

大型锻件锻造的关键技术

刘 国 晖

燕山大学机械工程学院锻压研究所, 秦皇岛, 066004



刘国晖 工程师

摘要:大型锻件的常规生产工艺存在萌生裂纹源的变形机制。从宏观力学出发剖析了大型轴类锻件、大型饼类锻件、大型板类锻件的常规生产工艺, 指出其容易产生废品的力学机理, 提出合理匹配料宽比、砧宽比和压下率来控制毛坯变形区横向和径向拉应力的方法, 从而彻底锻合毛坯内部的空洞缺陷, 改善毛坯内部金属的组织与性能, 防止内部产生裂纹, 降低废品率。该方法的可靠性得到生产实践的检验, 具有广阔的应用前景。

关键词:大型锻件; 自由锻造; 饼类锻件; 板类锻件; 轴类锻件

中图分类号: TG316

文章编号: 1004—132 X (2004)22—2037—04

Key Forging Techniques of Heavy Forgings

Liu Guohui

Yanshan University, Qinhuangdao, 066004

Abstract: The conventional technologies for heavy forgings tend to generate crack origins. The paper analyzed macro-mechanically the conventional technologies for heavy forgings of different types, such as axle-shaped forgings, dish-shaped forgings and plank-shaped forgings, and further pointed out the mechanism resulting in reject products, and put forward the method, using the blank-width ratio & tool-width ratio & reduction ratio simultaneously, to control the transverse and radial stresses in deformation zones of billets. The method can be used to consolidate void defects in billets extraordinarily, to improve the tissue and properties of inner metal, to prevent from inner cracks and to decrease the reject rate. The credibilities of the key techniques, which hold a great promise, are testified by production practices.

Key words: heavy forgings; free forging; dish-shaped forgings; plank-shaped forgings; axle-shaped forgings

0 引言

根据几何特征, 可将大型锻件分为三种类型: 大型轴类锻件、大型饼类锻件和大型板类(模块等)锻件。大型发电机汽轮机转子、核电站压力容器中的管板、大型轧辊、船舶用传动轴、冲击载荷模块等, 不但尺寸越来越大, 且使用条件也越来越苛刻。锻件大型化, 使得所用的钢锭也朝着超大型化的方向发展。生产实践表明, 由于金属材料的物理化学特性, 即使采用最现代化的冶金技术, 钢锭内部的偏析、疏松及缩孔类缺陷也几乎是不可避免的。钢锭越大, 这些缺陷就越严重, 由于设备能力和操作条件方面的限制, 生产优质的锻件也就越困难。

冶金缺陷的消除, 必须通过锻造来实现, 即给钢锭以足够的变形量, 使疏松压实, 缩孔锻合, 偏析组织得以改善。要想达到此目的, 所采用的锻

造工艺应能保证锻件内部缺陷集中区域不出现拉伸应力, 否则, 不但不能将缺陷消除, 而且还有可能使之更加严重。由于锻造工艺理论方面的某些错误, 使得现行大型锻件的锻造工艺往往不能满足其质量要求。在实际生产中, 常常由于超声探伤不合格, 而使价值数百万的锻件报废, 造成巨大的经济损失。

本文针对大型锻件质量要求的特点, 通过分析、综合, 归纳出了大型锻件锻造的关键技术, 其中的某些部分已得到实践检验, 对实际生产有指导作用。

1 大型轴类锻件锻造的关键技术

大型轧辊、传动轴、汽轮机转子等都属于大型轴类锻件, 其中以汽轮机转子的质量要求最为严格, 可以作为大型轴类锻件的典型代表。汽轮机转子锻件要求具有高强度、高塑性、高韧性、低的中心脆性转变温度(FATT), 晶粒细小, 超声波探伤要求很高, 技术要求达到具有世界先进水平的

收稿日期: 2004—02—25

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(59235101)

美国西屋公司标准。

1.1 汽轮机低压转子锻件现行锻造工艺及其存在的问题

作为典型的大型轴类锻件,汽轮机低压转子一般采用墩粗与拔长的组合工艺。目前采用较多的拔长工艺主要有 FM(free from mannesman effect)锻造法、WHF(wide die heavy blow forging)法、对称或不对称的上下 V 形砧锻造法以及 20 世纪 50 年代末由日本 Tefeno 和 Shikano 提出的 JTS 法。中国某重型集团在锻制 300MW 汽轮机低压转子时则采用了三次墩粗、三次 WHF 法、两次 JTS 法和一次 V 形砧压实的锻造工艺。

就上述工艺实例而言,有一个极为重要的问题需要澄清,即前道工序对消除冶金缺陷的积极作用是否会被后续工序抵消,甚至产生新的锻造缺陷。如果工艺参数选择不当:在随后的墩粗工序中,若径比大于 1,在缺陷较多的工件中心部位,会产生径向和切向拉应力^[1];在随后的拔长工序中,若料宽比小于 1,会在拔长部位产生横向拉伸应力^[2]。这些拉伸应力有可能将上道工序已锻合缺陷(但未被焊合者)重新拉开。

1.2 锻造的阶段性的作用

解决上述问题的关键,是要明确锻造的各工序欲达到的目的和实际工艺所能起到的作用。

按照对转子锻件所起的作用而言,可把锻造分为三个阶段:第一阶段以彻底破碎铸造组织为主,主要目的是使锻件达到所要求的力学性能(特别是 α_k 值)。这个阶段要用 1~2 次墩粗加拔长或拔长加墩粗来实现;第二阶段彻底锻合内部孔隙性缺陷,严防内部萌生新裂纹,以满足超声波探伤的技术要求为主要目标;第三阶段用控制热力学参数的锻造方法来解决转子中的混晶问题。为了满足转子的质量要求,第二阶段必须兼有第一阶段的作用,第三阶段也应具有第二阶段的功效。

1.3 转子锻件锻造的关键技术

为了实现汽轮机转子锻件成形过程中锻造的阶段性的作用,必须保证在锻造变形的每一瞬时,工件内部不出现拉应力。为此,需要应用新的锻造工艺理论与技术对各锻造工序进行优化与组合,使各阶段的变形机制和功能得到最佳配合。其要点如下:

(1)在以打碎铸造组织为主的第一阶段,可采用锥形板墩粗加新 FM 法(同时用料宽比和砧宽比控制毛坯变形区中心不出现拉应力,上用普通平砧、下用大平台的锻造方法)或 LZ 锻造法(同

时用料宽比和砧宽比控制毛坯变形区中心不出现拉应力的拔长工艺)拔长。

(2)焊合内部孔隙为主的形变阶段应在一次拔长中完成。拔长可采用新 FM 锻造法或 LZ 锻造法进行,中间可加 JTS 法,但不允许 JTS 压实后再有平板墩粗变形。

(3)拔长方法应先选 LZ 锻造法,如砧宽比小,不能满足要求,则改选新 FM 锻造法。不论是选用 LZ 锻造法还是应用新 FM 锻造法,都应严格控制砧宽比 W/H 、料宽比 B/H 和压下率 $\Delta H/H$ 的合理匹配^[1]。在 300MW 及以上的汽轮机低压转子锻件锻造工艺中可选用 JTS 锻造工艺。

(4)在主要变形阶段,始锻温度应达到 1250~1270℃,并保证足够的保温时间,以便于偏析扩散,保证坯料温度均匀。

(5)方形截面毛坯变形成圆形截面毛坯,允许用平砧压成八面体外,其余成形过程都可采用上下 V 形砧完成。

(6)消除混晶的控制锻造,可采用高温停锻或低温停锻工艺。

2 大型饼类锻件锻造的关键技术

最典型的饼类锻件有管板、平盖、封头等,其尺寸特征是高径比 $H/D < 1$ 。饼类锻件一般以墩粗为主要工序锻制而成,要求质量很高,生产难度要比轴类锻件更大,工艺不当,就会使锻件报废。在实际生产中,这类锻件的墩粗变形量虽然很大,但仍会出现横向型内裂层缺陷,其原因不能用古典的塑性力学理论解释。

2.1 大型饼类锻件常规生产的成形分析

大型饼类锻件常规锻造的工艺方案见图 1。

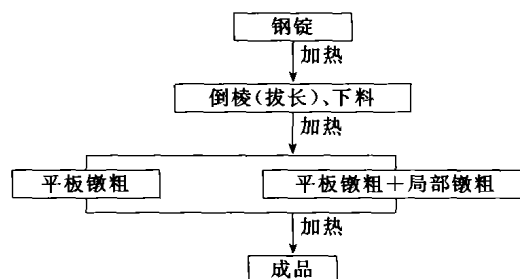


图 1 常规锻造的工艺方案

(1)倒棱(拔长):变形量小,内部组织不能得到很好改善。

(2)平板墩粗(高径比 H/D 在 1~2 之间):
 $H/D > 1$ 时,锻件中心(难变形区除外)存在径向和切向拉应力,只有当墩粗毛坯高径比 H/D 达到 1 时,其中心才呈三向压缩应力状态。难变形区基本不变形,保持倒棱(拔长)后的内部组织。

(3)继续墩粗变形到成品尺寸,通常有如下两种工艺方案:①压机能力允许的情况下,用上下平板继续墩粗至成品。此过程中,在毛坯($H/D < 1$)中心对称面附近,剪切变形激烈,且随变形体高径比的降低而加剧^[1]。如果毛坯材料没有得到一定的预变形,材料的夹杂、偏析又比较严重,在剪切变形激烈部位会引起严重的剪切裂纹。②用上下平板继续墩粗变形,压机压力不够。在此情况下,只能用局部墩粗来完成。在进行局部墩粗的过程中,缺乏具体的工艺规范来控制不利的变形机制,更容易在不合理的工艺条件下变形而产生内部缺陷。

2.2 大型饼类锻件锻造的关键技术

针对现行常规工艺的不足,根据锻造领域最新理论和技术成果,本文提出了大型饼类锻件锻造的关键技术,其要点如下:

2.2.1 锥形板墩粗+局部压平的新工艺^[1,3]

钢锭倒棱、预拔长下料,再经加热后用上下锥形粗板墩粗。此工艺可用于电炉冶炼、真空浇注或大气浇注的钢锭,可保证内部为三向压缩应力状态,能迫使平板墩粗时出现的刚性区变形($H/D > 1$),以及消除($H/D < 1$)或降低($H/D \ll 1$)平板墩粗体内静水应力区的剪切变形强度,使整体变形均匀。这对锻合毛坯内部的空洞缺陷、改善毛坯内部金属的组织与性能、防止内部新缺陷(裂纹或夹杂性裂纹)的产生具有良好的效果。此工艺经生产证明是生产饼类锻件的最佳工艺。具体操作有如下两种方法:

(1)下料使原始高径比 $H_0/D_0 \approx 1.6$;加热后立料于平板上,用锥形墩粗板压凹;翻转 180° ,立放在锥形墩粗板上,上面再置放锥形板,墩粗变形到适当高度;然后在平板上用局部变形辗平一面,翻转 180° 再辗平另一面。

(2)下料使原始高径比 $H_0/D_0 \leq 2$;加热后立料于平板上,上置锥形墩粗板,在液压机上墩粗变形到一定高度,取下锥形墩粗板,用局部变形方法辗平;翻转 180° ,立料于平板,上面再搁置锥形板,墩粗变形到一定高度,取下锥形墩粗板,再用局部变形方法辗平。

2.2.2 平板整体墩粗圆柱体+方砧局部墩粗的工艺

如果缺乏上述工艺方案的工具条件,则在冶金条件良好时,可采用本工艺。具体过程如下:钢锭经倒棱、预拔长变形(拔长比不小于2)后下料;坯料加热后在平板间进行墩粗,墩粗变形量应达到60%;再用小方砧进行局部墩粗,先压外围,最

后压中心,第一次局部墩粗时小方砧的边长 A_1 与工件高度(或厚度) H_1 之比 A_1/H_1 应在 $0.85 \sim 1.20$ 的范围内,随着毛坯高度的降低,再次局部墩粗时,要选用尺寸小一些的方砧,以保证其边长 A_2 与工件高度 H_2 之比仍保持在 $0.85 \sim 1.20$ 的范围内,第三次或第四次局部变形仍需满足此关系;最后压中心部位时,中心凸起处的横向尺寸 D_c 与其高度 H_c 之比 D_c/H_c 还在 $0.85 \sim 1.20$ 范围内。

用小方砧进行局部墩粗有两种方法:一是上下都用小砧,对称同压;二是用小砧进行局部变形压一面,后翻转 180° 压另一面(注意压另一面时,毛坯高度已减小)。

在小方砧不具备的条件下,可用平砧代替,但要严格控制压料尺寸。

3 大型板类锻件锻造的关键技术

大型板类锻件的尺寸如用 L (长) $\times B$ (宽) $\times H$ (高)来表示,其特征为 $L/B \geq 1, B/H \geq 1.3$,且 $H \geq 300\text{mm}$ 。

3.1 板块锻件的常规工艺分析

大型板块的普通锻造工艺过程为:钢锭墩粗(或倒棱、墩粗)后用上下平砧拔长来完成其主要变形阶段。由于模块的尺寸特征,在模块宽度方向压下时,满足不了不产生轴向拉应力的砧宽比($W/H \geq 0.85$)和不产生横向拉应力的料宽比(B/H 在 $0.85 \sim 1.18$ 之间)的条件^[4],这样,在锻造过程中,工件内部就不可避免地存在双向拉伸应力,在晶界或有冶金缺陷的部位形成裂纹源。压完一趟后再翻转 90° 从模块高度方向压下时,料宽比 B/H 会远远大于1,若砧宽比再控制不当,就有可能在变形区的水平对称面附近产生很大的剪切应力而萌生出层状横向裂纹源。前次出现的纵向裂纹和翻转 90° 后萌生的层状横向裂纹,都在毛坯内部的同一位置同一方向。这样,反复变形的结果使得裂纹源扩展为裂纹缺陷。因此采用常规工艺锻造板块,产品合格率通常只有 $50\% \sim 60\%$ 。

3.2 大型板类锻件锻造的关键技术

(1)无横向拉应力锻造法 在设备能力许可的条件下,可以采用无横向拉应力锻造法^[5]。只需满足砧宽比 $W/H > 0.85$,便可使锻件中心部位处于三向压缩应力状态,排除萌生裂纹源的变形机制,保证模块锻件的质量。

(2)新 FM 锻造法 在设备能力不够的条件下,可以采用新 FM 锻造法。用新 FM 锻造法锻

基于三维凸包的可变形离散网格模型

杨文玉 胡雯蔷 熊有伦

华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉, 430074



杨文玉 副教授

摘要:针对有限三维点集的表面重构问题,提出一种可变形网格模型的建模方法。对网格模型的流形表达、可变形网格的约束模型等关键技术进行了研究和探讨,提出了确定和维护网格变形方向的方法,并给出了三维离散点集的凸包计算结果。

关键词:表面重构;三维凸包;变形行为;网格模型

中图分类号:TP391. 41

文章编号:1004—132X(2004)22—2040—04

A Deformable Mesh Model Based on Convex Hull of Scattered Points

Yang Wenyu Hu Wenqiang Xiong Youlun

Huazhong University of Science & technology, Wuhan, 430074

Abstract: A deformable mesh model was presented for surface reconstruction from a finite 3D point set. Several key techniques were discussed about the topology manifold and constraint model of the mesh model. It describes a method to set up and maintain the orientation of mesh deformation, and gives the resulted convex hull of a scattered point set.

Key words: surface reconstruction; 3D convex hull; deformation behavior; mesh model

0 引言

离散点集的三维重构是形状建模的基础问题之一,广泛应用于逆向工程、快速成形、三维可视化、虚拟环境建模、几何压缩、机器人视觉和自动对象识别中。在三维表面重构研究中,一般地,基

于物理的可变形重构模型常采用隐式曲面,基于几何模型重构方法则常采用多边形模型。前者的主要问题是如何克服局部极小^[1],后者则常伴随十分复杂的几何结构和搜索方法。为了扬长避短,结合几何模型和物理变形的的方法成为近年来的一个重要研究方向。文献[2]提出了通过单纯形网格的变形实现重构的一般方法;文献[3]提出基于 Voronoi 图与隐函数方法相结合的距离函数

收稿日期:2004—02—17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175036)

造时,只要满足砧宽比 $W/H \geq 0.4$,就可防止工件中心出现轴向拉应力。这个工艺参数在沿模块宽度 B 的方向压下时,是容易满足的。而此时料宽比参数 B/H 小于 1,有可能会引起拉应力,但其大小可通过压下率来控制;压下率不宜过大,分 2 次完成,即压完一趟翻转 180° 后再压第二趟。

在随后沿高度 H (翻转 90°) 方向压下时,料宽比 B/H 一定大于 1,不会产生横向拉应力。只要对砧宽比参数严加控制,使单面压下率在 11% 的范围内,便可避免在变形区的中心对称面附近产生剧烈的剪切变形,从而防止层状横向裂纹萌生。

- [2] 李纬民,刘国晖,朱继武. 平砧拔长矩形截面毛坯横向应力控制的实验研究. 钢铁, 1999, 34(5): 34~37
- [3] 刘助柏,王连东. 用锥形板锻粗的新工艺及其力学原理. 机械工程学报, 1994, 30(4): 83~85
- [4] Liu Zhubai. Theory of Stretching a Blank with Rectangular Cross Section between Flat Tools. The 12th International Forgemasters Conference, Chicago, USA, 1994
- [5] 刘国晖. 小锻比锻造新工艺. 钢铁, 2001, 36(11): 30~32

(编辑 苏卫国)

参考文献:

- [1] 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

作者简介:刘国晖,男,1970 年生。燕山大学机械工程学院锻压研究所实验工程师。主要科研方向为大型锻件锻造理论与工艺、快速成型与逆向工程。发表论文 10 余篇。获省部级科技进步一等奖 1 项、三等奖 1 项。