

14. 加工与生产

首席作者 F. A. Leckie R. M. McMecking
(Illinois 大学理论和应用力学系)

对初稿的审阅意见由 L. Anand, S.N. Atluri, J.A.M. Boulet, J. Dally, R.D. James, R.W. Perkins 和 K.R. Rajagopal 提供.

提要 讨论了涉及成型加工力学的一般问题。特殊课题包括：①电子器件的加工；②柔性机器人系统；③现代材料的生产方法；④最佳性能的工艺控制。

14.1 引言

在金属的成型过程中，加工力学的一般作用是提供对作用载荷、作用应力和应变进行计算的手段，从而预测成品中的残余应力和应变。然而，它所关心的范围已扩大到包括改变成品中材料性能的新工艺，以便使强度性能适应不同场合的需要。此外，聚合物、复合材料和表面涂层的加工中出现的一些新问题也很快表现更大的重要性。

成型工艺中的一般问题，是系统地阐述能够描述大应变存在情况下出现应力和应变场的力学。甚至对于容易描述其力学性能的材料，一种详尽的暂态分析也可能涉及大量的计算，以致这些计算实际上不为人们所感兴趣。因而就需要寻找更合适的计算方法，无需进行详尽的暂态分析就能确定定常态条件。除了进行计算的能力之外，还必须研究材料的内部状态。因此，必须模拟例如相变、空洞扩展和体积变化等物理过程的发展。除了金属成型工艺如拔拉、轧制、挤压和铸造等之外，一般生产过程的应用将为更好地了解爆炸成型等工艺以及传统和惯性焊接等连接工艺提供可能性。焊件材料性能和残余应力状态的变化可能大大影响成品的性能，尤其当焊件是承受主要载荷时更是如此。如能预测和控制加工工艺的性能，那就将为生产稳定可靠的产品创造了可能性。

生产工艺原理的合适成型模型问题向固体力学提出了多方面新的挑战。下面讨论这类问题的一些有代表性的例子。

聚合物的流动特性连同控制增强纤维方向的规律一起，在成型工艺的力学方面和确定所制成部件的强度方面都起着作用。研究能描述流动纤维方向和强度特性的合适模型，对力学是一个巨大的挑战。描述在极大应变和大应变率下材料非线性行为的本构方程，构成了至今尚未完全解决的问题。不论是理论研究还是多轴应力实验结果，都要求对它们有充分的了解。涂料沉积在金属上面能够改进象疲劳之类的表面性能，同时却保持了母材金属的整体性能。根据所涉及部件的成分，可以用化学粘合剂或力学粘合剂将涂料粘附在基体上。还可以通过应用如激光等提供的强热点源来使用涂料。为了研究合适的加工模型，必须考虑传热，流体力学和固体力学，材料的相变以及化学过程。正因为问题很困难，研制的制造方法和试验方法的费用肯定非常昂贵，付出的代价将是非常可观的。另一种整体成型工艺是利用如炸

药等强大的能源将无定形的金属粉末爆炸压实成型。问题在于既要压实粉末又要保留它未形成占优势晶体结构的无定形时的特性。这种工艺的可靠性将大大借助于对这种工艺所涉及的力学机理有正确的定量了解。

除了上面提到的一般性质的问题，下面几节还提出特别迫切的工艺和问题方面的课题。

14.2 电子器件的加工

14.2.1 集成电路器件中的残余应力 由于热膨胀系数的失调以及制造实际器件时所处的中等高温条件，在典型的集成电路器件中总是出现很大的残余应力。当这些器件其后又受到电场的作用时，这些残余应力就可能导至不希望形成的空洞或裂纹，或产生所谓的“电迁移”破坏。这个问题需要研究层状薄膜中的残余应力，同样也需要研究真实器件结构的三维应力分析。因为由残余应力所引起的问题，将进一步认定芯片上镀金属线的数目增加（即争取小于微米的导线图案在芯片上形成），所以为了生产镀金属线密度更高的芯片，必须搞清楚并解决这些问题。也有可能作出更好的组装设计。应当指出，每个芯片制造厂实际上都有由于残余应力的存在而引起的问题。

14.2.2 电连接生产的分析 软钎焊和其他连接广泛用于把电子器件连接在一起。其他连接还广泛用于把电子器件与集成电路组件连接在一起。软钎焊过程包括熔化、相变和热应力产生，并能导致内部受压孔隙的发展。连接的质量可能影响电性能、强度、抗化学蚀腐能力以及热学力学疲劳。软钎焊中热学力学过程（thermomechanical processes）的分析，利用了力学的原理，利用了固化作用、液-固混物流动和非弹性响应的本构律资料。如果力学问题能得到解决，就能更好地控制软钎焊的质量。把连接设计得越精密，就越能避免附近材料的损伤（例如开裂）问题。目前软钎焊和其他连接的设计采用试试改改的办法来进行。这限制了能进行试验构形的范围，并且并不总是有可能获得一种有效的优选结果。

14.2.3 磁头的技术问题 磁带录音技术的最紧迫问题，是生产磁头尽可能紧靠磁盘浮动的磁头-空气轴承-磁盘系统。虽然磁头和磁盘相互作用是很有兴趣的一类固体力学问题，但是由于磁头不是猛撞磁盘就是把磁盘表面碰撞成很粗糙，因此还存在着磁盘表面磨损和磨蚀等重要问题。磨损和磨蚀导致所录下的信息受到损害，因此一般不能承担现代计算或信息存储任务。与录音磁盘的寿命一样，录音系统的效率和可靠性已大大提高。除非可抹除信息的光（激光）盘成为可能，否则磁录音是不大可能在信息存储领域失掉其优越地位的。

14.2.4 生产电子器件过程中的腐蚀问题 生产电子器件的一种常用方法是腐蚀掉多层结构中某些层的某些区域。这些层中常含有残余应力而影响化学反应速率，此外还包括扩散作用。这种过程的力学是了解这个问题所需的方法的一部分。可以做到更精密地控制这种生产方法。也可以更好地控制形状。可以减少浪费，并且腐蚀过程可以比目前所用的经验方法要快得多。目前，腐蚀法由于可能产生不希望出现的结果而有时避免采用，于是不得不采用效率不高的技术。

14.3 柔性机器人系统的控制

14.3.1 机构和机器人装置柔性元件的动力学 本问题是发展分析方法来预测轻型机构或机器人在大变形和高速运动下元件的动态响应。对于在此系统中将要应用的控制方法来说，叠加在一受约束运动上的运动的稳定性特别重要。这将导致能够设计用更快的响应和更好的精度来表征的重量更轻的系统，这类轻型设备的特殊用途之一可能是用于宇宙空间中进

行生产。

14.3.2 柔性机器人系统的控制 本问题基本上是计及大变形的柔性结构的动态响应分析跟控制方法分析的结合。这个问题的一部分将是研究传感方法来确定计及振动的柔性构件的结构。本问题的一个重要方面是根据有限多个传感设备所获得的数据来识别系统的响应。这将使机器人设备具有更好的性能。

14.3.3 传感的力学 有两个重要的领域：①研制触觉系统，用来握住柔软的或脆硬的产品；②研制以声学原理或其他力学原理为基础的传感系统。机器人的许多应用，如食品的装运或敏感电子元件的加工等，都要求所处理的物体最后没有什么损伤。还可以进一步应用于柔性物体如薄片或绳子等。在这种情况下，物体在操作过程中由于拉力而需要把它紧紧握住。

14.3.4 机器人的分布驱动方法 对于大柔度和大质量惯性矩系统，使用磁场之类的分布驱动方法是很有利的。这个领域的研究将提高大尺寸系统的运动的效率和精度。

14.4 现代材料的生产方法

14.4.1 取向的聚合物 许多聚合物通过取向而获得高强度和高模量。例如 Kelvar 之类的液晶聚合物，根据取向而得到很大的强度/密度比。聚合纤维的取向一般用拔拉来产生，但在原则上可以采用多种多样的取向机理如多轴应变、电场等来获得所给定的方向。需要有能描述可取向的材料对应力和电场的响应的本构方程。这样就会生产出更强的纤维。高度取向的材料将是三维形状的，但目前只有纤维或薄膜。日本人近来为一大国际财团（日本通商产业省(MITI)）提供资金来研制高强度纤维。

14.4.2 高强度/高模量纤维中分子取向的力学 通过分子取向来生产高强度/高模量纤维这一重要研究工作正在进行。此项工作是先挤压，继之拔拉，以获得极大的面积比和极好的方向排列而完成的。看来这种分子取向过程可以通过应用弹性和塑性拉伸不稳定理论而建立在坚实的分析基础上。其目的是发展一种包含材料和加工参数的力学模型。此模型可以用来优选材料（聚合物）配方和工艺。增加高强度高模量纤维的种类，在工业上极其重要。尼龙、涤纶、丙烯腈等纤维，可能被那些能制成寿命更长、重量更轻而又更结实的织物的改良纤维所取代。除了更高强度的织物能代替金属片的新市场外，上述这些织物都将用于带子、帆布和工业织物等所有普通市场。

14.4.3 陶瓷的韧化 生产陶瓷材料的新方法是利用颗粒小于微米的极纯陶瓷粉末，在高压下压实和烧结而成陶瓷。这种新方法制造出来的陶瓷体，由于控制了缺陷的尺寸而具有相当高的韧度。另一种新方法涉及二相细观结构的形成。一相是氧化锆，它经受应力诱发的相变。相变吸收了应力集中处的大部分变形能，从而防止了断裂。需要对应力诱发相变的条件和对二相细观结构的力学描述进行基础研究。此项工作将应用于研制高温发动机和切割工具等方面的更强的陶瓷。如果不把韧化的工程陶瓷引入发动机的研制中，我们就将继续局限于在金属超合金的低温限制下进行设计，结果将依旧处于低效率和高燃料消耗的局面。

14.4.4 新铁电材料的水听器力学 近来在铁电聚合物的领域里进行了一项很有意义的研制工作。当与 $BaTiO_3$ 的压电跃变 (PZT) 之类的陶瓷铁电体相比较时，铁电聚合物显示了优良的性能。已系统地阐述了把这些聚合物铁电体纳入将于80年代末设计的新潜水艇艇身上大量应用水听器制造声纳的研究计划。需要有描述这些材料的动态电学力学性能的非线性

本构方程。固体力学研究工作者所做的动态实验最近揭示了许多令人困惑的电学力学效应，包括一些显著的异常谐振。可能出现各种利用铁电体特殊性能的传感设备。

14.5 产品最佳性能的工艺控制

14.5.1 含磨料流变材料的流动 多种构件如航空航天结构等的表面所要求的传统抛光法达不到的高精度，以及激光打出的孔需要清理毛口，都可能需要用埋置在聚合物熔体中的磨料来进行抛光。当聚合物以高速推动时，它在表面上“粘住并滑移”。这种现象是把金属从表面上除去并精密抛光所必需的。然而，这种现象并未很清楚地得到了解。这类问题的力学包括流变材料的变形、界面边界条件以及磨损对正在磨蚀的表面的影响。这将导致有能力加工难以达到的小孔，提高重复性和改进表面的精密抛光。这种方法尚未很好得到了解，但它可以通过解决所涉及的力学问题而得到改进。

14.5.2 激光表面涂釉 快速固化作用领域的几项进展之一的是激光表面涂釉。这种工艺是用极大功率的激光扫描金属的表面，在金属材料表面上产生一层很薄的熔融金属膜。当这种薄膜以 10^5 °C/s 速率迅速冷却时，往往会产生一种具有优良力学性能的金属玻璃表面。至今还极少考察这些涂釉表面层的力学方面问题。要研究这些很薄的非晶体层，损伤的起始是一个关键方面。导致疲劳裂纹起始的滑移过程，应当由非晶体结构明显地抑制住。表面硬度和磨损性能也应增强。假若能够了解金属玻璃表面的涂釉过程及其力学机理，那就很可能将疲劳和磨损寿命提高一个很大的程度。这将使机床和发动机延长寿命而取得经济效益。

14.5.3 细观结构和缺陷的控制。生产过程中热学力学历史的计算 生产产品的力学性能直接取决于产品中隐伏的缺陷和细观结构状态，而内部状态则直接依赖于生产过程中物体所经受的热学力学历史状况，因此，计算生产部件过程中所遇到的热、变形和应力历史，是一个很重要的工作。这就需要利用本构方程来系统表述和求解热学和力学耦合的复杂边值问题，这里本构方程可能（充分地）计及了物体的内部状态及其演化。对金属来说，这将使压实烧结、轧制、挤压、锻造等的内部状态得到显著的改进。对复合材料来说，这将提高抗脱层、剥落和层板屈曲的能力而获得更能耐受损伤的产品。对结构陶瓷来说，这将提高象断裂韧性和抗热冲击能力之类的力学性能。而对聚合物来说，这将得到较好的注塑和压模装料工艺，得到在载荷下具有最佳抗变形和抗断裂性能的加工产品。以木材为基础的和混凝土的材料性能，极大地取决于湿度-温度和应力的复杂相互作用。以上这些耦合问题的分析的进展，将使更好地设计和应用这些广泛应用的工程材料得到显著的改进。假若不进行这方面的工作，结果将是把进行过分安全设计和低效利用国家重要材料资源的不合理情况继续下去。

14.5.4 生产中的摩擦学 象锻造、轧制和切割这类生产的力学问题，都是边界值问题。应当解决这些问题，以便使我们能够预测和设计成品的性能。边界条件通过所使用的润滑（或没有润滑）的性质来确定。此外，边界条件还决定着生产过程中发生的有关变形和热的历史等的一切事件。通常，用来描述这些问题计算中的边界的那些条件是起码的条件。必须根据边界的符合实际的模型将复杂的固体-流体-温度的相互作用结合起来。这种结合也许可以用经典的润滑理论或精确的方法来进行。在生产过程中热学力学历史的更符合实际的预测将是可能的。这将导致更精密地推导出有关的最终状态和性能，从而使我们能够以最精密的办法按最佳条件设计出成品。

14.6 辅助应力的扩散

影响所讨论的许多课题的一个非常基础的研究领域，是辅助应力扩散的研究。这种扩散发生在多种高温生产过程中，也发生在应力腐蚀开裂、氢脆和辐射致脆的过程中，甚至发生在由于残余应力和电场中空洞和物质迁移引起集成电路器件的破坏过程中。一种有用的辅助应力扩散的框架是建立在理性热力学和化学热力学以及可能的唯象动力学的基础上，它使我们能够着手研究可变形固体（其中具有移动物质）的时间演化。

14.7 需要开展研究项目一览

下面是一般研究课题一览表。这些课题的研究结果很可能有重大的影响。

- 计算格式 能描述生产和加工过程中材料最终状态的高效计算格式。
- 本构方程 能描述生产和加工过程中发生的变形和材料细观结构变化的本构方程。
- 产品缺陷的控制 细观结构和缺陷扩展间的关系；软钎焊和焊接焊缝的疲劳；在定量估价法基础上的合理工艺控制的研究。
- 柔性机器人系统的控制 高速、轻便、柔性机器人的控制。
- 现代材料的生产方法 研究力学模型来帮助优化材料性能和工艺控制。
- 摩擦学 生产过程中的边界条件。

彭滢美译自：*Appl. Mech. Rev.*, **38**, 10 (1985): 1297--1309. (董务民校)