

浮压法压实斜轧钢球内部空洞的条件

束学道^{1,2}, 田端阳^{1,2}, 王 雨^{1,2}, 魏伊伦^{1,2}, 殷安民^{1,2}, 王 英^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 钢球斜轧成形工艺中容易出现心部疏松、空洞等质量问题, 为了能有效地消除钢球内部空洞, 实现钢球高质量生产, 提出了利用高压气体压实钢球内部空洞的新方法, 简称浮压法。利用 DEFORM-3D 有限元软件, 研究了浮压法压实钢球内部空洞的影响因素以及各因素的影响程度。结果表明: 压实空洞的难度随空洞尺寸的增大而减小, 随空洞到球面距离的增大而增大, 随温度的升高而减小, 随气压增长速度的提高而减小; 其影响因素的主次顺序为: 钢球温度、空洞尺寸、空洞位置和气压增长速度。研究结果为提高钢球质量与成品率提供了理论指导。

关键词: 斜轧钢球; 浮压法; 空洞; 压实难度

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 01-0001-06

通过斜轧工艺生产出的钢球, 作为重要的基础零部件已广泛应用于汽车、农业机械、航空等制造领域, 尤其是高精密的钢球在国民经济发展中起着重要作用^[1]。钢球工作时不断地受到交变载荷的作用, 工作环境极其恶劣, 要使钢球具备较好的机械性能, 对其成形质量的要求必然严格。实际通过斜轧工艺生产钢球时, 钢球内部容易出现疏松、空洞等缺陷^[2], 主要原因是受到了工艺参数、外部条件的影响。在交变应力的作用下, 钢球内部缺陷会进一步恶化, 很大程度上影响着钢球的工作性能与服役寿命, 这类缺陷的存在一直制约着我国斜轧技术的发展。

针对这类问题, 不少国内外学者进行了大量的研究。雷建中等^[3]对热轧轴承钢球心部空洞进行了形貌分析, 认为球内空洞近似为球状; 胡正寰等^[4]对斜轧工艺的基本原理、孔型设计、机械设备以及工艺调整等进行了研究; 曹强等^[5]对轴承钢球毛坯热轧成形过程进行了仿真模拟, 认为钢球心部缺陷的产生是由循环交变切应力、横向拉应力以及多向拉应力引起的负静水压力共同作用的结果; 杜少杰等^[6]研究了轧辊倾角、导板距和轧辊转速对

斜轧钢球质量的影响。

为了提高钢球质量, 前人主要从优化工艺参数与控制成形条件两方面进行了相关研究, 但这些措施都未能有效地消除钢球内部空洞, 因此有必要寻求新的解决办法。本文在参考文献[7-12]基础上, 首次提出了浮压法, 即利用高温高压气体压实钢球内部空洞的方法, 结合有限元模拟与单因素分析法, 得到了钢球内部空洞变形的影响因素^[12], 并综合分析了各因素的影响程度, 研究结果为提高钢球质量提供了参考。

1 模拟条件建立

1.1 浮压原理及优势

图1为浮压装备简化图。浮压装备的工作原理为: 利用超声波探伤技术从批量成品中筛选出内部存在缺陷的钢球。高温加热钢球后, 将其置于浮压装备内的V形定位架上, 关闭活动门, 向密闭装置中充入氮气, 同时驱动活塞做压缩气体运动, 使装置内部快速形成高温高压。在高温高压的惰性环境下, 高温钢球散热率低、金属流动性好、表面不易被氧化、压实钢球内部空洞所需的气压较小,

当压力超过其屈服强度时, 钢球开始发生塑性变形, 施压一段时间后, 其内部空洞可被压实。

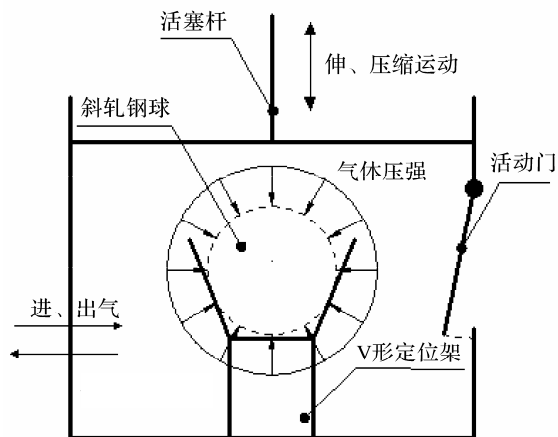


图1 浮压装备简化图

浮压法具有钢球无需通过模具加压的优势, 可避免因钢球受压不均匀而导致变形不均匀的问题, 且其操作方便、通用性好, 适用压实各种轴类件和球类件。

1.2 模拟对象选取

由于实际钢球的内部空洞近似为球状, 且其分布无规律, 仿真模拟时无法对其精确建模, 所以假设球内空洞均为球状。以钢球零件(图2)为例, 进行浮压工艺的研究。图2中 D 为钢球直径, L 为空洞到球面的距离, d 为空洞初始直径。由于暂不考虑多个空洞之间的影响, 所以本文只涉及对单个空洞的研究, 球的材料为45[#]。

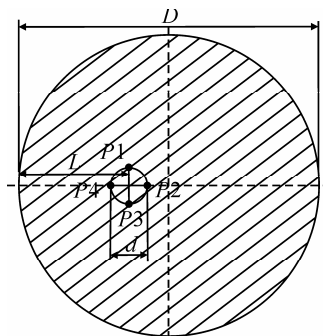


图2 钢球截面示意图

1.3 内部缺陷研究方法

为了能准确地分析浮压过程中钢球内空洞的变形速度, 选取最能直观反映空洞变化规律的轮廓节点, 分别为球状空洞轮廓面上的4个节点($P1 \sim P4$), 各节点分布如图2所示。

各点对应的空洞动态直径 ϕ_i 为其到空洞球心距离的2倍, 并设点 $P1 \sim P4$ 的径向位移分别为 ΔR_i ($i=1, 2, 3, 4$), 则 $\phi_i = d - 2\Delta R_i$ 。研究对象为空洞直径, 其值为点 $P1 \sim P4$ 所对应直径的平均值, 具体计算公式为:

$$\Phi = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (d - 2\Delta R_i). \quad (1)$$

结合式(1), 可以追踪到不同工况下钢球内部空洞的直径 Φ 。通过分析内部空洞的变形速度以及变形程度, 可以得出空洞压实的条件以及影响因素。

1.4 试验参数选取

浮压工艺属于热挤压成形, 需对钢球进行高温加热, 依据斜轧理论, 要求其温度在850℃以上。采用浮压法压实钢球, 由于其内部空洞分布无规律, 在相关理论形成之前, 人们很难凭经验来选取合理的工艺参数, 所以有必要研究空洞直径 d 、空洞到球面的距离 L 、钢球温度 T 、气压增长速度常数 K 对空洞变形速度的影响。本文选取直径为60 mm的钢球作为研究对象, 实测得该类钢球内部空洞的直径小于10 mm, 并采用4因素3水平方案进行仿真模拟。各试验参数见表1, 3种不同的气压加载方式如图3所示。

表1 试验参数表

钢球温度/℃	空洞到球面距离/mm	空洞直径/mm	气压增长速度/(MPa·s ⁻¹)	球直径/mm
950/1050/1150	0	4	17.50	60
1050	0/10/20	4	17.50	60
1050	0	2/4/6	17.50	60
1050	0	4	17.50/11.67/8.75	60

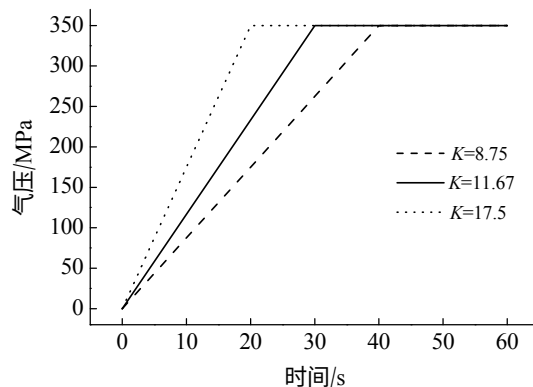


图3 气压加载曲线

2 有限元模型建立

本研究模型采用相对四面体网格划分, 较精确地分析了空洞的变形规律, 并对空洞周围区域进行了局部网格细化, 局部与其他部分的单元尺寸比为 0.1, 单元数为 100 000~110 000 个, 且视钢球为刚塑形体. 边界条件是在球面上施加面载荷, 面载荷随时间的变化曲线如图 3 所示. 为了减少模拟时间, 取钢球 1/2 模型进行运算, 最终建立的有限元模型如图 4 所示.

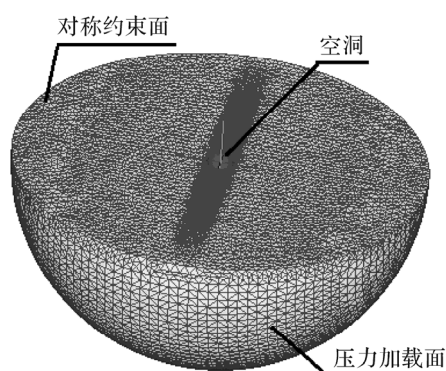


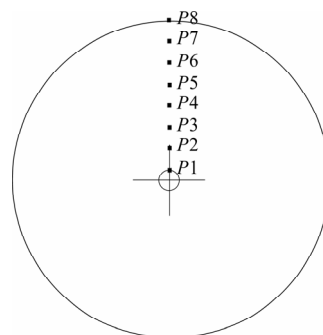
图4 斜轧钢球有限元模型

3 变形机理分析

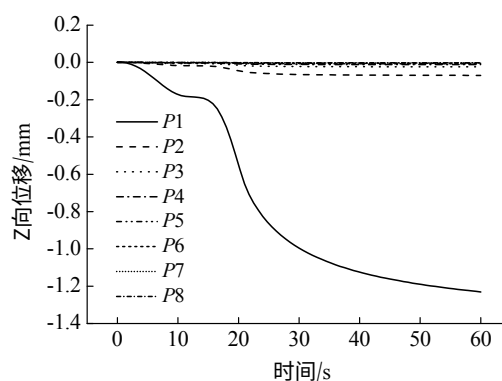
由于钢球变形源于其内部金属的流动, 所以主要从分析球内金属的流动规律与应力分布两方面来阐明钢球受气压作用时的变形机理. 选取 $D=60\text{ mm}$, $L=30\text{ mm}$, $d=4\text{ mm}$, $K=17.5$, $T=1\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况进行分析, 并在钢球纵截面上沿径向选取 8 个节点 ($P1\sim P8$), 各节点分布如图 5(a)所示, 得到各节点的径向位移以及等效应力随时间的变化曲线分别对应图 5(b)和(c).

从图 5(a)、(b)和(c)可以看出, 节点越靠近空洞, 其径向位移就越大, 流动速度也越快. 点 $P1$ 的径向位移最大, 点 $P8$ 最小, 这是因为钢球受到气压作用时, 空洞附近的金属最先流动, 起到了填充空洞的效果, 随后外层金属才开始流动, 填充了因内层金属流动而形成的空隙. 同时认为钢球是由多个与钢球同心的壳体单元层组合而成. 相比于内金属层, 外金属层表面积较大, 流动的金属较多, 而浮压过程中金属都是沿径向流动, 导致外层径向移动较小. 节点离空洞越远, 其等效应力就越小, 这是因为金属流动时都会受到其附近金属的阻碍,

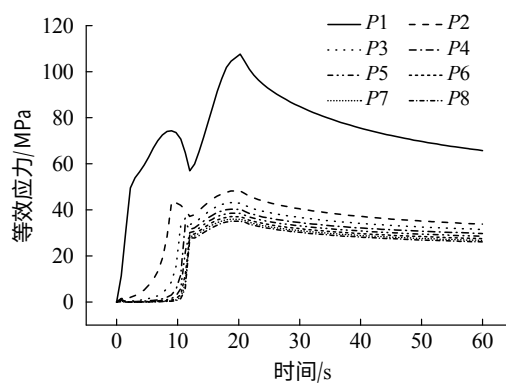
即变形抗力, 且金属越靠近空洞, 变形抗力越小, 导致其等效应力越大.



(a) 节点分布



(b) 位移变化



(c) 应力变化

图5 节点分布及其位移、应力变化曲线

依据曲线的斜率可知, 前 20 s 节点 1 的移动速度先增大后减小, 这是因为钢球处于加压阶段, 而随着压力的增大, 金属的流动速度逐渐增大, 但在 10 s 左右其变形速度出现了急剧下降, 空洞开始进入难闭合时期, 其形状对空洞的闭合产生了显著的影响. 这个时期空洞附近金属受到的变形抗力急剧上升, 等效应力大幅度减小, 导致在加压阶段末期空洞的变形速度下降较为明显. 20 s 后钢球处

于稳压阶段, 气压维持在 350 MPa, 而随着空洞的减小, 变形抗力逐渐增大, 等效应力不断地减小, 导致空洞的变形速度一直在减小. 浮压结束时, 节点 P8 的径向位移为 0.1 mm, 钢球直径减小 0.2 mm, 相对变化 0.33%, 说明浮压法既能实现钢球内部空洞的压实又能保证钢球外形和尺寸精度.

4 影响空洞变形的因素分析

4.1 空洞位置对空洞变形的影响

当空洞到球面的距离变化时, 得到空洞直径随时间变化的曲线如图 6 所示, 曲线斜率反映了空洞的变形速度. 从图 6 可以看出, 当 $D=60$ mm, $d=4$ mm, $K=17.5$, $T=1\ 050$ °C 时, 随着空洞到球面距离的增大, 其变形速度逐渐减小. 当空洞到球面的距离 $L=10$ mm 时, 空洞直径变化最大, 其值为 2.8 mm, 而 $L=30$ mm 时, 空洞直径变化最小, 其值为 2.4 mm, 可见空洞位置对其变形的影响较为显著, 实际应用中可参照空洞的位置来选择气压.

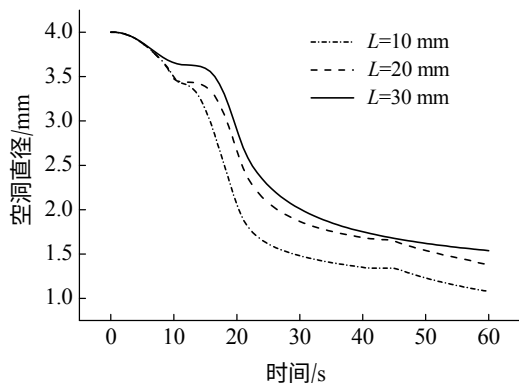


图 6 空洞位置对空洞变形的影响

根据钢球的变形机理, 空洞离球面越近, 其附近金属流动就越快, 空洞越易被压实, 反之亦然. 同时发现, 前 20 s 空洞变形速度除在 15 s 左右出现短暂性下降外, 其余时间都在不断增加. 这是因为在加压阶段末期, 金属变形抗力会因空洞形状的变化而急剧增大, 导致变形速度大幅下降. 而 20 s 后空洞的变形速度逐渐减小, 是因为在稳压阶段, 空洞附近的等效应力随其尺寸的减小而减小. 总之, 在实际应用中, 如果空洞离球面较远, 应选择较高的气压, 反之亦然.

4.2 气压增长速度对空洞变形的影响

当气压增长速度发生变化时, 空洞直径随时

间的变化曲线如图 7 所示, 曲线斜率反映了空洞的变形速度. 从图 7 可以看出, 当 $D=60$ mm, $d=4$ mm, $T=1\ 050$ °C, $L=30$ mm 时, 空洞的变形速度随着气压增长速度的增大而增大. 当气压增长速度常数 $K=17.5$ 时, 空洞直径变化最大, 其值为 2.37 mm, 而当 $K=8.75$ 时, 空洞直径变化最小, 其值为 2.25 mm, 可见气压增长速度对空洞变形的影响较小.

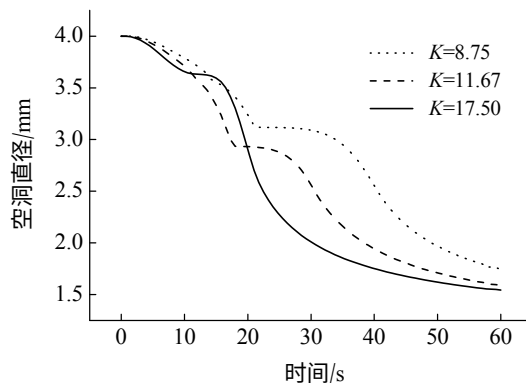


图 7 气压增长速度对空洞变形的影响

根据钢球变形机理, 气压增长越快导致空洞附近的等效应力增大越快, 空洞越易被压实. 从图 7 可以看出, 加压阶段空洞都经历了一个难闭合时期, 气压增长越快, 空洞越先进入难闭合时期, 反之亦然. 而在稳压阶段, 空洞的变形速度呈现逐渐减小趋势, 而且浮压结束时, 空洞直径相差不大. 其原因是, 虽然加大气压能够实现空洞变形速度的提高, 但是由于气压是由球面逐渐传递到内部, 压力传递与金属流动都是一个短暂的过程, 如果气压增长过快, 会导致金属来不及填充空洞, 使得提高空洞变形速度的效果不明显, 同时也增大了操作的难度. 因此在实际应用中不宜使气压增长过快.

4.3 空洞尺寸对空洞变形的影响

当空洞直径发生变化时, 空洞直径随时间变化的曲线如图 8 所示, 曲线斜率反映了空洞的变形速度. 从图 8 可以看出, 当 $D=60$ mm, $L=30$ mm, $T=1\ 050$ °C, $K=17.5$ 时, 空洞的变形速度随着空洞直径的减小而减小. 当空洞直径 $d=6$ mm 时, 空洞直径变化最大, 其值为 4.1 mm; 而当 $d=2$ mm 时, 空洞直径变化最小, 其值为 0.96 mm, 可见空洞尺寸对空洞变形的影响非常显著.

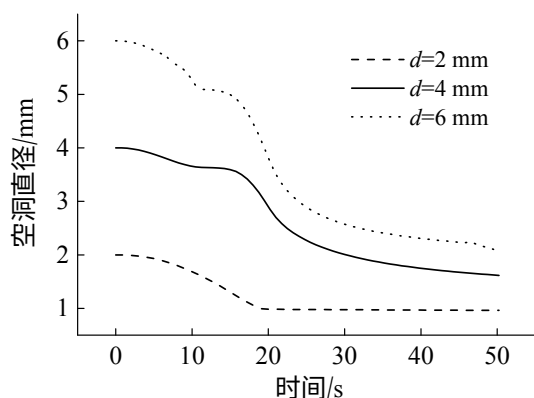


图8 空洞尺寸对空洞变形的影响

根据钢球变形机理, 空洞直径越大会导致变形抗力越小, 等效应力越大, 使得空洞变形速度越快, 反之亦然。从图8可以看出, 空洞直径越大, 越先进入难闭合时期; 且20 s后空洞变形速度均在减小, 直径为2 mm的空洞的变形速度几乎为零, 这是因为此时其直径小于0.8 mm, 空洞已演变为小缝隙, 变形抗力极大, 且外界压力维持在350 MPa, 导致空洞附近的等效应力大幅度减小, 空洞难以继续变形。为能进一步压实残留的小缝隙, 还需继续加大气压或延长浮压时间。

4.4 钢球温度对空洞变形的影响

当钢球温度发生变化时, 空洞直径随时间变化的曲线如图9所示。当 $D=60$ mm, $d=4$ mm, $L=30$ mm, $K=17.5$ 时, 空洞的变形速度随着钢球温度的升高而增大。当钢球温度 $T=1150$ °C时, 空洞直径变化最大, 其值为3.7 mm; 而当 $T=950$ °C时, 空洞直径变化最小, 其值为1.2 mm, 可见钢球温度对空洞变形的影响也较为显著。

根据钢球变形机理, 钢球温度越低会导致空

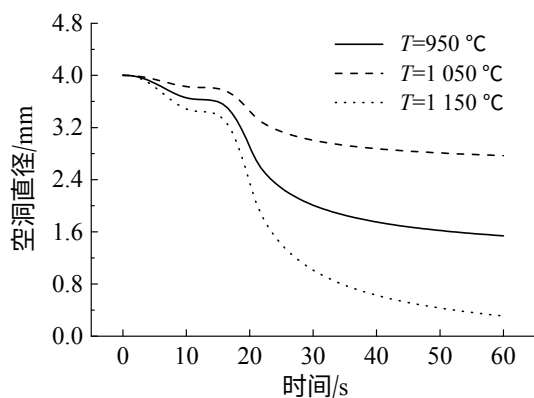


图9 钢球温度对空洞变形的影响

洞越难被压实, 反之亦然。这是因为钢球温度越高, 金属的流动性能越好, 变形抗力越小, 使得空洞变形速度越快。因此采用浮压法压实钢球内时, 合理控制钢球的温度非常关键。

4.5 各因素对空洞变形的影响程度分析

通过分析以上各项试验参数对浮压法压实钢球内部空洞的影响程度可知, 各项因素在不同程度上影响空洞的变形。为了得到各项因素对空洞变形影响的主次关系, 引入了无量纲影响因子 λ 和影响系数 η , 并定义 $\lambda_i = U_i/U_0$, $\eta_i = V_i/V_0$, 其中: U_i 为影响因素值, U_0 为影响因素初值; V_i 为浮压结束时不同工况下的空洞直径相对变化率, V_0 为相对变化率的初始值。

依据无量纲因子和其相对应的影响系数值, 得到各项影响因子对空洞变形的影响曲线如图10所示。图10中曲线的斜率反映了各因素对空洞变形的影响程度。

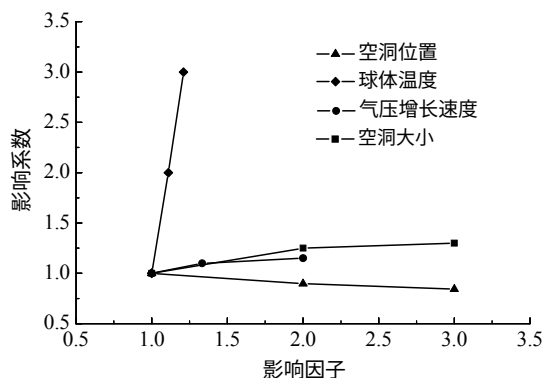


图10 影响因子对空洞压实的影响

从图10可知, 在以上所选取的试验参数范围内, 影响空洞变形的主次顺序为: 钢球温度、空洞尺寸、空洞到球表面的距离和气压增长速度。

5 结论

(1) 采用浮压法压实钢球时, 空洞附近的金属流动最快, 表层金属流动最慢, 且空洞闭合前后, 钢球仍然具有较高的形状、尺寸精度。

(2) 压实空洞的难度随着空洞尺寸的增大而减小, 随空洞到球面距离的增大而增大, 随钢球温度的升高而减小, 随气压增长速度的提高而减小。

(3) 各因素对空洞变形影响的主次顺序为: 钢球温度、空洞尺寸、空洞位置和气压增长速度。

目前采用浮压法压实钢球还处于理论研究阶段,本文的研究结果可为后期开展工艺参数优化、浮压装备研制以及实验验证等工作提供理论指导.

参考文献:

- [1] PATER Z, TOMCZAK J, BARTNICKI J, et al. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2013, 67:1.
- [2] PATER Z. Multi-wedge cross rolling of balls[J]. J Iron steel Res Int, 2013, 20(10):46.
- [3] 雷建中, 梁华. 热轧轴承钢球心部孔洞分析实例[J]. 轴承, 2010(8):41-42.
- [4] 胡正寰, 华林. 零件轧制成形技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:51-73.
- [5] 曹强, 华林, 钱东升. 轴承钢球毛坯热斜轧成形过程的数值模拟[J]. 轴承, 2015(1):16-21.
- [6] 杜少杰, 任小中, 刘永庆. 影响斜轧钢球质量的因素分析[J]. 机械设计与制造, 2013(2):248-250.
- [7] 崔振山, 徐秉业, 任广升, 等. 大锻件内部空洞的锻合压下率[J]. 塑性工程学报, 2002, 9(3):6-8.
- [8] 崔振山, 任广升, 徐秉业, 等. 圆柱体内部空洞的热锻闭合条件[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(2):227-229.
- [9] 张效迅. 大锻件锻造成形过程中内部空洞型缺陷演化规律的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [10] 吴永强, 安红萍. 基于宏细观模型的疏松缺陷研究方法[J]. 太原科技大学学报, 2012, 33(5):375-378.
- [11] 刘倩, 黄放, 吴玉忠. 大型锻件心部空洞型缺陷控制的数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(2):132-136.
- [12] 位杰, 束学道, 柳传, 等. 工艺参数对闭联合模横轧轴件端部质量的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(15):140-144.

Conditions of compacting inner void of helical-wedge rolling steel-balls by floating-pressure method

SHU Xue-dao^{1,2}, TIAN Duan-yang^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, WEI Yi-lun^{1,2}, YIN An-min^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the process of helical-wedge rolling of steel balls, some quality defects, such as core loose and core void, are easily noted in most cases. In order to effectively eliminate inner void and achieve high production quality of steel balls, a new method of using high-pressure gas to compact steel balls is put forward. The influence of different factors on compacting inner void of steel balls by floating-pressure method is investigated using the DEFORM-3D finite element software. Results show that the difficulty of compacting void decreases with the increase of the void size; whereas it increases as the distance widens between the void and the ball surface. It is also found that the difficulty decreases with the increase of balls' temperature; and it also decreases with the increase of the growth rate of the gas pressure. The influence factors are in the order of the balls' temperature, the void size, the void position, and the growth rate of gas pressure. The results provide theoretical guidance for improving the quality and non-defective rate of steel balls.

Key words: helical-wedge rolling steel balls; floating-pressure method; void; the difficulty of compacting

(责任编辑 史小丽)