

大型锻造的技术创新

郭会光*

(太原科技大学材料学院, 山西 太原 030024)

1 前言

大型铸锻件制造是一个十分关键的行业, 不仅是重大装备制造的基础产业, 而且与国防安全和社会经济发展密切相关, 因此具有一定的战略意义, 其发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志。

从 1953 年修复沈重厂 20MN 锻造水压机开始到 1958 年太重厂, 一重厂 30MN、60MN 水压机投产。随后 1965 年前后一重、上重、二重 120MN 水压机开工, 大型锻造基地初具规模。到 1977 年全国拥有 10MN 以上水压机超过 60 台, 大锻件生产格局大致定型。我国大锻件制造业在创业建设, 成长壮大、自力更生, 奋发图强的初期发展中, 为国家提供了一批急需的大锻件, 满足了制造重大装备的需要。在经历了改革开放、引进技术、调整优化, 发展提高等阶段之后, 逐步适应了社会主义市场经济发展的规律, 而今大锻件生产已具备了制造 600MW 亚临界火电机组, 700MW 水电机组全套大锻件。千吨级石化压力容器, 大型冶金轧辊, 7 万吨级远洋轮船锻件以及铁路交通、航空航天、军工装备、模块、轴承等重型基础件的生产能力。“十五”期间新产品的产值率达 30%, 有 20% 的品种达到国际先进水平。全国有 4 所高等学校, 3 个研究院所长期从事大型锻造科技创新研究工作, 基本形成了大锻件制造研发体系。

随着科技的进步和社会经济的发展。为了满足不断增长的经济建设和人民生活的需要。“十一五”期间要求提高大锻件技术水平和现代化水平, 提高质量与效益, 努力缩小与先进国家的差距, 力争成为世界大锻件生产强国之一。

党的十六大提出了“用高新技术和先进适用技术改造传统产业, 大力振兴装备制造业”的要求。要认真按照这个要求全面提高行业技术创新能力, 突破关键制造技术, 提高核心竞争力。中科院院长路甬祥在谈到当今世界科技发展趋势时强调: 科技创新, 转化和产业化速度不断加快, 原始科学创新, 关键技术创新和系统集成作用日益突出, 学科交叉融合已经成为一个大趋势。如何按照这样的要求和思路来解决问题, 促进大锻件制造业的发展是目前应当着力关注的研究课题。以下仅就大锻件制造中几个新的技术问题提一点参考意见。

2 冶炼技术进步与铸锻联合工艺的开发

冶炼与铸锻技术的进步, 主要体现在: 能够冶炼出化学成份合格的新钢种和合金。材质纯净度高、结晶结构合理、冶铸缺陷少等方面。近年来冶炼技术不断改革创新取得了明显的进步。1978 年来我国各种炉外精炼方法和设备相继应用, 使钢中硫、磷、氮、氧和非金属夹杂物含量大幅度降低。比如钢包精炼炉, 电渣重熔, 真空处理广泛应用。许多大锻件用钢中的 S、P 含量已降到“双 O”以下, 这就为大锻件质量上等级打下了良好的基础。另外冶炼了许多特殊钢, 使以往不能生产的重大装备也能立足国内制造了。在铸锻方面, 短冒口锭、空心锭、短粗型锭生产技术比较稳定, 实用标准相继制订。对定向凝固钢锭, 三瓣型锭等异型锭的制造, 进行了必要的探索。对如何减少偏析缺陷, 节省加热锻造时间, 改善压实效果等问题进行了研究。另外对钢锭凝固理论和方法的研究广泛开展。对新锭型, 新辅具以及缺

* 作者简介: 郭会光 (1936-), 男, 教授, 主要研究方向为大型锻造新技术与理论、塑性加工模拟与控制
电子邮箱: hwh2000@sohu.com

陷预测等研究成果的应用也取得了明显的进展。例如清华大学、第一重机厂等对钢锭凝固过程中的温度场、流场、应力场进行了研究。探讨了疏松、缩孔、偏析裂纹变化的原因，进而优化了钢锭的结构，以 205t 钢锭替代 220t 钢锭，而且避免了疏松、缩孔进入锭身区（如图 1 所示）。

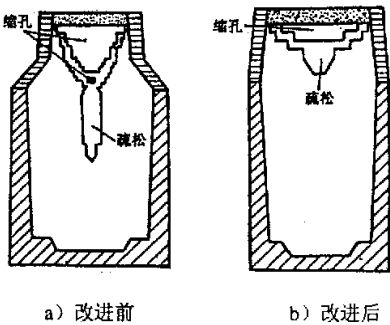


图 1 220t 钢锭缩孔、疏松的分析

随着电渣熔铸，精确铸造，离心浇注等技术的发展，铸-锻联合成形逐渐引起关注。因为它既能发挥铸造易于成形复杂形状制件的优势，又具有锻压能有效地压实空隙缺陷，打碎粗晶组织，改善使用性能，提高质量的优点，两者联合对缩短工艺流程，提高质量与效益有重要的意义。研究表明：当铸坯经过锻压变形后（锻造比为 1.4~1.9），制件的强度和韧性可达到锻坯成形同样的效果。太原重机学院与太原重机厂曾用报废护环电渣熔铸了空心环坯，然后热锻成形并液压胀形强化，制成了 Mn18Cr4 钢 3MW 护环，性能质量全面达到了合格标准。环坯热锻的锻造比为 1.9。现在复合成形，短流程工艺在大锻件生产中不断得到试验和应用。

3 锻压技术的改革与创新

正确调节与控制锻造热力学参数，合理改善锻造温度场、应力场，控制塑性流动与变形分布，是提高锻造性能，缩短工艺流程，获得优质锻件，增加效益的重要环节。

由于大型锻造过程系高温、高压、长时间、多因素、不稳定的成形过程，所以，实施控制锻造时，对热力因素进行“线性控制”比较困难，而将热力参数控制在一个合理的范围内，进行“宽带控制”则便于实现。当然控制的温度范围、应力状态、变形分布、变形速度等规范都是通过试验科学确定的，能够满足控制锻造的要求，能够提高生产质量和效益，而且在工程上便于实施。

3.1 热力模拟试验与热变形特性的研究

热力模拟试验是研究材料热成形性能的重要手段，可以通过设定的热力参数，用热压缩、热拉伸、热扭转等试验进行。

图 2 是 18-18 护环钢（C: 0.12% N: 0.6% Mo: 0.013% W: 0.018%）在 Gleeble 热模拟试验机上热压缩试验得到的应力应变关系和再结晶特性。由不同变形条件下试验可知：该钢在高温变形时，随温度下降变形抗力迅速升高，如从 1200℃ 降至 800℃，变形抗力提高 8.5 倍。硬化倾向很大。

从高温变形时应力应变关系和微观组织变化可知：800℃ 变形属硬化型曲线，950℃ 变形有软化迹象发生。在 1050℃，热变形发生典型的动态再结晶机制。热成形的再结晶组织如图 3 所示。以上试验结果可为合理确定锻压设备力能参数，控制锻

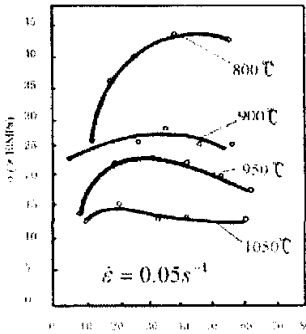


图 2 Mn18Cr18N 钢热变形本构关系

件组织性能以及为计算机数值模拟提供重要依据。



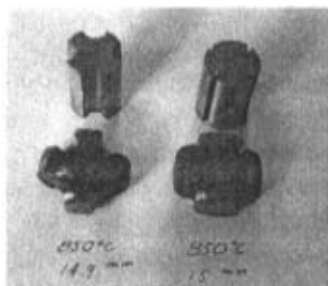
a)动态再结晶组织 b)静态再结晶组织

图3 Mn18Cr18N 钢 950℃变形的组织

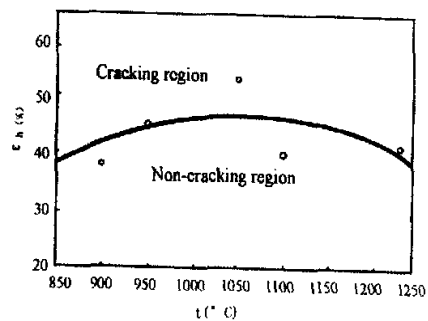
3.2 热塑性变化与锻造开裂

由于自由锻造时应力应变分布不均匀。变形温度、变形速度难以控制，锻造开裂经常发生，这不仅影响锻压工艺的正常进行，而且会造成大量废次品。尤其在合金元素多，塑性低的材料中锻件裂纹往往成为影响锻造成形的制约因素。例如：高锰高氮护环钢因热锻时裂纹严重、清理困难、污染环境、火次多、周期长成为生产中的关键，严重影响大型护环的制造。所以研究热锻工艺塑性变化，微细裂纹萌生与宏观断裂机制是当前材料热成形中的重要课题。

图4为Mn18Cr18N钢（C：0.085%-0.90% N：0.63%-0.64% S：0.01%-0.002%）采用刻槽试件分级等温压缩，通过观察微细裂纹的形貌和位置判断裂纹萌生扩展状况，根据发生微细裂纹对应的变形程度，以及开裂发生的热力学条件，绘制防止裂纹产生塑性极值图（图4b）。



a)热压缩试件



b)热塑性曲线

图4 18-18 钢微观裂纹试验

图5为电渣重熔（ESR）18-18 高氮钢（N：0.689%）热拉伸试验宏观断裂曲线及其断口。由图示可知在 1050℃时热塑性最好，而热强度较低。温度升高晶粒长大。晶界氧化物的强度与塑性都将降低。从断口观察可知：800℃~850℃为脆性断口。1050℃~1200℃为塑性断口。以上试验对合理制订热成形制度有一定参考价值。

对于高合金、低塑性材料而言，充分发掘塑性潜力，确保成形效果是塑性加工工作者的重要任务，为此应该设法提高材料的工艺塑性。改善热成形时的应力状态，合理控制变形速度，研究开发新的成形技术。例如：为了防止大型护环热锻裂纹，研究开发了分步挤扩包套模内成形技术（如图6所示）。其原理是在低塑性坯料外围加一包套，并从自由锻成形改为模内复合成形。首先，包套能起保温隔热作用，防止坯料温度下降塑性降低，其次，改善了坯料外缘受力变形状态，减少了拉应力开裂。再者，分步挤

扩复合成形，逐渐达到变形要求，不仅省力，而且可有效防止开裂破坏。实践证明：这种新方法不仅攻克了高氮钢锻造开裂的难关，而且对提高大型护环生产的质量与效益有良好的作用。

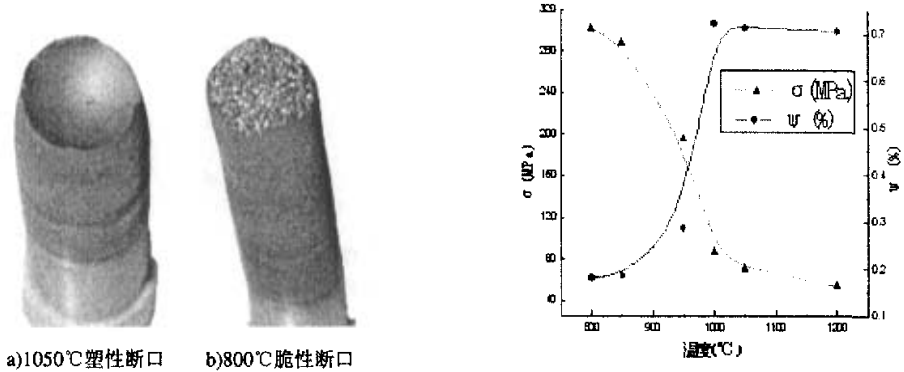


图5 18-18 钢热拉伸塑性与强度的变化

3.3 采用新型砧。新型坯及其新的操作方法

改革锻造工具的工作面形状尺寸及其配置组合方式，可以改善坯料的应力应变分布，控制塑流流量，减少变形不均匀性。改变坯料形状可以调控变形分布，防止不均匀变形和锻压开裂。改进操作方法可以优化纤维分布，提高锻压质量与效率。实践证明：这是一种经济有效，简单适用的技术。例如：目前广泛采用的 WHF 锻造法，就是应用上下对称的宽平砧，高温高压下量锻造。KD 锻造法是应用宽 V 型砧，高温高压下量锻造。FM 法是利用非对称变形原理，减少坯料芯部拉应力，防止开裂提高锻压效果。FM 法如图 7 所示。而 FMV 及 PV/FM（图 8 所示）等方法也是根据不对称变形原理用 V 型砧及平砧的不同配对，提高锻造压实的效果。以上例举

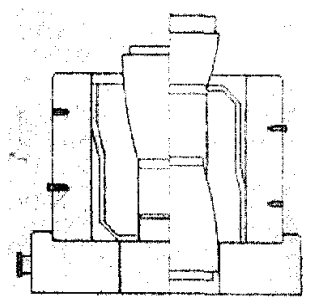


图6 包套扩挤复合热成形

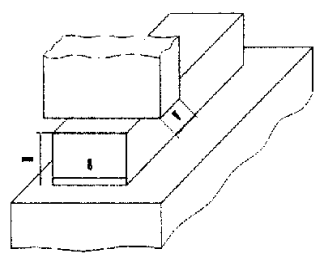


图7 FM 法锻造示意图

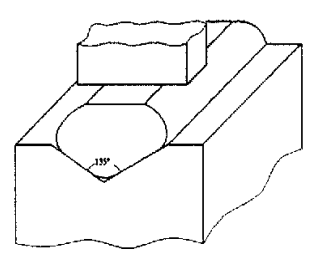


图8 PV/FM 法锻造示意图

的方法，在转子、模块等锻件生产中都取得过很好的结果。关于砧子工作面的形状，配对组合方式以及相关尺寸关系（如，砧宽比 W/H ，料宽比 B/H 等）和压下率的合理数值，国外学者和我国燕山大学及有关重机厂都进行过大量的研究和实践总结。另外为了消除锻造中的难度形区，采用锥形锻粗板，凸平组合砧，较好的改善了锻压时的摩擦状况，改善了坯料内变形分布。

在改变坯料形状方面，如采用凹腰形坯料锻粗，可以减少鼓肚变形。采用三瓣形钢锭拔长能够提高芯部变形程度等。合理改变边界接触条件，应用反复多向塑性流动，合理控制变形分布，引入有限剪变形等概念，设计制造了一些特殊砧子，对提高锻件晶粒均匀度，改善坯料压实效果等方面具有良好效果。

采用不同的变形温度场实现控制变形的目的,例如 JTS(中心压实锻造法)如图 9 所示就是通过将加热坯料出炉后预冷使外表降温形成“硬壳”,由于坯料中心与表层温度梯度加大,当用特殊形状的砧子沿纵向施压时,芯部受表层“硬壳”制约,处于高温闭式受压状态,于是产生很好的中心压实效果。所以应用不同的温度场,可以构成不同的局部变形结果。

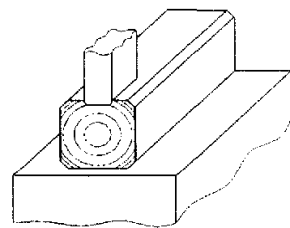


图 9 JTS 锻造法示意图

对于一些承力的轴类锻件,可以通过控制压下程序,采用特定的翻转方法以及其他一些措施,使锻件内部纤维形成螺旋型分布,这样切向性能会提高,轴的尺寸可减少,材料会节约。

采用综合措施,科学地减少目前锻压生产中的无效变形,实行小锻造比锻造。减少火次,缩短工艺流程。采用复合成形措施,改善质量控制水平对提高锻件生产质量与效益有十分重要的意义。

4 大锻件内部裂纹的愈合修复

大锻件内部存在裂纹损伤,超声波探伤不合格是造成废品的重要原因,其中多数因为坯料中存在的夹杂物和粗晶结构,在受到较大的集中应力和剧烈的剪应力作用,局部变形较大的情况下,材料内部产生损伤破坏,因此,改善原料品质,对材料设计,制造及使用过程进行综合控制,消除材料产生内裂的根源和条件以提高制件的服役能力与寿命。这是一个积极的措施。对带有裂纹的锻件,通过修复愈合处理重新启用,也有重要的意义。北京科技大学、清华大学对此进行了深入细致的研究,建立了金属材料内部裂纹愈合修复的模型,并用钻孔压缩法和平板撞击法预制了带内裂的试件,在高温扩散条件下进行了裂纹愈合试验。描述了内裂愈合机制大致是:裂纹相对面凸起融合,使长裂纹分段球化,并收缩愈合。依据裂纹中组织生长,性能变化与生物伤口愈合相似的现象,提出了内裂纹类生修复机制。探讨了愈合处理温度,时间和热塑性变形条件等因素对内裂纹愈合的影响。研究了单纯高温扩散处理。加压扩散处理,扩散与塑性变形相结合条件下的愈合过程。得到了在特定情况下一些参考数据。比如 45 钢试件在 1000°C – 1100°C 。保温 60 分钟以上的热愈合处理后,对拉伸强度的恢复最为有利。被修复裂纹的临界尺寸,在 1200°C 时大约在 0.5 mm 以下,温度降低不利于扩散修复。

根据裂纹修复愈合原理,研究得出的防止大型管板,大型模块中夹杂性裂纹萌生与扩展的控制锻造工艺,在大锻件生产中应用效果明显。而园棒、钢管抑制内裂纹的控轧工艺,在轧钢生产中应用也取得了显著的效益。

金属材料内部裂纹愈合的研究今后将在扩大应用范围,深化理论研究方面继续开展工作,力争在抑制内裂纹的产生,提高构件服役寿命方面发挥更大的作用。

5 大型锻造的现代研究方法

随着当代科学技术的进步,社会经济的发展,重大装备有向大型化、高性能、可靠性、长寿命方面的发展趋势。同时对关键大锻件的制造过程和组织性能提出了更新的要求。为了更好地研究大型锻造的成形规律,控制组织性能。优化工艺过程。沿用的单一模拟实验,经验类比方法难以攻克生产中的关键,也不适应当代技术经济发展的要求。为此采用综合集成的思路,整合现代研究手段,构建了大型锻造现代研究方法。其内容是采用热力学模拟实验,微观组织研究和计算机数值模拟相结合的方法。不仅可以揭示热变形本质和规律,而且能提供成形尺寸精度控制和内在质量控制的依据,同时在进行性能预检,缺陷预警,工艺优化,技术创新等方面有一定的参考作用。该研究方法的原理与规划如图 10 所示。

因为热力学模拟通过对锻件热成形特性和行为的研究,可以给出不同变形温度,变形速率,变形程度和应力变形状态下,热力学因素对“成形”及“改性”的综合影响。提供材料热成成本构关系,塑性

变化，塑性流动矢量，相变，动态与静态再结晶等信息。微观组织观察研究能得知晶粒大小及分布，流线疏密与方向，夹杂疏松，空隙，裂纹，组织结构不均匀及变化行为，相态组织与变形条件的相关性规律。通过实验数据处理，不仅能给出边界条件和具体数据，而且能建立组织结构演变，相态转变模型，为计算机仿真提供具体参数。数值模拟则是通过有限元计算，工程优化分析，定量地将材料性质，变形条件与组织结构和性能联系起来，能够得到锻造过程的信息与制件各处的场量信息。并能够动画显示，虚拟成形，进行工艺参数，工艺方案的优化，进一步开展 CAD/CAM/CAE 工作。通过以上集成研究，不仅可以正确认识大型锻造的科学本质，而且能够对锻造过程实施现代化控制。

大型锻造现代化研究方法，主要依据综合集成的思想，合理将物理实验、模拟分析、数值计算等整合与集成，全面考虑了锻压变形中“内因”与“外因”的影响，构建成研究大型锻造的现代方法，但是由于大型锻造的复杂性，所以应用该新方法时要与实际结果反复对照，不断调整修正有关数据和程序，从而在工作中更好地应用。

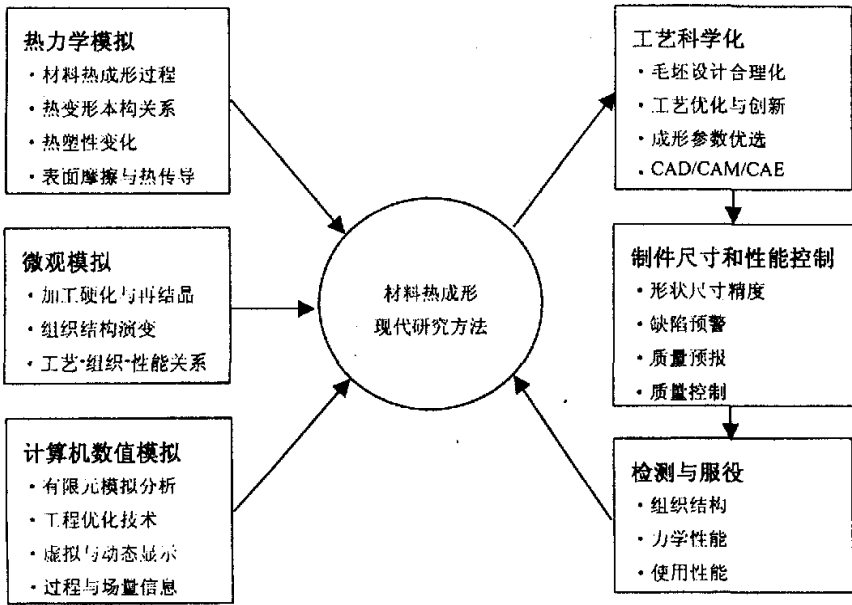


图 10 大型锻造现代研究方法的原理与规律

6 结束语

面对经济全球化和振兴装备制造业的形势以及国民经济和国防建设的快速发展，给大锻件制造带来了难得的机遇和严峻的挑战，必须深化改革，加快技术改造和结构调整的步伐，认真提高自主开发能力和核心竞争力，真正承担起振兴重大装备业的重要使命。

我国大型铸锻件行业“十一五”计划的发展总体目标是：提高产品的技术水平和成套能力。提高工艺水平与装备现代化水平，提高生产集约化程度和管理水平，提高经济运行的质量与效益，力争成为世界大型铸锻件生产强国之一。其中产品品种的 30% 要求达到当代国际水平。主要产品国产化率要超过 70%。能够制造 550-600 吨级钢锭，300 吨级优质锻件。能够制造 700MW 水电，1000MW 核电及超临界煤电机组大锻件，目前此类锻件全部依赖进口。为此必须对 12%Cr 钢高温转子，超纯净钢低压转子开展攻关研究。对核电异型封头，特大管板等进行试制，对 Cr5 以上锻钢轧辊，对 2000 吨级石化反应器（含

煤液化反应器)进行开发。对大型组合曲轴,大型航空航天锻件的生产进行优化。还要对大型锻压设备要进行更新改造,配备锻造操作机和新型加热炉,热处理炉,提高效率,提高质量扩大生产能力。

要注重共性基础技术的研究,提高发展后劲。注意先进适用技术的应用,创造良好效益。

要迅速推广应用高新技术,促进自主创新能力的提高。普及应用计算机技术,以数字化、信息化带动工业化。

要建设好大型铸锻件工程技术研究中心,发挥产、学、研联合优势,攻克关键技术难题,提升自主研发能力,提高核心竞争力。

要特别注意人才培养与应用,充分发挥有关高等学校出人才、出成果的作用。多出德才兼备的人才,多出科技创新成果。同时还要加强高级技工的培养作好新老交替,防止后继乏人。

面对难得的发展机遇和严峻的挑战,只要深化改革,奋勇前进,一定会迎来更加美好的发展前景。

参考文献:

- [1] 路甬祥. 世界科技发展的新趋势及其影响. “科学与中国”报告, 2004 年 12 月
- [2] 中国机械工程学会锻压学会编. 锻压手册, 第 2 版 (1) 机械工业出版社 2002 年
- [3] 陆燕荪. 发电和输变电设备制造业“十一五”发展重点及 2020 年展望, 发电设备 2003 N05
- [4] 汪 耕. 我国大型发电机制造技术展望. 上海电气科技论坛, 2001 年
- [5] 郭会光等. 护环成形技术及质量控制的新进展. 太原重机学院学报, 2005, No1
- [6] 张巧丽等. 高强度护环省力热成形技术的开发. 锻压装备与制造技术, 2004, No3
- [7] Bai S J, Guo H G. Integrated modern study method on hot forming largeforging. ICPNS' 03
- [8] Chen H Q. Simulation and prediction of microstructure in hot forming of metals trans. Nonferrous Met. Soc., China, 2000, No4
- [9] Guo H G. Study on simulation for the large forging projects. ICME 2000, 11
- [10] Guo H G. Controlled hot forming and cooling of retaining rings of Mn18Cr18N Steel. 4th ICTP 1993
- [11] Li J K. The investigation of the technology about the retaining ring by the hydraulic bulging strengthening through the inter-intensifier. ATMMF1992
- [12] 韩静涛. 大型饼块类锻件夹杂物裂纹形成机理及控制锻造工艺研究. 清华大学博士论文, 1995
- [13] 北京科技大学. 金属材料内部裂纹愈合的理论与应用研究, 2004, 4
- [14] 清华大学. 大型锻件成形模拟和质量控制技术, 2002 年 4 月
- [15] 刘助柏. 塑性成形新技术及其力学原理. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [16] 郑英伦. 二重集团公司基本建设和技术改造工程的总体设计. 大型铸锻件, 2005, No1
- [17] 大型铸锻件行业协会. 大型铸锻件“十一五”规划要点(讨论稿), 2004 年