

## 关于美国国家科学基金会主办的 局部化塑性不稳定性破坏准则讨论会的报告

L Anand O Dillon T A Place B F von Turkovich 编

美国国家科学基金会工程管理部

在大塑性变形下,以狭窄剪切带形式表现的局部化不稳定性是不可避免的。这样的剪切带一旦形成,它们就要继续发展,以至带中的应变可以变得非常大。所以,剪切带是大塑性变形的一种重要的机理,同时它们又经常是最终韧性断裂的重要先兆和所在位置。自70年代初期以来,对剪切局部化现象已进行了广泛的研究,1989年11月14—15日,国家科学基金会(NSF)在华盛顿资助和组织了一个小型讨论会,以评估当前对“局部化塑性不稳定性破坏准则”的认识,并确定所需的研究工作,一是要提高我们对该现象的基础性科学认识,二是要发展我们预报材料工艺缺陷,加工,可加工性的能力以及对所有各类工程材料的深入了解。讨论会的参加者如下。

专门小组成员:

E. Aifantis, Michigan Tech. Univ.	A. Needleman, Brown Univ.
D. Bammann, Sandia Nat. Lab. Livermore.	M. Ortiz, Brown Univ.
J. Bassani, Univ. Pennsylvania	O. Richmond, Aluminum Company of America.
M. Boyce, MIT	H. Rogers, Drexel Univ.
Shun Chio, Chou (仇顺勤), Army Mater. Tech. Lab.	J. Rudnicki, Northwestern Univ.
R. Clifton, Brown Univ.	D. Shockey, SRI.
J. Duffy, Brown Univ.	J. Simo, Stanford Univ.
A. Ghosh, Univ. Michigan.	R. Stevenson, General Motors.
T. Howson, Wyman and Gordon Company.	M. Stout, LA Nat. Lab.
U. S. Lindholm, South West Res. Inst.	R. Wagoner, Ohio State Univ.
M. Mehrabadi, Tulane Univ.	S. Wayne, GTE.
	T. Wright, Ballistic Res. Lab.

美国国家科学基金会(NSF)的参加者: L. Anand, O. Dillon, A. Place, B. F. von Turkovich, B. Ma Donald, K. Chawla.

海军研究局(ONR)的参加者: R. Barsoum, Y. Rajapakse, A. K. Vasudevan.

海军研究所(NRL)的参加者: P. Matic, J. Nemes.

现将由专门小组成员<sup>1)</sup>拟制的本讨论会主题在分析,实验和计算3个方面的“研究需要”叙述如下。

### 1 分析

当前对局部化塑性剪切变形的分析,由于缺乏理论和实验的关键性的比较而受到限制。这些比较可以为发展改善的数学模型提供指导。一个关键性的研究需要,是改善对局部化与

1) 本报告表述的任何意见、看法、结论或建议,都是本讨论会形成的,它并不一定反映国家科学基金会,或会议参加者所属单位的领导们的看法。

材料微结构关系的理解。这是一个具有多方面含义的命题：其范围从初始微结构对导致不稳定性的早期变形的影响，经过在局部化过程中所发生的结构的变化，直至剪切带完全形成之后所造成的微结构。在整个这个过程中，这种演化着的微结构决定着材料的响应。对于剪切带的形成是一个重要的设计考虑的许多工艺过程而言，这种材料响应在描述为分析和设计这些工艺所需的本构模型时，是必须考虑的。对晶体塑性认识上的进展，看来为理解高度局部化变形这类难以对付状态的许多特征行为提供了基础。诸如，几何软化，应变率敏感性，热软化和应变硬化等效应，正在滑移系的尺度上得到了理解。这些效应需要按多晶体规则 (polycrystal codes) 来实现，以提供与实验的全面比较，从而确定这些理论的使用限制。这样的比较应该包括对变形过程中微结构变化，例如织构、晶粒尺度、孔洞等等的测量。

为了处理高度局部化变形这一特殊问题，并揭示其在建立塑性流动的本构模型中的蕴含意义，应该重新考察有关塑性的一些根本问题。例如，这些微结构长度尺度是否都需要包括到理论中去？在位错的协同运动中是否有一些东西必须顾及，以便理解晶体中的精细尺度局部化？在多晶体剪切带的层次上，能否借助滑移带的理论计算来考虑晶粒的转动，从而解释织构的软化？如何才能建立由剪切带连接第二相粒子所导致的破坏的模型。

塑性流动局部化对方向性十分敏感，因此，随着大塑性应变而发展起来的硬化各向异性的演化，便会强烈地影响局部化。这样的例子包括：单晶中滑移系的差动硬化，粉末压实体在偏斜压密过程中孔洞的非球形缩小，以及聚合物在拉伸成形中所发生的应变诱致分子取向等。一般说来，与各向同性分析相比，这些例子中的每一个都对局部化现象的预言有一阶影响。在仔细考察与单晶有关的问题时，我们注意到，虽然潜在硬化 (latent hardening) 的一些简单理论能够定性地预言剪切带的一些行为，但它们并不能描述一些更为根本性的行为，例如，硬化的 3 个阶段和硬化的取向依赖性。因此，对局部化现象的更精确和量化的预言，要求更好地描写各向异性的演化，这就需要做仔细的细观力学分析和实验。

变形和微结构的组织是塑性流动的一个重要方面。这发生在大小不同的所有各种长度尺度上。从位错滑移带层次 (位错塞积) 到位错胞的发展 (位错壁和亚晶粒，驻留滑移带)，以至宏观剪切带 (定态剪切带, Portevin-Le-Chatelier 移动带)。带宽和带间距，传播带的速度，从一种变形花样 (pattern) 到另一种花样的转变，(例如，从胞状结构到层状微观带，从棒状位错脉结构到周期驻留滑移带) 等，诸如此类使人感兴趣的时间-空间形貌已经被观察到，并且在一些情况下还曾被仔细测量过。现在看来，思考如何将能够把握这些空间形貌的物理模型，融汇到现有的塑性理论中去是适宜的。一种可能方式，是将高阶梯度量引入屈服条件或流动应力的表达式中。这类梯度量的根源可以联系到基本性微结构的非均匀演化，这些微结构包括点缺陷，位错，孔洞和晶粒形态。这里的一个有关的问题是要研究完全的平衡律的形式和性质。这些平衡律是指在建立如位错密度之类的微结构变量的通量模型时，所涉及的速率项和散度项中有关的所有内变量的关系。在这样的框架里，与梯度有关的位错动力学模型，已经为驻留滑移带问题中的位错密度和波长提供了一种描述。类似地，对流动应力的梯度修正，已经使人们得到了对定态剪切带的宽度，传播的 Portevin-Le-Chatelier 带的宽度、间距和速度的估计。考虑了这些梯度，并不破坏支配微分方程的椭圆性，同时还提供了一个物理长度尺度，它能消除数值计算中对网格尺寸的依赖性。尚未解决的一

些问题有：由此而造成的附加的边界条件的性质，这种附加条件是梯度的必然要求；此外，为了测量有关的唯象系数而必须的新实验。另一未解决问题是计算宏观应力应变曲线，它是这类微观不稳定性 and 花样的表现形式。

分析工作的目标之一是要得到标度律。这些标度律把所考虑问题的各个重要的物理方面，归纳到无量纲参数的几个数组之中。最起码，存在一种可能性，就是把这样一些标度律与表征材料不稳定性条件的变形图联系起来。对标度律的研究是随着需要适当表述物理问题而发展起来的，这种表述乃是以一种自然的方式去无量纲化了的形式。但是，所要寻找的解所在的参数空间往往是多维的，以致想要系统地探索这个空间，比如用数值方法，是相当不实际的。所以在这里，在各种极端参数值下有特解和渐近解常常能指出解决问题的方向。特别具有吸引力的是，获得那些对本构关系的细节不敏感的结果。

这样的一个例子，是对具有热传导的热粘塑性材料中形成的绝热剪切带的分析，取决于描述问题的精确程度，这里可能有5个或更多的无量纲参量，它们至少包括密度，强度，热容量，热导率，应变率敏感度，软化率，加工硬化率，外加应变率和物理长度尺度等。尽管问题这么复杂，一些研究者仍然得到了许多标度结果。对于热传导忽略不计的幂律材料，已经找到了稳定性边界。对于完全塑性材料，也可找到考虑热传导时的一个稳定边界。当忽略热传导和惯性时，甚至对于加工硬化材料，也可能找到临界应变、扰动幅度和物理参数之间的关系。但是在完全塑性材料中考虑热传导时，可能找到临界应变和无量纲热导率之间的关系。在最后这种情况中，已证明对于弱率硬化材料，其结果仅对初始软化行为敏感，而对大范围温度变化时的细节行为则不敏感。发展一些进一步的“标度律”，对于从事材料加工领域的工程师们将会有重大的帮助。

一般来讲，连续介质中局部化和不稳定性现象都对非均匀性相当敏感。塑性不稳定性局部化，在很宽的材料尺度范围内，确实受到非均匀性的影响。正如对几何缺陷所做的分析表明的，塑性局部化对非均匀性程度的敏感性，要求我们能够把材料加工中的变量，转换为适当的，对非均匀性的度量参量。公差，非均匀变形，材料结构，成分，各向异性取向和第二相粒子等等，都是非均匀性的例子和不稳定性的潜在根源。

为了阐明非均匀性的作用，应该确认出塑性局部化过程中每一尺度上的可测量参量。这些参量应当既便于对现象进行分析描述，又便于在实验室和加工实验中做严格的验证工作。应该把在每个尺度起主导作用的非均匀性予以分离，然后，确定耦合效应，并确定对下一个更大尺度上的局部化的影响。所以，为阐明非均匀性敏感性而定的一组适当的目标，应该能达到以下几点：①能确认每个尺度上的主导非均匀性参量；②能确定各参量的重要的耦合效应；③能确定所需要的物理测量；④能了解每个尺度上的非均匀性是如何放大或减弱总体的材料不稳定性；⑤能为加工控制策略提供一个有力的理论框架。

至此，本文所讨论到的还只是，在材料的变形加工中，剪切带形成所必须的条件。然而，还应该关注，非均匀塑性流动对以后材料行为的影响。对塑性流动的非均匀本质的认识，对于优化产品性质的热学-力学工艺的设计，有极其重要的作用。这类受过去不均匀变形影响的材料行为的例子有：退火和再结晶；疲劳寿命和延性；强度和残余应力等。

由于聚合物在大应变下出现明显的刚度提高（这是由分子链的取向和拉长造成的），它的应变局部化现象与金属中的现象十分不同，这导致颈缩和剪切带的传播。因为永久性的取

向状态通常能改善性能,所以局部化变形的传播是聚合物加工的基础,然而,它也能导致以后的材料破坏。当前,工业和民用聚合物的使用范围很广,发展很快。然而,对聚合物的热粘塑性局部化的认识,仍很幼稚,这给固体力学家和材料科学家提供了特别的机会。

局部化问题在多晶陶瓷和金属基复合材料的粉体加工工艺中也是关键性的。高孔隙度材料的压密必然导致大塑性变形,这就可能导致几个不同尺度上的局部化。从概念上讲,这些方面很类似于在颗粒固体力学中所产生问题。目前,因为我们对这些材料中的原始结构及其演化所起的作用,缺乏完善的知识,这就阻碍了所希望得到的最终产品的有效生产。各向异性结构的演化和局部拉应力的发展,都能造成微裂纹,从而导致压密结果不合要求。最近的工作表明,用孔隙的体积百分比这个参量,单一地来表征微结构是十分不够的。很需要用例如颗粒尺寸,形状,取向(堆积)和接触情况等,来作一些更详细的描述。

应变局部化形成了剪切带,这在设计颗粒材料的整体装运设备时,是一个很重要的因素,起源于料斗和料仓接头处的剪切带,被认为是导致大货仓破坏的原因。对模型货仓的上述接头部位的仓壁应力的观测表明,剪切带内的应力激增,其值差不多是带外的11倍。而对模型料斗中沙粒流的X光摄影,则清楚地显示了该材料中剪切带的萌生和传播。

## 2 实验

改善我们对不稳定过程,包括变形和断裂的认识,对于改进一些金属加工工艺,起着至关重要的作用。实验研究需要考虑微结构变量对不稳定性的影响,并且需要与应力,应变,应变率和温度等的,有精确时间分辨率的测量关联起来。几个特别需要考虑的问题是:

- ①初始微结构的作用;
- ②变形过程中微结构的演化,以及应变局部化之前和之后的演化;
- ③变形过程中再结晶(动态再结晶)的效应和变形之后静态再结晶的效应。

应当运用适当的工具和技术,包括扫描电镜,透射电镜,X射线法,原位观察,断续试验,叠加静水压力实验等,在所有各种尺度水平上研究微结构。变形路径可能会强烈影响所有这些方面。优先考虑的项目和课题应该是那些涉及局部化的细观力学方面的问题。

因为对局部化现象的以上这些研究要用到不同的加工工艺,所以应该在足够宽的温度范围和应变率范围来开展实验,以保证其普遍性。

实验计划应该与材料本构关系,模型化,和数值计算结合起来,以促进发展实验和分析相结合的研究路径。这将鼓励那些能迅速确证模型和计算分析的工作,而这些模型和计算分析又将指导更进一步的实验。发展一组自治的数据,也是很重要的。鉴于所论问题的难度,优先支持应该给予那些把实验、分析和计算结合为一体的自治的研究计划。

现代化的,配有优良测试仪表的加工设备,目前所缺的是,对不稳定性进行模型化所需数据的测量。这个复杂的领域,需要独特、新颖,非常规和贵重的仪器设备。为了推动更多的研究者更广泛地参与这个研究领域,必须建立装备优良的实验设施,并使其广泛开放使用。

## 3 计算

当延性的固体经受大塑性变形时,不稳定性几乎是不可避免的。这种塑性不稳定性具有两重含义:既是断裂的先兆,又是进一步变形的一般机理。发展能预告其发生、演化和继而破坏的办法,无论对有效控制很大一类加工工艺,还是对材料的微结构设计,都是基础性的

工作。例如，我们可以想象，将实时计算用于控制工艺过程将保证所期望的产品性能，或许甚至用于实时裁剪产品的性能，以满足不同的需要。对不稳定性和破坏的“脱机”分析，将有助于澄清如下一些问题：换一种加工方法，换一种材料微结构，将会有什么效果。为了将这种能力变为现实，还有许多工作要做。虽然计算工作是同模型描述及实验研究耦合在一起的，但是，显而易见，准确而快速地计算出局部化和破坏现象的能力，是实现上述可能性的一种基本要素。

值得指出的是，由于上述这些现象具有高度非线性，以及牵涉到复杂的时间和空间历史，上述预言能力便不可避免地要立足于以计算机为基础的数值方法。还有一点也是重要的，由于在可成形的固体中所发生的局部化和破坏都是一些发展过程，因此对这些过程的描述必须是充分耦合的，也就是说，这个描述必须包括对破坏机理的描写在内，同时预言其演化。那种先做应力分析，再把破坏数据带进去的非耦合的计算，对完成上述的任务是不适合的。

还应该强调，精确的预言能力依赖于精确的物理模型。这种物理模型包括：本构关系，边界条件（例如，摩擦），以及对关键的长度尺度和时间尺度的确认。建立精确本构关系的工作，包括细心比较理论预言和实验结果。这里的变形场可能是非均匀的，因此，需要计算。

过去10年来的研究成果，已经为下一步的进展奠定了基础。在一些情况下，这些成果现在可直接付诸应用。在许多情况下，例如用开式模具进行锻造，局部化主要是由几何形状，而不是由材料性质或摩擦所主宰，这时计算工作能够对产品的质量和工艺设计的成本，发挥重大的影响。而当材料的行为起主宰作用时，如果该材料的准确本构关系是现成的话，那么准确预言局部化的发生和局部化带的取向是可能的。看起来已很接近于实用的一类进展是，对2维，甚至是3维的完全耦合的热学-力学问题的求解能力。在更局限一些的情况里，如限于1或2个空间维数，应变局部化的发展和破坏模式是可以计算出来的，其结果与实验定性地吻合，有时甚至是定量地吻合。但是，目前的计算能力需要扩充，以便可靠地预言真实的加工工艺中所出现的局部化和破坏现象。

计算和模型化的问题往往都是不容易解耦的。在计算和模型化问题相耦合的领域中要取得进一步进展的几个关键方面为：

- ①发展本构模型；
- ②用于局部化和其后的破坏时，热效应，率效应和损伤效应的相互作用；
- ③在材料加工中出现的边界条件的符合实际的模型化，例如挤压、轧制和有模成型。

作为模型化和计算相耦合的一个例子，我们来好好考察一下如下情况。基于经典率无关本构关系所计算的塑性流动局部化的一些关键性的响应，都具有固有的网格尺寸依赖性。为了消除这种病态的网格敏感性，需要将本构模型正则化。正则化可以有多种形式，如计及材料的率敏感性，或者对本构关系引入非经典的应变梯度修正。当然，这类正则化必须从物理和数学上被了解清楚和被证明无误。不同的正则化方式向数值计算提出了不同的挑战。它们对数值计算的精度，效率和稳定性的潜在影响必须弄清楚。这里还有一些重要的数学问题，如局部化问题的解的存在性，正则性和稳定性。

在涉及模型化和数值计算的进一步发展中，有两个方面看起来特别重要。一个方面是需要进一步发展大应变非弹性变形的精确本构模型，以适宜计算的需要。这些本构模型无疑应该基于有关变形和/或破坏机理的物理模型。在许多应用中的一个有关的要求是，对问题所

包含的边界条件,特别是摩擦,提供精确的模型和有效的算法。第二个方面则集中于确认适当的材料尺度。剪切带的宽度通常都大大小于任一宏观部分的尺寸。因此,当必须准确地表示剪切带宽度的时候,就需要把不同的长度尺度分解开,这些尺度往往相差3个数量级或更多。在许多情况下,还没有找到一种适当的方式,来把材料的长度尺度放到整个描述中去。比如说,是在边值问题的陈述中直接谈及晶粒或第二相组分的分布好呢?还是发展一种均匀化了的应变梯度型本构关系好呢?对此的任一种选择,都存在有关计算精度和效率的一些重要问题。

数值计算能做出重要贡献的另一种方式是,通过这些计算来分析和了解基本现象。比如,计算研究对于发展以物理为基础的本构模型和破坏模型是至关重要的,特别是对于多相材料是如此。在发展上述这些模型的时候,可能有必要分析“细观”尺度上的塑性不稳定性,这些不稳定性影响到“宏观”均匀化的响应。在这方面应该指出,目前可用的模型大都是只基于一种变形机理或一种破坏机理的。在了解和模型化不同机理的相互作用和/或相互竞争上,例如热软化以及延性孔洞生长造成的损伤,数值计算研究能起很重要的作用。再者,数值计算模型化在设计材料以使其阻止局部化,并具有比现有材料更好的延性上,也能起有效的作用。

显然,也需要实验来验证复杂的,以微结构为基础的本构关系。因此,实验必须要能容纳由于强烈的非线性变形造成的载荷路径的巨大变化,并能容纳可能发展起来的应力场的非均匀性。所以,了解实验观测量,如力和总应变同材料性能的关系,以及了解真实的数据归纳,都包含了计算模型化工作。

在计算方法发展本身,会对理论预言能力有重大影响的几个领域如下:

① 3维塑性不稳定性和破坏现象的计算方法。在这方面,提高和丰富了有限元、边界元等单元方法看来是有前途的。

② 分析应变局部化现象的自适应方法。这可能包括自适应网格细化法和自适应加密法。这些方法以及前面提到的数值办法,都要能用于成形工艺中所遇到的复杂变形历史下出现的局部化和破坏现象。

③ 发展能处理从局部化向断裂转变的计算方法。单元消失的技术已经在处理多孔塑性本构关系时发展起来了,但是,这种方法或是另一些替代方法都需要发展,以适宜破坏模式的范围。

④ 以网格为基础的数值方法的精度和收敛性,建立用于局部化问题的牢固的数学基础。这样一种认识能为发展自适应技术提供基础。

⑤ 开发新型计算机结构型式,特别是大规模并行计算机,以便能用微结构为基础的本构关系,来解决包括局部化和破坏的复杂问题。

#### 4 结论

本讨论会建议,国家科学基金会的力学与结构系统部以及设计与加工系统部,都应大大优先资助若干跨学科的小组在美国的大学从事这个领域的研究,同时要求其他的基金组织也这样做。

白以龙译自: *Int. J. Plasticity*, 6 (1990): 1—9. (董务民校)