

新世纪材料成形加工技术的发展趋势

原中国航空精密机械研究所 (北京 100076) 荣烈润

材料成形加工技术与科学是制造业的重要组成部分,材料成形加工技术是机械、汽车、电力、石化、造船及航空等支柱产业的基础技术,新一代材料加工技术也是先进制造技术的重要内容,铸造、锻造及焊接等材料加工技术是国民经济可持续发展的主体技术。

据统计,全世界约有75%的钢材需经过塑性成形加工,有45%以上的金属结构用焊接成形。以汽车为例,2000年,汽车总重量的65%由钢材(约45%)、铝合金(约13%)及铸铁(约7%),通过锻造、焊接或铸造成形,并通过热处理或表面改性获得最终所需的实用性能。随着科技发展及需求的进一步增加,今后将有更多的新材料需要经过成形加工,铝镁合金用量将急剧增加。美国在新一代铝合金轿车制造中提出了多项材料关键成形加工技术。

对国防工业来说,由于现代武器装备性能提高很快,相应的结构、材料及成形加工工艺就成为关键。以航空发动机为例,现代飞机要求超声速巡航,非常规机动性,低环境污染,低油耗,以及低全寿命成本等性能,很大程度上是依靠发动机性能的改进和提高来实现的。要达到上述性能就要不断发展先进涡轮盘材料,也相应要发展这些材料的精密成形与加工技术,材料的精密成形与加工技术就成为关系国防安全的一种关键技术。

1. 成形精度向精密净成形的方向发展

从尺度上看,精密制造技术已经跨越了微米级技术,进入了亚微米和纳米技术领域。材料成形加工技术也在朝着精密化的方向发展,表现为零件成形的尺寸精度正在从近净成形向净成形,即近无余

量成形方向发展。“毛坯”与“零件”的界限越来越小。

当前精密成形技术已在较大程度上实现了近净成形,即制造接近零件形状的工件毛坯,较传统成形技术减少了后工序的切削量,减少了材料、能源的消耗。发展趋势是实现净成形,即直接制成符合形状和尺寸要求的工件。

主要方法有多种形式的精铸、精锻、精冲、低温挤压、精密焊接与切割等。在精确铸造成形和加工方面,汽车工业中Cosworth铸造(采用锆砂砂芯组合并用电磁泵控制浇注)、消失模铸造(见图1)及压力铸造已成为新一代汽车薄壁、高质量铝合金缸体铸件的3种主要精密铸造成形方法。其中消失模铸造新工艺具有高精度、

短流程、洁净化等优点,因此许多国家预测消失模铸造将成为“明天的铸造新技术”。另外,

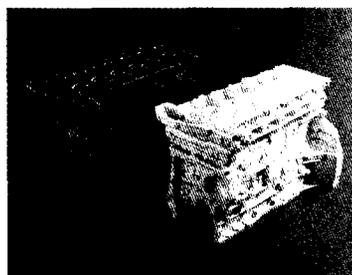


图1

用定向凝固熔模铸造生产的高温合金单晶体燃气轮机叶片也是精密成形铸造技术在航空航天工业中应用的杰出体现。

在轿车工业中还有很多材料精密成形新工艺,如反压力液压成形、铸锻工艺(压铸与锻造工艺相结合)、同步成形工艺、动态液压技术、变压力液压胀形技术、回归热处理工艺、三维挤压法及摩擦压力焊接等新技术近来备受人们的关注。

半固态铸造技术最早在20世纪70年代由美国MIT凝固实验室研发，分为流变铸造和触变铸造。20世纪90年代中期，因汽车的轻量化，半固态铸造技术在汽车零部件的生产上获得了快速发展和应用。

喷射铸造是英国率先推出的一种铸造与粉末冶金工艺复合的快速凝固新技术，具有组织致密均匀、工序简单等特点，适合于多种金属及合金材料的盘、块、管、板和棒材生产。

另外，“接近零余量的敏捷及精密冲压系统”及“智能电阻焊系统”正在汽车生产中研究开发。

2. 成形质量向近无缺陷方向发展

净成形加工技术主要反映的是成形加工技术的尺寸与形状精密的特征，反映了成形加工保证尺寸与形状的精密程度，而反映成形加工优质特征的则是近无缺陷、“零”缺陷成形加工技术。热加工过程十分复杂，因素多变，很难避免产生缺陷。近年来，热加工界提出了“向近无缺陷方向发展”的目标，这里“缺陷”是指不致引起早期失效的临界缺陷。采取的主要措施有：采用先进工艺净化熔融金属，增大合金组织的致密度，为得到健全的铸件、锻件奠定基础；采用模拟技术，优化工序设计，实现一次成形及试模成功，保证质量；加强工艺过程监控及无损检测，及时发现超标零件；通过零件安全可靠性能研究及评估，确定临界缺陷量值等。

3. 成形过程向快速化的方向发展

随着全球市场的激烈竞争，加快产品开发速度已成为提高竞争力的重要手段之一。制造业要满足日益变化的用户需求，加工制造技术必须有较强的灵活性，能够以小批量甚至单件生产迎合市场，需要材料成形加工技术的快速化。

成形加工技术的快速特征表现在各种新型高效成形工艺不断涌现，采用新型铸造、锻造、焊接方法均可从不同角度提高生产效率。

快速原型（RP）技术是一种将零件的电子模型（CAD模型）应用“堆积”的原理直接制成产品原型的新技术。由于工艺过程简单，制造速度比传统制造方法快得多，到目前为止，全世界已有1万多台不同类型的RP装置在运行。

近年来，快速原型制造已发展为快速制造与快速模具制造（RP+RT），又提供了一条从CAD模型直接制造模具的新方法，能大幅缩短产品的设

计开发周期，解决单件或小批量零件的制造问题。RP正在向着多种制造工艺集成、形成快速制造系统的方向发展。

4. 成形方法向复合方向发展

随着化合物材料、金属基复合材料、各种新型功能材料，以及超导材料等高新技术材料的不断出现，传统的加工方式或多或少地遇到了困难。与新的材料制备及合成技术相适应，新的加工方法成为材料加工研发的一个重要领域，材料制备和材料加工一体化是一个发展趋势，一些特殊材料（如超硬材料、复合材料、陶瓷等）的应用造就了一批新型复合工艺（如超塑成形/扩散连接技术）的诞生。

激光、电子束、离子束及等离子体等多种新能源及能源载体的引入，形成了多种新型加工与改性技术，其中尤以各种形式的激光加工技术发展的最为迅速。激光加工技术多种多样，包括电子元件的精密微焊接，汽车和船舶制造中的焊接、切割与成形等。激光表面材料改性处理方法有热处理、表面修整、表面冲击强化、表面熔覆、表面合金化及冲击成形等，使用的激光器主要是大功率CO₂激光器、YAG激光器。近年来，激光加工自由成形技术成为重要的研究方向，国内已用激光熔覆柔性制造技术制作了硬X射线天体望远镜钨基合金准直器。

此外，复合的特征还表现在冷热加工之间，加工、检测、物流及装配过程之间的界限趋向淡化，而复合、集成于统一的制造系统之中。

5. 材料成形加工过程向建模与仿真的方向发展

目前，材料成形工艺模拟仿真是材料科学与工程学科的前沿领域及研究热点。而高性能、高保真及高效率则是模拟仿真的努力目标。据有关部门测算，模拟仿真可以提高产品质量5~15倍，增加材料出品率25%，降低工程技术成本13%~30%，降低人工成本5%~20%，提高设备利用率30%~60%，缩短产品设计和试制周期30%~60%，增加分析问题广度和深度的能力3~3.5倍。

工艺模拟仿真技术是一项多种新技术特别是信息技术的综合应用、发展的结果。应用数值模拟于铸造、锻压、焊接及热处理等工艺设计中，并与物理模拟及专家系统结合，来确定工艺参数，优化工艺方案，预测加工过程中可能产生的缺陷，控制和保证加工工件的质量。如铸造凝固过程的三维数值

模拟；锻压过程微观组织的演化及热塑性本构关系模拟；焊接凝固裂纹的模拟仿真，开裂机制的研究，以及焊接氢致裂纹的模拟；金属材料热处理加热、冷却过程的模拟仿真，以及组织、变形、性能预测等。

目前，模拟仿真技术已能用于压力铸造、熔模铸造等特种精密成形工艺。很多研究人员开展了材料成形加工新工艺（如喷射成形）的模拟研究等。

多尺度模拟，特别是微观组织模拟（从毫米、微米至纳米尺度）是近年来研究的新课题。通过计算机模拟，可深入研究材料的结构、组成，及其各物理化学过程中宏观、微观变化机制，并由材料成分、结构及制备参数的最佳组合进行材料设计。多尺度模拟已经在汽车及航天工业中应用。

铸件凝固过程的微观组织模拟从凝固热力学与结晶动力学两方面，基于晶粒尺度研究材料的组织和性能等，美国爱荷华州立大学用相场法研究了晶体生长取得了突出的进展。20世纪90年代后，铸造微观模拟开始由试验研究向试验应用发展，国内在用相场法研究铝合金枝晶生长，用三维Cellular Automation模型模拟金属型及砂型铸造铝合金组织的演变（见图2），以及对汽车球墨铸铁微观组织与性能进行研究预测，取得了重要进展。



图2 模拟金属型及砂型铸造铝合金的微观组织

6. 材料成形加工技术信息化

21世纪的制造业正从以机器为特征的传统技术时代向着以信息为特征的系统技术时代迈进。信息技术的发展为材料成形加工技术的发展带来了活力，同时也要求材料成形加工技术的发展适应信息技术的发展。目前，信息技术对材料加工技术发展的作用已占到第一位。

举一个最为典型的例子，工艺模拟及优化技术是依赖信息技术的发展而进步的。成形加工装备正沿着“单机自动化→流水线自动化→柔性、集成系统”的方向发展，其中应用了大量的传感器、计算机、信息和控制技术；成形质量控制向控制过程智

能化方向发展，为此需要大力发展生产过程自动化，工艺参数在线控制，以及生产工艺因素对工艺效果影响的模拟等。这都使材料成形加工技术注入了“信息化”的特征。

7. 材料成形加工向清洁生产方向发展

清洁（绿色）生产技术和协调工业发展与环境保护的矛盾，以及需求日益增长与有限资源的矛盾的一种新的生产技术，是21世纪制造业发展的重要特征。

精密成形精洁生产技术的主要意义在于：高效利用原材料，不造成环境污染；以最小的环境代价和最小的能源消耗，获取最大的经济效益和社会效益；符合持续发展与生态平衡。

实现清洁生产的主要途径有：①采用清洁能源，如用电加热代替燃煤加热锻坯，由电熔化代替焦炭冲天炉熔化。②采用清洁的环境（工艺）材料。环境材料是指资源和能源消耗小，生态环境影响小，以及再生循环利用率高或可降解使用的具有优异应用性能的新型材料。③研发新的工艺方法。如采用绿色集约化铸造。绿色集约化铸造是指铸造生产全过程应满足对环境无害，合理使用和节约自然资源，以及依靠科技同时得到最大的产业和效益等几个要求。④采用新结构，减少设备的振动和噪声。

美国在展望2020年的制造业时，进一步把“材料净成形工艺”发展为“无废弃物成形加工技术”。新一代“无废弃物加工”制造技术是指在加工过程中不产生废弃物，或产生的废弃物能被整个制造过程中作为原料利用，并在下一个流程中不再产生废弃物。由于“无废弃物加工”减少了废料、污染和能耗，并对环境有利，从而成为今后推广的重要绿色制造技术。日本铸造工厂提出了3R的环境保护新概念，即减少（Reduce）、重用（Reuse）及回用（Recycle）废弃物。

8. 结语

今后要强调与重点行业的结合，使得发展材料成形加工技术更有效地促进国民经济的发展。当前应着重加强与军工、IT制造业的结合，如发展光刻技术、贴片技术等，另外还要加强与汽车制造业的结合。 MW (20121022)