

7.5.2 几何特性与材料特性设置

为了避免 2195 铝锂合金样件在加载过程中发生屈曲，经过多次仿真验证，确定材料厚度为 10 mm。由于缩比件的最大尺寸仅为 580 mm，选择使用实体单元能够更准确地反映该合金样件在蠕变时效过程中的变形情况。通过 MTS 拉伸试验机，测得 T34 和 T6 两种坯料的应力应变曲线，如图 7-36 所示。选取曲线中进入屈服阶段之后的数据，并将其分别导入 MSC. Marc 软件的表格中。

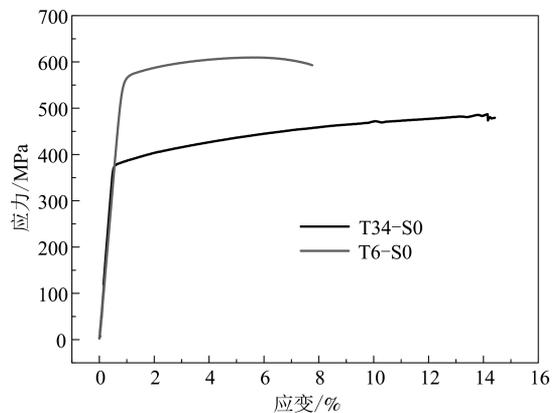


图 7-36 2195 铝锂合金不同初始坯料状态下轧制方向力学性能曲线

在 MSC. Marc 中，各向异性屈服准则相较于各向同性屈服准则（如 Von Mises 屈服准则），能够更准确地预测 2195 铝锂合金的成形行为。在多种各向异性屈服准则中，Barlat91 屈服准则不仅预测精度较高，而且其参数可通过单轴拉伸等简单实验手段测量得出。因此，本文采用 Barlat91 屈服准则对 2195 铝锂合金进行模拟分析，其相关参数经过计算后如表 7-2 所示。

表 7-2 Barlat91 屈服准则参数表

坯料状态	M	C_1	C_2	C_3	C_6
T34	8	1.13	0.85	1.13	1.26
T6	8	1.02	0.98	1.02	1.15

在表中，参数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_6 均可通过不同取向屈服强度的比值计算得出。参数 M 是与材料相关的常数，对于 2195 铝锂合金这种面心立方结构材料，其值通常为 8。

为了明确材料的方向，在有限元模型中设置了全局坐标系，其中以轧制方向为 X 轴，垂直于轧制方向为 Z 轴，垂直于轧面方向为 Y 轴，并将所有单元的方向定义为与这些坐标轴一致。

在仿真过程中，将不同初始坯料的 2195 铝锂合金的各向同性本构模型与本章提出的各向异性本构模型（通过 CRPLAW 子程序实现）分别嵌入有限元模型中进行对比分析。此外，材料的屈服强度和微观结构变量作为状态变量，通过 PLOTV 进行输出。

7.5.3 接触条件与边界条件设置

由于模具在加载与回弹过程中的位移极小，几乎可以忽略不计，因此可将模具设置为刚体，而 2195 铝锂合金构件则设置为变形体。2195 铝锂合金板料与模具之间的接触关系定义为“接触”，摩擦系数取为 0.3。

贮箱顶盖因其良好的中心对称性，能够在模具上实现自定位，便于施加约束。然而，仍需在轧制方向和垂直轧制方向的对称轴上设置相应的位移约束。此外，需在 2195 铝锂合金样件的上表面施加均布载荷。边界条件的具体设置如图 7-37 所示。

(1) 在 2195 铝锂合金样件轧制方向的对称轴所在的节点上设置约束 fixed-x，限制了 z 方向的位移、x、y 方向的旋转。

(2) 在 2195 铝锂合金样件垂直轧制方向的对称轴所在的节点上设置约束 fixed-z，限制 z 方向的位移、z、y 方向的旋转；

(3) 在 2195 铝锂合金样件上表面均匀施加随时间增加的 0-2 MPa 面载荷，命名为“zaihe”，此载荷用于促使样件贴膜；

(4) 在 2195 铝锂合金样件上表面均匀施加 2 MPa 的面载荷，命名为“baochi”，此载荷用于促使样件在贴膜后继续保持加载状态，工件在高温高压下完成蠕变时效成形。

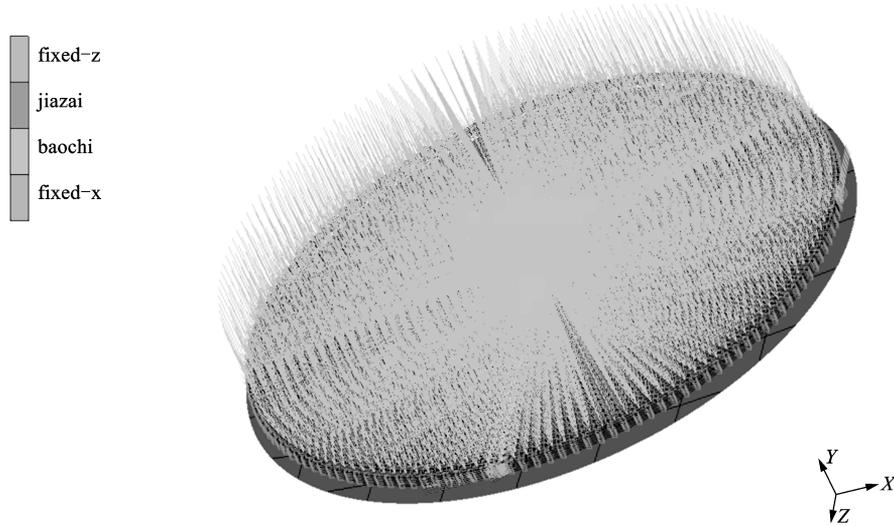


图 7-37 2195 铝锂合金样件有限元模型边界条件设置

7.5.4 工况条件设置

为了模拟实际情况，可分为加载阶段、蠕变阶段和回弹阶段，由于在蠕变过程中，不同蠕变阶段的蠕变速率不一样，为了加快运算效率，可将蠕变阶段分为 3 个小阶段，在不同的工况条件下，设置不同的约束条件，具体设置如表 7-3 所示。

表 7-3 2195 铝锂合金样件有限元模型工况条件设置

阶段	整体工况时间/h	步数/步	约束
loading	1	100	fixed-x, fixed-z, jiazai
creep1	0.2	320	fixed-x, fixed-z, baochi
creep2	5.8	250	fixed-x, fixed-z, baochi
creep3	10	250	fixed-x, fixed-z, baochi
unloading	1	100	fixed-x, fixed-z

7.5.5 2195 铝锂合金样件限元仿真结果分析

(1) 贴膜状态分析

构件的贴膜情况对后续回弹结果的影响显著，良好的贴膜度能够有效减小工件回弹后型面与目标型面之间的误差。因此，分析加载结束后的贴膜度对于整个有限元仿真过程至关重要。

由于各向异性本构与各向同性本构的差异仅体现在蠕变阶段，而在加载阶段，两种本构模型的仿真结果是相同的。因此，提取不同坯料状态下 2195 铝锂合金样件加载后的贴膜情况，如图 7-38 所示。由于板料厚度较大且模具深度较浅，整体变形量较小，不同坯料状态下的变化趋势较为接近。

从图 7-38(a1)和(b1)可以看出，加载后的贴膜度约为 60%。经过 6 小时蠕变时效后，如图 7-38(a2)和(b2)所示，由于应力松弛，贴膜度继续增加，达到约 75%。而继续进行蠕变时效，如图 7-38(a3)和(c3)所示，可以发现贴膜度的提升量较低。这表明，在第一阶段蠕变时效中，蠕变应变贡献了大部分的变形量。

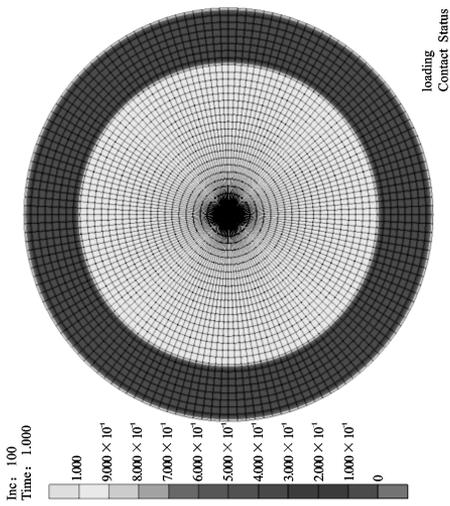
7.5.6 应力分布状态分析

2195-T34 态铝锂合金样件加载后的应力分布情况如图 7-39 所示。尽管整体变形量较小，但应力分布仍表现出一定程度的各向异性。最大等效应力主要集中在半径为 245 mm 至 290 mm 的外缘区域以及直径约为 95 mm 至 125 mm 的小圈周围，其值约为 298.3 MPa。应力分布并非标准圆形，而是呈现出垂直轧制方向应力更高的特点。这种现象的出现，是由于 2195-T34 态铝锂合金引入了 4% 的预变形，导致其在垂直轧制方向具有扩散趋势。在相同应力水平下，垂直轧制方向的扩散速度较其他方向更快，从而使得该方向的等效应力更高。上表面的主应力大多为负值，表明受到压应力；而下表面的主应力大多为正值，表明受到拉应力。轧制方向的最大主应力为 264.1 MPa，垂直轧制方向的最大主应力为 266.2 MPa。剪应力沿 45° 方向对称分布，其大小低于主应力，最大剪应力约为 142.5 MPa。

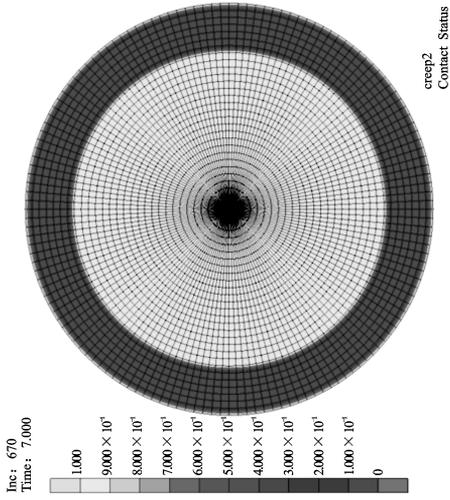
相比之下，如图 7-40 所示，2195-T6 态铝锂合金(无预变形)的应力分布较为均匀，仅存在微小的各向异性。其最大等效应力为 363.2 MPa，高于 T34 态的最大等效应力。这主要是因为 T6 态材料的初始强度高于 T34 态，在变形过程中应力水平也相应更高。T6 态轧制方向的最大主应力为 290.1 MPa，最大剪应力为 142.6 MPa。

7.5.7 不同蠕变本构下蠕变应变分布状态分析

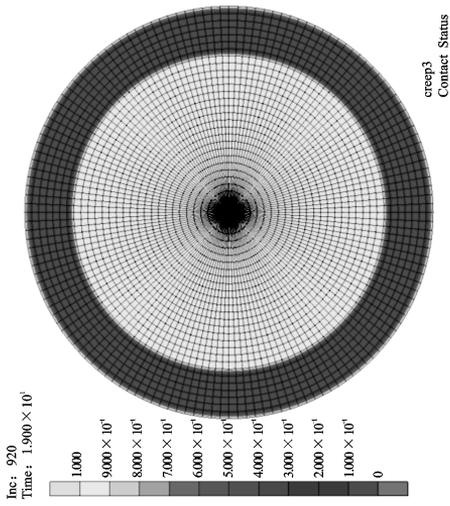
不同坯料组织状态下 2195 铝锂合金样件蠕变应变云图如图 7-41 所示，当采用各向同性本构时，如图 7-41(a1-a2)和图 7-41(c1-c2)所示，T34 态和 T6 态上下两个表面的蠕变应变云图都呈现标准的对称性，而采用各向异性本构时，如图 7-41(b1-b2)和图 7-41(d1-d2)所示，可以看出整个蠕变应变分布呈现各向异性，对于 T34 态，蠕变应变的分布规律是 $S_{90} > S_{45} > S_0$ ，这与第 3 章的研究现象相同，而对于 T6 态蠕变应变的分布仍然是 S_0 的蠕变应变处于最低水平，而且整体蠕变量低于 T34 态对应三个方向的蠕变量，可以发现，中圈附近的蠕变应变各向异性较高，这是由于样件在成形过程中中圈附近的部位变形幅度较大，材料不同方向的屈服强度不同，在承受相同应力的情况下，彼此抵抗变形的能力不同，因此贴膜速度不一致，而贴膜后由于模具的支撑，其蠕变应变大小也与未贴膜部分的蠕变应变大小不相同，蠕变量与初始应力的分布相关。



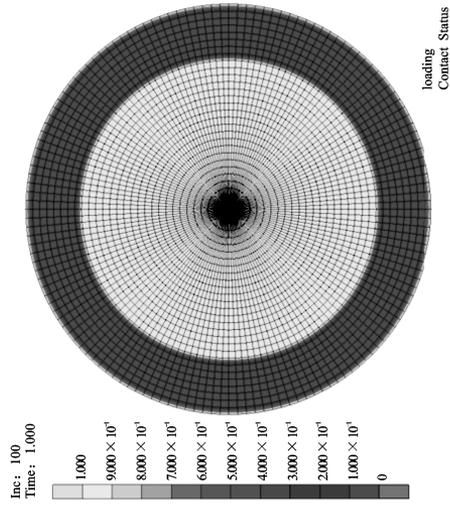
(a1) 2195-T34态铝锂合金加载结束后的贴膜度图



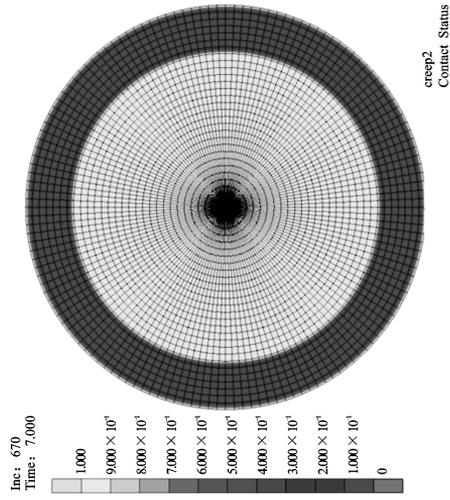
(a2) 2195-T34态铝锂合金蠕变6h后的贴膜度图



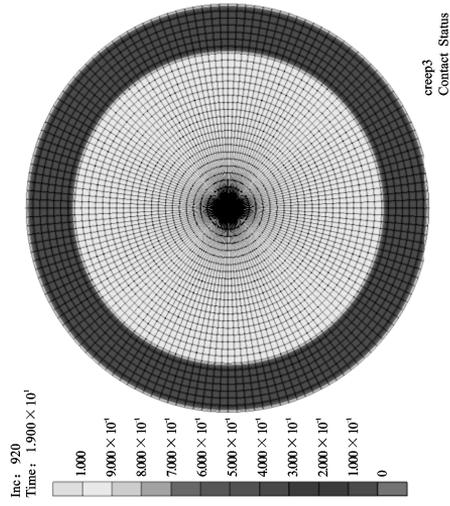
(a3) 2195-T34态铝锂合金蠕变结束后的贴膜度图



(b1) 2195-T6态铝锂合金加载结束后的贴膜度图

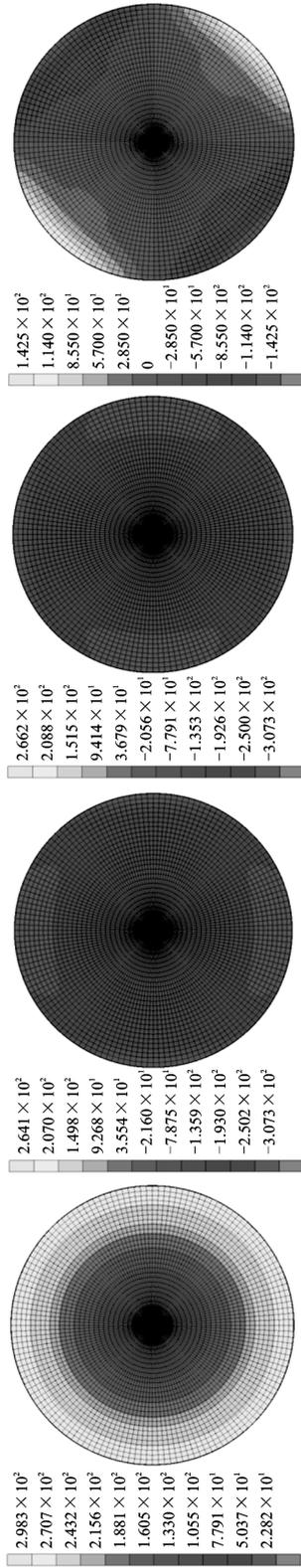


(b2) 2195-T6态铝锂合金蠕变6h后的贴膜度图



(b3) 2195-T6态铝锂合金蠕变结束后的贴膜度图

图7-38 2195铝锂合金不同坯料组织状态加载后贴膜情况分布图

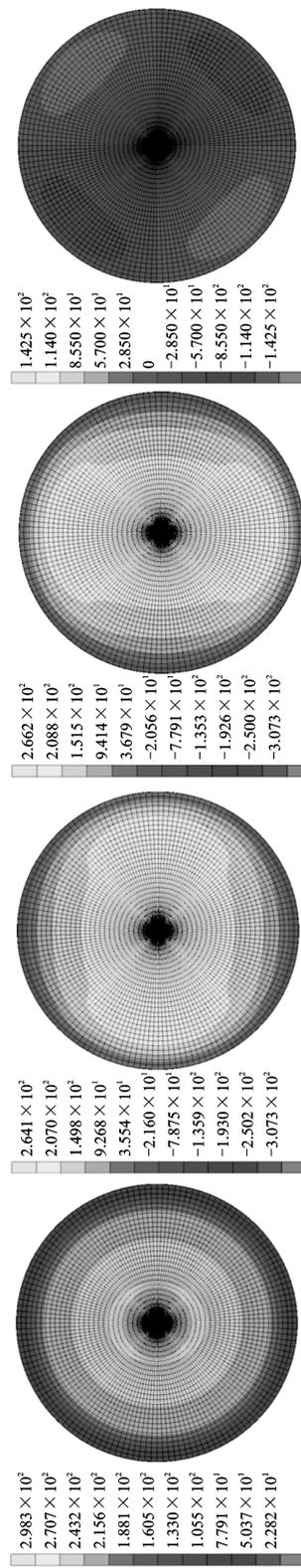


(d1) 样品上表面的剪应力

(c1) 样品上表面的 90° 方向主应力

(b1) 样品上表面的 0° 方向主应力

(a1) 样品上表面的等效应力



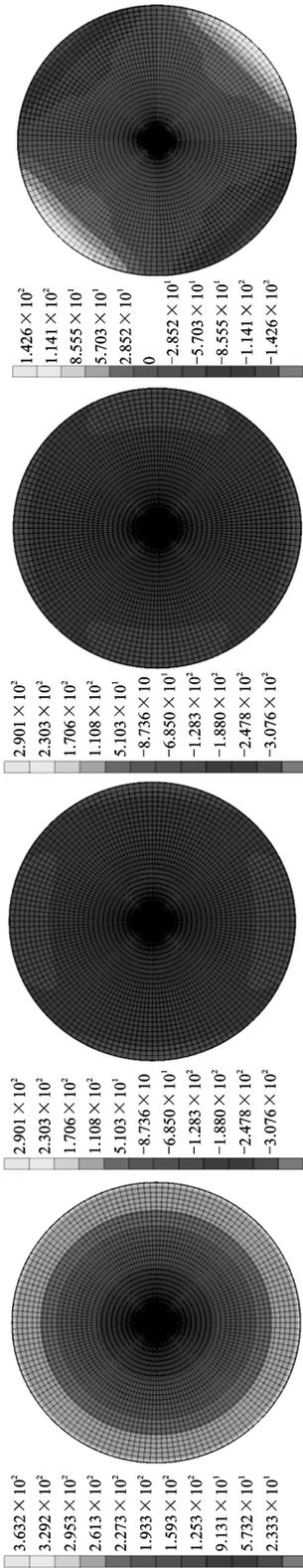
(d2) 样品下表面的剪应力

(c2) 样品下表面的 90° 方向主应力

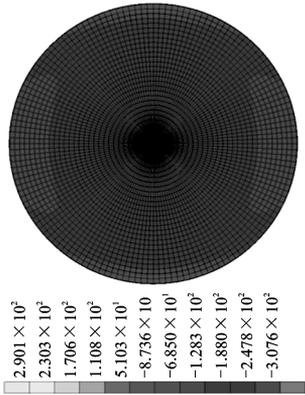
(b2) 样品下表面的 0° 方向主应力

(a2) 样品下表面的等效应力

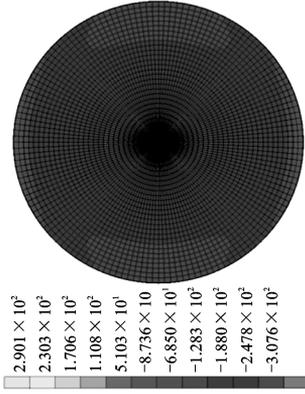
图 7-39 2195-T34 态铝锂合金样品上下表面应力状态分布



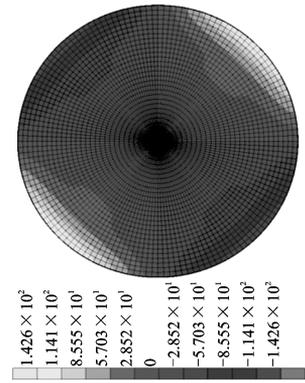
(a1) 样品上表面的等效应力



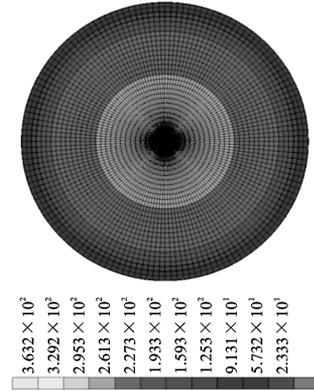
(b1) 样品上表面的0°方向主应力



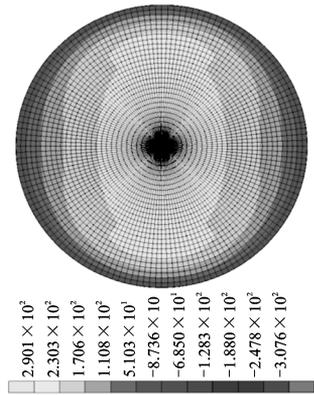
(c1) 样品上表面的90°方向主应力



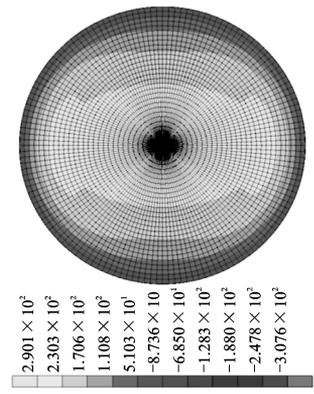
(d1) 样品上表面的和剪应力



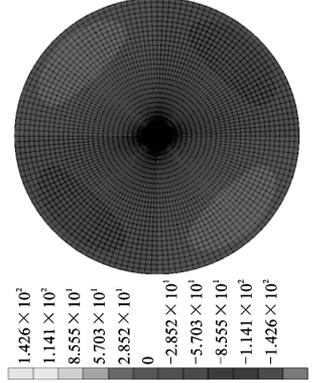
(a2) 样品下表面的等效应力



(b2) 样品下表面的0°方向主应力



(c2) 样品下表面的90°方向主应力



(d2) 样品下表面的剪应力

图 7-40 2195-T6态铝锂合金样品上下表面应力状态分布

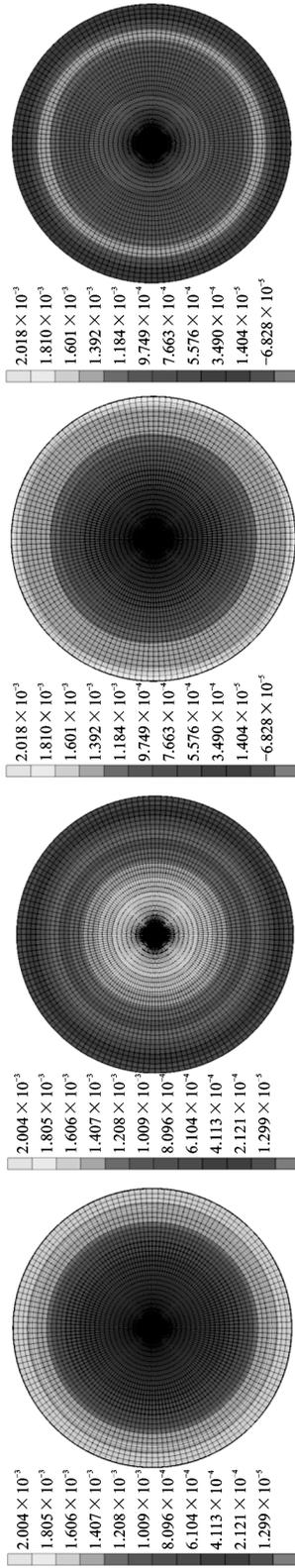
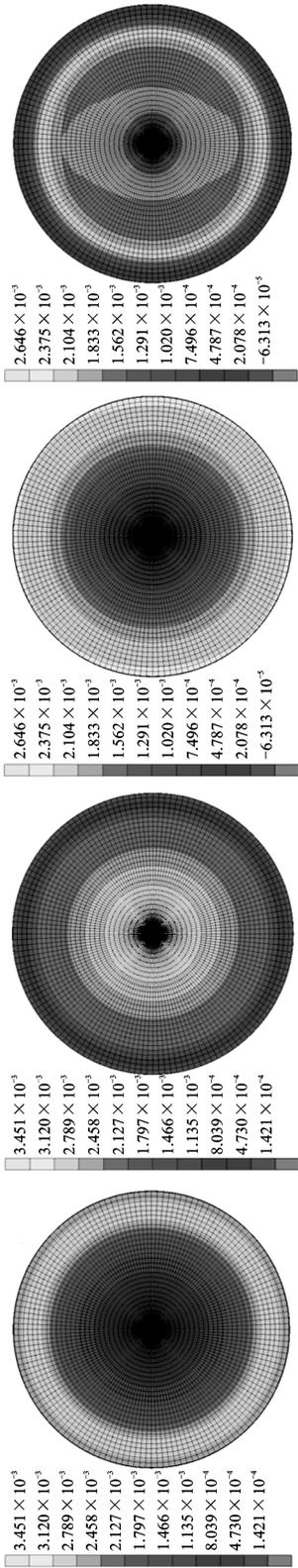
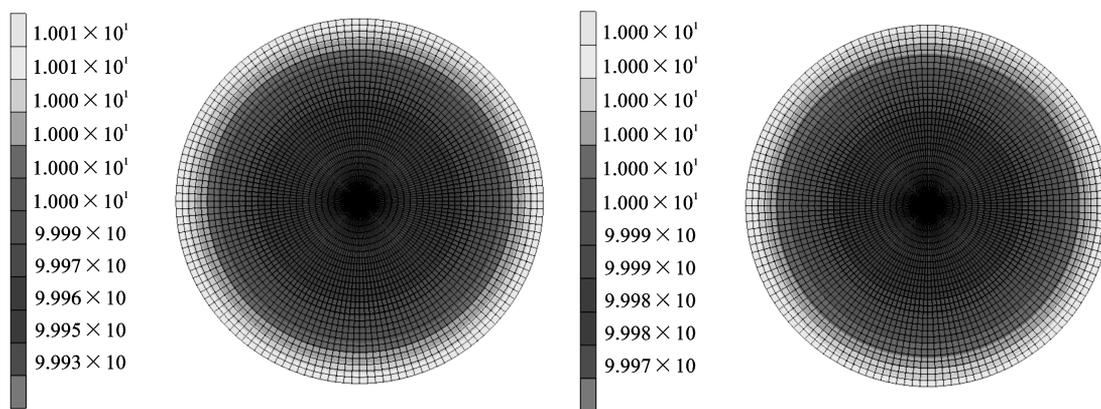


图7-41 不同坯料组织状态下2195铝锂合金样品蠕变应变云图

7.5.8 不同蠕变本构下回弹后型面厚度分析

构件在蠕变时效结束后的型面厚度是成形质量中较为重要的一环，对不同坯料状态下 2195 铝锂合金蠕变时效后的有限元仿真型面厚度进行提取，结果如图 7-42 所示，通过对比图 7-42(a)图 7-42(b)，可以发现不同坯料状态的 2195 铝锂合金蠕变前后厚度变化都极小，当初始态为 T34 态时，厚度由原来的 10 mm 变为现在 9.993~10.01 mm 之间，相对误差为 0.17%，当初始态为 T6 态时，厚度由原来的 10 mm 变为现在 9.997~10 mm 之间，相对误差仅为 0.03%，可以发现，不同坯料状态对成形后构件厚度几乎没有影响，而蠕变时效成形相比于其他成形工艺的优势之一就是其成形前后几乎不改变板料的厚度，这对变厚度产品的成形制造更为有利。



(a) 2195-T34 态蠕变时效后厚度分布图

(b) 2195-T6 态蠕变时效后的厚度分布图

图 7-42 不同坯料组织状态下 2195 铝锂合金蠕变时效后型面厚度分布图

综上所述，相比于各向同性本构，采用各向异性本构可以很好地预测不同坯料组织状态下 2195 铝锂合金蠕变时效成形的各向异性行为，对不同坯料组织状态下 2195 铝锂合金的蠕变时效成形具有很好的指导意义。