

锻造过程中钢锭内部孔洞型缺陷闭合规律研究 *

徐 斌 孙明月 李殿中

(中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘 要 对可能影响锻造过程中大型钢锭内部孔洞型缺陷闭合的各种因素进行了系统研究. 结果表明, 变形温度、应变速率、摩擦系数、试样尺寸和孔洞尺寸对锻造过程中孔洞的闭合基本没有影响, 而试样高径比、孔洞位置和孔洞形状对孔洞的闭合有较大影响. 其中试样高径比和孔洞位置通过影响孔洞周围的应变条件来影响孔洞闭合, 是间接因素. 孔洞所在位置的应变越大, 孔洞越容易闭合. 孔洞形状是影响孔洞闭合的直接因素, 也是最本质的因素. 为了描述这种现象, 提出了孔洞高径比的概念. 模拟结果显示, 沿变形方向孔洞的高径比越大, 孔洞越难闭合. 基于以上研究和大型钢锭的实际解剖结果, 提出了全新的宽砧径向压实工艺(WRF法). 该工艺可使应变集中于钢锭中心区域, 并满足孔洞闭合所需的最佳高径比条件, 因此, 可高效愈合钢锭的中心缩孔、疏松. 工业实验验证了该工艺的有效性和实用性.

关键词 孔洞闭合, 孔洞高径比, 宽砧径向压实法

中图法分类号 TG316

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2012)10-1194-07

THE VOID CLOSE BEHAVIOR OF LARGE INGOTS DURING HOT FORGING

XU Bin, SUN Mingyue, LI Dianzhong

Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: SUN Mingyue, associate professor, Tel: (024)23971973, E-mail: mysun@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51204157)

Manuscript received 2012-06-08, in revised form 2012-07-17

ABSTRACT All the parameters that may affect void closure behavior are judged using finite element method (FEM). The simulation results show that temperature, strain rate, friction coefficient, sample size and void size do not affect the void closure behavior. Height-diameter ratio of the sample and void position will affect the strain around the void and the void will be easier to close when the strain around it are higher. Of all the parameters, void shape is the most important one. Height-diameter ratio of the void is defined to describe the effect of void shape. The simulation results show that the larger height-diameter ratio of the void, the harder it is for the void to close. Based on these results and the sectioning results of a 100 t ingot, a new forging method, wide-anvil radial forging (WRF) is proposed. WRF method can concentrate the strain on the center of the ingot; meet the optimum height-diameter ratio condition of the void closure and heal shrinkage cavities effectively. Experiments on continuous casting billets prove the effectiveness and applicability of this method.

KEY WORDS void closure, height-diameter ratio of void, wide-anvil radial forging (WRF) method

大型锻件是重大装备的基础零部件, 其制造能力是衡量一个国家工业发展水平的重要标志. 随着我国经济的高速发展, 能源电力、冶金机械、船舶制造等重点行业迫切需要配套优质大型锻件, 如百万千瓦级核电汽轮机转子、大型锻钢支承辊、船用大马力低速柴油机组合曲轴等.

大型钢锭是制备大型锻件的基础. 由于金属的凝固收缩, 大型钢锭内部不可避免地会产生缩孔、疏松、气孔等孔洞型缺陷^[1]. 通过解剖分析当前工业生产条件下获得的 100 t 核电转子用钢锭, 发现其中心存在长度为 1700 mm, 宽度为 20 mm 的轴线缩孔、疏松带, 如图 1 所示^[2]. 这些缺陷的存在严重破坏了材料的连续性, 采用常规锻造工艺难以将其有效愈合, 造成锻件因超声探伤不合格而批量报废. 解决这个问题一方面需要通过前期优化铸锭工艺以减轻缩孔疏松, 另一方面需要后期开发高效的中心压实锻造工艺予以去除, 以获得内部致密、质量可靠

* 国家自然科学基金资助项目 51204157

收到初稿日期: 2012-06-08, 收到修改稿日期: 2012-07-17

作者简介: 徐 斌, 男, 1984 年生, 博士生

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2012.00339

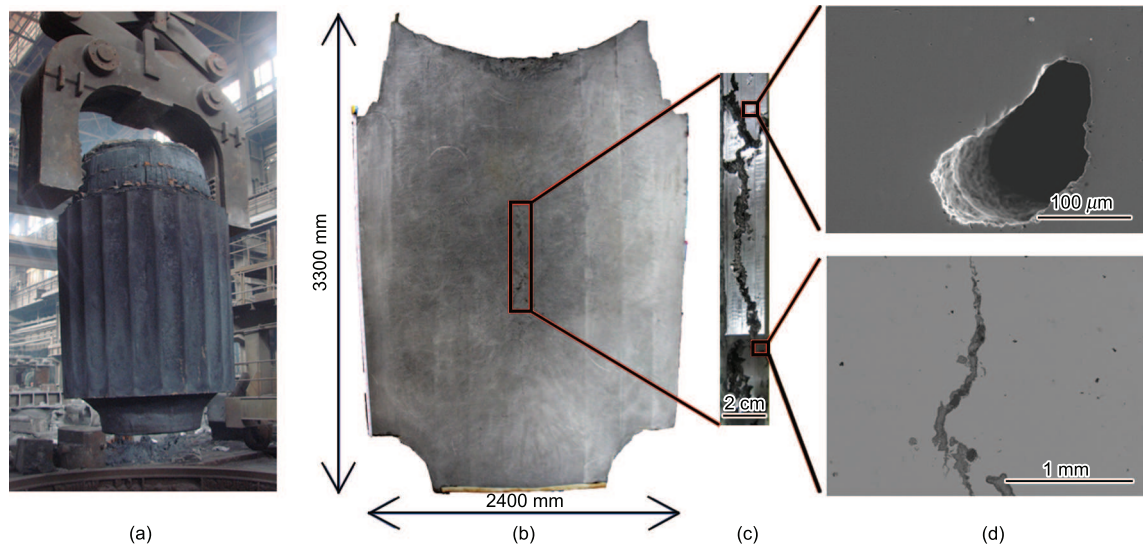


图 1 100 t 核电转子用钢锭内部缺陷的实际解剖照片 [2]

Fig.1 Sectioning results of a 100 t ingot for nuclear low pressure rotor [2]

- (a) the demoulded ingot
 (b) the macro examination on the cross section
 (c) shrinkage cavity on the axle of ingot
 (d) typical micro void and crack in the area of shrinkage cavity

的大型锻件. 本工作重点研究后一内容.

空洞型缺陷的愈合过程包含 2 个阶段: 空洞闭合和闭合界面的焊合 [2-5]. 闭合是指空洞在锻造过程中不断变形, 最终实现上下表面的物理接触; 焊合是指闭合界面在一定温度、接触压力以及保温时间的条件下通过扩散、再结晶等方式实现冶金结合. 在锻造过程中, 钢锭中心部分通常温度较高并有较大压应力, 这非常有利于闭合界面的焊合. 对钢铁材料高温扩散焊的研究 [6] 表明, 在 1100 ℃, 界面压力为 30 MPa 条件下, 保温 1 min 即可实现接触界面的冶金结合, 这种条件在大型钢锭锻造过程中非常容易达到, 也就是说, 只要钢锭内部的空洞能够充分闭合, 后续的焊合将自然实现. 因此, 本工作主要针对空洞闭合进行系统研究.

针对钢锭内部空洞缺陷的闭合问题, 20 世纪 70—90 年代, 包括日本制钢所、苏联科学院、德国 IBF, 国内清华大学、上海交大、东北重型机械学院、北京机电所、太原重机学院等科研机构的大批学者对空洞的闭合规律开展了系统研究, 形成的研究成果有力指导了当时大型锻件中心压实工艺开发 [7-15]. 近年来, 伴随重大装备超大型化、超长服役周期和超高安全性的发展趋势, 需要关键部件用材料具有更高的疲劳寿命和持久强度, 这对材料的致密化程度提出了更为苛刻的要求, 原有的一些锻造工艺难以满足当前的技术条件. 为此, 基于不断进步的材料检测手段和快速发展的数值模拟技术, 新一代科研人员在前人工作的基础上, 对空洞的闭合行为开展了广泛研究. 王祖唐等 [7,8] 通过实验和有限元模拟, 证实空洞的闭合度与

空洞周围的最大应变成线性关系, 并通过对应变的研究提出了钢锭拔长中应采用的最佳砧宽比. 李世键等 [2] 对空洞闭合过程进行了模拟, 发现典型的空洞闭合过程分为 3 个阶段, 即闭合速率减小、增加、再次减小. Lee 等 [16] 通过 X 射线检测得到钢锭中空洞的形状和分布情况, 将有限元模拟和实验进行对比后提出空洞闭合的临界局部应变应大于 0.6. Kakimoto 等 [17] 研究了镦粗过程中压下率与空洞形状和空洞位置的关系, 并提出在拔长过程中, 当空洞闭合评估系数 Q 大于 0.21 时空洞才能够闭合. Banaszek 和 Stefanik [18] 研究了砧形和压下速度、温度等参数对缺陷闭合的影响, 基于此提出了最佳的锻造工艺. Zhang 等 [19] 基于力学分析和数值计算提出了空洞体积演化模型, 得到了包含材料属性、应力应变状态和温度影响的大锻件内部空洞闭合判定准则.

大钢锭的锻造过程包括镦粗和拔长 2 个工序, 通常使用两镦两拔以提高锻件中心部分质量. 提出了 WHF 法 (宽砧强压法)、FM 法 (中心消拉应力法) 和 JTS 法 (硬壳锻造法) 等锻造方法以提高锻件中心部分应变, 有效锻合钢锭的中心缩孔、疏松 [20,21]. 这些方法已成功应用于实际生产, 显著地提高了大型锻件的质量. 针对这些锻造方法, 科研人员也进行了大量的模拟和实验以获得最优的锻造工艺参数. Chun 等 [22] 对砧宽比、错砧量、砧形以及压下率等都进行了系统的研究并提出了优化工艺. Dudra 和 Im [23] 通过二维有限元模拟对比了 V 形砧和平砧的中心压实效果, 提出 V 形砧可以获得更大的中心部分应变, 但所需压力较大. Kim 等 [24] 模拟了 520 t 钢锭的镦粗

和拔长过程,对钢锭高径比、错砧方式、压下量等进行了研究,提出了最优工艺方案应用于生产中。

本工作使用 DEFORM 软件对含孔试样的镦粗过程进行了模拟,系统地研究了各个因素对锻造过程中孔洞闭合情况的影响,揭示了其中最为重要的因素。基于这一结果提出了全新的锻造方法,与传统方法相比,此方法可以更有效地愈合钢锭中心的缩孔、疏松缺陷。此方法简单易于操作,且无需增加设备投入和操作成本,有望成为未来大钢锭锻造的标准方法。

1 孔洞型缺陷闭合的影响因素

1.1 孔洞闭合过程的有限元模型与模拟方案

采用支承辊用材料 6Cr2MnMoV,其化学成分(质量分数,%)为: C 0.69, Cr 1.56, Mn 1.12, Mo 0.52, V 0.01, Si 0.35, Ni 0.04, P 0.01, Fe 余量,测量了 6Cr2MnMoV 的热物性参数和高温应力应变曲线,并将材料参数应用在模拟过程中。

本研究采用 DEFORM-2D 软件对含孔洞试样的镦粗过程进行模拟。试样尺寸为直径 300 mm×400 mm,试样高径比约为 1.33(在试样高径比对孔洞闭合影响的研究中,试样高度按需要取值)。缺陷位于试样中心部位,按照需要设计不同尺寸、不同外形的球形或椭球形孔洞。为了更准确地模拟孔洞的变形情况和孔洞周围的应力、应变变化情况,对孔洞周围区域进行局部细化,整个模型包含约 20000 个单元。

在模拟过程中考虑了试样与模具之间的传热。试样初始温度为 1200 °C,模具初始温度为 20 °C,试样与模具之间的热交换系数为 11000 W/(m²·K)。上模具以 10 mm/s 的恒定速率下压,试样的应变速率约为 0.025 s⁻¹。为了系统地研究各种因素对孔洞闭合的影响,将可能影响孔洞闭合的因素分为外在因素和内在因素。外在因素是指与孔洞本身无关的因素,包括变形温度、应变速率、摩擦系数、试样高径比和试样尺寸。内在因素是指与孔洞本身相关的因素,包括孔洞位置、孔洞尺寸和孔洞形状。其中孔洞尺寸和试样尺寸对孔洞闭合的影响是近似等效的,在其它因素相同的条件下,当孔洞占试样的体积分数一定时,孔洞的闭合过程也基本一致,因此,在本工作中不研究试样尺寸对孔洞闭合的影响,而仅研究孔洞尺寸的影响。在研究某一因素对孔洞闭合的影响时,仅改变这一因素,其它因素均保持不变。

1.2 外在因素对孔洞闭合的影响

文献 [2, 6] 研究了变形温度和应变速率对孔洞闭合的影响,结果表明,变形温度和应变速率对孔洞的闭合过程有一定影响,但对临界闭合压下率基本没有影响。其中临界闭合压下率是指孔洞完全闭合时所需的压下率。临界闭合压下率越大,孔洞越难闭合。因此,本工作主要对摩擦系数和试样高径比这 2 个因素进行研究。

在试样尺寸为直径 300 mm×400 mm,孔洞直径为 10 mm 的条件下,通过改变摩擦系数,模拟得到在不同摩擦系数下孔洞临界闭合压下率,如图 2 所示。可见,摩擦系数对孔洞的闭合几乎没有影响。在以往的研究 [6,25] 中,由于忽略了模具与试样之间的传热,普遍认为摩擦系数越大,孔洞的临界闭合压下率越小,孔洞越容易闭合。这是由于随着摩擦系数的增大,试样中心的鼓肚越明显,应变集中于试样中心区域,使孔洞更加容易闭合。本工作在考虑了传热的情况下,试样与模具接触面附近传热较快,在压下率为 25% 时,试样上下表面与模具接触的位置温度会降低到 550 °C 左右,形成了温度很低的表面急冷区,表面急冷区的存在使试样表面不易变形,相当于表面结成了一个硬壳。由于试样与模具之间的摩擦力是作用于试样表面的,硬壳的存在将摩擦力的影响与试样内部隔绝开,使试样内部的应变分布不随摩擦系数的变化而改变,从而消除了摩擦系数对孔洞临界闭合压下率的影响。在真实的钢锭锻造过程中,钢锭与模具之间的传热是始终存在的,因此,可以认为摩擦系数对锻造过程中孔洞的临界闭合压下率没有影响。这对于钢锭的镦粗和拔长过程是适用的,但对于复杂曲面零件的模锻,则必须考虑摩擦系数的影响。

以直径为 300 mm,孔洞直径为 10 mm 的试样为基础,通过改变试样高度来改变试样的高径比。模拟得到的孔洞临界闭合压下率,如图 3 所示。可见,试样高径比越大,孔洞越难闭合。在镦粗过程中,如图 4 所示,应变会集中于试样的中心区域形成应变集中区,而在试样与模具接触面附近会形成变形死区。随着试样高径比的增大,变形死区的体积基本不变,而应变集中区域的体积变大,这就使应变分散于更大的体积内,难以集中于试样的中心。在相同的压下率下,试样高径比越大,中心区域的应变越小,位于试样中心的孔洞越难以闭合。在实际的镦粗过程中,一般试样的高径比应小于 2,否则容易在镦粗过程中产生双鼓形,在试样中心区域会产生拉应力,有可能导致形成裂纹 [26]。

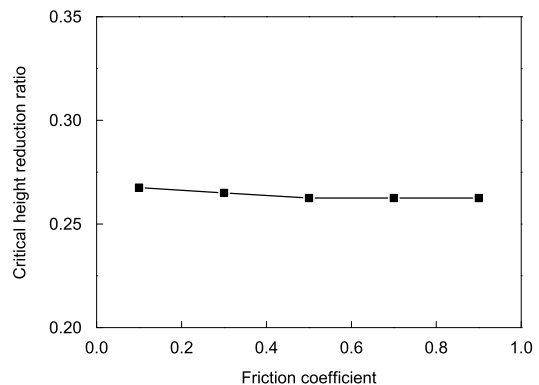


图 2 摩擦系数对临界闭合压下率的影响

Fig.2 Effect of friction coefficient on critical height reduction ratio

1.3 内在因素对孔洞闭合的影响

如图 4 所示, 在锻造过程中试样内部的应变分布是不均匀的, 试样中心部分的应变最大, 距离中心越远应变越小, 这直接影响了不同位置处的孔洞闭合情况. 由于应变集中, 位于中心区域的孔洞最容易闭合, 距离中心越远的孔洞越难闭合, 孔洞的位置对其闭合的难易程度有很大的影响. 对于图 1 所示钢锭中心的缩孔、疏松缺陷, 由于缺陷位于钢锭的轴线上, 在锻造过程中处于应变集中区域, 这有利于钢锭中心的缩孔、疏松缺陷在锻造过程中的愈合. 在钢锭中也可能存在气孔等其它的孔洞型缺陷, 这些缺陷可能距离钢锭中心较远, 这就需要较大的压下量才能使这些孔洞型缺陷闭合.

以尺寸为直径 300 mm×400 mm 的试样为基础, 改变试样中心孔洞的直径, 通过模拟得到孔洞的临界闭合压下率, 如图 5 所示. 可见, 在孔洞体积占试样体积较小的情况下, 孔洞的尺寸对于孔洞的闭合没有影响. 对于不同尺寸的孔洞, 其闭合过程和周围应变分布几乎完全相同. 这是由于在孔洞体积远小于试样体积的前提下, 不论孔洞大小如何变化, 均不会影响到孔洞周围的应变场, 因此对孔

洞闭合过程也不会产生影响. 本研究中最大孔洞直径已达 50 mm, 钢锭的实际解剖结果表明缺陷均小于该尺寸, 因此, 可认为钢锭中球形孔洞的尺寸对孔洞临界闭合压下率没有影响.

对于尺寸为直径 300 mm×400 mm 的试样, 通过在其中心部位设计不同形状的孔洞来考察这种改变对其临界闭合压下率的影响. 图 6 中的椭球形显示了孔洞的外形 (均为轴对称模型), 改变孔洞的形状, 分别设计了饼状、球形、椭球形的孔洞. 为了描述孔洞形状的差异, 提出了孔洞高径比的概念. 将沿压下方向孔洞的轴长定义为高 h (不一定为长轴长度), 将垂直于压下方向的轴长定义为径 d , h/d 即为孔洞的高径比. 不同外形的孔洞中高径比最大的椭球形孔洞其高径比为 7, 高径比为 1 时孔洞为球形, 而高径比为 0.5 时孔洞为饼状. 对于不同高径比的孔洞, 通过模拟得到的孔洞临界闭合压下率如图 6 所示. 可见, 其对孔洞的闭合有很大的影响: 沿变形方向孔洞的高径比越大, 孔洞闭合所需的压下率越大, 孔洞越难闭合. 这是由于对高径比较大椭球形孔洞来说, 其变形过程会经历由椭球形变为球形、进一步变成饼状、最终完全闭合的过程. 椭球形孔洞的闭合过程包含了球形和饼状孔洞的闭合过程, 因此其闭合最困难, 需要的临界闭合压下率最大.

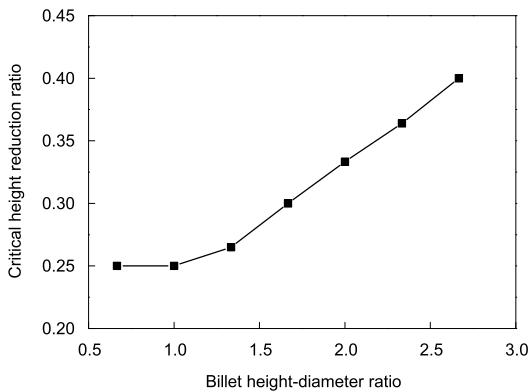


图 3 试样高径比对临界闭合压下率的影响

Fig.3 Effect of height-diameter ratio of the sample on critical height reduction ratio

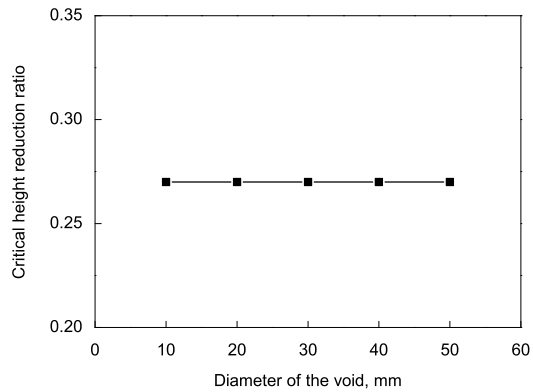


图 5 孔洞尺寸对临界闭合压下率的影响

Fig.5 Effect of void size on critical height reduction ratio

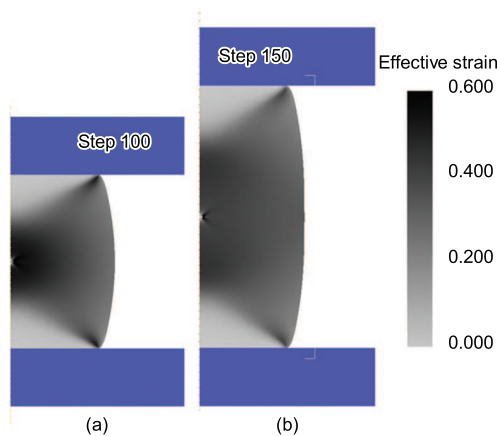


图 4 在 25% 压下率下试样高径比为 4/3 和 2 时的应变场分布
Fig.4 Strain distributions of samples with height-diameter ratios of 4/3 (a) and 2 (b) at 25% height reduction ratio

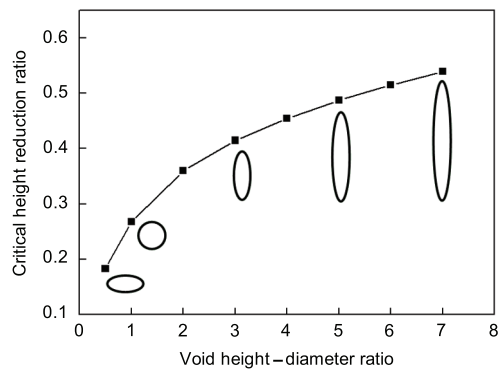


图 6 孔洞形状对临界闭合压下率的影响

Fig.6 Effect of void shape on critical height reduction ratio (Ellipses indicate the void shapes)

可以采用沿变形方向孔洞高径比来作为孔洞闭合难易程度的判据, 在模拟条件下, 孔洞高径比 h/d 与孔洞的临界闭合压下率 $\Delta H_C/H$ 符合以下关系:

$$\Delta H_C/H = 0.267(h/d)^{0.374} \quad (1)$$

通过对上述可能影响孔洞闭合的各种因素进行的系统研究发现, 变形温度、应变速率、摩擦系数、试样尺寸和孔洞尺寸对于锻造过程中孔洞的临界闭合压下率基本没有影响. 试样高径比和孔洞位置通过影响孔洞周围的应变条件来影响孔洞的闭合, 是间接的因素. 孔洞所在位置的应变越大, 孔洞越容易闭合. 在各因素中, 只有孔洞形状是影响孔洞闭合的直接因素, 也是最本质、最重要的因素. 对于不同形状的孔洞, 其闭合的难易程度有很大差异, 将各种形状孔洞归一化为具有一定高径比的形状后, 则沿变形方向孔洞的高径比越大, 孔洞越难闭合. 因此, 在对锻造过程孔洞型缺陷的压实效果进行评估时, 必须将孔洞形状作为首要的因素来考虑, 对钢锭中真实的孔洞形状进行适当简化后, 考虑其是否能在锻造过程中闭合, 而不应简单采用球形孔洞的闭合作为实际缩孔、疏松闭合的判据, 这种处理方法是以往绝大多数研究工作未曾考虑到的.

2 宽砧径向压实法(WRF 法)的提出

在实际钢锭中, 由于金属的凝固顺序是从表面到中心, 因此, 中心缩孔、疏松缺陷通常呈长条状(管状)沿轴线分布. 中心缩孔、疏松的外形条件决定了在镦粗过程中, 由于其高径比很大, 因此非常难以使其闭合. 根据上述模拟结果, 对于 $h/d=7$ 的孔洞来说, 在镦粗过程中即使以 50% 的压下率压下仍然难以使其完全闭合. 而在真实钢锭中, 如图 1c 所示, 中心缩孔、疏松的高径比可能远大于

7, 因此, 在锻造过程中, 镦粗对于中心缩孔、疏松的闭合作用是非常有限的, 主要依靠拔长过程来愈合钢锭的中心疏松.

2.1 传统宽砧强压法(WHF 法)的孔洞压实效果评估

WHF 法是在大钢锭锻造过程中常用的拔长方法. 传统理论认为, 由于使用宽砧进行拔长, 应变可以有效地施加到钢锭中心部分, 改变中心部分的应力、应变状态, 非常有利于钢锭中心孔洞的愈合. 为了评估这种锻造方法对于中心缩孔、疏松的压实效果, 对图 1 所示存在中心缩孔、疏松的真实钢锭在 WHF 法拔长过程中的情况进行了模拟.

钢锭在锻造之前外形为圆柱体, 原始尺寸为直径 2230 mm×2370 mm(去除冒口), 高径比为 1.063, 材质为 6Cr2MnMoV, 钢锭重约 100 t, 坯料加热温度为 1200 °C, 拔长所用上下平砧的砧宽均为 1200 mm, 使用 WHF 法对钢锭进行一个道次的拔长. 根据钢锭实际解剖结果, 在钢锭中心偏向冒口端存在中心缩孔、疏松的位置制造 2 个尺寸、形状与实际孔洞相类似的简化模型. 如图 7a 所示, 此孔洞模型呈圆柱体状, 尺寸为直径 12.14 mm×90 mm, 在圆柱体棱部有半径为 5 mm 的圆角.

如图 7d 所示, 在使用 WHF 法进行拔长的过程中, 每次压下后要将上砧抬起向右移动进行下一砧的压下, 此过程称为布砧. 在 2 次压下之间存在一个接砧区域, 在接砧区域的应变很小(仅 0.08), 这非常不利于此区域内孔洞的闭合. 从模拟结果可见, 在一个道次的压下完成后, 钢锭轴线上的应变分布很不均匀(从 0.08 到 0.33). 在此模拟中, 孔洞 2 恰好位于接砧区域, 从图 7c 可见, 孔洞几乎没有变形. 只有在下一道次的压下过程中错半砧, 才能使轴线方向的应变均匀分布, 但上一道次的应变集中区域在此

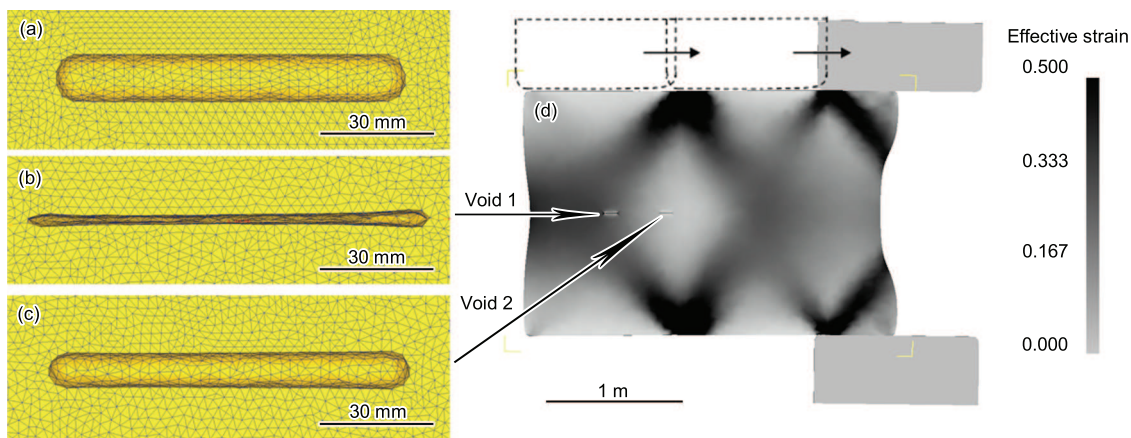


图 7 WHF 法孔洞压实效果模拟

Fig.7 Simulation of void crushing using WHF method

- (a) original shape of the void
- (b) shape of void 1 after cogging
- (c) shape of void 2 after cogging
- (d) forging method and strain distribution after cogging

道次中将成为接砧区域,这就使得钢锭中心部分的总应变是非常有限的。

孔洞 1 恰好位于应变集中区域,但由图 7b 可见,由于应变不够,孔洞无法完全闭合。而在下一道次的拔长过程中,此孔洞将处于接砧区域,无法产生较大变形进而闭合。因此,WHF 法难以使钢锭中心部分的孔洞完全闭合,其对于中心缩孔、疏松的压实效果比较有限。虽然它对钢锭中心的压实效果远好于使用窄砧进行拔长,但其在中心部分产生的应变仍然不足以使较大孔洞完全闭合。

2.2 宽砧径向压实法

为了解决传统工艺的问题,加大钢锭中心部分应变以压实孔洞型缺陷,本研究基于孔洞高径比对孔洞闭合过程的重要影响,提出了宽砧径向压实法(wide-anvil radial forging,简称 WRF 法)。此工艺使用上下大平板,沿钢锭直径方向压下,与传统轴向镦粗不同的是,该工艺的变形方向沿钢锭径向。这种工艺的优点是不但可使应变集中于钢锭中心区域,弥补传统拔长方法应变离散的缺点,而且由于钢锭的中心缩孔、疏松沿轴线分布,因此,沿径向的压下可以最大程度满足孔洞闭合所需高径比的最佳条件,弥补了传统镦粗工艺的不足。采用宽砧径向压实法对钢锭中实际孔洞的闭合效果进行了模拟,如图 8a 所示。可见,该方法使钢锭沿轴线分布的应变较大,可达到传统 WHF 法的 2 倍以上。图 8b 的结果显示,仅需施加 20% 的压下率即可使孔洞完全闭合。

对于大型钢锭,为了减轻中心缩孔、疏松缺陷,通常其高径比较小。在钢锭高径比小于 1.2 的情况下,可以直接使用宽砧径向压实法代替第一次镦粗,即在锻前加热后直接进行宽砧径向压实。如果钢锭的高径比大于 1.2,可以先进行预镦粗,将其镦粗至高径比小于 1.2,再进行宽砧径向压实。预镦粗的目的是改变钢锭的外形,以保证随后

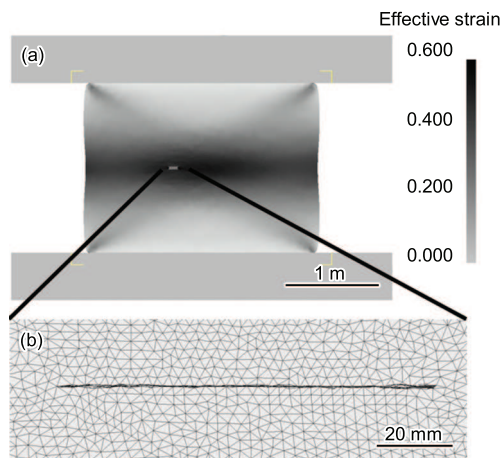


图 8 宽砧径向压实法孔洞压实效果模拟

Fig.8 Simulation of void crushing using wide-anvil radial forging

- (a) strain distribution after wide-anvil radial forging
(b) void shape after wide-anvil radial forging

的宽砧径向压实可以采用较大的压下率。此后可以使用传统的拔长工艺进行拔长,到达预定尺寸后再进行下一次的镦粗拔长过程。由于宽砧径向压实工艺所需的压下量小于常规镦粗过程,经模拟证实,该工艺坯料的变形抗力小于常规镦粗工艺,因此,使用已有压机就可以实现此工艺,不需要大量的投入进行技术改造,工艺简便易行,有望成为未来大钢锭锻造的标准方法。

2.3 宽砧径向压实法的工业验证

与钢锭相比,直径 600 mm 的连铸圆坯由于没有冒口对其中心缩孔、疏松进行补缩,因此,其中心区域通常存在严重的贯穿性缩孔、疏松缺陷,采用普通锻造工艺难以使其有效愈合,通常只能使用其锻造筒类、管类件,这就严重限制了其使用范围。大断面连铸圆坯的中心贯穿性缩孔疏松与大型钢锭中心的缩孔、疏松缺陷形状、分布非常相似,因此,可以使用连铸坯来验证宽砧径向压实法的有效性。

取 9 支 2 m 长的直径为 600 mm 连铸坯,其中一支的截面照片如图 9 所示,其中心存在着非常严重的缩孔。采用宽砧径向压实法沿轴向进行压下,压成扁方后将其回炉加热,使已闭合的孔洞有充分的时间焊合。之后使用 600 mm 宽砧拔长,摔圆至直径 385 mm。作为对比,取同一批次的另 9 支连铸坯,使用 600 mm 宽 KD 砧(上平砧和下 V 型砧)直接进行拔长,再摔圆至直径 385 mm (由于连铸坯高径比较大,难以使用镦粗工艺,因此直接对其拔长)。

锻造结束后,采用较为严格的 GB/T 6402-1991 2 级标准进行探伤。探伤结果显示,使用 KD 砧直接拔长的

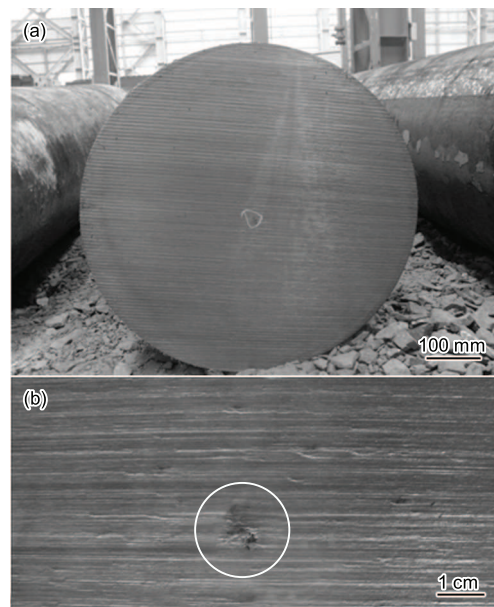


图 9 连铸坯横截面照片

Fig.9 Picture of the continuous casting billet

- (a) section of the continuous casting billet
(b) local amplification of the center of the billet

对照组 9 支连铸坯有 5 支合格, 合格率为 55.6%。沿坯料轴线随机分布着点状或密集状的缺陷。这是由于拔长过程中压下率较小, 在局部接砧区域存在变形死区, 此区域内的缩孔疏松无法有效愈合。采用宽砧径向压实法的 9 支连铸坯合格率为 100%。这是由于使用宽砧径向压实工艺后应变均匀地沿坯料轴线分布, 不存在变形死区, 可使轴线缩孔疏松有效愈合。

实验结果证实宽砧径向压实法对愈合钢锭或连铸坯轴线缩孔疏松缺陷有非常良好的效果, 可以提高其探伤合格率, 大大降低报废风险。

3 结论

(1) 通过对可能影响锻造过程中大型钢锭内部孔洞闭合的各种因素进行系统研究发现, 变形温度、应变速率、摩擦系数、试样尺寸、孔洞尺寸对锻造过程中孔洞的临界闭合压下率基本没有影响, 而试样高径比、孔洞位置和孔洞形状对于孔洞的临界闭合压下率有较大影响。

(2) 试样高径比和孔洞位置通过影响孔洞周围的应变条件来影响孔洞的闭合, 是间接的因素。孔洞所在位置的应变越大, 孔洞越容易闭合。在各因素中, 只有孔洞形状是影响孔洞闭合的直接因素, 也是最本质、最重要的因素。沿变形方向孔洞的高径比越大, 孔洞越难闭合。

(3) 提出了宽砧径向压实工艺, 该工艺可使应变集中于钢锭中心区域, 并满足孔洞闭合所需高径比的最佳条件, 可有效愈合钢锭的中心缩孔、疏松。与传统工艺相比, 该工艺仅需要约 20% 的压下量即可使钢锭的中心缩孔、疏松缺陷完全闭合。工业实验验证了该方法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] Campbell J, translated by Li D Z, Li Y Y. *Castings*. 2nd Ed., Beijing: Science Press, 2011: 240
(Campbell J 著, 李殿中, 李依依 译. 铸造原理. 第 2 版, 北京: 科学出版社, 2011: 240)
- [2] Li S J, Sun M Y, Liu H W, Li D Z. *Acta Metall Sin*, 2011; 47: 946
(李世健, 孙明月, 刘宏伟, 李殿中. 金属学报, 2011; 47: 946)
- [3] Park C Y, Yang D Y. *J Mater Process Technol*, 1996; 57: 129
- [4] Park C Y, Yang D Y. *J Mater Process Technol*, 1997; 72: 32
- [5] Ma Q X, Zhong Y X, Cao Q X. *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 1999; 39(11): 94
(马庆贤, 钟约先, 曹起骧. 清华大学学报 (自然科学版), 1999; 39(11): 94)
- [6] Li S J. *PhD Thesis*, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 2011
(李世健. 中国科学院金属研究所博士学位论文, 沈阳, 2011)
- [7] Wang Z T, Liu Z, Ren M. *Chin J Mech Eng*, 1989; 25(3): 51
(王祖唐, 刘庄, 任猛. 机械工程学报, 1989; 25(3): 51)
- [8] Wang Z T, Liu Z, Ren M. *Chin J Mech Eng*, 1989; 25(4): 47
(王祖唐, 刘庄, 任猛. 机械工程学报, 1989; 25(4): 47)
- [9] Wang A, Thomson P F, Hodgson P D. *J Mater Process Technol*, 1996; 60: 95
- [10] Kopp R, Ambaum E. *Stahl Eisen*, 1976; 96: 1004
- [11] Kopp R, Stenzhorn P. *Stahl Eisen*, 1983; 103: 377
- [12] Ono S, Minami K, Ochiai T, Iwadate T, Nakata S. *Japan Soc Mech Eng*, 1995; 61(585): 387
- [13] Park C Y, Yang D Y. *J Mater Process Technol*, 1997; 67: 195
- [14] Ren G S, Huang Z H, Bai Z B. *Chin J Mech Eng*, 1995; 31(2): 93
(任广升, 黄朝晖, 白志斌. 机械工程学报, 1995; 31(2): 93)
- [15] Han J T, Zhao G, Cao Q X. *Acta Metall Sin*, 1996; 32: 723
(韩静涛, 赵钢, 曹起骧. 金属学报, 1996; 32: 723)
- [16] Lee Y S, Lee S U, VanTyne C J, Joo B D, Moon Y H. *J Mater Process Technol*, 2011; 211: 1136
- [17] Kakimoto H, Arikawa T, Takahashi Y, Tanaka T, Imaida Y. *J Mater Process Technol*, 2010; 210: 415
- [18] Banaszek G, Stefanik A. *J Mater Process Technol*, 2006; 177: 238
- [19] Zhang X X, Cui Z S, Chen W, Li Y. *J Mater Process Technol*, 2009; 209: 1950
- [20] Kang D T, Ye G B. *Materials and Heat Treatment of Large Forgings*. Beijing: Longmen Bookstore, 1998: 73
(康大韬, 叶国斌. 大型锻件材料及热处理. 北京: 龙门书局, 1998: 73)
- [21] Wang L G, Huang Y, Liu Z B. *J Plast Eng*, 2002; 9(2): 28
(王雷刚, 黄瑶, 刘助柏. 塑性工程学报, 2002; 9(2): 28)
- [22] Chun M S, Van Tyne C J, Moon Y H. *Steel Res Int*, 2006; 77: 116
- [23] Dudra S P, Im Y T. *Int J Mach Tools Manufact*, 1990; 30: 65
- [24] Kim Y D, Cho J R, Bae W B. *J Mater Process Technol*, 2011; 211: 1005
- [25] Cui Z S, Ren G S, Xu B Y, Xu C G, Liu G H. *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2003; 43(2): 227
(崔振山, 任广升, 徐秉业, 徐春国, 刘桂华. 清华大学学报 (自然科学版), 2003; 43(2): 227)
- [26] Liu Z B, Ni L Y, Liang C, Liu G H, Deng D M. *Chin Mech Eng*, 2005; 16(1): 74
(刘助柏, 倪利勇, 梁晨, 刘国晖, 邓冬梅. 中国机械工程, 2005; 16(1): 74)

(责任编辑: 肖素红)