

形位参数对楔横轧轴件气压压实的影响

田端阳¹, 束学道^{1*}, 魏伊伦¹, 王雨¹, 许畅¹, 朱颖¹, 赵志龙¹, 何庆芬²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 安庆市振发汽车锻件有限责任公司, 安徽 安庆 246000)

摘要: 鉴于高压气体压实楔横轧轴件内部空洞(浮压法)可以提高楔横轧轴件质量与成品率的特点, 为进一步改善该方法对心部空洞的闭合程度, 运用 DEFORM-3D 有限元软件, 研究了形位参数对轴件外形尺寸和空洞闭合的影响规律. 研究表明: 轴件高径比为 2 时, 心部空洞最难闭合; 空洞越靠近轴件表面, 其闭合就越快; 空洞数量和形状对其闭合速度的影响较大; 但以上 4 个因素对轴件外形尺寸几乎没有影响. 研究结果为控制轧件心部缺陷、提高轴件的力学性能奠定了理论基础.

关键词: 楔横轧轴件; 浮压法; 空洞; 形位参数

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 04-0011-06

楔横轧具有显著节能节材的特点, 而被广泛应用于实心车轴、空心车轴和偏心轴的毛坯制造. 在轧制过程中, 由于受成形条件制约, 轴件内部极易出现如图 1(a)所示的空洞型缺陷^[1-2], 造成成品率降低和安全隐患的形成, 图 1(b)为因车轴内部质量问题而造成的交通事故. 因此, 研究能有效提高车轴内部质量的方法, 实现车轴成品率和车辆安全性能的提高, 具有重大的现实意义和应用价值.



图1 轴件内部缺陷及车轴断裂事故

近年来, 很多学者针对车轴内部缺陷问题做

了大量的研究. 刘永研究了大型连铸坯内部疏松、缩孔、夹杂物等缺陷在热轧过程中的形态演变和消除机理^[3]. 张振华对大锻件内部空洞的影响因素进行了研究, 得出空洞位置、形状、锻件的高径比、等因素对大锻件内部空洞闭合的影响规律^[4]. 马庆贤等^[5]针对大型锻件的模拟技术及内部质量控制进行了研究, 发现高温缺陷修复不仅可以减少大型锻件中的缺陷, 使其达到质量要求, 而且可以将使用报废锻件中的缺陷修复. 束学道等^[6]预测了楔横轧多楔成形汽车半轴心部缺陷的位置, 认为心部缺陷位置最有可能在侧楔楔入处附近横截面的中心. 邓陟等^[7]研究了中心压实法对提高锻件质量的影响, 认为在锻件上形成一定的温度梯度有助于变形更集中于锻件心部, 但中心压实法因无法精确控制温度而未被广泛应用. 此外, 束学道等^[8]提出利用浮压法来压实轧件内部空洞, 为有效消除空洞开辟了新的理论途径.

本文在文献[8]的基础上, 进一步研究了楔横轧轴件的形位参数对其外形尺寸与空洞闭合的影响规律, 为完善浮压法理论、提高楔横轧轴件内部质量提供了理论指导.

收稿日期: 2016-12-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51475247); 浙江省科技计划项目(2016C31018).

第一作者: 田端阳(1992-), 男, 湖北黄冈人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性成形工艺. E-mail: 13355211308@163.com

*通信作者: 束学道(1968-), 男, 安徽舒城人, 教授, 主要研究方向: 塑性成形工艺. E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

1 模拟条件建立

1.1 模拟对象及参数选取

由于楔横轧轴件内部的空洞通常产生于轧制段中心部位,其尺寸一般不超过 3 cm,形状近似为椭球形(图 1),由于空洞形状、位置及数量因轧件而异,因此非常有必要探究形位参数(空洞形状、空洞数量、空洞位置和轴件外形尺寸)对空洞闭合和轴件外形尺寸的影响规律。本文以圆柱钢(图 2)为研究对象,其直径为 D 、长度为 L ;假设其内部的空洞均为椭球形,空洞长轴为 A ,短轴为 B ,空洞到轴件几何中心的距离为 E ,空洞到轴件中心线的距离为 F ,气压为 P ,轴件温度为 T 。采用 5 因素 3 水平的试验方案来分析形位参数对轴件外形尺寸及内部空洞闭合的影响规律。

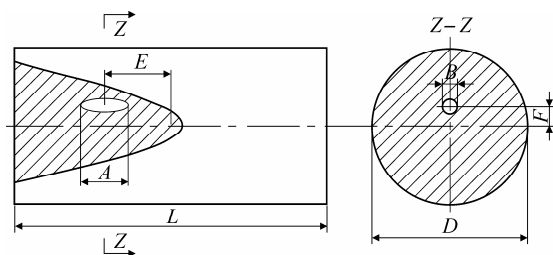


图 2 圆柱钢截面及空洞分布

具体试验参数见表 1。

表 1 模拟参数表

试验号	L/mm	D/mm	A/mm	B/mm	E/mm	F/mm	P/MPa	$T/^\circ\text{C}$
1	100	30	15	5	0	0	100	1200
2	100	50	15	5	0	0	100	1200
3	100	70	15	5	0	0	100	1200
4	60	50	15	5	0	0	100	1200
5	140	50	15	5	0	0	100	1200
6	100	50	15	5	0	5	100	1200
7	100	50	15	5	0	10	100	1200
8	100	50	15	5	0	0	100	1200
9	100	50	15	5	10	0	100	1200
10	100	50	15	15	20	0	100	1200
11	100	50	15	25	0	0	100	1200

1.2 有限元模型建立

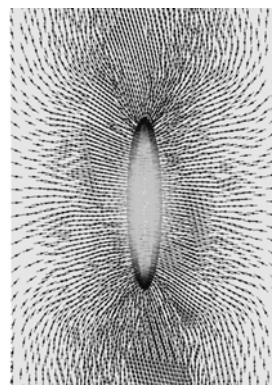
利用 Pro/E 软件建立圆柱钢三维模型,以 STL 格式将其导入 DEFORM-3D 有限元软件中。该模型采用相对网格划分,单元数为 150 000~160 000,

最小单元尺寸为 0.1 mm,最大单元尺寸为 0.3 mm,并对空洞附近区域进行网格细化,其局、外部网格的尺寸比为 0.2。该模型视为刚塑性体,材料为 42CrMo,这种材料可直接从软件的材料库中调用。

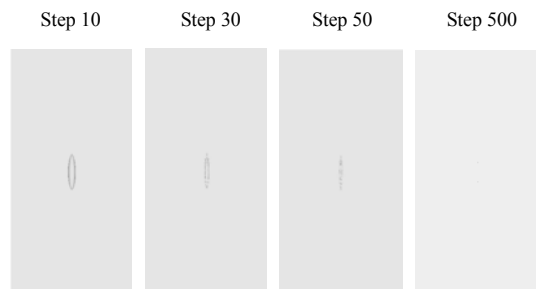
边界条件是在圆柱钢外表面施加相同的面载荷。模拟时间为 10 s,以等体积方式进行网格自动重划分,且不考虑轴件与空气接触时的热传导。为节省时间,取圆柱钢的 1/2 进行运算。

2 金属流动规律分析

选取圆柱钢温度为 1200 °C、气压恒为 100 MPa, $L=100$ mm, $D=50$ mm, $A=15$ mm, $B=5$ mm, $E=F=0$ 的工况进行分析,图 3(a)和(b)分别为圆柱钢纵截面上的金属流速图和有限元模拟的第 10、30、50、500 步时的效果图。由图 3(a)可知,空洞附近的流速线分布较密,此区域内的金属流动较快,均有流向空洞的趋势;而在距离空洞较远的位置,金属有沿轴向流动的趋势,这是因为金属三向受压,可促进金属流向空洞,起到既能使空洞闭合又可抑制新空洞生成的作用^[9]。从图 3(b)可看出,在浮压过程中,椭球形空洞主要沿轴件的径向闭合,这是因为空洞附近金属所受的纵向剪应力(轴件横截面



(a)



(b)

图 3 圆柱钢纵截面上金属流动及空洞演变规律

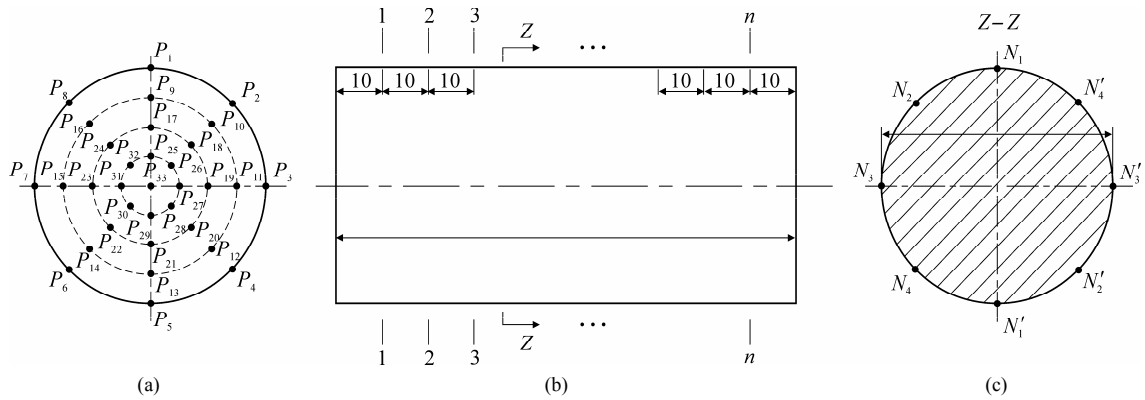


图4 圆柱钢表面上的特征点分布

的剪应力)远远大于横向剪应力(轴件纵截面上的剪应力), 导致金属径向流动的比轴向流动快。而轴件外形尺寸几乎没有变化, 其原因是由于从空洞中心到圆柱钢表面, 剪应力逐渐减小, 等效应变也逐渐减小, 导致在空洞闭合时, 轴件直径和长度变化都不到1%。

3 形位参数对轴件压实的影响

结合单因素分析法, 并以轴长、直径和空洞尺寸为分析对象, 可找到形位参数对空洞闭合和轴件外形尺寸的影响规律。

具体的研究方案如下:

(1)在圆柱钢左右两端面上, 分别在直径 $D/4$, $D/2$, $3D/4$, D 的4个圆的轮廓线上均匀选取8个点。图4(a)为圆柱钢左端面上的特征点的分布, 左端面上总共选取33个特征点($P_1, P_2, \dots, P_{33}$)。右端面上的特征点为 $P'_1, P'_2, \dots, P'_{33}$ (图中并未标识), 且 P_i 与 P'_i 的连线与轴线平行。

(2)浮压结束时, 通过追踪 P_i, P'_i ($i=1, 2, \dots, 33$) 的轴向位移, 可得到轴长的变化情况, 设定 P_i 与 P'_i 的轴向位移分别为 $\Delta X_i, \Delta X'_i$ ($i=1, 2, \dots, 33$), 轴长的最大变化量为 $\Delta L_{\max}$ 。在轴件上沿轴向均匀地取 n 个截面(图4(b)), 相邻截面间距为10 mm, 并在每个截面的外圆轮廓线上均匀取8个特征点(图4(c))。浮压结束时, 设第 j 个截面的直径变化量为 ΔD_j , 圆柱钢直径最大变化量为 $\Delta D_{\max}$ 。 $|N_i N'_i|$ 为 N_i 和 N'_i 之间的距离。其中:

$$\Delta L_{\max} = \{|\Delta X_1 - \Delta X'_1| - |\Delta X_2 - \Delta X'_2|, \dots, |\Delta X_{33} - \Delta X'_{33}|\}_{\max}, \quad (1)$$

$$n = L/10 - 1, \quad (2)$$

$$\Delta D_j = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (D - |N_i N'_i|), j=1, 2, \dots, 3, \quad (3)$$

$$\Delta D_{\max} = \{\Delta D_1, \Delta D_2, \dots, \Delta D_j\}_{\max}. \quad (4)$$

3.1 轴件直径对空洞闭合及其外形尺寸的影响

图5(a)和(b)分别为10 s时轴件外形尺寸、空洞尺寸随轴件直径变化的曲线。

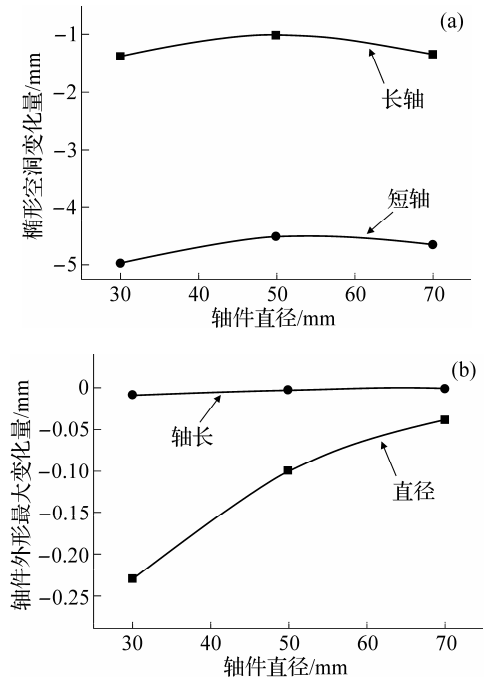


图5 轴件直径对空洞闭合及轴件外形尺寸的影响

由图5可知, 空洞短轴的变化幅度相对较大, 空洞主要沿轴件径向闭合。在相同时间内, 随着轴件直径的增加, 空洞各轴减小幅度均呈先减小后增大的趋势; 轴件直径和轴长的最大变化量都逐渐减小。当轴件直径为50 mm(高径比为2)时, 空洞闭合得最慢, 但与直径为30 mm、70 mm时相比, 空洞的闭合速度相差并不大。轴件外形尺寸变化

不到 1%, 说明轴件直径对空洞闭合及轴件外形尺寸的影响不明显。

3.2 轴长对空洞闭合及其外形尺寸的影响

图 6(a)和(b)分别为 10 s 时轴件外形尺寸、空洞尺寸随轴件长度变化的曲线。

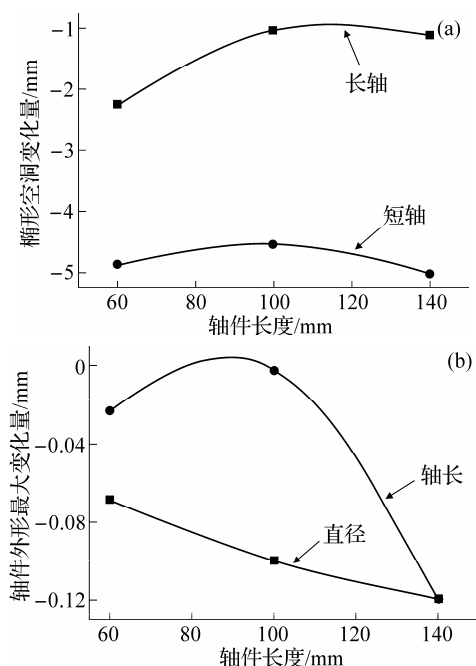


图 6 轴长对轴件外形尺寸及空洞闭合的影响

由图 6 可知, 空洞短轴的变化幅度远远大于长轴, 说明空洞主要沿轴件径向向闭合. 在相同时间内, 随着 L 的增大, 空洞长轴和短轴减小幅度均呈先减小后增大的趋势; 轴件直径最大变化量逐渐增大; 轴长最大变化量先减小后增大. 当 $L=100$ mm, 即圆柱钢高径比为 2 时, 空洞闭合得最慢; 但与 L 为 60 mm、140 mm 时相比, 空洞的闭合速度相差较大. 当 $L=140$ mm 时, 轴件外形尺寸变化最大, 直径和轴长减小了 0.12 mm, 相对变化不到 0.5%. 可见, 轴长对空洞闭合的影响较为明显, 而对轴件外形尺寸的影响不明显。

3.3 空洞形状对其闭合及轴件外形尺寸的影响

图 7(a)和(b)分别为 10 s 时轴件外形尺寸、空洞尺寸随空洞形状变化的曲线。

由图 7 可以看出, 随着空洞短轴 B 的增大, 空洞长轴减小幅度先增大后减小; 短轴减小幅度逐渐增大; 轴件直径和轴长的最大变化量逐渐增大. 相比于 B 为 25 mm 和 15 mm, $B=15$ mm(空洞呈球状)时, 空洞闭合得较快, 且速度相差较大. 轴件外形

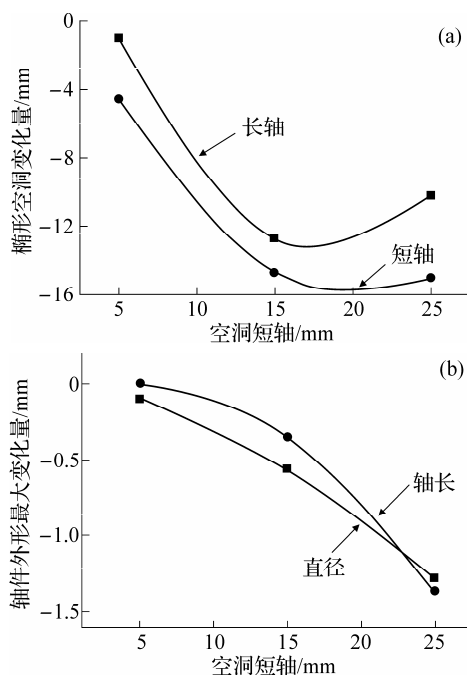


图 7 空洞形状对其闭合及轴件外形尺寸的影响

尺寸的变化幅度随着空洞原始体积的增大而增大; 当 $B=25$ mm 时, 轴长和直径变化最大, 相对变化 2.5%. 可见, 空洞形状对其闭合的影响较为明显, 而对轴件外形尺寸的影响不明显。

3.4 空洞位置对其闭合及轴件外形尺寸的影响

图 8(a)和(b)分别为 10 s 时轴件外形尺寸、空洞尺寸随空洞轴向位置变化的曲线。

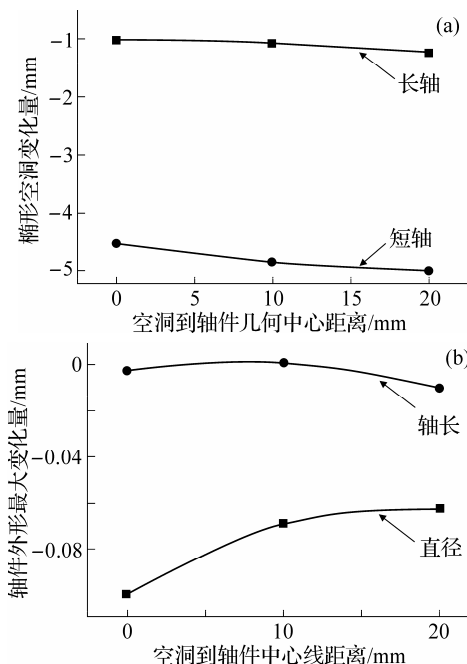


图 8 空洞轴向位置对其闭合及轴件外形尺寸的影响

由图 8 可知, 当空洞逐渐靠近轴件左端面时, 空洞长轴和短轴的减小幅度均逐渐增大; 轴件直径的最大变化量逐渐减小; 轴长的最大变化量先减小后增大, 说明空洞离轴件端面越近, 空洞越易闭合, 空洞轴向位置对其闭合的影响较为显著, 但对轴件外形尺寸影响并不明显。

图 9(a)和(b)分别为轴件外形尺寸、空洞尺寸随空洞径向位置变化的曲线。

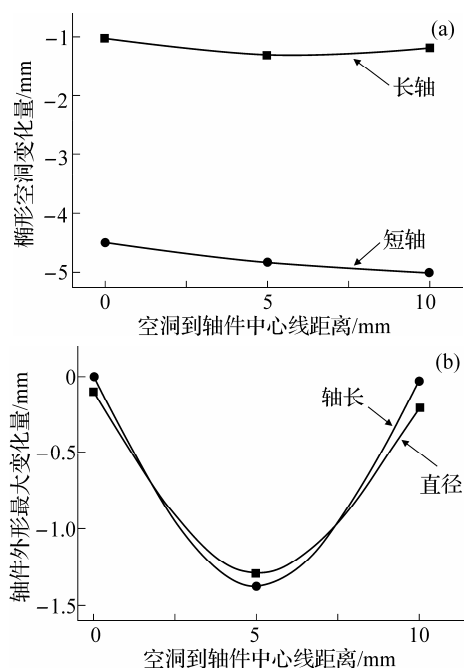


图 9 空洞径向位置对其闭合及轴件外形尺寸的影响

从图 9 中可以看出, 随着空洞到轴线距离的增加, 空洞长轴的减小幅度逐渐增大; 短轴减小幅度先增大后减小; 轴件直径和轴长的最大变化量均呈先增大后减小趋势。可见, 空洞距离轴件周面越近, 空洞的短轴变化越快, 当空洞距离轴件中心线 5 mm 时, 轴件外形尺寸变化相对较大, 说明空洞径向位置对空洞闭合的影响较为明显, 而对空洞的外形尺寸的影响不明显。实际应用中选工艺参数时, 可参考空洞的径向位置。

3.5 轴件内部多空洞的演变规律分析

为了探究圆柱钢内部存在多个空洞时, 浮压法压实轴件内部空洞的效果, 以 $L=100$ mm, $D=50$ mm 的圆柱钢为研究对象, 轴件温度为 1200 °C, 气压恒为 100 MPa。图 10(a)和(b)分别为圆柱钢径向、轴向存在多个空洞时的有限元仿真图。其中, 空洞尺寸均为 $A=15$ mm, $B=5$ mm。

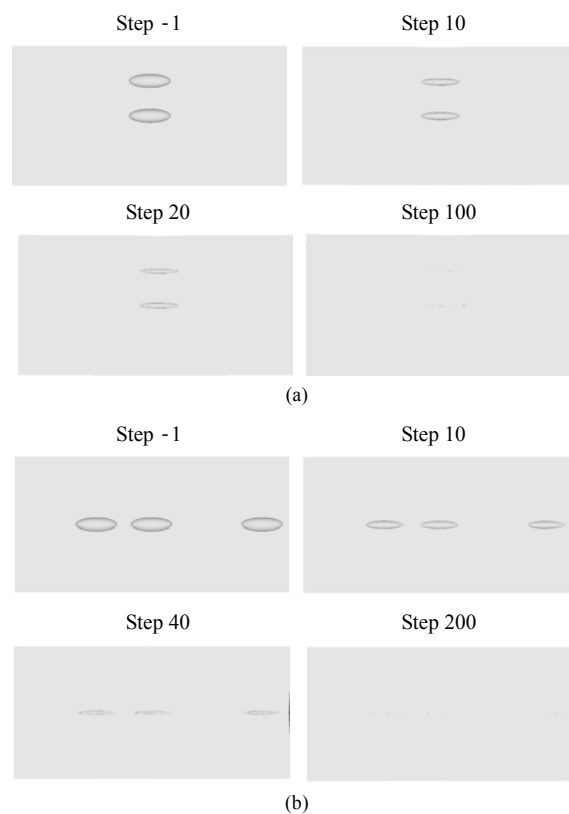


图 10 圆柱钢内部多空洞的演变规律

从图 10 中可以看出, 当圆柱钢内部存在多个空洞时, 靠近轴件表面的空洞闭合相对较快, 但 10 s 时空洞几乎都实现闭合, 且轴件的外形尺寸并未发生较大的变化。可见, 浮压法压实多个空洞的效果较好。

4 结论

(1)形位参数对空洞闭合及轴件外形尺寸的影响规律为: 采用浮压法压实轴件, 当高径比为 2 时, 轴件内部空洞闭合得最慢; 空洞离轴件表面越近, 空洞闭合得越快; 椭圆形空洞两轴长度相等时, 空洞闭合得最快。

(2)浮压法压实轴件内部单个空洞时, 轴件外形尺寸变化不明显, 相对变化不到 3%。但为了确保压实前后轴件的尺寸精度, 在设计坯料时可适当增大加工余量。

(3)轴件内部多处存在空洞时, 采用浮压法可使所有空洞闭合, 说明浮压法压实轴件在理论上是可行的。

(4)浮压法压实圆柱钢内部空洞的数值模拟研

究为提高楔横轧轴件内部质量和成品率奠定了理论基础.

参考文献:

- [1] 束学道, SHCHUKIN V Y, KOZHEVNIKOVA G, 等. 楔横轧理论与成形技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014:1-4.
- [2] DANNO A, AWANO T. Effect of rolling conditions on formation of central cavity in 2-roll cross rolling[J]. Journal of JST-P, 1976, 17(2):117-124.
- [3] 刘永. 大尺度圆钢热轧成型缺陷控制数值模拟研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- [4] 张振华. 大截面模具钢锻件内部空洞缺陷的闭合研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2010.
- [5] 马庆贤, 曹起骧, 钟约先. 大型锻件的模拟技术及内部质量控制研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(9):1021-1023.
- [6] 束学道, 李国平, 祖汪明. 楔横轧多楔成形汽车半轴心部缺陷位置预测[J]. 应用科技, 2012, 39(2):45-48.
- [7] 邓陟, 曹起骧. 中心压实法对提高锻件质量的影响[J]. 北京科技大学学报, 1991, 13(4):337-341.
- [8] 束学道, 田端阳, 王雨, 等. 浮压法压实斜轧钢球内部空洞的条件[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(1):1-6.
- [9] 孙茂才. 金属力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003:57-71.

Influence of shape and position parameters on compaction of cross wedge rolling shaft by gas pressure

TIAN Duan-yang¹, SHU Xue-dao^{1*}, WEI Yi-lun¹, WANG Yu¹, XU Chang¹, ZHU Ying¹,
ZHAO Zhi-long¹, HE Qing-fen²

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

2.Anqing Zhenfa Automobile Forging Co., Ltd, Anqing 246000, China)

Abstract: Using high-pressure gas to compact inner void of cross wedge rolling shaft, i.e. the floating-pressure method, can improve the quality and yield of cross wedge rolling shaft. In order to improve the degree of closure of core void by this method, the effects of shaft shape and position parameters on void closure and its overall dimension are investigated using DEFORM-3D finite element software. Results show that the void is the most difficult to compact when the ratio of shaft's height to diameter is 2; the closer a void is to shaft surface, the faster its closure would be; the effects of the void's shape and quantity on the speed of void closure are more significant than those of the other factors. But the above four factors have little impact on shaft part overall dimension. The research results lay theoretical foundation for controlling rolled part core defects and improving the mechanical properties of shaft part.

Key words: cross wedge rolling shaft; floating-pressure method; void; shape and position parameters

(责任编辑 章践立)