



国防特色学术专著·航空宇航科学与技术

National Defense Monograph



板料成形性基本理论

吴建军 周维贤 著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防特色学术专著·航空宇航科学与技术

板料成形性基本理论

吴建军 周维贤 著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社



本书系统地阐述了板料成形性基础理论与实际应用。全书分为8章,其主要内容包括板料的塑性异性现象、塑性异性理论及应用,板料的变形抗力曲线方程,板料拉伸失稳与极限应变,材料物性参数的识别及其在成形过程控制中的应用,板料模拟成形性试验方法,成形性评估参数在典型成形工艺中影响的定性、定量分析,复杂钣金件毛坯展开设计,以及板料冲压零件可成形性的逆向分析模拟方法及其应用。与同类书相比,本书的特点是系统性强,定量计算多,特别是书中所介绍的新的科研成果,能与实际应用相结合。

本书是为从事钣金制品生产和制造的工程技术人员、科学研究人员编写的,同时也可作为高等院校有关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

板料成形性基本理论/吴建军,周维贤著. —西安:西北工业大学出版社,2010.1
国防特色学术专著. 航空宇航科学与技术
ISBN 978-7-5612-2701-5

I. 板… II. ①吴… ②周… III. 材料冲压—成形 IV. TG386.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 218017 号



吴建军 周维贤 著
责任编辑 雷军 王璐

*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwpup.com> E-mail: fxb@nwpup.com

陕西向阳印务有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:12 插页 1 字数:290 千字
2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷 印数:2 000 册
ISBN 978-7-5612-2701-5 定价:25.00 元

前 言

薄板、薄壁管、薄壁型材等薄壁金属可以统称为板金属材料,在本书中简称板料或板材。以板材为原料加工成的各种零件在航空、宇航、汽车机车、电机电器、食品包装、日用五金、建筑等工业部门都获得了广泛应用。而生产板料的企业以及把板料加工成板料制品的加工企业,已是我国国民经济中一个十分重要的部门。

金属板料大多须经塑性加工成各种形状的零件后才能在产品上使用,因此板料加工中的主要问题和困难大多是关于成形方面的,这样便出现了板料的成形性问题。板料的成形性好坏直接关系到产品的成本和使用性能。目前,我国许多产品要用进口板料生产,其原因就是国产板料的成形性差,不能用于相关的产品上。为此,如何评价和改善板料本身的成形性能,如何选择所需要的板料和充分利用其成形性能,已成为板料生产和加工者十分关心的问题。自20世纪80年代以来,我国也进行了这一系列问题的研究,并取得了一些可喜的研究成果,有的已达到国际先进水平。同时有关这方面的国内、外资料也大量涌现。近年来冶金、机械部门的学校和科研、生产单位已普遍重视板料成形性的研究工作,并已有少数学校给本科生或研究生开设此课程。但是,由于至今国内在系统论述和总结板料成形性这方面科研成果的论著几乎空缺,给进一步的研究和教学工作带来较大困难。有鉴于此,笔者结合自己多年的科研实践以及国内、外研究成果,总结归纳后编撰了此书。有关板料成形性问题,笔者在“反映材料正交异性的广义抗力曲线数学模型研究”“板料塑性拉伸变形失稳机理研究”及“材料物性参数辨识与应变控制”等项国家自然科学基金,以及“飞机展开样板数字化设计及成形过程多步模拟”863计划项目和“基于反向模拟法的冲压成形性分析与工艺优化”航空基金等项目资助下进行了全面而又深入的研究。书中所述内容多是以笔者多年来对板料成形性问题研究的素材为基础,主要内容作为科研成果曾在国内、外本专业主要期刊和会议上发表过。

书中重点论述了板料的异性性能,成形性的评估参数及其取值方法,塑性拉伸失稳的类型、准则和在成形极限图预测上的应用,材料物性参数的识别及应用,板料成形快速有限元模拟技术等内容。在以上论述中既重视基本概念的系统阐述,也重视定量计算,以利于在生产、科研实际中能具体应用。与同类书相比,本书的特点是系统性强、定量计算多,特别是书中所介绍的新的科研成果,能与实际应用相结合,这些都是目前国内、外同类书籍不曾做到的。本书主要内容安排如下:第1章介绍板料成形性研究的重要性、成形性研究的范围和性质。第2章介绍板料的塑性异性,主要内容有板料的塑性异性现象、异性塑性理论、异性指数及其各种取值方法以及钛板异性性能变化规律。第3章介绍板料的变形抗力曲线

方程,主要内容有硬化指数的定义、现有抗力曲线方程的类型、方程的优选和拟合方法。第4章介绍拉伸失稳与极限应变,主要内容有板料塑性拉伸失稳的类型和准则,正交异性板失稳特点、成形极限图的预测和应用。第5章介绍材料物性参数的识别及其在成形过程控制中的应用。第6章介绍模拟成形性试验方法,主要内容有弯曲、拉深、扩孔、锥杯等模拟试验原理与规范,以及成形性评估参数在典型成形工艺中影响的定性、定量分析。第7章介绍板料冲压零件可成形性的逆向分析模拟方法及其应用。第8章介绍复杂钣金件毛坯展开方法及应用。

本书由吴建军和周维贤撰写。其中,第1章、第2章2.2、2.3和2.4、第3章3.1、第4章4.1、第5章、第6章6.1、第7章及第8章由吴建军执笔;第2章2.1、第3章3.2和3.3、第4章4.2和4.3、第6章6.2由周维贤执笔;第5章5.1参考了李顺平教授的有关研究资料;全书由吴建军统稿。此外,在编写中还参阅了有关著作和文献。在此,一并谨致诚挚的谢意。

本书是为从事钣金制品生产和制造的工程技术人员、科学研究人员编写的,同时也可作为高等院校有关专业的教材。

鉴于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

著 者

2009年4月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 板料成形性能	1
1.2 板料成形中的应力、应变分析.....	4
第 2 章 板料塑性异性理论	8
2.1 TC1 钛板的机械性能及其异性情况	8
2.2 各向异性屈服准则简介.....	20
2.3 Hill 异性屈服准则及其简化形式.....	24
2.4 面内异性材料的应力、应变状态	34
第 3 章 板料的变形抗力曲线	39
3.1 单向拉伸试验.....	39
3.2 材料变形抗力曲线方程的类别和优选.....	44
3.3 正交异性钛板广义变形抗力曲线方程.....	55
第 4 章 板料成形极限	63
4.1 成形极限曲线.....	63
4.2 分散和局部性失稳准则及成形极限图预测.....	68
4.3 正交异性板的塑性拉伸失稳特征及成形极限图右部预测.....	79
第 5 章 材料物性参数识别与应用	92
5.1 材料参数识别.....	92
5.2 Hill 新屈服准则 m 值识别及应变控制	108
第 6 章 板料成形性试验与成形性评估	119
6.1 基本成形性与模拟成形性	119
6.2 圆孔翻边成形极限的确定	125
第 7 章 板料成形性分析	130
7.1 基于理想成形理论的成形过程模拟方法	130
7.2 理想成形理论在壳体零件成形性分析中的应用	139
7.3 基于理想成形理论的增量分析	144
7.4 理想成形理论在多步成形中的应用	145
7.5 板料多步拉深成形工艺参数优化	150

第 8 章 复杂钣金件毛坯展开设计	162
8.1 几何映射展开方法概述	162
8.2 基于势流原理的分层展开	168
8.3 基于外法向的射线展开	172
参考文献	185

第1章 概述

1.1 板料成形性能

1.1.1 板料成形性能

尽管自动化技术已用于制造各种薄板金属零件、模具和模具零件之中,但这些工艺技术的应用主要还是依赖于人的经验和判断。之所以如此是由于与板料加工相关的可变因素非常多,而且这些因素的相互作用极为复杂,所有这些因素(如金属的流动特性、延展性、模具几何尺寸、模具材料、润滑以及加工速度等)都相互依存,以不同的等级决定零件加工的成败。因此,薄板加工时的成形性能不会决定于一个单一的参数,而是决定于所有因素的综合。

由于这些因素的相互作用,所以薄板加工性能是不容易度量的。不同的成形方法能使某些因素的重要性大于其他一些因素。更进一步地说,甚至薄板零件中的缺陷也不是由单一因素决定的,而是可能由包括金属和加工过程,以及零件设计在内的许多因素决定的。

一个金属板料零件包含有许多部分,这些部分可以采用不同的方式成形,甚至一个区域中的成形能影响其他区域中的成形。一个零件生产的成败决定于某一关键局部所进行的变形,因此,弄清一些基本成形模式是有用的。板料冲压成形的方式很多,通常可用四种基本变形方式来认识,即胀形、拉延、伸长类翻边以及弯曲变形。为了进一步分析板料对各种成形方式的适应能力,在此引入了板料冲压成形性能(简称板料成形性能)的概念。从广义上讲,板料成形性能包括狭义成形性、形状固定性以及抗起皱性。这里着重考虑狭义成形性能,即拉深性能、胀形性能、翻边性能、弯曲性能以及复合成形性能等。

板料成形性能可简单地定义为:金属板料通过塑性变形改变形状的能力。板料基本机械性能可采用拉伸试验测量,通过测量得出两类不同的机械性能:一是强度特性,例如屈服强度、拉伸强度;二是延伸性。从狭义上来说,板料成形性能的评价包括抗变形能力的测量(强度)和断裂前拉伸变形程度的测定(延伸性)。然而,要弄清楚板料成形性能测量的重点是预测和测量断裂之前的变形能力。据此,本书将会用到被限制的板料成形性能的概念。板料成形性能表示材料变形的等级,能在特定的板料成形过程中获得没有不良情况的变形,这种不良状况指裂缝或断裂,但也可能是其他商业上不允许的一些情况,例如不良表面、板料起皱、模具不能充满等。

1.1.2 板料成形性能的影响因素

板料成形性能是一项复杂的特性,因为它是与非常复杂的成形环境相关的。一般来说,板

料成形性能依赖于压力、拉力、拉伸速率、温度等与金属抵抗伸长断裂有关的因素,金属材料的尺寸、形状、第二相微粒的分布状况等对其性能影响也很大。板料成形过程不是稳定不变的,而是一个逐步变化的过程。压力和拉力的分布,决定于许多重要的工艺参数,例如模具的设计、工件尺寸形状和润滑。控制这些参数以及一些基本的材料参数,可增加金属材料在断裂之前的塑性变形程度。

虽然有许多因素能影响板料成形性能,但这里只讨论那些作为重要影响因素而且已被充分认识的一些因素。如果概括地将这些因素分为加工因素和材料因素,那么如模具几何参数、模具材料、压板、润滑、施压速度等可以归结为加工因素。一般情况下,加工因素决定板料上外载荷的特性,而材料因素决定材料对所施加载荷的反应。

1. 加工因素

冲头和凹模的几何参数、结构以及压板等因素是加工中重要的因素。因此它们基本决定了成形加工的约束。冲头和凹模的圆角半径是这些参数中最关键的参数。小冲头圆角半径用于加工零件上尖锐的特征线。但是这种尖锐的部分会增加应力集中而引起制造困难。这种应力集中阻碍了变形向临近区域的传播,增加了成形失败的可能性。

很明显,加大压板压力会增加变形中的拉伸形式,使其超越出压延形式,过大的压板压力会引起撕裂,过小的压板压力会引起起皱。

在许多多步成形加工中,在某一步承受了拉伸变形的区域在下一步的加工中可能承受压缩变形,反之亦然。加载路径上这样的变化,对于金属的性能曲线有重大影响,这种成形路径的变化对零件的最终成形是十分关键的。当没有进一步地改变尺寸的加工时,最后一步加工应为修形以及必要的修孔。

拉深或弯曲一块低延展、高强度的板料时,通常采用橡皮成形(橡皮背后加以液压)。压应力的好处在于有助于材料均匀变薄,减少集中于一个小范围的应变。另外,在弯曲时,可减少回弹,对于难成形金属常采用此方法。压力加工速度的影响不好描述也不易弄清,提高速度会略微减少金属的延展性,但却能显著减少模具与板料的摩擦力,使变形更均匀。

2. 材料因素

在成形时,极为重要的材料特性是塑性流动和断裂特性。这些特性主要由金属化学成分、铸造工艺、热轧、冷轧或铸造特性决定。提高金属的强度通常可使其延展性减小,这类方法主要有:①可产生固溶体硬化的合金法;②能产生沉淀或弥散强化的第二相;③细晶和可提高应力强度的冷加工;④硬相,如钢中的马氏体。在制造弯曲度不大的零件时,材料的屈服强度和弹性特性非常重要。

不论是低温或高温情况,塑性断裂是与结构相关的过程。塑性断裂起始于第二相微粒、夹杂或已存在的空洞,因而,可以预料塑性断裂应力将随第二相微粒的增加而下降。然而,第二相微粒的弥散、第二相微粒的内部脆性以及微粒与基体的联系也是引起塑性断裂的重要因素。此外,晶界上坚硬的第二相组织也特别容易造成塑性断裂。

板料经塑性加工后,总的来说,第二相组织将表现出与板料变形大致相符的形状和分布。另外,对于冷加工,一般会形成有取向的第二相晶粒纤维和有取向的晶界滑移面。所有这些将导致板料的机械特性随方向而变化,因此板料的机械性能是各向异性的。一般情况下,拉伸塑

性、疲劳特性和断裂强度在横向(垂直于纤维方向)上比长度方向(沿纤维方向)上的低。上述各向异性在评价板料成形性能的试验中应加以考虑。

1.1.3 板料成形时的缺陷

一般来讲,确定的某种工艺和确定的材料决定了一定的缺陷。然而,板料撕裂这种最常见的缺陷可以在任何只有压缩和拉伸的成形过程中看到。撕裂的先兆是产生变薄或局部颈缩现象,这样就有可能产生虽无断裂但却质量不佳的部分。

另外两种类型的板料成形缺陷是折叠与起皱,这是由于板料受压力作用而产生的。扭曲则是由于板料各个方向上受拉不均匀所致。如果在冲压中不消除这类缺陷,而是让其出现在已成形的零件表面部分,往往也是不可接受的。另外,这些缺陷的发展也能阻碍金属向模具内的流动,而使成形过程无法顺利完成。例如,在板料拉深中,由于起皱而造成的金属流动受阻将会直接导致板料的撕裂。

其他与大型薄板零件相关的缺陷主要是实际形状与预期的形状不一致,这是由于材料的弹性回复造成的。通常可以采取将板料弯曲略微过度的方法补偿弹性回复造成的偏差,这样就可以在零件从模具中取出之后得到预期的形状。由于回弹,在大型汽车覆盖件生产中会产生一个常见的所谓“金属松弛”的缺陷。这是由于零件上某些回弹的区域没有产生足够的塑性变形以使其从模具中取出之后仍保持拉紧的形态,这就产生了“金属松弛”现象。另外,其他一些类型的缺陷也会在成形时出现,其中,“鳄鱼皮”状缺陷则是由于吕德斯线会在沸腾钢中出现而产生的,相似的缺陷也会在铝合金板中出现。大的晶粒使金属表面变得粗糙(像“橘皮”),这会降低金属表面光洁度,这种缺陷在一些不外露的板料表面上是允许的。

模具的状况(如剪切不锋利)也可导致诸如在剪切边缘和孔边出现毛刺的现象,而毛边上的细小裂纹会在以后的成形加工(或者零件使用)中引起大的裂纹。因此,这些都是不允许的。润滑不良以及模具与板料接触面之间金属碎屑的积累,将会引起板料刮伤、粘接,或出现擦痕。

1.1.4 板料成形性能分析

简单地说,一张板料经加工成为有用的形状,产生所需形状的变形总和叫做成形应变。成形应变在冲压变形中不是一直不变的,实际上,它可能从一点到另一点就产生剧烈的变化。如果板料成形时,某一点达到了板料极限变形能力,即说明板料达到了成形极限,超过这一点,板料就会破裂,这个冲压件也就是一个废品了。也就是说,零件上99%的部分没有超过成形极限并不重要,但只要有一点的变形超过成形极限,板料即被破坏。通过评估成形应变的程度和材料的成形极限,可以设计出避免冲压破坏的方法。这一过程就叫做板料成形性能分析。

基本的成形性能分析主要包括以下四个方面:

- (1) 确定成形应变并知道从一点到另一点应变是如何变化的。
- (2) 确定成形应变在零件成形时某些特殊点上的应变是如何增加的。
- (3) 确定板料成形极限。成形极限一般用成形极限图或成形极限曲线来表示。
- (4) 综合考虑工具、压力、板料金属、润滑对增加或减少成形应变因素的影响。

1.2 板料成形中的应力、应变分析

1.2.1 应力

简单地说,应力就是单位面积上的作用力。两种基本的不同类型的应力状况是很容易分辨的。如图 1.1 所示, P 是沿着试件轴线方向的拉力, S_0 是试件的横截面积, A 面与横截面之间的夹角为 θ ,则 A 面面积是 $S_0/\cos\theta$,作用在 A 面上的正应力为

$$\sigma = \frac{P\cos\theta}{S_0}$$

作用在 A 面上的剪应力是

$$\tau = \frac{P\sin\theta\cos\theta}{S_0}$$

平面上的剪应力能引起滑移。

如果正应力是基于外力作用的实际面积计算的,那么它就是真实应力。如果正应力是基于未加载之前的初始面积计算的,那么它就被定义为工程正应力。

一般一点上的应力状态可由 3 个正应力和 6 个剪应力来确定。主应力平行于 3 个互相垂直的主轴,并垂直于 3 个主平面。3 个主平面上没有剪应力。任何复杂的应力状态都可以通过 3 个主应力表示。通常习惯上用 σ_1, σ_2 和 σ_3 来表示主应力,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

1.2.2 应变

应变是尺寸上的变化。假设试件的标距长度为 L_0 ,且 L_0 在拉力作用下变为 L_1 ,则工程应变表示为

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

如果试件从初始长度 L_0 被压缩到 L_1 ,那么,用上式计算出的应变是负值。

不仅物体长度上的变化可以引起变形,而且物体内两个边之间的夹角的变化也可以引起变形。以直角的角度变化量来定义剪切应变。如图 1.2 所示为一个单元体受剪应力作用而引起的应变。 P 点的位置初始状态是 90° ,由于施加了一个剪应力而产生了一个很小的角度变化,其剪应变可表示为

$$\frac{\Delta\gamma_\tau}{\gamma_y} = \tan\phi_{xy} \approx \phi_{xy}$$

与一点应力相似,完整地描述物体内一点的应变需要 3 个正应变和 6 个剪应变。

工程应变的定义与原始长度 L_0 有关,这样的应变定义对弹性变形是合适的,因为在弹性

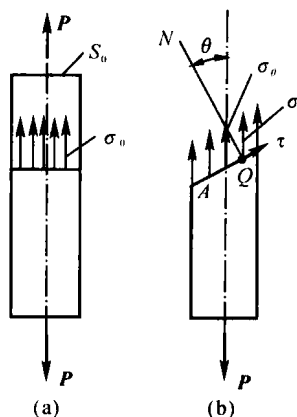


图 1.1 单向均匀拉伸时的应力

变形中材料的伸长量很小。然而,在金属成形过程中,应变通常很大,不可能再把应变的确定放在初始标距 L_0 的基础上。这时,应变应定义为真实应变。真实应变与瞬时标距的长度有关,它可定义为

$$\epsilon = \sum \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \frac{L_3 - L_2}{L_2} + \dots + \frac{L_{n+1} - L_n}{L_n}$$

或

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

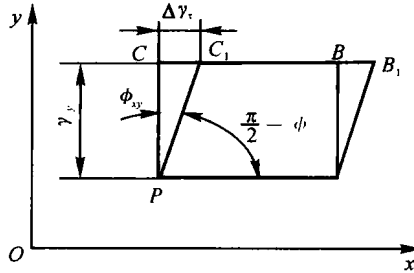


图 1.2 剪切变形

真实应变与工程应变的关系为

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(e + 1)$$

真实应变与工程应变的比较见表 1.1。

表 1.1 真实应变与工程应变的比较

真实应变 ϵ	0.01	0.1	0.2	0.5	1.0
工程应变 e	0.01	0.15	0.22	0.65	1.72

1.2.3 体积不变

金属塑性变形可导致金属体积产生大约 0.1% 的变化,这样就可以简单地认为体积不变这个关系存在。体积不变在分析金属加工过程中有很大的价值。例如,长方体试件的长、宽、高在变形前分别为 l_0, w_0 和 h_0 ,变形后是 l_1, w_1 和 h_1 ,则有

$$l_0 w_0 h_0 = l_1 w_1 h_1$$

对以上等式两端取自然对数,得

$$\ln \frac{h_1}{h_0} + \ln \frac{w_1}{w_0} + \ln \frac{l_1}{l_0} = 0$$

或

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

这样,3 个主应变之和为零。利用这个关系,当两个主应变已知时,即可得到第三个主应变。

金属加工的变形通常可用横截面积的减小量 φ 表示,即

$$\varphi = \frac{A_0 - A_1}{A_0}$$

由于体积不变, $A_0 L_0 = A_1 L_1$, 所以可得

$$\ln \frac{L_1}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{1}{1 - \varphi}$$

1.2.4 板料应力、应变状态

因为工件和工具的几何尺寸不同,而且变形时施加力的方式不同,所以不同的板料加工过程会有不同的应变状态。一般对板料变形状态可进行如下分类:

- (1) 两向等拉 — 单向拉伸;
- (2) 单向拉伸 — 单向压缩。

如图 1.3 所示,在冲压过程中,两向等拉 — 单向拉伸区间属于板料胀形区域,其中包括如宽板拉伸的平面应变状态;单向拉伸 — 单向压缩属于板料压延区域,例如,深拉杯形件的凸缘部分,其中包括纯剪应变状态。对于各向同性材料,冲压中所遇到的平面应力状态如图 1.4 所示。

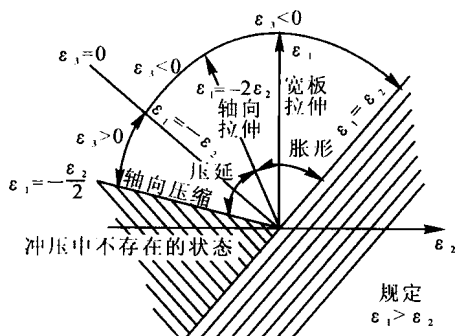


图 1.3 冲压中所遇平面应变状态

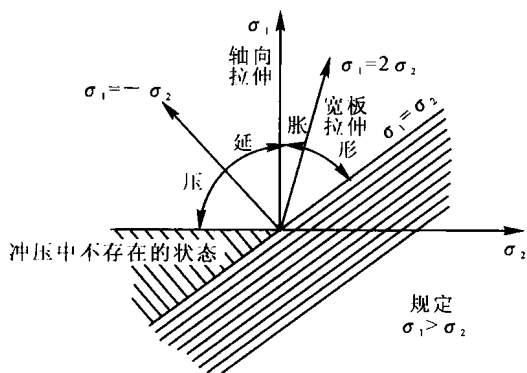


图 1.4 冲压中所遇平面应力状态

应该注意,有两种状态,常常出现在金属塑性加工过程中,即平面应力状态和平面应变状态。这里的“平面”表示局限于二维状态的情况。平面应力是应力都局限在工件的平面方向上。具体地讲就是,当工件的某一个方向的尺寸与其他两个方向的尺寸相比很小时,设想加载的力作用于工件对称平面上,例如,板料的受载、薄壁管受内压等。在平面状态下,分析应力、应变的莫尔圆法十分有用。

在 3 个主应变中,其中一个应变为零时,就是所谓的平面应变,例如,细长工件受到横向均布载荷,以及一个有槽的薄板受拉力作用的情况。宽板滚压加工中材料的应变状态即为平面应变状态,这时,在宽度方向上没有变形。有一点必须注意,虽然,对平面应变来说,有一方向应变为零,但在这个方向上还是有应力作用的,因为对塑性变形来说,在变形为零的方向上应力的值是其他两个主应力的平均值,即 $\sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ 。滑移线法通常适用于金属平面应变

状态下的应力、应变分析。

金属塑性加工中的应变情况常常是很复杂的。当材料、温度、变形速度一定时,压应力越大,材料可加工性能就越好。这可用平均应力(也就是静水压应力)来表示,即

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

最后应注意的是,断裂是一个与局部应力状态有关的受力过程。因此,在一个压缩占优势的变形过程中,由于摩擦或一些能导致变形不均匀的因素,局部的拉应力也可能增加。

1.2.5 屈服准则

金属是否易于屈服或易于流动是影响其成形性能的一个重要方面。如果金属能在应力很低的情况下变形,如超塑成形,变形工件各处的应力越低,断裂的可能性也就越小。显然,除材料成分、变形温度等因素外,应力状态也很重要。金属流动是由于单个晶体的滑移产生的,而滑移是由于剪应力引起的,因此,显然可用最大剪应力准则来预测塑性流动的开始,即

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{\sigma_s}{2}$$

式中, τ_{\max} 是最大剪应力, σ_s 是单向拉伸或单向压缩试验中测出的屈服应力。

虽然,最大剪应力准则可以使用,但是这一准则却忽略了主应力 σ_2 的影响。因此, Mises 提出了一个更为完整的屈服准则,即

$$2\sigma_s^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$$

如果屈服应力 σ_s 已知, σ_1 和 σ_3 能够测量,则可以用 Mises 准则来确定 σ_2 。

第 2 章 板料塑性异性理论

2.1 TC1 钛板的机械性能及其异性情况

2.1.1 试验用材料的成分

实践表明,目前钛板的机械性能并不是很稳定的,不要说是不同厂、不同炉号的性能不同,即使是同一板料,在不同的位置其性能也有着不小的差异。如果轧制板材的工艺规范是相同的,则造成这种状况就与材料的化学成分及其分布的均匀程度有关。如表 2.1 所示是试验所用板料的化学成分和它们的供应状态。如果板料的成分和状态与表 2.1 所列数据不同,则可以预计其性能会有差别。

表 2.1 试验用的 TC1 材料板料的化学成分

板厚 mm	生产厂	炉号	供应 状态	化学成分的质量分数 / (%)									
				C	Mn	Si	Ni	Fe	Al	N	H	O	Ti
0.6	902	531-202017	M	0.09	1.54	0.09		0.055	1.75	0.025	0.008 4	0.12	其余
0.8	902	531-202016	M	< 0.017	1.51	0.10		0.03	1.66	0.017	0.004 4	0.103	其余
1.0	902	01531-07	M	< 0.08	1.4	0.02	0.03	0.08	1.6	0.025	0.005 9	0.12	其余
					1.5			0.09	1.7				
		01531-06	M	< 0.08	1.3	0.02		1.0	1.6	0.025	0.004 4	0.11	其余
					1.5			1.11	1.7				
1.2	苏家屯	70-806	M	0.05	1.32	0.037	0.025 2	0.031	2.17		0.001	1.12	其余
							0.050	0.016					
1.5	上钢 三厂	022-346	M	0.019	0.86	0.04	0.019	0.12	0.08				其余
				0.017	1.62		0.020	0.03	2.17				
2.0	抚顺	9A190281	退酸	0.07	1.37	0.03		0.07	1.43	0.027	0.010 5		其余

2.1.2 试验方法

试件尺寸是按规定的标准尺寸制作的,标距长度是 50 mm;不过,因所用测量仪器工作范

围的限制,划线长度只取中间部分的40 mm。因此,试件端头影响是足以避免的。

试件的厚度在1.0 mm以下的板料是在10 kN拉力试验机上进行试验的,试件的厚度在1.2~2.0 mm的板料是在100 kN拉力机上进行试验的。因测量工具的限制,本试验仅测定试件的屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 、强度极限 σ_b 、均匀拉伸应变 $\epsilon_{\text{均匀}}$ 、断裂剖面收缩率 $\varphi_{\text{断}}$ 、最大载荷时的厚向异性指数 $R_{P_{\text{max}}}$ 和拉断后试件最窄剖面的厚向异性指数 $R_{\text{断}}$ 。变形前、后标距长度的测量是在工具显微镜上进行的,其最小刻度为0.01 mm。试件的宽度和厚度则是用尖头百分尺进行测量的,其最小刻度也是0.01 mm。

屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 是这样确定的:测好试件的原始数据后,将试件装上拉力试验机进行拉伸,加载到比估计的 $\sigma_{0.2}$ 值低20 MPa左右时停止加载,卸载并取下试件,在工具显微镜上测量标距伸长量;测完后再装上拉力机继续拉伸,再加载到所受的应力比上次增加10 MPa时又停止,卸载并取下试件,在工具显微镜上测量标距伸长量。这样重复,直到测得的拉伸应变大于0.2%时为止。然后在最后二个数据间按插入法确定 $\sigma_{0.2}$ 的数值。

强度极限 σ_b 的确定:记下试验过程中拉力机上拉力刻度盘上指示的最大载荷,将其除以试件的原始平均截面积(取原始最小截面积似乎更好),所得结果就作为强度极限 σ_b 的值。

均匀拉伸应变 $\epsilon_{\text{均匀}}$ 的确定:从理论上讲,试件在受载过程中,最大载荷出现时刻的拉伸应变就是它的均匀拉伸应变 $\epsilon_{\text{均匀}}$,因为在受最大载荷后试件就进入不均匀变形阶段了。但是在实际中,由于加载最大载荷时,载荷变化极其缓慢,要准确地确定“最大载荷时刻”非常困难,往往不是偏前就是偏后,这样确定的 $\epsilon_{\text{均匀}}$ 偏差就相当大。在本试验中, $\epsilon_{\text{均匀}}$ 是这样确定的:在试件加载到拉力机的载荷指针停止上升时,停止加载,卸下试件,并在工具显微镜上测量标距长度,计算出拉伸应变。然后再装上试件继续加载,到达最大载荷,直到载荷指针开始下降时再卸载并取下试件,再次测量标距长度,计算出拉伸应变。取这前后两个拉伸应变的平均值作为均匀拉伸应变 $\epsilon_{\text{均匀}}$ 。

最大载荷时的厚向异性指数 $R_{P_{\text{max}}}$ 的确定:在测量最大载荷开始和结束时刻的拉伸应变的同时,另用百分尺测量试件的几处宽度,取其平均值为平均宽度,并据此算出宽度方向的应变 ϵ_b ;再按体积不变条件,取该时刻的伸长应变与宽度应变之差为厚度方向的应变 ϵ_t 。按定义,厚向异性指数是 $R = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_t}$ 。不过,本试验中也是取最大载荷开始和停止两时刻的两个厚向异性指数的平均值作为最大载荷时的厚向异性指数 $R_{P_{\text{max}}}$ 。

断裂剖面的收缩率 $\varphi_{\text{断}}$ 的确定:将拉断后的试件放在工具显微镜下按断裂面拼好,测出它最窄(细颈)部分的宽度;取下,再用百分尺测得它断裂边缘处的厚度,算得试件拉断时的最小截面积;再按该处的原始截面积算出试件的断裂剖面收缩率 $\varphi_{\text{断}}$ 。

拉断试件最窄截面处厚向异性指数 $R_{\text{断}}$ 的确定:在 $\varphi_{\text{断}}$ 测量的基础上,可以算得拉断试件最窄截面处的宽度应变和厚度应变,从而算出 $R_{\text{断}}$ 的数值。应注意的是,这里的 $R_{\text{断}}$,并不是沿试件断裂面(通常它与试件轴线不垂直)测定的,而且,沿试件最窄截面的厚度变化也是不一样的。所以,这样算得的 $R_{\text{断}}$ 并不能很确切地代表试件断裂处的材料性质,不过,因它测量方便,故就这样用它而已。

实践表明,用0.01 mm读数刻度的量具测量精度还达不到要求,0.2%残余变形和厚度变

化必须非常细心才能测准;另外, $\epsilon_{\text{均匀}}$ 的确定方法似乎也不十分满意。这些都有待于进一步改善。

2.1.3 试验结果

表 2.2 所示为试验得到的数据。由于性能的不稳定,数值有一定的波动范围;除个别数据外,波动范围一般小于 5%。那些个别特别偏大或者偏小的数据,有可能正是反映了材料性质突出的差异;对于 $\epsilon_{\text{均匀}}$,则可能还包含着判定最大载荷的到达和下降的视差的影响,所以它的波动范围比其他试验内容稍大。

尽管如此,就各个平均值来说,仍存在下述明显规律:

(1) 除厚度为 0.6 mm, 0.8 mm 的板料外,其余 5 种厚度材料的 $\sigma_{0.2}$,都是横纹方向的值较大,45° 方向的次之,顺纹方向的较小。厚度为 0.6 mm, 0.8 mm 的板料则有所不同,45° 方向的 $\sigma_{0.2}$ 比横纹、顺纹方向的都小。规律上为何有此差别,有待进一步探讨。

$\sigma_{0.2}$ 在材料纤维方向上的差别,相对差值小的为 2.5%,大的达 14% 左右,所以并不是不显著的。

(2) 除厚度为 2.0 mm 的板料外,其余 6 种厚度材料的强度极限 σ_b ,都是顺纹方向的值较大,横纹方向的次之,45° 方向的较小。就顺、横纹方向性能不等来看,强度极限最小值大概在大于 45° 方向的某个地方。对于厚度为 2.0 mm 的板料,则有所不同,它的强度极限是横纹方向的值较大,顺纹方向的次之,45° 方向的较小。

σ_b 的差别,一般为 5% ~ 6%,最大也不超过 10%。

(3) 除厚度为 0.5 mm 的板料外,均匀拉伸应变 $\epsilon_{\text{均匀}}$ 都是顺纹方向的值较大,45° 方向的次之,横纹方向的较小。它们的差别比较显著,一般为 10% ~ 30%,最大可达 60% 左右,这可能与不易测量准确有关。厚度为 0.5 mm 的板料则是顺纹方向的值较大,横纹方向的次之,45° 方向的较小。

(4) 拉断收缩率 $\varphi_{\text{断}}$ 则有三种类型。厚度为 0.5 mm 和 1.0 mm 的板料,顺纹方向的 $\varphi_{\text{断}}$ 值较小,45° 方向和横纹方向的基本上差不多,略大一些。厚度为 0.6 mm 和 0.8 mm 的板料,则是随着与顺纹方向的夹角的增大其 $\varphi_{\text{断}}$ 值逐渐增大。厚度为 1.2 mm, 1.5 mm 和 2.0 mm 的板料又有不同,虽然它们仍是顺纹方向的 $\varphi_{\text{断}}$ 值较小,但就 45° 方向与横纹方向相比较,前者的明显比后者的大了。

材料在不同纤维方向上 $\varphi_{\text{断}}$ 的差别,其相对差值一般为 15% ~ 18%,小的为 7% 左右,大的可达 30% 左右。

(5) 至于最大载荷和断裂时的厚向异性指数 R ,除一个数据可能是有问题的外,其余的都是顺纹方向的较小,45° 方向的较大,横纹方向的次之;后面的两个只对厚度为 0.5 mm 的板料差别稍大,其余的差别都是微小的。

不同方向上厚向异性指数 R 值的差别是比较显著的,一般为 100% 左右,少者为 10% ~ 40%,多者达 140% ~ 180%。不同厚度材料 R 值的差别是比较显著的,例如,厚度为 0.8 mm 的板料比厚度为 2.0 mm 的板料的 R 值大约 1 倍。