

岩石断裂力学导论

Introduction of Rock Fracture Mechanics



李世愚
和泰名 等 编著
尹祥础

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

岩石断裂力学导论

Introduction of Rock Fracture Mechanics

李世愚
和泰名 等 编著
尹祥础

北方工业大学图书馆



C00178149

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本专著主要反映断裂力学在地球科学中的应用进展,它涉及震源物理、工程与滑坡,断层与地震等跨尺度的岩石、岩体破裂问题.在基础部分介绍了线弹性断裂力学的基本知识,在专业部分主要阐述了作者在有关的理论和实验研究方面的成果,包括压力之下岩石内部的裂纹剪切破裂,过程区微裂纹的萌生、演化、集结(成核),破裂周围的应力场和位移场,裂纹扩展途径,三维破裂问题等.本书也简要介绍了有关领域的前沿进展,包括岩石断裂的物理效应(如声发射),如何用地面物理测度来评估断层的活动性,预测失稳破裂的危险性,流体在岩石断裂中的作用,地球深部存在的超临界流体在地震成因方面的作用和地震破裂动力学等.

本书可以作为高等院校有关专业的研究生教学参考和有关研究人员的参考.

图书在版编目(CIP)数据

岩石断裂力学导论/李世愚,和泰名,尹祥础等编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010.1

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书;中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02229-6

I. 岩… II. ①李…②和…③尹… III. 岩石力学:断裂力学-研究
IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 183377 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026
网址 <http://press.ustc.edu.cn>
印刷 合肥晓星印刷有限责任公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 30.25
字数 542 千
版次 2010 年 1 月第 1 版
印次 2010 年 1 月第 1 次印刷
印数 1—2000 册
定价 88.00 元

编 委 会

顾 问 吴文俊 王志珍 谷超豪 朱清时

主 编 侯建国

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 水 史济怀 叶向东 伍小平

刘 兢 刘有成 何多慧 吴 奇

张家铝 张裕恒 李曙光 杜善义

杨培东 辛厚文 陈 颀 陈 霖

陈初升 陈国良 周又元 林 间

范维澄 侯建国 俞书勤 俞昌旋

姚 新 施蕴渝 胡友秋 骆利群

徐克尊 徐冠水 徐善驾 翁征宇

郭光灿 钱逸泰 龚 昇 龚惠兴

童秉纲 舒其望 韩肇元 窦贤康

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度，很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年，之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一，主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强，在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献，为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月，胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信，信中称赞说：半个世纪以来，中国科学技术大学依托中国科学院，按照全院办校、所系结合的方针，弘扬红专并进、理实交融的校风，努力推进教学和科研工作的改革创新，为党和国家培养了一大批科技人才，取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果，为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计，中国科大迄今已毕业的5万人中，已有42人当选中国科学院和中国工程院院士，是同期（自1963年以来）毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中，本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和700多名硕士、博士，比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中，作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代表，科大毕业生已连续多年榜上有名，获奖总人数位居全国高校前列。鲜

为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出 20 多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于 2008 年 9 月起陆续出书,校庆年内集中出版 50 种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有 IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT 行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008 年 9 月

前 言

断裂现象和一切生物以及人类生活息息相关。土壤的形成、农作物的收割、食物的切割和咀嚼、木柴与煤的获取都与断裂有关。打制石器成为从猿变成人的第一标志，而打制石器的主要功能就是断裂。对断裂现象的认识历来包含两个对立的方面。一方面，寻找导致断裂的工具和方法；另一方面，寻找防止断裂的材料与工艺。人类发展冶炼技术制造各种材料，希望这些材料要自身坚固，同时又要能成为无坚不摧的武器或工具。矛与盾的发展，不但改变着人类生活，也不断改变着人类的观念。这两者的对立与统一，不但渗透在一切宗教与艺术中，也渗透在人们的哲学和宇宙观之中。几千年来，主要通过经验不断加深对断裂问题的认识，但直到上世纪20年代，格里菲斯能量理论的提出，才使断裂现象的研究进入科学范畴。断裂是个最古老的问题，又是最新发展的学科。由于各方面的迫切需求，它在近几十年来取得了迅猛的发展。它的内容极为丰富，却又很不成熟。已有的理论模型解决了许多问题，但也面临着更多需要探索的课题。我们在本书讨论的所有问题，与其说是做出结论，不如说是在进行探讨。

断裂力学最早从金属断裂研究开始，但立刻开始关注岩石断裂问题。由于断裂力学成功地解释了地震断层低应力降现象，它在地学中得到发展，成为震源物理学科的起源。工程与滑坡，断层与地震，迫切需要断裂力学回答一系列问题。地球科学部的不同研究专业，都涉及跨尺度的岩石、岩体破裂问题。本专著就是依据这些需求，在内容上偏重以下几个方面：

1. 地壳内部的岩体主要处于压力环境之下。压力之下岩石内部的裂纹主要是剪切破裂。对于剪切破裂的研究给予了更多的讨论和关注。

2. 对于过程区微裂纹的萌生、演化、集结(成核)问题,阐述理论基础和实验研究结果.

3. 裂纹周围的应力场和位移场,这些问题在断层运动和大地测量中占有重要位置.

4. 断裂与裂纹面之间摩擦问题的耦合,同时给出了裂纹面上载荷分布不均匀的应力函数.

5. 流体在岩石断裂中的作用,特别是地球深部存在的超临界流体在地震成因方面的作用.

6. 地震破裂动力学的简要介绍.

本书在前沿性研究进展方面包含以下内容:

1. 三维脆性破裂. 作者设计了 II-III 复合型破裂实验,并且在三维破裂面双曲率曲面结构的理论证明方面取得了突破性进展,解决了 Palaniswamy 和 Knauss(1970)在理论上未能解决的问题.

2. 裂纹周围的应力场和位移场,对 Maruyama(1969)等作者给出的一些结果做出了许多重要补充和修正. 作者从因果律出发,根据边界条件重新计算并绘制了应力分布. 作者发现 II 型裂纹周围主应力在裂纹面中垂线上存在两个对称的“盲点”,这两个“盲点”是主应力等值线的间断点,在主应力的作用方向等值线图中表现为类似磁力线汇聚的“磁极”的极点. 这在 Maruyama 的原著作中是没有的.

3. 对二维脆性破裂的判据问题做出了进一步研究. 利用最大周向应力理论推导了单轴拉伸条件下斜裂纹优势裂纹角. 结果表明,不同的理论模型在具体问题上得到的结果可能会有不同.

4. 对典型裂纹系周围微裂纹演化图像进行了研究,并将结果和声发射(AE)定位结果进行了比对. 结果表明,二者在主要部分上是基本相同的,但有些地方有区别. 这个结果与 Lockner(1993)的观点是一致的,即 AE 测量并未能完全表征破坏的全部过程.

5. 揭示了断裂力学格里菲斯-欧文准则与岩石力学莫尔-库伦准则的内在联系.

6. 发展了 Barenblatt 的内聚带理论,突破了原直线内聚带理论的限制,提出了非直线内聚带的新概念,并以此给出了计算受压闭合剪切裂纹(系)曲线扩展路径的半解析解的理论和方法.

7. 提出了断层失稳破裂“地面物理测度”概念. 用地面物理测度来评估断层的活动性,预测失稳破裂的危险性,是实现地震预测预报的根

本途径。

8. 介绍了流体对于岩石断裂的作用,介绍了超临界流体在断裂动力学中的作用内容,提出了一种与此相关的地震破裂动力学模型。

本书在基础知识部分的取舍颇费了一番斟酌。本书不是纯教材,在基础知识部分不能论述过细,但也不能将本书写成论文集。为顾及系统性和严谨性,与本书有关的公式出处,特别是涉及学科交叉,或与以往一些文献相异之处,都必须给出必要的论述和说明。

本书的第1章至第5章的局部保留了尹祥础(1985)《固体力学》的内容,多数地方进行了改写和补充。第2章的后半部分由和泰名(原名和雪松)完成计算和绘图工作,第6章至第12章的主要内容是在尹祥础、和泰名、滕春凯的合作下完成的。第13章的实验是与 Kuksenko 教授等合作完成的,分析部分由刘建新在硕士论文中完成。第8章8.5节由叶剑红完成,第14章与和泰名合作完成,第9章、第18章和19章的内容在陈运泰院士的指导下完成,并成为作者博士论文的部分内容。第16章声发射频谱部分内容在唐林波合作下完成。

本书可以作为高等院校有关专业的教学参考和有关研究人员的参考。本书在纠正以往文献的讹误的同时,自身也会产生新的谬误。书中凡属有不正确的地方,希望能得到读者的批评与指正。

本书所收录的本课题组成果,在研究过程中曾经得到国家自然科学基金、地震学联合基金重点课题、科技部社会公益项目、中国地震局重点课题和中国地震局地震行业科研的多次资助。没有这些资助,是不可能完成这些研究工作的。陈运泰院士在理论方面,陈颀院士在实验方面给予了指导和帮助。Kuksenko 教授等曾多次来华合作进行实验研究。邓大量院士、Maruyama 教授、范天佑教授与本书作者多次交流,并给予作者很大支持和鼓励,姚孝新、李红、钟放庆参加了合作。耿乃光、蔡戴恩、刘晓红、郝晋升、张来凤、李纪汉等在实验工作中给予了很大帮助,在此深表感谢。

感谢李钦组教授对三维破裂研究的多次鼓励。

李世愚

中国地震局地球物理研究所

2009年10月于北京

目 次

总序	i
前言	iii
第 1 章 弹性力学基础	1
1.1 应力分析	1
1.2 应变分析	10
1.3 弹性变形过程的热力学	16
1.4 线性弹性	20
1.5 弹性力学的平面问题	28
1.6 弹性介质的应力应变曲线	38
参考文献	39
第 2 章 线弹性断裂力学(一)——裂纹周围的应力和位移	41
2.1 Griffith 的能量平衡理论	41
2.2 柯洛索夫-穆斯海里什维里(K - M)应力函数	43
2.3 威斯特嘎德应力函数	45
2.4 裂纹周围的应力和位移	57
参考文献	74
第 3 章 线弹性断裂力学(二)——应力强度因子、断裂韧性和能量 释放率	75
3.1 应力强度因子与断裂韧性	75
3.2 无限大裂纹体中集中力及集中力偶作用时的 K	80
3.3 其他一些情况下求应力强度因子	82
3.4 能量释放率及其与应力强度因子间的关系	89
参考文献	98

第 4 章 二维脆性断裂的破裂判据	99
4.1 引言	99
4.2 最大周向应力理论	99
4.3 应变能密度因子理论	107
4.4 最大能量释放率理论	112
4.5 最大张应力理论	113
4.6 讨论	114
参考文献	114
第 5 章 非线性断裂力学	115
5.1 引言	115
5.2 微裂纹的演化	116
5.3 裂纹端部塑性区大小的估算及 Irwin 修正	121
5.4 Dugdale(D - M)模型	126
5.5 Barenblatt 内聚力模型	127
5.6 裂纹扩展阻力 R 和亚临界扩展	129
5.7 裂纹端部张开位移 δ (CTOD)	131
5.8 J 积分	133
5.9 非线性区尺度	138
参考文献	142
第 6 章 受压裂纹周围的应力和位移	144
6.1 受压裂纹问题的特殊性	144
6.2 受压裂纹周围的应力场	145
6.3 裂纹面上的载荷为非均匀分布	150
参考文献	156
第 7 章 受压裂纹扩展的实验研究	157
7.1 受单轴压裂纹扩展的实验原理	157
7.2 单轴压力下的实验研究	162
7.3 伪三轴压力条件下的断裂实验	168
7.4 差应力下岩石的体积膨胀	173
参考文献	174
第 8 章 受压裂纹扩展的理论分析	176
8.1 用非直线内聚带理论拟合破裂扩展途径	176
8.2 扁椭圆裂纹模型	179
8.3 利用断裂角实验数据分析非线性区尺度	184

8.4 利用巴西圆盘试验测定岩石的抗拉强度	187
参考文献	193
第9章 三维脆性破裂	195
9.1 引言	195
9.2 国内外研究概况	196
9.3 II-III复合型裂纹破裂的实验研究	198
9.4 三维脆性破裂的张应力判据	202
9.5 三维破裂张应力判据临界 K -曲面	211
9.6 三维脆性破裂群的分形特征	215
9.7 三维破裂的研究结果在地学中的意义	216
参考文献	219
第10章 裂纹系	221
10.1 引言	221
10.2 共线裂纹问题的理论解	221
10.3 共线剪切裂纹破裂的实验研究	229
10.4 用非直线内聚带理论模拟破裂扩展途径	231
10.5 其他几何结构的裂纹系实验	233
参考文献	239
第11章 微裂纹演化导致岩石破裂成核的实验研究	240
11.1 微破裂成核理论	240
11.2 实验方法	242
11.3 若干典型构造模型的实验观察	242
11.4 理论分析	251
参考文献	252
第12章 岩石的剪切破坏	254
12.1 引言	254
12.2 岩石抗剪切破坏强度	256
12.3 岩石类介质中剪切破坏面形成的机理	260
12.4 与剪切破坏有关的若干实验研究	265
12.5 剪切破坏机理	268
12.6 地壳内部的应力条件	272
12.7 对地震时剪切破裂的若干参数的估计	274
参考文献	275

第 13 章	用声发射方法研究微破裂演化导致成核	278
13.1	引言	278
13.2	完整岩石样品在加载过程中 AE 定位	279
13.3	与构造相关的 AE 定位	283
13.4	Kaiser 效应和 Felicity 效应	288
13.5	载荷保持不变时的声发射	291
13.6	卸载时的声发射	292
13.7	Kaiser 效应和 Felicity 效应的机理分析	293
13.8	总结与讨论	296
	参考文献	297
第 14 章	预应力作用下脆性破裂的稳定性和止裂	298
14.1	引言	298
14.2	脆性破裂的稳定扩展与失稳扩展	299
14.3	止裂条件与止裂准则	300
14.4	集中力或力偶	301
14.5	分布力或力偶	307
14.6	结论与讨论	311
	参考文献	311
第 15 章	流体的作用	312
15.1	引言	312
15.2	应力腐蚀	313
15.3	孔隙率和渗透度	314
15.4	通过孔隙介质流体的流动	315
15.5	孔隙压力与有效应力	315
15.6	水压致裂	317
15.7	地球深部流体的存在	318
15.8	超临界流体的作用	320
15.9	流体在地震与断层活动中的作用	324
	参考文献	331
第 16 章	岩石断裂力学在震源物理中的应用	335
16.1	地震孕育的膨胀模式	335
16.2	摩擦准则	338
16.3	地震孕育过程的流变模式	343
16.4	地震破裂成核(nucleation)的基本含义	347

16.5 地震破裂动力学简介	348
参考文献	354
第 17 章 岩石损伤导致失稳破坏的地面物理测度	358
17.1 引言	358
17.2 损伤理论介绍	359
17.3 细观非均匀性的表征及其统计分布	361
17.4 统计细观损伤力学介绍	361
17.5 CT 技术的应用	362
17.6 波速和波速比	364
17.7 形变场测量	367
17.8 声发射序列的能级和数量关系—— b 值	372
17.9 介质的各向异性	374
17.10 微破裂声发射的频谱分析	380
17.11 岩石中的声波衰减	382
17.12 调制模式与调制比	384
17.13 大地电阻率法和大地电位法	384
17.14 加卸载响应比	386
17.15 讨论	392
参考文献	398
第 18 章 库仑力能否触发远场地震——兼论库仑力的计算问题	402
18.1 引言	402
18.2 伏尔泰拉错动模型	403
18.3 线弹性断裂力学模型	405
18.4 滑动弱化模式——破裂面上的应力处处给定	409
18.5 库仑力能否触发远场的下一次地震	419
18.6 讨论	420
参考文献	421
第 19 章 一种与流体动力作用有关的地震破裂动力学模型	423
19.1 引言	423
19.2 导致孔隙压力突然增加的几种原因	425
19.3 导致断层扩展的几种预应力分布情况	427
19.4 “隧道效应”与分形断层破裂速度的测不准原理	432
参考文献	434

附录 1 弹性力学的常用公式	436
附录 2 无限大平板含扁椭圆孔的问题	447
附录 3 本书用到的积分	455
附录 4 大规模屈服条件下 CTOD 公式的推导	459
主要符号表	465
译名对照表	467

第 1 章 弹性力学基础

1.1 应力分析

1.1.1 应力符号

图 1.1 给出了二维空间中两种符号体系的比较. 图 1.1(a)为通常材料领域的符号制, 其中正应力以拉为正. 剪应力在以坐标轴正向为法向的坐标面上, 正向规定为朝向坐标的方向. 例如 τ_{xy} 的正向就规定为以 x 轴为法向的坐标面上, 以朝 y 轴正向的力为正. 图 1.1(b)为岩石力学领域的符号制, 其中正应力以压为正. 剪应力在以坐标轴正向为法向的坐标面上, 正向规定为朝向坐标的反向. 例如 τ_{xy} 的正向就规定为以 x 轴为法向的坐标面上, 以朝 y 轴反向的力为正. 这两种符号体系只是符号正负不同, 其余一切运算规则(如坐标变换, 莫尔(Mohr)圆)完全相同. 上述的符号制不难推广到三维

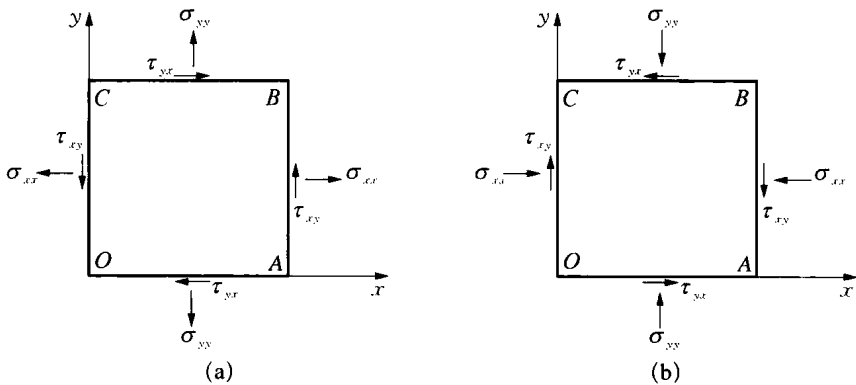


图 1.1 作用在二维正方形边上单位面积的力

(a) 弹性力学沿用的符号制; (b) 岩石力学领域沿用的符号制

空间.

本书的应力符号制和通常的弹性力学书籍相同. 只在压力条件下莫尔圆的使用等个别问题上与岩石力学文献接轨, 在涉及应力分析, 特别在用到张应力判据时, 仍采用弹性力学惯例.

1.1.2 张量运算规则

这里的张量运算形式满足“求和约定”, 即凡是同一指标字母在乘积中出现两次时, 则理解为对所有同类求和, 例如 $\sigma_{ij}e_j$ 应理解为 $\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij}e_j$. 这样的求和指标 j 称为假指标或哑指标. 有关张量分析的符号表示和运算规则, 还可以参阅李灏、陈树坚(1982), 杜庆华等(1986), 盛正华(1985).

1.1.3 柯西(Cauchy)方程

记 S 为过 P 点的外法向为 n 的斜截面. 外法线 n 的方向可由其方向余弦记为 $\alpha_{n1} = \cos(\widehat{n, x_1})$, $\alpha_{n2} = \cos(\widehat{n, x_2})$, $\alpha_{n3} = \cos(\widehat{n, x_3})$. 设此斜

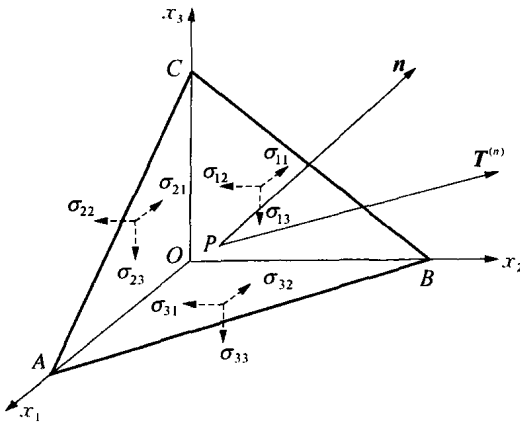


图 1.2

截面 $\triangle ABC$ 的面积为 S , 则如图 1.2 所示, 过此点所取的小四面体 $OABC$ 的另外三个面为与坐标面平行的截面 (即以 x_1, x_2, x_3 三个坐标轴为法线的三个截面), $T^{(1)}, T^{(2)}, T^{(3)}$ 分别表示三个截面上的应力矢量. 每一个应力矢量又分解为沿三个坐标轴的应力分量, 有

$$T^{(i)} = \sigma_{ij}e_j \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.1)$$

三个截面的面积分别为 $\triangle OBC: S_1 = S \cdot \alpha_{n1}$, $\triangle OAC: S_2 = S \cdot \alpha_{n2}$, $\triangle OAB: S_3 = S \cdot \alpha_{n3}$. 此截面上的应力矢量记为 $T^{(n)}$, 即

$$T^{(n)} = T_j^{(n)}e_j \quad (1.2)$$

另外三个面上的应力矢量分别为 $-T^{(1)}, -T^{(2)}, -T^{(3)}$. 考虑此微元(四