

·成果简介·

大型锻件的模拟技术及质量控制研究

马喜腾 钟志平 曹起骧 马庆贤

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

[关键词] 大型锻件, 模拟技术, 质量控制

国家自然科学基金重点项目“大型锻件的模拟技术及质量控制研究”将高温损伤、裂纹预测引入材料塑性加工的研究中,通过材料模型将热塑性加工的宏观热力参数与细观组织的变化联系起来,以制定出合理的加工工艺,达到提高大锻件质量的目的。课题组针对大锻件内部质量问题,从内部热裂纹与细观组织两方面进行了深入的研究,在大锻件的模拟技术和质量控制方面取得了重要成果,初步实现了大锻件内部质量的控制锻造。主要成果简介如下:

1 大型锻件夹杂性裂纹形成机理及控制锻造工艺研究

1.1 大型管板夹杂物形貌控制

管板锻件夹杂性裂纹是由于锻造制坯时夹杂物经较大的变形而成为薄片状引起的。研究发现,采用直拔制坯-双凸成形工艺^[1],可控制夹杂物不成为片状,提高管板内部质量。

1.2 夹杂性裂纹形成机理

通过高温热扭转实验,搞清了含夹杂材料在塑性加工过程中内部裂纹形成的机理。实验发现,在800°C—1200°C的温度范围内,裂纹产生存在3种形式:850°C以下,夹杂处基体形成孔洞,孔洞长大直至汇合(如图1(a));850°C—1100°C,夹杂与基体脱开形成孔洞,然后沿界面扩展至基体直到断裂(图1(b));1100°C以上,裂纹萌生于晶界,沿晶界扩展至断裂(图1(c))。

1.3 夹杂性微裂纹聚合的判据

在大锻件的生产中,夹杂性微裂纹聚合成宏观裂纹,往往造成锻件的报废。通过常温实验,我们得到了夹杂性微裂纹聚合的几何判据^[2]。该判据表明,当相邻夹杂性微裂纹尖端之间的距离与裂纹长度相等时,微裂纹将聚合成宏观夹杂性裂纹。参考此判据,制定了可有效地控制夹杂性裂纹聚合的锻造工艺,取得了较好的效果。

1.4 夹杂性微裂纹的常温细观损伤力学模型

通过常温实验,我们得到了夹杂性微裂纹演化的细观损伤力学模型^[2]。该模型表明,随着金属基体沿夹杂性裂纹直径方向的应变的增加,裂纹尺寸增大。它为高温细观损伤力学模型的建立奠定的基础。

国家自然科学基金重点项目,批准号 59235100.

本文于1997年7月9日收到.

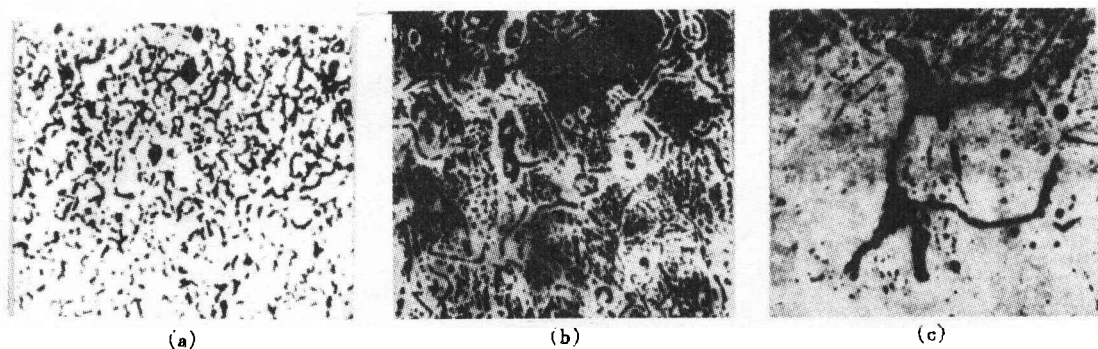


图1 裂纹萌生的3种形式

1.5 高温变形对材料内部微观损伤的修复作用

损伤力学起源于70年代,研究在役条件下材料细(微)观结构中发生不可逆劣化过程引起的构件性能变化、变形直至破坏的力学规律。本研究首次将损伤这一概念引入材料的热塑性加工中,将声显微镜(SAM)检测技术应用到高温损伤的研究中,发现高温损伤具有可修复性(图2),得到了材料在高温变形条件下的微观损伤力学模型^[2]。该模型表明,随着锻造温度的升高和保温时间的

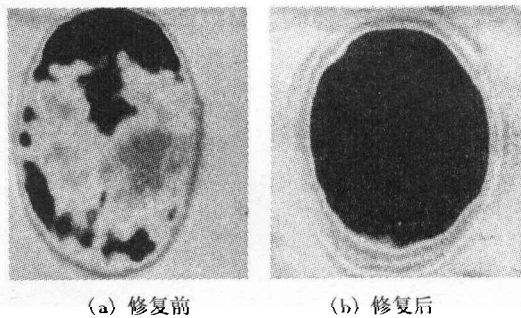


图2 高温损伤修复示意图(SAM)

的延长,损伤的修复程度得到提高。将此模型以及上述夹杂性微裂纹聚合的几何判据与刚塑性有限元耦合,可以用来预测在给定的锻造工艺参数(如锻造温度、火次、压下量等)条件下锻件内部损伤场的分布,并由此得到了可控制锻件内部裂纹的锻造工艺方案。将该方案应用于管板和模块的实际生产,有效地降低了废品率。

1.6 控制夹杂性缺陷的管板和模块锻件锻造工艺

管板等饼类锻件的锻造工艺分为“制坯工序”和“成形工序”两部分。实验发现,控制“制坯工序”镦粗变形量 $\leq 40\%$ 或采用大拔比制坯、小镦比成形,即可防止夹杂性裂纹的形成与汇合。由此得到了可控制夹杂性缺陷的管板和模块锻件的锻造工艺。对于大型管板(直径 > 2000 mm),采用一锭一件的锻造工艺;对于中小型管板(直径 < 2000 mm),采用一锭多件的锻造工艺。这些工艺已在第一重型机械集团公司、中信重型机械公司洛阳重型铸锻厂、陕西重型机器厂的管板和模块锻件的生产中得到应用,效果非常好。

1.7 大型锻件废品再生新工艺

在研究高温损伤机理的过程中,发现锻件内部裂纹有自修复现象,为探讨其在生产中的应用的可行性,经进一步的研究得到了合适的处理温度和保温时间,并在工厂进行了生产性试验,对5件管板锻件废品进行了处理。处理后,其中2件完全合格,另有2件因缺陷减少而基本合格,只有1件无效果。由于管板锻件报废后无法改锻,一般只能作为废品回炉,浪费巨大。因此,这种新工艺的开发及机理的研究具有很高的价值,亟需投入力量对其机理及热力参数等进行深入的研究。

2 钢热成形中晶粒细化规律和控制锻造技术研究

2.1 ASME SA508cl.3 钢的高温屈服应力模型和多机制软化规律

ASME SA508cl.3 钢是国际上常用的核电用钢,对此材料进行彻底研究成为核电国产化的关键。钢在热加工中的组织变化是多机制软化过程,包括:动态、静态、亚动态再结晶。研究得到了用热力参数描述的高温屈服应力模型和再结晶过程的数学表达式。

(1) ASME SA508cl.3 钢高温下的屈服应力模型。钢在高温下变形时同时存在硬化与软化两种机制,国内外现有的高温屈服应力模型大多采用单一的数学表达式,难以准确描述材料在高温下的流动行为。本研究将流动应力曲线分成3段分别加以描述:硬化阶段采用改进的指数函数;软化阶段采用三角函数;稳定阶段采用直线变化模型。与现有模型比较,本模型具有明确的物理意义,精度高^[3]。

(2) 动态再结晶规律。采用 Gleeb1500 材料热模拟机和金相分析技术,在国内首次对核电 ASME SA508cl.3 钢的动态再结晶进行了研究,得到了用热力参数描述的动态再结晶模型^[3]。将材料动态再结晶模型与三维刚粘塑性有限元耦合,预测了核电子锻件锻造过程中微观组织的变化,并由此制定出合理的锻造工艺方案。该方案的实施,将有效地打碎钢锭的原始粗大组织,使锻件具有均匀细小的再结晶组织,为后续的热处理环节提供优质锻件。

(3) 静态再结晶规律。采用热力模拟和金相分析相结合方法,在国内首次对 ASME SA508cl.3 钢的静态再结晶进行了研究,得到了用热力参数描述的静态再结晶模型^[4]。

将材料静态再结晶模型与三维刚粘塑性有限元耦合,用于预测核电大锻件锻后晶粒尺寸的变化,从而确定能获得均匀细小晶粒的锻造工艺方案。目前,第一重型机械集团公司拟采用该方案生产定向凝固铀核电管板。

(4) 高温下稳定晶粒尺寸和晶粒粗化温度。再结晶后的细小晶粒不稳定,在高温下停留时会快速长大。试验研究表明:当晶粒长大到一定程度,长大趋势便不明显了;对于一定的温度,存在确定的稳定晶粒尺寸;存在晶粒粗化温度,超过此温度则稳定晶粒尺寸急剧增大。根据这一实验结果,我们得到了 ASME SA508cl.3 钢的稳定晶粒尺寸和晶粒粗化温度,并用其来制定锻造工艺温度规范,以控制锻件毛坯的初始晶粒度和锻后晶粒尺寸。

(5) 多工序多机制晶粒细化的黑箱模型。大锻件的锻造过程是一个多工序多机制的晶粒细化过程。锻造过程由镦粗、冲孔、拔长及扩孔等工序组成;每道工序中锻件内部存在动态、静态和亚动态再结晶机制。迄今,我们还不能完全掌握这3种机制,以及工序之间各种机制是如何相互影响的。为此,我们只给定锻造热力参数(如初始晶粒度、始锻温度、变形程度、变形速率以及锻后高温停顿时间),锻后就有唯一确定的晶粒组织与之对应,由此建立了晶粒组织与各热力参数之间的一一对应关系,称为晶粒细化的黑箱模型。本项研究综合考虑 ASME SA508cl.3 钢的动态、静态、亚动态再结晶对晶粒细化的作用,给出了热变形后高温停顿 5—10 分钟晶粒细化的黑箱模型,首次实现了筒体锻件多工序热锻的晶粒度预测,对大型筒体锻件的锻造生产有重大的指导意义。

2.2 金属热成形高温物理模拟技术

将离子溅射法应用于高温云纹栅的制造中,使高温云纹栅的使用范围从 850°C 拓展到 1250°C,特别适用于钢的高温锻造变形的物理模拟研究。我们用新研制的高温云纹栅模拟研

究了核电管板的高温 (1 200°C) 变形规律, 首次将高温变形与材料的细观组织变化直接联系起来^[4], 为高温锻造工艺的制定提供了依据。

2.3 金属成形过程和内部组织变化的三维热力耦合数值模拟技术

用计算机来模拟金属热成形过程并预测其晶粒组织的变化从而控制锻件的内部质量, 是国际上的前沿课题。我们开发了三维刚粘塑性有限元软件 TRVPEM3 的主体框架 (工作站版本和微机版本)^[5-6], 其微机版本适合于我们目前大多数只有微机的研究者。

2.4 核电压力壳上法兰锻造累积晶粒细化机制和控制锻造工艺

核电压力壳上法兰锻件应满足一定的晶粒度要求, 其锻造工艺是多火次、多工序过程, 锻件晶粒度取决于最后一火操作。实验表明, 由于最后一火为扩孔操作, 单次压下实际变形量小而且严重不均匀, 故不能依靠单纯的动态或静态再结晶来达到细化晶粒的目的。本研究提出了累积晶粒细化原理, 即: 在热变形过程中, 材料经历多次小变形时, 各次小变形的变形能可以积累下来, 促使再结晶的发生, 从而使晶粒得到细化。我们通过试验验证了 ASME SA508cl.3 钢累积晶粒细化现象, 由此制定了核电上法兰的空心和实心两种锻造工艺方案。目前, 上海重型机器厂拟采用此方案生产 300MW 核电上法兰锻件。该研究成果对实际生产中制定合理的热锻工艺具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 曹起骧, 韩静涛, 马庆贤等. 大型管板锻件夹杂性裂纹形成机理探讨. 塑性工程学报, 1994, 1(1): 14—19.
- [2] 韩静涛. 大型饼块类锻件夹杂性裂纹形成机理及控制锻造工艺研究. 清华大学博士学位论文, 1995, 3: 48—50, 60.
- [3] 王连生. 核电压力壳上法兰空心锻造工艺的数值模拟和试验研究. 清华大学博士学位论文, 1995, 9: 51—58, 67—68.
- [4] 潘维国. 定向凝固锭核电管板锻件锻造工艺及内部质量控制. 清华大学博士学位论文, 1996, 5: 30—38, 51—60.
- [5] 许思广, 曹起骧, 王连生. 金属成形中晶粒变化的计算机模拟. 清华大学学报(自然科学版), 1995, 35(S1): 63—68.
- [6] Wang L.S., Cao Q.X., Liu Z. Numerical simulation and experimental verification of microstructure evolution in a 3-dimensional hot-upsetting process. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58: 331—336.

RESEARCH ON MODELING TECHNOLOGY AND QUALITY CONTROL OF HEAVY FORGINGS

Ma Xiteng Zhong Zhiping Cao Qixiang Ma Qingxian
(Tsinghua University, Beijing 100084)

Key words heavy forgings, modeling technology, quality control