

为 $\phi 935/\phi 775 \times 170\text{mm}$ ，驱动辊转速( $n_1$ )为 $1.71\text{rad/s}$ ，上锥辊转速( $n_2$ )为 $7.82\text{rad/s}$ ，上锥辊轴向进给速度( $v_1$ )为 $v/2$ ，模具预热温度( $T_1$ )为 $200^\circ\text{C}$ 。

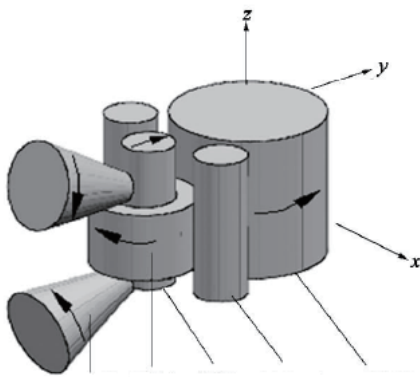


图1 轧制成形有限元模型

## 2 2219铝合金环锻件轧制成形数值模拟

在选取初始工艺参数和建立实体模型后，用单因素实验法，以变形温度这个工艺参数为因素，以单一参数因素所影响的等效应变、金属流动、金属损伤和行程——载荷作为目标进行环锻件轧制成形过程的数值模拟，分析其对成形的影响，研究其影响规律，从而选取最优工艺参数，指导实际生产过程。

### 2.1 变形温度对轧制成形的影响

变形温度对合金的塑性成形能力、锻件质量和成形载荷等有较大影响。变形温度过高，会发生过热甚至过烧，导致性能不合格；温度过低，材料成形困难，摩擦力较大，也会加快模具磨损。

#### 2.1.1 变形温度对等效应变的影响

如图2所示为四种不同变形温度下环锻件轧制结束时的等效应变图。由图可知，随着变形温度的升高，最大应变逐渐减小，说明提高变形温度，合金的塑性增加、变形抗力逐渐

降低；且最大等效应变与最小等效应变的差值也逐渐减小，说明轧制变形的不均匀性降低，有利于成形。最大应变集中在上下端面及附件较厚区域，此区域材料流动剧烈，发生了大变形，等效应变变大，中心部位的等效应变最小，且最大等效应变值出现在上下端面和内外表面相交处，不同变形温度( $380^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$ 、 $420^\circ\text{C}$ 、 $440^\circ\text{C}$ )分别对应的最大等效应变值为15.8、14.7、13.9、13.1。

#### 2.1.2 变形温度对金属流动的影响

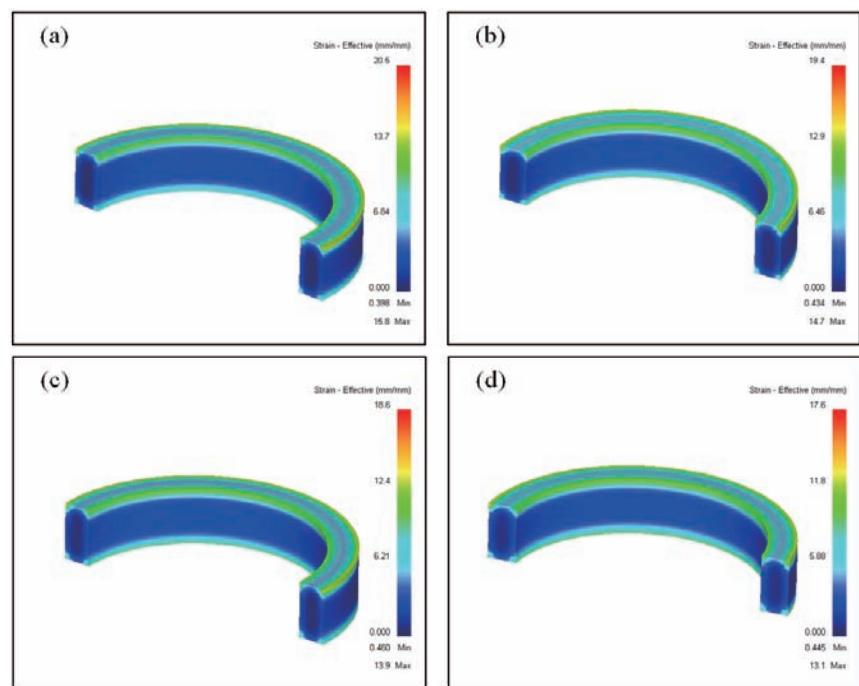
如图3所示为四种不同变形温度下环锻件轧制结束时金属流动的速度矢量图。由图可知，随着变形温度的升高，沿环坯切线方向金属流动速度的最大值呈增大趋势，但增幅较小，最小值逐渐增大，这是由于变形温度的提高，使得金属流动趋于均匀，减缓了加工硬化，粒子间的结合力减小，摩擦力减小，变形阻力减小；且在轧制结束时，观察不到直径方向上的金属流

动，说明径向变形已基本完成。金属流动速度的最大、最小值分别集中于环坯的外径、内径处，且不同变形温度( $380^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$ 、 $420^\circ\text{C}$ 、 $440^\circ\text{C}$ )分别对应的金属流动速度最小值为777、804、810、821。

#### 2.1.3 变形温度对金属损伤的影响

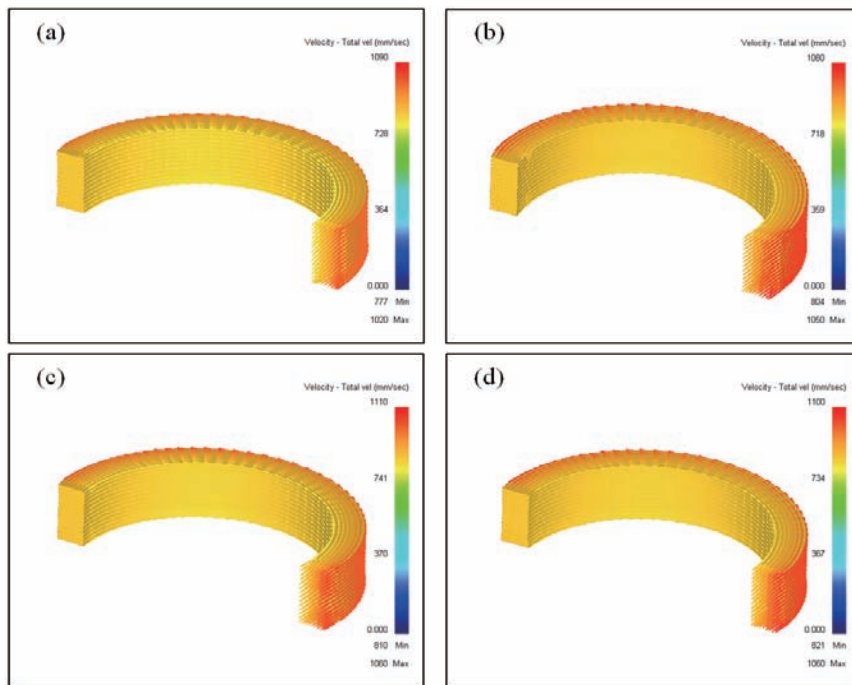
如图4所示为四种不同变形温度下环锻件轧制结束时的金属损伤分布图。

由图可知，金属损伤最严重的区域集中在上下端面，此区域受到环坯变形带来的撕裂作用和锥辊的巨大切应力，金属损伤最严重，故环件上下端面是表面质量控制的重点，在实际生产中需增加该区域的局部润滑；而环锻件内外表面的金属坯料在驱动辊和芯辊的径向作用下，处于三向压应力+切应力状态，故金属损伤较小<sup>[9]</sup>。随着变形温度的增加，环坯各部分金属损伤值先逐渐减小后基本保持不变，不同变形温度对应的金属损伤最大值分

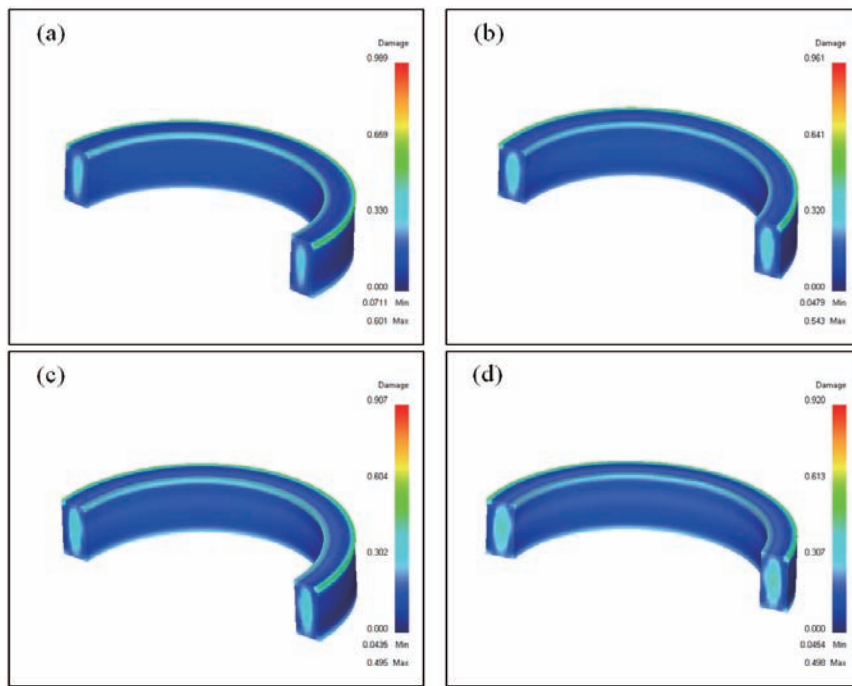


(a)  $380^\circ\text{C}$ ; (b)  $400^\circ\text{C}$ ; (c)  $420^\circ\text{C}$ ; (d)  $440^\circ\text{C}$

图2 不同变形温度的等效应变图



(a) 380°C; (b) 400°C; (c) 420°C; (d) 440°C  
图3 不同变形温度的金属流动速度矢量图



(a) 380°C; (b) 400°C; (c) 420°C; (d) 440°C  
图4 不同变形温度的金属损伤图

别为0.601、0.543、0.495、0.498，且出现在上下端面和内外表面相交处。

#### 2.1.4 变形温度对行程——载荷的影响

如图5所示为四种不同变形温度

下环件轧制结束时的行程——载荷曲线图。由图可知，随着变形温度的升高，芯辊所受的最大成形载荷逐渐减小，并在一定范围内上下波动。在环坯

刚被芯辊咬入孔型时，芯辊所受的径向载荷迅速增大到峰值，在随后的轧制过程中载荷不断降低。这是因为随着轧制过程的进行，变形温度升高，材料的变形抗力减小；环坯壁厚逐渐减小，塑性变形产生的热量及轧辊与环坯接触摩擦产生的部分热量都将转化为热能，使环坯温度升高，从而使变形抗力降低，所以芯辊所受的最大成形载荷不断降低，各温度下成形载荷达到峰值后也逐渐降低。

#### 2.2 环锻件轧制过程中特征追踪点的参数变化规律

模拟结果的变化规律可以很好地反映环锻件轧制过程的动态情况。如图6所示为成形过程中环锻件截面图，其中P1、P2、P3、P4、P5和P6分别为所选特征追踪点。

如图7所示为环锻件轧制过程中特征追踪点模拟结果的参数变化规律。由图7(a)可知，随着轧制过程的进行，等效应变值逐渐增大，且外层处始终大于内层，中间层始终最小，说明环件外层处为大变形区，中间层为小变形区，这与龚小涛等认为的外径进给量一直大于内径，两者之间差值越来越小的理论观点相符<sup>[5]</sup>。等效应变增大，即环件的塑性变形程度增强，虽有利于提高环件的力学性能，但变形的不均匀性也会增加<sup>[4]</sup>。

由图7(b)可知，环件外层金属流动的总速度大于内层，但外层处的速度变化趋势小于内层，这与上文数值模拟结果中变形温度和芯辊进给速度对金属流动的影响规律是相同的，且符合华林等人的观点：轧制过程中合金的塑性流动是非线性和非对称性的，环件内径的扩大速度大于外径<sup>[1]</sup>。由7(c)可知，金属损伤值随轧制过程