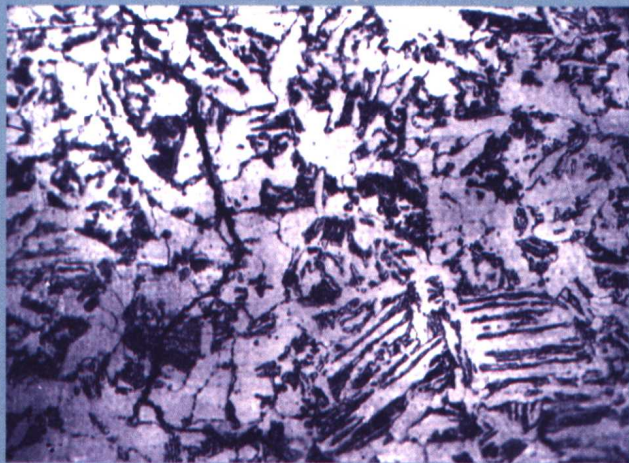


焊接结构疲劳强度理论

杨化仁 郭晓光 编著



5



NEUPRESS
东北大学出版社

焊接结构疲劳强度理论

杨化仁 郭晓光 编著

东北大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接结构疲劳强度理论/杨化仁, 郭晓光编著. —沈阳: 东北大学出版社, 2002. 6

ISBN 7-81054-794-1

I. 焊… II. ①杨… ②郭… III. 焊接结构—疲劳强度
IV. TG405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 038974 号

出版者: 东北大学出版社

(邮编: 110004 地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号)

出版人: 李毓兴

印刷者: 东北大学出版社

发行者: 东北大学出版社

开本: 850mm×1168mm 1/32

字数: 130 千字

印张: 5

出版时间: 2002 年 8 月第 1 版

印刷时间: 2002 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 王兆元

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 20.00 元

垂询电话: 024—83687331 (发行部) 024—83680265 (传 真)

E-mail: neuph@neupress.com

<http://www.neupress.com>

前 言

随着现代工程中焊接结构的大量采用，焊接结构的疲劳理论和应用研究越来越受到广泛的重视。系统而深入地研究焊接结构疲劳断裂机理及其规律，对于正确认识焊接金属的疲劳本质，准确预测焊接结构的疲劳寿命，防止破坏事故突然发生，有着重大的理论意义和实用价值。

为了进一步深入探索焊接结构疲劳的微观机理，作者对焊缝金属中位错结构的变化和显微裂纹的形成机制进行了全面、综合的研究。透射电子显微镜、扫描电子显微镜的观测结果表明，焊缝金属中的位错密度随载荷循环次数的增加而增加，其相互作用也随之加强。在大量试验结果的基础上，建立了位错密度的增量、最大疲劳应力、循环次数之间的数学表达式。

通过对在不同循环次数下，焊缝金属铁素体内位错组态变化的电镜观察与分析，发现了焊接疲劳损伤、显微裂纹萌生过程的主要特征是焊缝金属中位错组态的变化。位错密度随载荷次数的增加而增加，并形成了位错的纠结，进而构成了高位错密度条带及低位错密度区，增加了位错运动的阻力。随着疲劳过程的持续进行，位错间的相互作用向低能转化而形成位错胞，继而在晶粒内形成亚晶。由于位错的运动和衍变，焊接金属中出现了滑移带，从而萌生了疲劳微裂纹，使疲劳强度降低。这些规律的发现将焊接结构疲劳裂纹萌生的机理从微观领域又向前推进了一步。

首次对焊接金属疲劳载荷下共析组织损伤过程进行了研究。发现焊缝金属在循环载荷作用下，铁素体组织内随位错组态的变

化而萌生疲劳微裂纹。在共析组织中，随着疲劳载荷或循环次数的增加，疲劳损伤的标志是共析组织内渗碳体片的碎化，并向载荷方向发生偏转。位错与共析渗碳体发生交互作用，在碎化的渗碳体周围产生了微裂纹，进而可能形成小裂纹。

焊接结构疲劳实验结果表明，焊缝及热影响区内各精细部位的疲劳寿命不同。焊后的金属不同于常规金属，存在着应力、组织、硬度的不均匀性，这必然影响焊接结构的疲劳性能。实验结果还表明，在相同应力水平下，熔合区疲劳寿命偏低，正火区疲劳寿命偏高；宏观疲劳裂纹的扩展一般在铁素体内，并有一定程度的择优取向。研究发现，焊缝金属中魏氏组织的存在，使焊接接头的疲劳强度有所提高。

为准确地测定焊接结构的残余应力，寻求残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响规律，描述焊接结构疲劳裂纹扩展过程中残余应力的变化，作者自行设计了应力释放的新方法，测定焊接结构残余应力随疲劳裂纹扩展的变化。结果表明，沿焊缝及热影响区两端显著地存在着横向残余压应力，中间部位为拉应力。随着疲劳裂纹的扩展，裂纹尖端残余应力发生松弛，绝对值递减，但分布规律不变，疲劳裂纹尖端始终处于压应力场内，比较真实地描述了残余应力随疲劳裂纹扩展而变化的规律。

作者还对焊接接头、焊缝及热影响区的疲劳裂纹的扩展速率及其影响因素进行了综合研究。研究表明，仍可用 Paris 公式来描述焊缝及热影响区中的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子 Δk 间的关系。在焊接区随应力比 R 增大，疲劳裂纹扩展速率增加较快，热影响区次之，母材变化的幅度较小。当应力比 $R < 0.6$ 时，残余应力对焊接件疲劳裂纹扩展速率影响较大，显微组织的影响次之；当应力比 $R > 0.6$ 时，残余应力影响减弱，显微组织的影响较大。

为准确地计算焊接结构疲劳裂纹在焊接残余应力场中的扩展

规律，作者将权函数引入残余应力场的计算中，建立了 16Mn 钢焊接件疲劳裂纹在残余压力场中扩展的计算模型。根据这一计算模型，可不必分别去测定焊缝及热影响区疲劳裂纹扩展速率，而由母材的疲劳裂纹扩展关系式和测得的焊接结构的残余应力值及计算部位的微观组织，直接算得焊接件热影响区和焊缝的疲劳裂纹扩展速率。经检验，预测值与实测值吻合较好，为工程焊接结构疲劳寿命估算提供了简便而精确的方法及手段。

作 者

2002 年 4 月

目 录

前 言

1 概 述	1
1.1 引 言.....	1
1.2 焊接结构疲劳研究的历史及应用.....	2
1.2.1 历史的回顾	2
1.2.2 理论与研究与工程应用	5
1.3 焊接结构疲劳强度理论研究的方向和存在的不足.....	8
1.3.1 焊接结构整体状态下疲劳强度的研究	8
1.3.2 性能不均匀对疲劳性能的影响	8
1.3.3 焊接结构中残余应力的影响	9
1.3.4 焊接制造工艺对疲劳性能的影响.....	10
1.3.5 无损检测的手段及可靠性研究.....	11
1.4 本书研究的主要内容.....	11
2 焊接结构疲劳的基本概念.....	13
2.1 S—N 曲线与疲劳强度	13
2.2 其他试验方法	16
2.2.1 阶梯试验法.....	16
2.2.2 Locati 法	17
2.3 试验结果的表示法	19
2.3.1 Goodman 图形	19
2.3.2 Smith 图形	20
2.3.3 S_{\min} 对 S_{\max} 图形.....	22
2.4 应力集中	23

2.4.1	应力集中系数	23
2.4.2	焊接接头应力集中系数的确定	26
3	断裂力学与疲劳裂纹扩展	36
3.1	断裂力学	37
3.2	应力分析与应力强度因子	38
3.3	塑性的近似校正	43
3.4	焊接接头的应力强度因子	47
3.5	断裂力学在疲劳研究中的应用	51
3.5.1	疲劳裂纹扩展速率的一般表达式	51
3.5.2	疲劳裂纹扩展速率的工程应用	57
4	焊接结构疲劳裂纹萌生机理	62
4.1	焊接工艺与疲劳试验	62
4.1.1	实验材料	62
4.1.2	试验及结果	63
4.2	焊缝金属中疲劳载荷下的位错结构	64
4.2.1	位错密度的测量	64
4.2.2	位错密度的计算	65
4.3	疲劳载荷下焊缝金属中的微观组织	70
4.3.1	焊缝金属中位错结构的观察	70
4.3.2	位错结构变化过程及其分析	74
4.4	疲劳载荷下焊缝金属中共析组织的变化	75
4.4.1	电子显微镜下焊缝共析组织的形态	75
4.4.2	疲劳载荷作用下共析组织的变化与分析	78
4.5	影响焊缝疲劳寿命的其他因素	79
4.6	焊接金属疲劳裂纹萌生过程	84

5	焊接结构疲劳裂纹扩展微观特征及断口分析	86
5.1	焊接金属疲劳裂纹扩展实验	86
5.2	对焊接头疲劳裂纹扩展微观特征	87
5.2.1	16Mn 钢母材、焊缝及热影响区的金相组织分析	87
5.2.2	16Mn 钢焊缝及热影响区疲劳裂纹萌生与扩展的微观特征分析	89
5.3	双面埋弧焊金相组织	93
5.3.1	焊缝金相组织的特点	93
5.3.2	母材、焊缝、热影响区显微组织的特点	94
5.4	疲劳裂纹扩展微观特性分析	96
5.4.1	裂纹在母材金属中的扩展	96
5.4.2	裂纹在热影响区中的扩展	98
5.4.3	裂纹在焊缝中的扩展	99
5.5	不同焊接方法疲劳裂纹扩展的微观特征	100
6	焊接结构疲劳裂纹扩展宏观特性	102
6.1	疲劳裂纹扩展实验	102
6.1.1	实验材料与试验	102
6.1.2	实验数据的处理	104
6.2	疲劳裂纹扩展速率的实验分析	105
6.2.1	疲劳裂纹扩展速率回归结果	105
6.2.2	16Mn 钢母材的疲劳裂纹扩展速率	105
6.2.3	热影响区疲劳裂纹扩展速率	107
6.2.4	焊缝疲劳裂纹扩展速率	109
6.3	焊接金属疲劳裂纹扩展的宏观特性	111

7 焊接结构残余应力的测定及其对疲劳裂纹扩展速率的影响	113
7.1 X射线法测量焊接件的残余应力	113
7.1.1 测量原理	113
7.1.2 测量结果	114
7.2 切割应力释放法测定裂纹扩展时残余应力的变化	116
7.2.1 切割应力释放法测量残余应力的方法及原理	116
7.2.2 应力释放法测定残余应力的计算原理	117
7.2.3 测试结果	119
7.2.4 残余应力对焊接件疲劳裂纹扩展的影响	121
7.3 应力比、残余应力、微观组织与裂纹扩展速率的关系	124
8 焊接接头疲劳裂纹扩展速率的估算	126
8.1 残余应力引起的应力强度因子	126
8.2 焊接件疲劳裂纹扩展预测模型的建立	129
8.3 预测值与实验值的比较和验证	130
8.4 焊接结构疲劳裂纹萌生与扩展的基本特征	131
附录 A 疲劳裂纹扩展速率的数据处理	134
参考文献	139
后 记	147

1 概述

1.1 引言

随着科学技术的发展,疲劳研究由浅入深,已经发生了巨大的飞跃,金属疲劳已作为一个独立的学科加以系统的研究和提高。从高周疲劳到低周疲劳,从宏观疲劳性能的研究到晶粒、位错和原子结构,从无限寿命估算到有限寿命估算,以及损伤容限设计和连续损伤力学的研究方法的应用,使其不断地向纵深发展。但是,应该承认,由于疲劳研究涉及的学科领域较广、影响因素复杂、要求的试验技术和测试精度较高,至今人们还没能找到一种可以完整、系统地解释金属疲劳的理论。不同专业的疲劳研究工作者正在潜心钻研,力图对客观存在的疲劳现象给予合理的解释。材料工程领域着重研究疲劳过程中缺陷、微裂纹的形成以及短裂纹的疲劳问题;新型金属材料、复合材料等的疲劳问题。近年来,国内外固体力学领域中一直研究循环过程中的本构方程、遗传记忆规律和损伤力学等在疲劳研究中的应用。

现在,疲劳研究已不再局限于疲劳现象及理论的探讨,正力图应用已获得的理论,有目的地对工程实际问题进行疲劳强度设计与分析,对重要的工程零件及结构进行疲劳寿命的预测,并不乏成功的实例。

在工程疲劳研究中,疲劳寿命的估算仍然是最有实用价值的课题之一,疲劳理论的应用不仅局限在机器构件的金属疲劳,随着焊接结构的广泛应用,焊接件的疲劳理论和应用的研究也越来越受到广泛的重视。

1.2 焊接结构疲劳研究的历史及应用

1.2.1 历史的回顾

金属的焊接,公元前就已经出现。但是,现代焊接技术是19世纪末才开始发展起来的^[1]。20世纪10~20年代,金属电弧焊技术首次用于金属结构的生产。第一艘全焊的远洋舰是1921年建成的。第二次世界大战期间,由于缺乏焊接结构强度和断裂的知识,缺少设计和制造大型焊接结构的经验,以致于有相当多的焊接结构出现了破坏事故^[2,3]。在此期间美国建造的五千多艘商船中,约有一千多艘损坏,一些建筑物的焊接结构也相继发生事故。这些事故的发生阻碍了焊接技术及结构的应用,促使科技工作者对焊接结构的强度和断裂理论进行研究。

从焊接结构的应用开始,人们就注意到焊接件同其他金属构件一样,应重视构件的疲劳强度设计。20世纪20年代(1920—1930),Moor H. F等人就开始研究不同金属材料焊接件疲劳载荷下的试验方法,指出焊接件疲劳试验与金属一般疲劳试验有所差异^[4~7],不仅应研究焊缝处快速凝固的金属,还应注意焊缝两侧由于金属的受热状态不同、组织和性能不同而产生的不同疲劳特性。但是,由于当时检测手段不够完善,受实验设备的局限,同时焊缝中含有各类缺陷较多,实验数据的分散性较大,规律性较差,因而理论的研究不够深入,对焊接结构的力学性能分析也不全面。与常规金属疲劳理论的研究相比,在疲劳理论和试验手段方面都处于初始阶段,没有新的突

破和进展。

20世纪30年代以后,世界上各工业先进国家已经开始大规模应用焊接结构,特别是公路、铁路桥梁、压力容器、船体结构、汽车、机车等结构广泛采用焊接。由于当时缺乏设计和制造大型焊接结构的知识和经验,疲劳设计的规范不够完善。工程的需要推动了理论研究的进展(1931—1950)。焊接和疲劳研究工作者们,采用18世纪末期常规金属疲劳性能的研究方法和手段,测定不同类型焊接形式的S—N曲线及它们的疲劳极限,以适应疲劳强度设计的需要^[8~11]。在此期间,英、美、日研究的文章较多,主要研究的内容是针对当时条件下的焊接工艺、材料、焊剂等对焊缝疲劳性能的影响。美国学者Wilson W. M等人在此期间工作较多,通过实验认真研究了各类钢和各类接头焊后的疲劳性能、疲劳强度与板厚、焊接方法的关系。这些研究成果对焊接结构的疲劳强度设计具有一定的指导意义。但鉴于当时焊接技术和工艺不够发达,无损探伤手段不完善,对焊接过程的冶金分析不够透彻,断裂力学还没有引入到焊接疲劳的领域,因而焊接结构的疲劳设计还偏于保守,可靠性还不高。

宇航工业的发展,对焊接结构疲劳强度设计的研究提出了新的课题。断裂力学为焊接结构疲劳强度的研究开拓了新的天地。进入20世纪50年代(1950—1965年)以后,焊接结构的强度研究由于断裂力学的引入出现了生机和活力^[12~16]。研究表明,几乎所有的焊接接头中,疲劳裂纹都明显地从预先存在的缺陷上开始,存在的这些缺陷可以看做是一条已经开裂了的裂纹。因此,绝大部分焊接结构的全部疲劳寿命都是由裂纹生长的阶段决定的^[17]。从20世纪50年代开始,英国焊接研究所学者Gurney T. R致力于焊接结构疲劳性能的研究,多年来发表了很多有关论文。在大量实验的基础上,他认真分析和研究了不同钢材、不同焊接方式疲劳设计的规范,提出了疲劳条件下焊接缺陷的容限这一新概念^[18]。研究表明,所有的焊接接头都有缺陷,这些缺陷的发现取决于所采用的无损检测方法的灵

敏度,完全消除这些缺陷有时是不必要的。研究的重点应该是如何根据使用的合理要求确定不会引起结构或接头过早破坏并始终保持原状态的缺陷,来作为容限的基础。当然以使用要求为依据的缺陷容限标准的采用,并不意味着可以普遍地降低原来的质量要求^[19~21]。

缺陷容限的原理是以 S—N 曲线为依据,根据焊后金属缺陷的不同形式和数量,通过统计分析和处理,将 S—N 曲线分为不同的质量带。Harrison 将 S—N 曲线分为如图 1-1 所示的若干个区,即 V~Z 等 5 个质量带,V 不容许有缺陷,从 W 到 Z 范围内缺陷尺寸容许增大。该方法从 20 世纪 50 年代开始一直被保留在英国的焊接设计标准中^[22,23]。随着无损检测的发展和试件破坏性检验的增多,必须作出缺陷是否大到影响结构的使用,以致需要修复的程度判断。研究表明^[24~26],可以采用断裂力学来定量评定缺陷的影响,即测定不同材料、不同焊接方法、不同结构的疲劳裂纹扩展速率。近年来,围绕焊缝处的缺陷,对 Paris 公式中各系数的影响所做的研究工作较多;对焊缝热影响区以及该区中不同组织、残余应力对疲劳裂纹扩展的行为影响所做的研究工作较少。

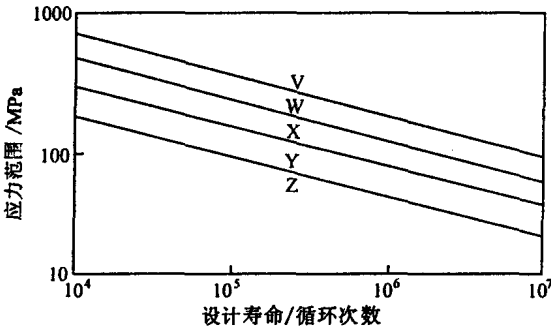


图 1-1 缺陷容限的质量带

20 世纪 60 年代中期以后,随着近代焊接技术、冶金技术和电子计算机技术的发展以及焊接结构形式的不断变化和新材料的出现,

焊接结构疲劳理论研究和设计方法有了新的发展。随着断裂力学的广泛应用和出于工程实际的需要,20世纪70年代末各国纷纷修订疲劳设计规范,自此焊接结构疲劳试验及其理论研究正处于大发展阶段。

1.2.2 理论与工程应用

焊接结构疲劳理论的研究,促进了工程结构的应用。焊接的桥梁结构、房屋建筑在地震力作用下的破坏,海上结构在海浪冲击下的破坏等,这些在动载的作用下,处于弹塑性和塑性受力的状态,属低周疲劳。

日本是个多震国家,地震时结构产生很大的应力与变形,经受若干次这样大的变形后,就要发生破坏。为防止地震对结构的破坏,除要研究结构的刚度外,还要研究容易产生破坏部位的抗疲劳要求。日本由于在这方面的研究取得了较大的进展,改变了以往不敢修建高大建筑物的观点。20世纪60年代以后,高层建筑和高架桥有了较大的发展^[27]。从此,这方面的研究工作大量进行,有许多文献报道了房屋刚架结构、柱与梁连接处焊缝质量及熔深对抵抗循环应变、疲劳破坏的规律^[28~31]。1978年日本仙台地震,炼油厂储油罐遭到破坏,流失 $68\ 100\text{m}^3$,破坏位置在外壳与底板连接的环状T形焊缝处。为解决这类问题,日本有关研究机构对焊缝低周疲劳性能做了大量的试验,提出了某些设防的规定^[32]。天然气、石油的贮存器等压力容器结构的截面应力并不大,往往产生突然性破坏,多数是由于使用期间在焊接接头处或热影响区产生低周疲劳而破坏,有关的研究较多,但系统性不强^[33~35]。

美国1967年开始对公路焊接桥梁进行了规模庞大的疲劳试验,取得了很多宝贵的数据,为疲劳设计理论提供了依据^[36]。

高周及中周疲劳试验研究也逐年增多,美国里海大学自1967年开始对不同类型的公路桥梁进行疲劳试验。德国对起重机走行钢梁

的不同焊接部位进行了随机载荷下的疲劳试验,于1979年发表了实验结果^[37]。

大型结构疲劳试验,在模型上能真实地反映实物的制造工艺、构造细节、残余应力及应力集中等条件,试验的结果是有意义的,但需要的试验机大而复杂,试验耗用的材料较多。因此,除少数大型结构疲劳试验外,很多试验是根据结构的各个焊接接头形状或部件的构造细节,按设备的能力,做成试件试验。各国也大都针对自己生产使用的钢材和焊接工艺进行试验,用其结果作为疲劳强度设计及计算的基础^[38~40]。

焊接缺陷如气孔、夹渣、咬肉、裂纹等,对疲劳寿命有一定影响。1979年,德国开始系统地研究不同类型、不同数量及不同尺寸的焊接缺陷对焊接疲劳寿命的影响,作为规定焊接质量的基础。日本、瑞典等国家也开展了焊接缺陷与疲劳强度的关系的研究工作^[41,42]。

焊缝成形及焊趾角的大小对焊接接头的疲劳强度会产生一定的影响。自20世纪70年代初,就开始研究TIG焊修整焊趾和消除焊趾处残余应力,以提高焊缝的疲劳强度。研究表明,对焊接接头采用TIG焊修整焊趾后,可提高寿命1.6倍,横向角焊可提高2.1倍^[43,44]。但是,当时这些工艺尚未用于大规模生产。

其他方法,如焊接修补、矫形对产品疲劳强度的影响,利用焊趾磨光法、锤击法、等离子焊修整焊趾改善疲劳强度等,在很多工业发达国家(如美国、英国、澳大利亚等),也被列入研究项目。焊接结构疲劳强度的研究也由大结构向微细结构,由宏观向微观发展^[45,46]。

在各种焊接结构的疲劳设计规范中,一直不重视疲劳设计载荷的问题^[47]。通常将以一般设计荷载计算的应力作为疲劳检算的基础,要求在这个应力作用下,能满足一定的循环次数。如我国铁路桥梁疲劳设计规范要求的应力循环次数均为200万次。实际荷载作用在结构上时,由于跨度大小、构造细节、在结构上的位置等诸因素的差异,每个结构细节中都会产生不同的应力谱,这些应力谱不仅与设

计荷载计算的结果不符,就是与按实际荷载作用在结构上的计算结果也不完全一致。事实上,应对不同跨度的桥梁进行实际荷载的应力谱测定,对实测的应力谱进行整理和分析,得出应力密度分布曲线。用实际测定的应力分布来计算常幅设计应力需要的循环次数,也可以用来估算旧有桥梁的剩余寿命,对其他的焊接结构也应进行类似的试验分析。

我国焊接结构的疲劳研究起步较晚。铁路桥梁工程中开展得早些,现在船舶、起重设备、建筑、各类机械,特别是重型机器等焊接结构的疲劳设计也开始涉入这一领域。研究工作的重点是针对各类产品建立和完善设计规范。铁路钢桥的疲劳研究从1963年开始,最初主要针对低碳钢各类焊接接头进行少量的常规疲劳试验。根据这些试验结果,我国设计了成昆铁路钢桥几十座。1975年对这些试验稍加补充后,编制了我国自己的桥梁疲劳设计规范。1973年对15MnVN钢及其焊接结构,如对焊、十字型横向不受力角焊缝、十字型横焊缝受力角焊缝、十字型纵向不受力角焊缝等情况进行试验。这些试验结果已用于1976年建成的北京密云水库白河大桥。所有这些试验也为九江大桥的设计提供了依据^[48,49]。

我国除造船、桥梁设计外,许多大型冶金、矿山机械,包括大量引进设备也采用焊接结构来加工制造。由于没有认真地研究焊缝处疲劳断裂失效及损伤机理,疲劳失效时有发生。如我国1978年制造的一台球罐,使用仅一年,就由于焊缝附近裂纹很快扩展,泄漏的液化石油气着火燃烧,引起整个罐区连锁爆炸着火,造成68人伤亡,直接损失人民币628万元。由此可见,随着焊接结构的广泛应用,焊接结构疲劳强度的研究工作有待拓宽和深入,疲劳断裂的机理及其理论有待深入地探讨。