

金属热变形时摩擦边界条件的确定

阎 军 鹿守理

北京科技大学材料与工程学院,北京 100083

摘 要 通过圆环压缩的有限元模拟和实验的方法分析了金属在高温下变形时的摩擦边界条件,分析了摩擦因数的大小对环形件压缩时变形和应力的影响.通过模拟计算和实验确定了摩擦的变化规律和金属热变形时摩擦因数的取值范围.

关键词 热变形;边界条件;摩擦

分类号 TF 556.3

在金属成形分析中摩擦边界条件最终体现在作用于接触面上的摩擦力.确定摩擦力的大小,最常用的是库仑摩擦和常摩擦因子方法.它将复杂的摩擦边界条件转化为确定摩擦因数的大小,但摩擦因数随变形条件不同在一个很广泛的范围内变化.如何确定摩擦因数就成了边界条件研究的一个重要内容.实验研究接触面的摩擦规律时经常采用圆环压缩实验的方式^[1].这种方法的准确性不仅与实验的精度有关,更依赖于计算模型是否正确.上限法只是一种近似计算方法,它假设圆环的径向变形沿高度方向均匀分布,侧面不产生鼓形,这与实际是不符的.另外上限法只能求出总的变形力,不能分析变形体内部各点的应力和变形过程,尤其是边界节点的应力和变形.因而,用上限法研究摩擦现象是不充分的,难以准确掌握摩擦的规律,得出的结论存在着较大误差.因此,采用有限元方法并结合实验分析能更准确地了解摩擦规律,这对于有限元模拟在金属成形中广泛深入应用有着非常重要的意义.

1 圆环压缩上限法计算和有限元分析的比较

圆环压缩的上限法解析是一种常见的比较经典的解析算法,能得出圆环尺寸与变形力之间的显式关系.文献[1]中给出了详细的推导和解析算式.

在设定运动许可速度场时假设径向速度沿

高度均匀分布,不考虑侧面鼓形,其一般关系见(1)式和(2)式,也可用(3)式将常摩擦因子转换为平均库仑摩擦因数:

$$\frac{P_{ave}}{\sigma_0} = f(R_0, R_i, T, R_n, m) \quad (1)$$

$$R_n = f_1(R_0, R_i, T, m) \quad (2)$$

$$\mu_{ave} P_{ave} = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

式中: R_0 —圆环半径, R_i —圆环内半径, T —圆环高度, R_n —中性半径, m —常摩擦因子, μ_{ave} —平均库仑摩擦因数, P_{ave} —平均压力, σ_0 —变形抗力.

在计算大变形量的圆环压缩问题时,为提高计算精度,必须采用分段压缩、分段计算的方法,每段的时间间隔取得越小,计算结果越准确.圆环实验确定摩擦因数可按体积不变条件确定中性半径,再反算常摩擦因子.

和上限法相比,有限元方法不进行任何假设,除变形抗力模型和边界条件外,计算精度主要取决于有限元网格的疏密.它的计算结果更接近于实际.利用有限元模拟还可分析边界节点的应力变化规律.本文采用MARC非线性有限元软件分析圆环的变形.

根据上述2种方法,对圆环压缩变形进行了计算,圆环的外径为15 mm,内径为7.5 mm,高度为5 mm,材料为Q235.变形抗力模型和热物性参数取自MARC材料库.用有限元计算时,接触表面采用库仑摩擦规律.

图1给出了在850℃时圆环压缩后外径和内径的变化.从计算中可以看出,2种算法的计算结果存在着显著的差异.用上限法计算的变形力一般比用有限元法计算的要高,随着摩擦因数的增大,用上限法计算的变形力显著增加.

当摩擦因数达到0.3以上时,用有限元计算的变形力增加的比较缓慢.因此,摩擦因数越大,2种计算结果的差别越明显.圆环变形的计算结果也明显不同.图中可以看出上限法计算的外径较大,内径也略大.也就是说,不考虑圆环内不均匀变形时,按上限法的观点金属易于向外流动.圆环压缩时存在中性半径,中性半径是一个分流点,在该点两侧,金属向两边流动.在实际变形过程中,中性半径的大小沿高度方向是变化的,而上限法计算的中性半径是不变的.

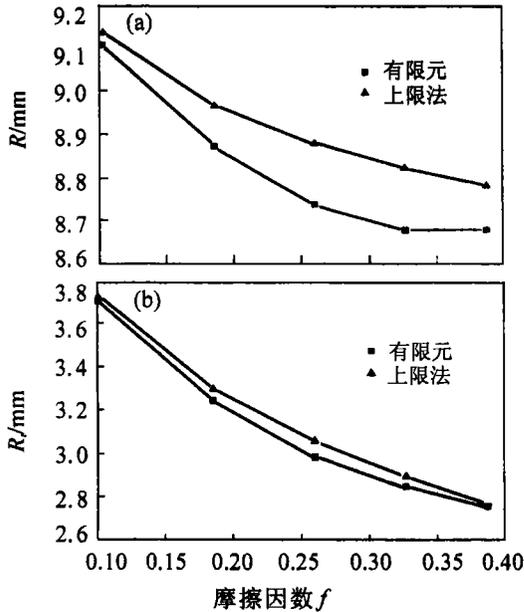


图1 圆环压缩时外径(R_o)(a),内径(R_i)(b)的变化

为使2种计算结果能进行比较,有限元计算中性半径按不同高度处的中性半径的平均值计算,即平均中性半径.模拟计算说明,上限法计算的中性半径比有限元计算的要大.这种差别随摩擦因数的增大而减小.图2和图3所示为2种方法中性半径的计算结果的比较和有限元计算时中性半径的大致形状.综合上述结果,由于上限法将圆环的变形看成是均匀的,因此金属更易于流动,计算的变形尺寸绝对值都较大.从图3可以看出圆环压缩时存在明显的侧面鼓形,摩擦越大,鼓形越严重.图4给出了圆环内外侧鼓形随摩擦因数的变化情况.当摩擦因数小于0.1时,圆环内侧鼓形很小,金属向内侧流动的极少.随着摩擦因数的增大,金属向内侧流动的体积增加,出现鼓形现象.圆环内表面的这种形状变化不仅对摩擦非常敏感,而且与圆环的尺寸也有很大的关系.圆环的半径与高度的比值越大,内侧越易于出现鼓形.从圆环内外径

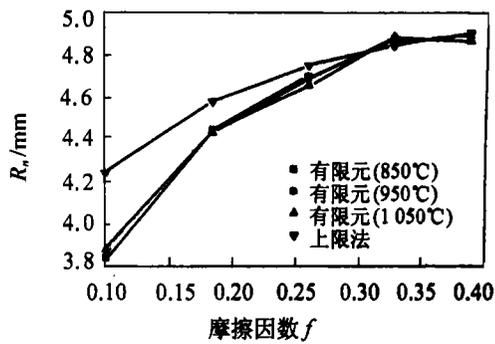


图2 圆环中性半径的比较

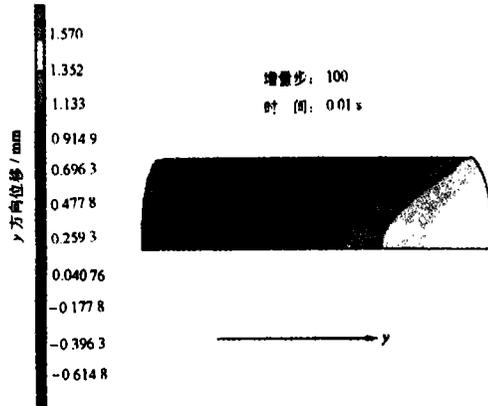


图3 圆环压缩后形状的变化

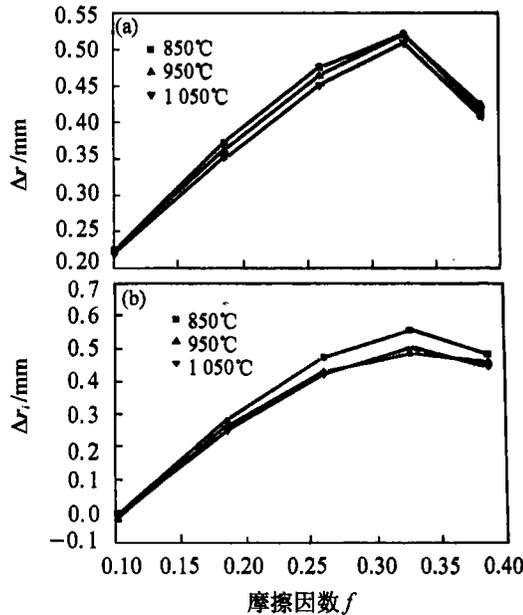


图4 圆环外侧(a)和内侧(b)鼓形大小与摩擦的关系

的变化来看,外径始终是增加的,但增加的幅度随摩擦的增大逐渐变小.内径在摩擦因数较小时可能会增加,随着摩擦的进一步增大内径开始变小.内径变化的幅度随摩擦的增大而逐渐增大.因此,随着摩擦的增大,内径的变化量占外径变化量的比值越来越大.

在不同温度下,用有限元计算的鼓形和半

径变化量略有差异.从2种算法存在的差别中可以看出,使用同样的实验数据,用不同的方法进行分析必然会得出不一致的结果.利用有限元计算的结果采用上限法进行计算可以发现,用上限法反算的库仑摩擦因数比有限元计算的大30%以上;而且当摩擦因数接近0.3时,反算的 m 值已超过1,出现了不合理的结果.这说明当摩擦因数较小时,上限法计算的结果是可以接受的;当摩擦较大时,由于均匀速度场的假设随着摩擦因数的增大越来越不符合实际,计算就会出现较大的误差.因此,在金属热变形的条件下,利用圆环压缩所获得的实验数据,用有限元模拟能更正确的再现实际变形过程,也能更深入地分析研究接触面上的摩擦问题.

2 热变形时摩擦

2.1 圆环压缩实验

圆环压缩实验在Gleeble热模拟机上进行.试样基本尺寸如前所述.变形温度在850~1050℃,变形速率约44s⁻¹.接触表面为干摩擦状态.该机可测量圆环变形前后的尺寸变化、变形力和成形温度.典型的测试结果如图5.

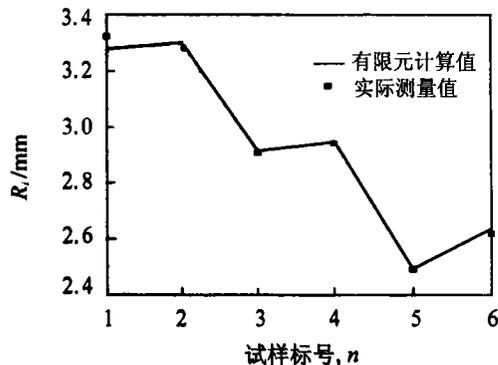


图5 圆环内径测量值与计算值的比较

2.2 有限元模拟计算

采用MARC非线性有限元软件进行模拟计算.接触面采用粘滑库仑摩擦模型模拟摩擦.该模型可以模拟从粘性摩擦到滑动摩擦的摩擦力突变,既可精确的描述滑动摩擦,又可模拟真实的粘性摩擦.圆环的墩粗是轴对称问题,取1/4断面进行计算,采用150个4节点四面体单元对圆环进行网格离散化.有限元计算的结果和圆环实验结果进行比较,通过其变形状况分析接触面摩擦的规律.

2.3 计算结果及分析

圆环变形计算结果与实测值十分接近,比

较准确地反映了圆环墩粗后外径和内径的变化.圆环内表面的形状变化对接触面的摩擦十分敏感,图5给出了圆环内半径测量值与计算值的比较曲线.从图中看出二者非常接近.外径的实验数据与计算结果之间的差别也比较小,最大相对误差小于5%.变形力的计算值与实测值的差别也比较小,一般有限元计算的数值比实测值略低,最大误差不超过8%.

图6给出了圆环在950℃压缩时的压力和温度的测量结果以及有限元计算压力的变化.

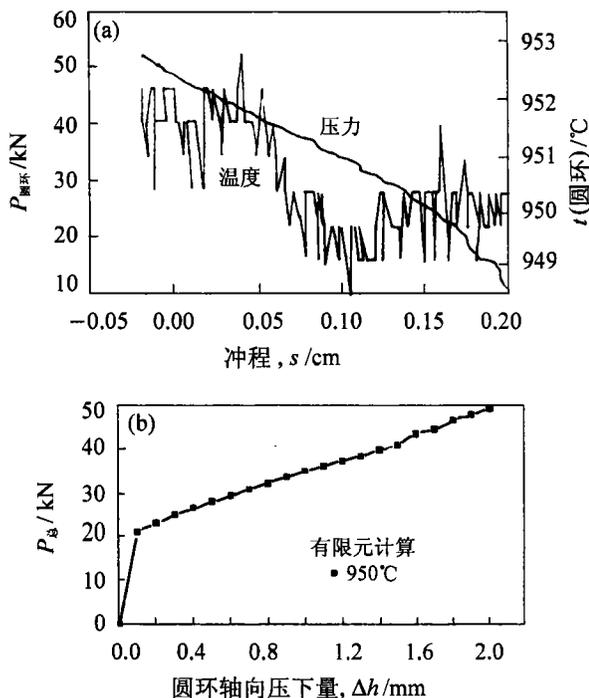


图6 圆环压力测试数据(a)和有限元模拟结果(b)

从力和变形两方面分析,有限元计算都能正确地反映圆环的变形过程.从实验结果中可看出,随变形温度的升高,圆环内径的变化量占外径变化量的比值在不断增加.按照850,950和1050℃测试数据的平均值计,该比值分别为29.98%,54.21%和80.93%.从圆环的基本变形规律分析,摩擦越大,金属向内侧流动的越多,内径变化量占外径变化量的比值也逐渐增大.这说明摩擦随温度的升高而增大.温度高时,金属的变形抗力小,表面摩擦力易于达到剪切屈服限,因而摩擦因数相对得以增大.根据圆环墩粗的测试数据和有限元分析计算的结果,在850,950和1050℃时,接触表面的库仑摩擦因数的平均值分别是0.21,0.27和0.38.各试样的摩擦因数计算值都在0.2~0.4之间.

通过边界节点的应力分析还可以了解边界

摩擦力的分布状况. 摩擦力在边界上的分布是变化的. 边界节点上摩擦力的分布状况, 尤其是在分流点附近的分布情况不仅与采用的摩擦规律有关, 而且与程序软件中对摩擦的具体算法有关. MARC 程序中采用的粘滑摩擦模型能较好地模拟从粘性摩擦到滑动摩擦的摩擦力突变.

图 7 和图 8 所示的是摩擦因数 $f = 0.3871$, 温度为 950°C 时, 接触表面的应力分布和剪应力沿圆环高度方向的分布情况. 应力分布规律与圆环的变形形状以及中性半径的大小是一致的. 这说明有限元分析结果的可信性. 文献 [2] 认为摩擦因数与等效应力、塑性等效应变等因素有关, 并给出了近似表达它们之间关系的表达式. 应力分析有助于了解这种关系. 对边界节点的应力分析还可以了解库仑摩擦因数和常摩擦因子之间的关系, 判断摩擦因数的取值是否合理^[3]. 通过计算边界节点上的应力可以反算常摩擦因子 m 的大小.

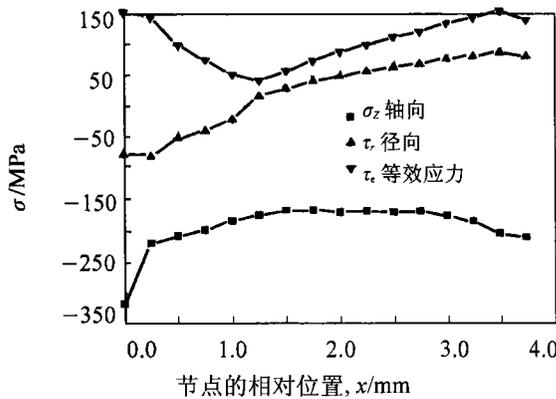


图 7 边界节点的应力分布 (增量步 60)

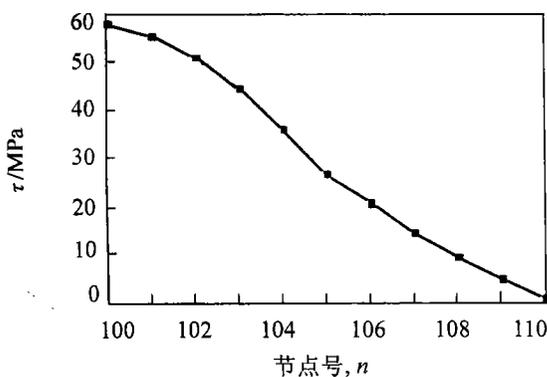


图 8 剪应力沿圆环高度方向的分布 (增量步 50)

图 9 给出了在 850°C 时按接触表面节点应力平均值计算的结果. 随着库仑摩擦因数的增大, 常摩擦因子也增大; 当摩擦因数达到 0.4 时, 分析边界节点的应力状态可以看出此时的常摩

擦因子已很接近 1; 如继续增大摩擦因数, 圆环的总压力和变形的变化都很小, 但个别节点的常摩擦因子会大于 1, 出现不合理的现象. 此时该节点已经产生粘着, 应采用粘着摩擦规律. 由于有限元采用数值计算方法, 收敛判别有一定的允许误差, 造成在应力的计算上存在着一些误差. 但从边界节点应力分析的总的结果来看, 摩擦因数的最大值取 0.4 左右是比较合理的.

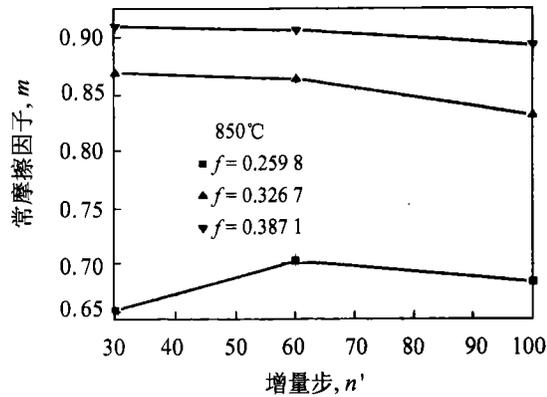


图 9 摩擦因数 f 和常摩擦因子 m 之间关系的计算结果

3 结论

(1)有限元模拟能更好地再现金属的变形过程, 通过有限元模拟计算和圆环镦粗实验可以比较准确的评价热加工时的边界摩擦条件, 确定摩擦因数的大小, 所得结果也更易于在金属成形有限元分析中采用.

(2)在金属热变形状态下, 根据圆环镦粗实验所确定的库仑摩擦因数一般在 0.2 ~ 0.4 之间. 随着温度的升高, 摩擦因数是增大的.

(3)从圆环压缩边界节点的应力分析中可以看出, 在热加工状态下, 库仑摩擦因数的最大值应在 0.4 左右.

参考文献

- 1 艾维超 B 著. 金属成形工艺与分析. 王学文译. 北京: 国防工业出版社, 1988.9
- 2 Baltov A I, Nedev A G. An Approach to the Modelling of Contact Friction during Rolling. Journal of Materials Processing Technology, 1995,53:695
- 3 Zhang W, Peeters M J P A, Bay N. Numerical Modelling of Cold Rolling of Metal Plate Adopting a General Friction Model. Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Application. Balkema, Rotterdam: Shen & Dawson, 1995

(下转第 547 页)

3 结论

(1) $\text{CaZrO}_3/\text{ZrB}_2$ 复合材料不能在氧化气氛和还原气氛下烧结. 在氧化气氛下, ZrB_2 将被氧化生成 ZrO_2 ; 在 N_2+H_2 条件下 $\text{CaZrO}_3\text{-ZrB}_2$ 体系会被氮化, 生成 ZrN .

(2) $\text{CaZrO}_3/\text{ZrB}_2$ 复合材料可以在 Ar 气保护下烧成.

参考文献

- 1 Stubican S V, Ray S P. Phase Equilibria and Ordering in the System $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$. *J Am Ceram Soc*, 1997,60(11-12):534
- 2 横山洋一, 淵本博之, 釣久司, 毛利文彦. ZrO_2/CaO 比の異なる電融 $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$ クリッカー. 1992,44(1):21
- 3 Binns D B. The Use of Special Ceramics in Handling Molten Iron and Steel. *Trans J Brit Ceram Soc*, 1978,77(1):1
- 4 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册. 沈阳: 东北大学出版社, 1980

Effect of Atmosphere on $\text{CaZrO}_3/\text{ZrB}_2$ Composite Sintering

Chen Deping¹⁾, Zhao Hailei²⁾, Zhong Xiangchong²⁾, Wang Jian²⁾

1)Resources Engineering School,UST Beijing, Beijing 100083, China 2) Material Science and Engineering School

ABSTRACT The effect of atmosphere on the sintering of $\text{CaZrO}_3/\text{ZrB}_2$ composite has been studied in three kind of atmosphere. Thermodynamic analysis has indicated that at high temperature both CaZrO_3 and ZrB_2 thermodynamic relation would be stable only in Ar atmosphere. The experimental results have verified the reliability of the above thermodynamic analysis.

KEY WORDS calcium zirconate; zirconium diboride; sintering atmosphere

上接第 542 页

Study on Friction Boundary Condition in Metal Hot Deformation

Yan Jun, Lu Shouli

Materials Science and Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT The boundary condition of metal deformation at high temperature using experimental and FEM simulation method, and the effect of friction factor on deformation and stress of ring are studied during forming process. Through ring compress experiment and FEM simulation analysis, the regularity of friction can be determined and the range of friction factor in metal hot deformation can also be obtained. Maximum coulomb friction factor is around 0.4.

KEY WORDS hot deformation; boundary condition; friction