用途流变仪
..... 徐振焱、章其忠、韩 涵、付荣华、许元泽、陈晓慧 (239)
- 90E06 Alcomer 120 稀水溶液的拉伸流动 鲍慧芸、R.K.Gupta (242)
- 90E07 用挤出物胀大等方法研究聚合物熔体弹性 陈栋荣、潘碧莲、刘 颖 (245)
- 90E08 高聚物熔体第一法向应力差的测量与估算
..... 陈栋荣、潘碧莲、苑会林、刘 颖 (249)
- 90E09 用单片机控制的新型毛细管流变仪 王昌永、万守华、陈晓娟 (252)
- 90E10 用衰减振动式流变仪测量线性粘弹性流体粘弹性系数的新方法 I 理论分析部分
..... 黄亚奇、庄逢源 (255)
- 90E11 毛细管流变仪流变学测试及研究应用软件 I—系统组织及应用实例
..... 尹名东、李济根 (258)
- 90E12 挤出物胀大比的测定与弹性计算 陈栋荣、潘碧莲、苑会林、刘兵武 (261)
- 90E13 同时测量聚合物熔体的剪切粘度与第一法向应力差系数
—弯管毛细管流变仪工作原理简介..... 吴其晔 (264)

90F 工业流变学

- 90F01 用流变学评价一种新型增粘剂的热氧化稳定性
..... 王维熙、邱一鸣、吕 军 (268)
- 90F02 《钻井液流变学》微机程序设计 李永信、李 莉、李洪德 (271)
- 90F03 RIM 聚氨酯绝热反应流变性能研究 ... 潘碧莲、陈栋荣、姜志国、朱 萍 (274)
- 90F04 RIM 聚氨酯化学流变性能研究 潘碧莲、陈栋荣、姜志国、朱 萍 (277)
- 90F05 关于稠油乳化降粘的研究 岳福山、王永富、韩 平、唐铁飞 (280)
- 90F06 聚合物泥浆 η_{∞} 影响因素及物理意义探讨 唐善法、罗平亚 (282)
- 90F07 泥浆触变性的调整 谢和溢 (285)
- 90F08 非牛顿性原油的触变性 鲍 冲、曹学文 (288)
- 90F09 含蜡原油全流变曲线 罗塘湖 (291)
- 90F10 原油表现粘度测定方法探讨 罗凤霞、张永强 (294)

- 90F11 用降凝剂改善任邱原油低温流变性的研究 刘青林 (296)
- 90F12 渗透理论在宾汉流体降膜流传质中的应用 王 平、褚家瑛 (299)
- 90F13 假塑性流体在多孔介质内自然对流的数值方法——SIMPLE 程序的应用
..... 张 平、屠传经、王韩阳、张晓奋 (303)
- 90F14 泡沫分离塔的传质模型 陈树晖、褚家瑛、江体乾 (306)
- 90F15 羧甲基纤维素水溶液流变特性的研究 刘 琴 (308)
- 90F16 剪切作用对含蜡原油凝固点的影响 周晓君、陈志刚 (311)

90G 食品流变学

- 90G01 浓缩菜油磷脂及其溶液的流变性 邵双喜、魏德卿 (314)
- 90G02 海藻酸钠流变力学研究 沈良骥、袁耀锋、董润安 (316)
- 90G03 磷脂对巧克力浆料的流变性质与稳定性的影响
..... 胡立坤、柏云杉、韦 萍、俞 斌 (318)
- 90G04 影象云纹法测定苹果及土豆的流变特性 石曙东、孙一源 (321)
- 90G05 钙离子对海藻酸钠溶液的流变性影响
..... 韩恩山、陈 娟、陈宗淇、张玉苓、石 林 (324)

90M 多相体系流变学

- 90M01 HDPE 共混发泡料的流变行为 冯 克 (326)
- 90M02 粘性泥石流浆体的粘度-时间关系 赵惠林 (329)
- 90M03 改性羧甲基羟丙基纤维素—苯丙乳液体系流变性的研究
..... 王恩浦、朱新荣、黎秉环、刘跃平、虞 明、李慧琼 (332)
- 90M04 高浓度填料悬浮体流变性能预估 杨可喜 (336)
- 90M05 尼龙 6 共混体和共混填充体的流变性及形态结构
..... 申屠宝卿、吴大诚、谢新光 (339)
- 90M06 关于高聚物共混体系统流动活化能的准化学动力学方法研究
..... 金日光、武德珍 (342)
- 90M07 PVC / MBS 共混体系的流变性能—相态—组成关系的研究
..... 武德珍、金日光 (345)
- 90M08 泥石流体的应力衰减和堆积形貌的初探
..... 王裕宜、吴积善、熊 刚、严璧玉 (347)
- 90M09 泡沫流体在套管环隙中的流动分析 李向方、褚家瑛 (350)
- 90M10 用泡沫回收废液中的金 陈树晖、褚家瑛、柳淑党、江体乾 (353)
- 90M11 超高浓度塑性浆体及其测粘问题 李丛奎 (356)
- 90M12 水解聚丙烯酰胺和二氧化硅悬浮体的正负触变性

- 陈宗琪、陈立滇、石 林、滕弘霓 (360)
- 90M13 阴离子型表面活性剂构成的微乳液异常流变性
..... 陈宗琪、伍世英、袁云龙、石 林 (362)
- 90M14 固液两相流体流变特性的实验研究..... 谭 箭、沈寿长 (364)

90P 高分子加工及流变性质

- 90P01 填充改性尼龙的流变性质与形态的相互关系 唐 烈、古大治、吴大诚 (366)
- 90P02 PET / PA66 共混体的流变性与形态的关系 解孝林、谢新光、吴大诚 (368)
- 90P03 混炼胶熔体在园锥口型入口流动的压力降研究
..... 黄衍强、唐国俊、赵良知、梁基照、罗 健 (370)
- 90P04 毛细管挤出过程中混炼胶熔体壁面滑移行为研究 梁基照、唐国俊 (373)
- 90P05 增塑剂对聚苯乙烯剪切改性的影响 钱锦文、A.Rudin (376)
- 90P06 有光、半消光 PET 流变性能的研究 徐德增、高桂芬、毛伟民 (379)
- 90P07 聚醚砜 / 聚酚氧共混物的拉伸行为及相容性
..... 安立佳、寇喜春、马荣堂、吴忠文、汤心颐 (382)
- 90P08 聚醚砜 / 聚对苯二甲酸乙二酯共混物的拉伸及转变行为
..... 安立佳、马荣堂、寇喜春、汤心颐、闵永刚 (384)
- 90P09 纤维填充剂对尼龙流变性能的影响 胡大洙、沈协人 (387)
- 90P10 聚丙烯 / 乙丙橡胶热塑弹性体流变学的研究
..... 沈宁祥、盛 京、史幼朋、张德全 (389)
- 90P11 三种尼龙 66 切片的流变性能探讨 高桂芬、徐德增、宋德才 (393)
- 90P12 超高分子量聚乙烯冻胶流动行为的研究方法 丁亦平、董明君、刘 青 (396)
- 90P13 氯化聚氯乙烯三元共混体的流变性能 史铁钧、吴大诚、张正柏 (399)
- 90P14 热固性丙烯酸粉末涂料流变性能的研究 陈义芳 (402)
- 90P15 不同催化剂聚丙烯纺丝料流变性能的探索 曹淑荣 (405)
- 90P16 填充聚丙烯的界面对流变和力学性能的影响
..... 梁瑞凤、许元泽、蔡维真、吴人洁 (408)
- 90P17 聚丙烯腈纤维在预氧化过程中的分子运动 钱梓玉、尹碧茵 (411)
- 90P18 胶束 / 高聚物系统流变性的研究
..... 曾利容、徐桂英、竺和平、毛宏志、毛恒涛 (413)
- 90P19 高枝化度、长枝链、半刚性聚电解质溶液流变特性及表面活性剂的影响
..... 卢淑仪、杨治中、林 果、林莲贞 (416)
- 90P20 尼龙 1010 / LDPE 流变-形态-性能的研究 许晓秋、刘双平、刘罗庆 (420)
- 90P21 硬质 PVC 流变性能研究 凌 绳、刘长维、苑会林、吴春萌 (424)
- 90P22 两种聚合物熔体入口流动的实验研究 朱 柯、唐国俊 (427)
- 90P23 关于洗衣机内桶聚丙烯专用树脂研制中的流变性能测量与分析 张 林 (430)
- 90P24 聚乙烯及其珍珠岩填充物的流变性能— η_a - γ_n 关系 王梓杰 (434)

90P25	增稠剂对乳液流变性的影响	童身毅、解孝林 (437)
90P26	聚氧乙烯苯酚醚水溶液的异常流变性	黄志贞、陈宗淇、程德书、石 林 (440)
90P27	测定聚烯烃熔体的胀大比估算它的应用范围	朱同春 (443)
90P28	BR / HDPE 共混型热塑性弹性流变性研究	吴其晔、袁泽明、腾碧隆、许淑贞 (446)
Abstract		(450)

流变断裂学的现状^①

袁龙蔚

(湘潭大学流变力学研究所)

摘要：在批判与继承经典断裂力学与经典热力学的基础上，作者创建的流变断裂学是近代断裂力学中新发展起来颇有意义的一个分支，本文综述了这一领域的近期发展。详细地介绍了它的新观点、新理论和研究内容，并对这一课题今后的研究任务提出了一些建议。

一、引言

当代科学技术发展的重大特点是基于应用的整体化趋势，是各学科领域的相互渗透、协同发展和辩证综合。毫无疑问，一切理论都有它自身适用的层次与范围，但又是可以相互借鉴的。随着实践的发展，会对理论作出评价与修正，并使之不断深化。有些时候，实验期待着上升到理论的高度；有些时候，一个决定性的实验却又导致新理论的诞生。

湖南省柘溪水电站单支墩大头坝迎水面垂直浅裂纹在水库蓄水八年后，突然失稳扩展成深裂纹又随之止裂的事实，使我们在扬弃经典断裂力学的基础上，建立起以研究裂纹扩展全过程为对象，以正确估算含裂纹工程构件剩余使用寿命为目的、以起裂控制与止裂设计为应用目标的流变断裂理论^[1-6]。

裂尖温度场存在性的实验验证^[7-9]进一步启示了我们：裂纹扩展过程绝不是一个纯力学过程而是一个热-力耦合的热流变性过程，从而引起我们对现有的线弹性、弹塑性、粘弹性等经典断裂力学^[10-12]的反思及对经典热力学^[13, 14]的质疑。

流变断裂理论的固有特征就在于裂纹扩展过程的非线性与不可逆性的本质，尤其是流变响应的非线性、广义力与广义流间的非线性以及表现为应力张量对称性破缺、热-力耦合形式耗散的不可逆性。这里，热力学与连续介质力学被有机地统一起来，流变学与断裂不再成为独立的分支，裂纹场与规范场的结合为宏观与微观间架起通桥。

^①本课题由中国国家自然科学基金会(NNSF-1990360)及美国国家科学基金会(INT-8812995)共同资助。

二、基本点

流变断裂理论的基本点, 通过几年的理论与实验研究, 认为主要有:

(1) 裂纹扩展的全过程一般地可分成三个阶段, 即孕育期、稳定扩展期、失稳扩展期。其中包括的失稳扩展前或止裂前的亚临界扩展或亚临界止裂。

(2) 从热力学意义来说, 裂纹扩展过程是从线性平衡通过线性非平衡转化到非线性非平衡的状态演变过程, 仅当对称性产生破缺, 才可能发生失稳扩展现象。

(3) 就裂纹扩展过程来说, 由于局部化剩余的存在, 局部平衡方程不能像通常力学那样作为结论而从整体平衡方程直接推导出来, 通常的局部化假设是个强假设。

(4) 在裂纹扩展过程中, 裂纹体的体积必将随新裂纹面面积而变化, 它反映了非局部的及应变梯度的影响。同时, 体积能密度和表面能密度可以相互转换。

(5) 能量耗散的主要形式是热传导与熵产生, 裂纹的扩展过程既非绝热又非等温。热-力耦合现象不容忽略, 必须同时考虑力和热的能量平衡及其时间变化。

(6) 裂纹扩展过程中, 裂尖塑性流变区作用着不平衡力系, 其质量密度不是常数, 不但具有裂纹体的内部质量降低, 而且同时新裂纹面上具有局部质量的增加。

(7) 在裂纹扩展过程中, 裂尖塑性流变区形成温度场, 它与能量耗散速度有关而与屈服无关。温度的变化可从位移梯度和体积随表面面积的变化率直接求得。

(8) 裂纹扩展过程中, 裂纹体的空间对称性或时间对称性出现破缺, 这与考虑系统对称性及其破缺为主要特征的规范场理论不谋而合。同时, 裂纹场也具有规范不变性。

三、主要成果

我们的理论与实验研究结果表明, 裂纹体的裂纹扩展过程实质上是:

(一) 非平衡态不可逆热力学相容的过程

裂纹扩展的全过程可分为三个阶段, 孕育期间裂尖塑性流变区的面积增大并发生质量流源的扩散; 稳定扩展期间熵增量减小并达稳定态的极小值; 失稳扩展期间超熵增量通过临界点出现负值。稳定扩展是线性非平衡态的不可逆性扩展, 失稳扩展则是非线性非平衡态的不可逆性扩展; 而平衡态不可逆过程具有唯一解, 但非平衡态不可逆过程则具有确定的极限解且受到前者限制。就稳定和失稳扩展这两类非平衡态来说, 由于系统熵的时间变化率是两部分组成, 即熵增与熵流或超力与超熵流, 从而根据考虑内部结构和内部特征长度的非局部场论, 可以得到扩展与断裂判据。而这些判据涉及表面量, 故是试件几何尺寸相依的。由于裂纹快速扩展的动态效应主要表现在试件中与裂纹扩展路径相平的边界面反射回来的应力波对裂尖塑性流变区应力场的相互作用, 所以动态止裂韧度是裂纹扩展速度和温度的函数。显然, 止裂设计概念作为起裂控制的补充, 将提高结构物的安全性。

(二) 动量不守恒而能量亦耗散的过程

裂纹的扩展使裂尖塑性流变区上作用着不平衡力系, 即内部体力场发生作用。在裂纹扩展过程中, 裂尖区做整体运动, 其几何尺寸、形状、位移场、应力场均随时间而变化。它的质量扩散运动与裂纹扩展速度相关, 同时, 内部体力偶正比于外部体力偶, 内部体积力对内

部体力偶有贡献, 而外部体力偶对内部体积力有贡献, 可直接借助实验来验证裂纹扩展过程中动量是不守恒的。由于扩展过程中局部质量在数学上不可能是闭的。所以局部化剩余做的功使局部动量的局部动量矩的经典平衡律失效。Griffith^[15]引入的表面能 γ 也不是常数, 它涉及新裂纹面上质量的生成及其具有的内能、线动量及动量矩的贡献, 以及通过该面的热流向量等。体积随表面面积的变化率反映了非局部影响及应变梯度影响, 它的存在导致裂尖区内流变应力张量的非对称性。在裂纹扩展过程中, 热能与机械能间相互转化并在总体上是不可逆的。能量耗散的主要形式是热传导和熵产生。

(三) 热能与机械能共存的变化过程

在裂纹扩展过程中, 能量耗散的主要形式是热传导, 并在裂尖塑性流变区形成温度场, 它与能量耗散速度而不是与屈服有关。临近经典屈服极限点阶段, 温度达相对极小值; 失稳扩展前, 温度发生跃变。整个温度场的温度分布由裂尖向外逐渐降低至周围温度, 但具有峰值。根据我们的实验结果^[16], 当裂纹扩展速度为 4.86mm/s 时, 单边 I 型裂纹的最大温差达 21°C (聚氯乙烯塑料板) 或 30°C (A3 钢板)。可见, 机械功可以全部转化成热, 但反之则不然。裂尖产生的热随时间连续的变化, 因此裂纹扩展的过程既非绝热又非等温。所以, 机械能和热能的平衡不仅需要同时考虑, 它们的时间导数也必须有机地联系起来^[17]。同时, 这些能量间存在着耦合及非线性相互作用, 机械平衡的满足并不能保证热平衡条件的成立。因此, 对于裂纹扩展过程中的热-力耦合现象, 不能像经典热力学那样对于热与力作解耦处理。

(四) 伴有热源汇的非纯粹力学过程

裂纹扩展过程中的温度变化可直接由位移梯度和体积相对于表面积的变化率求得^[18], 从而热传导方程中不能忽略表面积变化对温度的影响。同时, 这一扩展过程既然伴有热传导和熵产生, 那么在从始态到终态的连续过程中, 必须有局部平衡方程才能确定任一特定态的熵增值。但是, 断裂过程的本质是非局部的, 所以在局部理论的方程中应引入源汇项。如果 Clausius 非补偿热是非负值, 则可建立广义熵不等式。它是某一泛函的可积微分不等式, 其中唯象系数为流和力的比值, 是一个不定偶数级的张量。由于熵产生等于局部熵产生与热传导引起的熵产生的总和, 所以熵增率可用耦合的流和力的约简内积表示。热与力及流与力这两个耦合表明, 断裂过程是一个非纯粹的力学过程。对于极性材料, 由于温度梯度的存在, 在裂尖区引起热磁效应, 从而热传导方程包含有电磁场的贡献。场感应的对称性表现为空间对称群, 一旦对称性产生破缺, 则裂纹失稳扩展。对于裂纹缓慢扩展过程。可得裂纹的起止裂判据。

(五) 具有 Lyapounov 函数型流变记忆泛函可描述的历史延拓过程

裂纹扩展过程中包含有裂纹体内部不可逆性及其引起的熵产生, 从而赋予时间以方向性, 因此时间不仅是运动相关的外界参数, 而且是系统内部结构的物理量, 它是裂纹扩展的总体表现。所以, 稳定扩展期的熵产生就是判别系统稳定性的 Lyapounov 函数, 失稳扩展期的 Lyapounov 函数则是超熵流。可见, 这里的“时间”不再只与运动有关, 而且与内部结构变化引起的耗散有关。另外, 非耗散有效能函数等于零的充要条件是: 可用满足广义 Onsager 非线性倒易关系的耗散势函数来定义耗散能函数, 从而, 本构关系完全可由耗散能函数给出。但是, 耗散应力张量与热通量向量组成的反映物质本性的本构关系, 反映了内部三维的应力-应变-时间关系, 且处于衰退记忆及延迟历史条件下, 故是几何尺寸非相依的。如果放松在局部线性延拓上所作的假设, 则必将引起对本构函数的附加限制。否则, 无法解释

试件几何尺寸及加载速度对单轴应力-应变关系的影响。

(六) 微观动力学可逆与宏观热力学不可逆间的互补过程

整体的时空对称性是连续介质固有的, 裂纹的出现与扩展, 使整体对称性产生破缺。若以无裂纹的理想连续体为系统的基态, 则裂纹的扩展就是: 基态场的整体对称性发生变化、从而产生的表明流变场与裂纹场间相互作用的规范场, 而裂纹场具有规范不变性。规范场作为解释自然界基本相互作用的基本理论早就为物理学家所熟悉, 而裂纹规范场正好对应于自然态上的随动标架所构成的主切丛上的联络和半度规, 这与非线性裂纹连续体的三构形几何理论完全一致, 若不计热耗散效应, 则裂纹场的动力学方程, 可从构造的相应 Lagrange 函数并利用最小作用量原理直接求得。并使它与现有非线性几何理论协调起来。然后运用 Neother 定理也可以建立裂纹场的各种守恒量及相应的守恒律。进一步, 我们还需在动力学量与热力学量间寻求一种非倒易性, 通过它从微观上得到实现新的对称性的变换条件, 使得热动力历史的某些泛函在时间倒逆下是不完全的。这样, 对于稳定扩散可得到类似于 Onsager 型的理论。从稳定扩展到失稳扩展存在着分支点。在此点附近, 系统的动力学场量的随机涨落较大。所以时间对称性产生破坏时也会发生失稳扩展。显然, 这一转变更符合各态历经假设, 即符合严格平衡的弱条件。重要的问题是边界条件与初始条件的确定。

四、未来课题

流变断裂学的今后任务, 主要有:

(1) 在理论上要回答裂纹体的非欧物质流形有什么样的几何结构? 它的几何性质与裂纹场有怎样的关系?

(2) 在裂尖区的“自然”热胀改变内变量自然值的条件下, 与广义热传导方程相应的是怎样的非线性流变模型?

(3) 在裂纹分布和流密度未知的条件下, 建立裂纹体的变形几何学和裂纹在四维时空内的热动力学方程。

(4) 在裂纹分布和流密度已知的条件下, 发展各种解析或数值方法, 计算裂尖本征热应力场和本征流变应变场。

(5) 便于工程应用的定解条件及扩展判据的确定, 尤其是初始的边值条件及热传导方程的确定。

(6) 使失稳后的裂纹能够按照预定方向进行规则性扩展, 把一个失控过程转化为一个可控过程, 以应用于工程中的预裂。

(7) 提出正确的止裂判据与措施, 或正确估算各种含裂纹构件的剩余使用寿命, 把起裂控制与止裂设计结合起来。

(8) 在 6T61 型红外辐射热像仪的基础上, 建立高分辨率快速动态连续处理的模拟-数值转换系统, 以提高实验手段。