

镁合金管滚珠旋压变形区温升特性研究

赵春江, 张飞涛, 刘雁伟, 苏梦颖

(太原科技大学 太原重型装备协同创新中心, 山西 太原 030024)

摘要: 滚珠旋压由于连续逐点成型特性而产生大量的变形热而需要对变形区进行连续冷却。由于镁合金成型温度较低, 可以利用摩擦与变形热替代镁合金薄壁管滚珠旋压工件的加热过程。通过有限元模拟对不同工艺参数下的生热规律进行计算。结果表明: 滚珠旋压变形影响区的温度随着摩擦系数、模具转速、减薄量和进给比的提高而增加, 其中, 减薄量对温度的提高最为敏感, 模环转速对温度的提高影响较小, 摩擦系数对温升的影响最小; 在高转速和大减薄量时变形影响区的温度可以达到 220 ℃ 以上, 可以满足镁合金温热成型的温度要求。变形区非接触式温度测量结果表明, 模拟结果与实测结果吻合度较高。

关键词: AZ31B 镁合金; 薄壁管; 滚珠旋压; 变形区温升; 有限元

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)07-2151-08

目前, 针对高速滚珠旋压工艺的研究, Rotarescu^[1]对滚珠旋压的过程及其旋压力的计算进行了系统的理论推导和数值模拟。Abd-Eltwab^[2]对滚珠旋压生产内花键套的工艺进行了实验和理论研究。Ahmed^[3]提出了一种新的滚珠旋压球组设计方法, 可以克服生产纵向内肋管件的问题。李茂盛^[4]利用平面应变状态假设, 得出了滚珠旋压力的计算公式。李勇^[5]对充液旋压加工铜管内壁沟槽和微细热管旋压拉拔复合成形机理进行了深入的研究。Kuss^[6,7]对影响工件滚珠旋压过程中的表面开裂现象进行了有限元模拟和实验, 给出了工艺参数对滚珠旋压损伤的影响规律。Zhang Shihong^[8]对铜管内螺纹滚珠旋压折叠缺陷及其金相组织特性进行了分析。

滚珠旋压工艺过程如图 1 所示, 其中支撑环、圆锥模环和滚珠一起组成滚珠旋压模具, 旋压模具套在工件外壁, 模具和工件相对转动同时产生沿轴向的相对进给运动, 则套在心轴上的工件与滚珠接触并受压产生塑性变形, 达到旋薄管坯的目的。

滚珠旋压过程的主要工艺参数如图 2 所示, 其中 R 为旋压用滚珠直径, Δt 为旋压道次减薄量, f 为进给比, α 为旋压角。

关于旋压工艺温度场的研究, Jiang Shuyong^[9]用刚粘塑性有限元法模拟镍钛形状记忆合金管的滚珠旋压, 获得了温度场、应力场和应变场。范有发^[10]采用摩擦旋压成形方法可以快速将坯料温度提高至 200~450 ℃。柴国强^[11]计算并分析了铝合金强力旋压变形区温

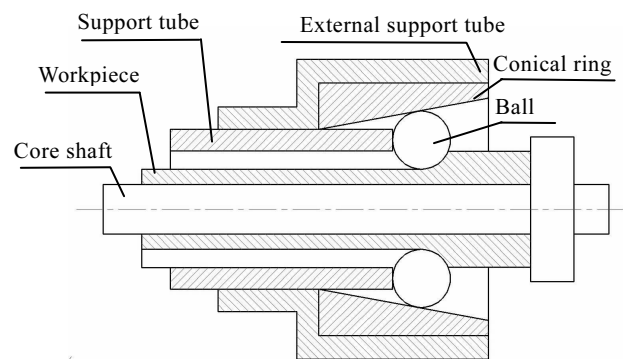


图 1 滚珠旋压示意图

Fig.1 Diagram of ball spinning

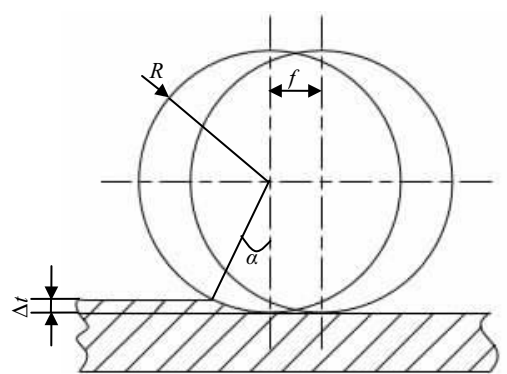


图 2 滚珠旋压的工艺参数

Fig.2 Process parameters of ball spinning

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51375325); 国家自然科学基金山西煤炭联合基金(U1610118, U1510131)

作者简介: 赵春江, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: zhaochj75@163.com

度变化规律及其对旋压工艺的影响。詹梅^[12]采用 ABAQUS 软件对钛合金薄壁壳体强旋进行了热力耦合有限元分析。结果表明,摩擦生热和接触换热的作用使在旋压区沿厚度方向形成较大的温度梯度,产生明显的不均匀变形。文献[13,14]对 AZ31B 镁合金加热旋压进行了研究,验证了镁合金板材或管材热旋压成形的可行性。

文献[15]对室温下难变形轻金属材料热旋成形的一些研究成果进行了总结。对于镁合金的旋压,模具转速的提高会增大应变速率,有利于细化组织,但可能降低塑性。据相关研究表明,在适当的温度,如 250 °C 左右,镁合金随着应变速率的提高延伸率增大^[16]。由于滚珠旋压局部变形量大、变形速度快,旋压过程中的摩擦十分强烈,因而产生大量的热能;如果润滑冷却不充分,管件和旋压模具之间的温度急剧升高。由于镁合金熔点低,对加工过程中的变形热和摩擦生热比较敏感,将发热转变为加工条件,成为有利因素,可避免镁合金旋压前的加热过程,使能耗大幅度降低。目前,国内外对镁合金室温摩擦旋压研究很少,本研究利用摩擦与变形热替代镁合金薄壁管滚珠旋工件加热过程,通过有限元模拟对不同工艺参数下的滚珠旋压生热规律进行了计算。

1 有限元模型

1.1 工艺参数与材料属性设置

本研究基于有限元软件 ABAQUS 的 dynamic, temp-disp, explicit 模块建立了镁合金薄壁管滚珠旋压热力耦合三维弹塑性有限元模型。芯模直径为 $\Phi 16$ mm;为了节省计算时间,取较短的管坯长度,将管坯规格设为 $\Phi 19$ mm \times 1.5 mm \times 10 mm;滚珠直径为 $\Phi 5.5$ mm;模环锥角为 2.5°。定义芯模、滚珠和模环均为三

维离散刚体,管坯为弹塑性体。所建立的有限元模型如图 3 所示。

管坯所采用的材料为 AZ31B 镁合金,其密度为 1780 kg/m³,泊松比为 0.35,其化学成分如表 1,其力学性能见表 2、热物性参数见表 3。

1.2 网格划分

滚珠旋压是复杂的动态接触过程,采用隐式算法很难收敛。因此,采用六面体八节点的线性实体减缩积分单元 C3D8RT 进行离散,此单元具有抗沙漏效应,抗畸变能力强,并能高效、稳定地进行复杂的热力耦合计算。对芯模与模环进行稀疏网格划分,并简化为壳体。对管坯划分了 15 618 个单元,20 139 个结点;对芯模划分了 3 604 个单元,3 710 个结点;对滚珠划分了 561 个单元,530 个结点;对模环划分了 2 907 个单元,3 078 个结点;共 28 861 个单元,33 287 个结点。

1.3 边界条件设置

将芯模设定为固定约束;在模环上施加一个速度载荷,使其沿轴向进给运动,并对其施加一个转速载荷,让其绕着芯模中心轴线转动;对滚珠和管坯无自

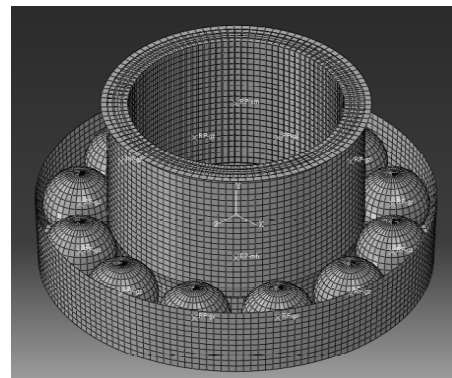


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

表 1 AZ31B 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy ($\omega/\%$)

Al	Zn	Mn	Cu	Ca	Ni	Fe	Si	Others	Mg
2.5~3.5	0.7~1.3	≥ 0.2	≤ 0.05	≤ 0.04	≤ 0.005	≤ 0.005	≤ 0.3	≤ 0.3	Bal.

表 2 AZ31B 镁合金力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of AZ31B magnesium alloy^[14]

Temperature, $T/^\circ\text{C}$	20	100	150	200	250	300
Young's modulus, E/GPa	45	37.7	35.6	33.5	31.4	29.3
Yield stress, $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	183	140	100	70	40	22

表 3 AZ31B 镁合金热物性能参数

Table 3 Thermal performance parameters of AZ31B magnesium alloy

Temperature, $T/^\circ\text{C}$	20	100	200	300
Thermal conductivity, $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	96.4	101	105	109
Specific heat, $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	1100	1130	1170	1210
Expansion, $\alpha/\times 10^{-6}\text{mm}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	26	27	27.9	27.9

由度约束，滚珠只依靠其与模环的摩擦来实现滚珠的自转与公转。

采用剪切摩擦模型、罚函数接触公式来描述各接触面间的摩擦接触，各接触面间采用面面接触方式、有限滑动摩擦准则，各接触对中，芯模与管坯、模环与滚珠、滚珠与管坯的摩擦系数为 0.1。

采用简化的方式设定室温恒定为 20 °C，考虑接触面和周围环境之间的热对流，取对流换热系数为 20 $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ，考虑接触区相互导热，取接触传导系数为 3000 $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 。模型中假设转换成热的摩擦耗散能量为 1，即摩擦功全部转化为摩擦热；接触面和目标面之间热分布的权重系数为 0.5，即摩擦热平均分配给两相互接触面；取塑性功转热系数为 0.9^[17]。

1.4 数值模拟参数确定

在本研究数值模拟过程中，研究管坯在稳定旋压状态时不同壁厚减薄量、进给比、旋压转速对温度场的影响，具体参数详见表 4。

2 高速滚珠旋压过程温度场变化规律

通过 ABAQUS 有限元模拟获得在高速滚珠旋压过程中 AZ31B 镁合金薄壁管的温度场分布如图 4 所示，图 4a~4d 分别为 $n=6000\text{ r/min}$ ， $\Delta t=0.2\text{ mm}$ ， $f=0.2\text{ mm/r}$ 的不同时刻时管坯温度场云图。由图 4 可以发现，管坯在旋压变形区的温度最高，温度沿旋压区向两侧分布比较均匀，旋压变形区温度随着旋压时间的延长而不断升高，旋压区最高温度达到 118 °C，成形区温度大致稳定在 58 °C 左右。

这是因为在旋压区管坯发生塑性大变形，短时间内大量的塑性功转化为变形热，通过变形热与摩擦热

的作用使得旋压区温度快速升高，随后通过热传导向旋压区两侧进行热量传递；成形区温度变化主要是管坯与外界环境的热交换，管坯以散热为主，随着远离旋压变形区，管坯与外界环境热交换逐渐趋于稳定，使得成形区温度达到稳定状态。

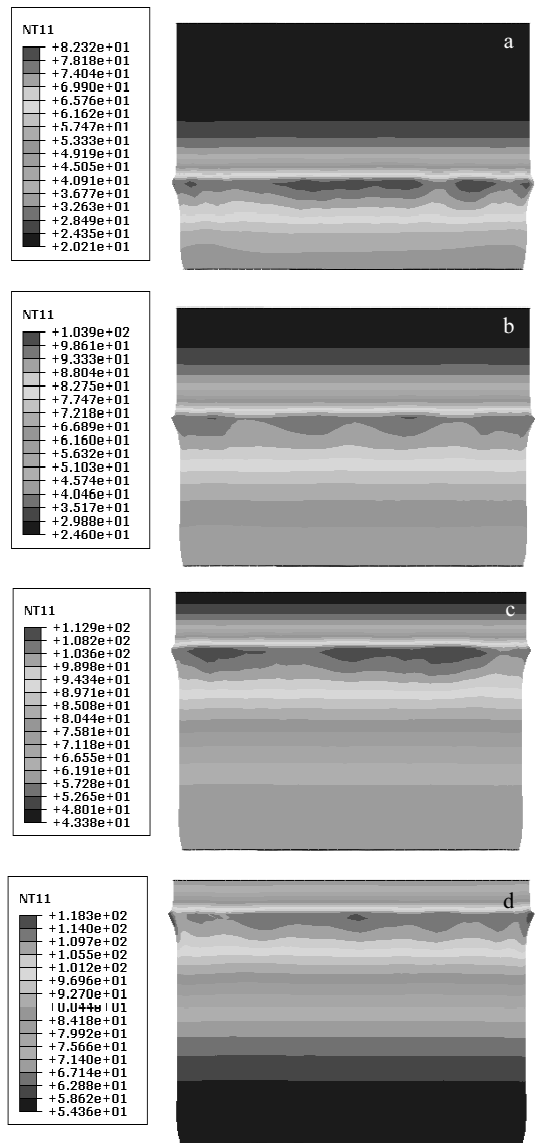


图 4 不同时刻的温度场云图

Fig.4 Temperature field at different time: (a) $t=0.1125\text{ s}$, (b) $t=0.2250\text{ s}$, (c) $t=0.3375\text{ s}$, and (d) $t=0.3938\text{ s}$

表 4 工艺参数

Table 4 Process parameters

Process parameters	Value
Thinning, $\Delta t/\text{mm}$	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25
Feed ratio, $f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Speed, $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	5000, 6000, 7000, 8000, 9000
Number of balls, N	12

图 5 为管坯表面轴向某一路径上各结点编号，从结点 7407 到节点 7388 方向为滚珠旋压进给方向。选该路径上 5 个不同节点，绘制各节点随时间变化的温度曲线如图 6 所示。从图中可以看出，随着时间的推移，每一条曲线温度值都是先增大后减小，且节点处于旋压变形区时的温度值最大，这是由于滚珠旋压区的管坯发生塑性变形，产生大量的变形热，而且散热区域小，使得旋压区升温大；另一方面，由于旋压区的金属堆积现象，导致管坯实际减薄量增大，从而使得管坯的塑性变形量增大，增加了变形热和摩擦热的产生，使得旋压变形区升温较高。

在旋压开始阶段，各个节点处于管坯未变形区，在刚开始旋压时，温度变化不大，处于初始温度值附近；但随着逐渐靠近旋压变形区，其温度开始逐渐升高，这是因为未变形区的温升主要依靠旋压变形区的热传导来实现，使得未变形区温度少量升高。随着旋压区的向前推进，各节点进入已成形区，其温度保持缓慢下降，温度值低于处于旋压变形区时的温度；这说明随着滚珠的向前旋进，成形区主要以管坯与外界的热交换为主发生散热，从而使得温度降低。但进入已成形区的节点温度高于初始温度。

比较图 6 中的 5 条不同曲线，还可以发现，随着旋压时间的延长，旋压变形区温度在不断升高，最高达到了 120 °C，这是由于受到变形热和摩擦热的作用，且管坯与环境接触区域小，导致旋压变形区生热大于散热，并且由于管坯在前一时刻旋压所产生的热量对当前旋压变形区热传导的影响，所以当前旋压变形区的温度较前一时刻旋压变形区的温度在不断地升高。随着旋压时间的延长，各节点的温度逐渐降低到统一的温度值，并趋于稳定，并最终稳定在 53 °C 左右。

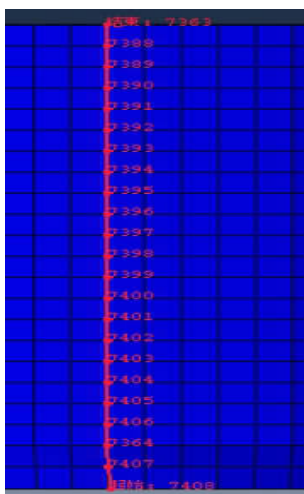


图 5 管坯轴向结点编号
Fig.5 Axial node number of tube

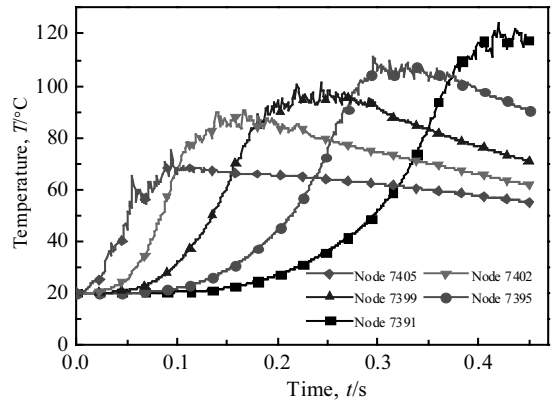


图 6 不同节点温度值
Fig.6 Temperature values of different nodes

为了详细探讨不同工艺参数对变形区温升的影响，分别对不同进给比、不同转速和不同减薄量下滚珠旋压变形区温升规律进行了有限元计算。

2.1 不同进给比下温升的变化规律

选取工艺参数 $n=6000 \text{ r/min}$, $\Delta t=0.2 \text{ mm}$, $f=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 \text{ mm/r}$, 模拟计算不同进给比下管坯表面的温度变化图 7 所示。图 7 中，横坐标为管坯旋压区与旋压起始处的距离，纵坐标为旋压区温度值。从图 7 中可以看出，进给比的变化对管坯的生热升温有明显的影响，随着进给比的增加，旋压区温度也在不断增大。但是随着进给比的增加，旋压变形区的温度升高的越来越慢。当进给比从 0.05 mm/r 增加到 0.1 mm/r 时，旋压区温度快速升高，最大温差值可达到 19 °C，最小温差值也达到 8 °C；但当进给比大于 0.3 mm/r 时，最大温差只有 5 °C，最小温差仅仅为 0.5 °C。

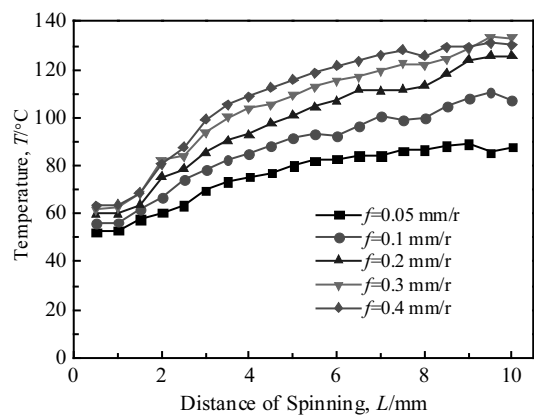


图 7 不同进给比下的旋压变形区温度变化图
Fig.7 Temperature changes of spinning deformation zone at different feed ratios

2.2 不同转速下温升的变化规律

选取工艺参数 $\Delta t=0.2 \text{ mm}$, $f=0.1 \text{ mm/r}$, $n=5000, 6000, 7000, 8000, 9000 \text{ r/min}$, 模拟计算不同转速下管坯表面温度变化。图 8 为不同转速下的旋压变形区温度变化曲线。从图 8 中可以看出, 随着模环转速的提高, 管坯旋压区的温度也不断升高。随着转速的升高, 管坯旋压区温度的升高趋势越来越平缓, 从 5000~6000 r/min, 旋压区变形温度升高 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 而从 8000~9000 r/min, 旋压区变形温度升高只有 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。可见, 转速对高速滚珠旋压管坯生热升温有一定的影响, 但效果不如进给比显著。

2.3 不同减薄量下温升的变化规律

选取工艺参数 $n=6000 \text{ r/min}$, $f=0.1 \text{ mm/r}$, $\Delta t=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 \text{ mm}$, 模拟计算不同减薄量下管坯表面的温度变化。图 9 为不同减薄量下的旋压区温度变化曲线。从图 9 中可以看出, 滚珠旋压过程中, 减薄量的变化对管坯的生热升温有着显著的影响, 旋压区变形温度随着管坯减薄量的增大而不断升高, 并持续呈快速上升趋势。减薄量从 0.05 mm 增加到 0.25 mm 时, 管坯旋压区温度上升了 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右; 而且减薄量每增加 0.05 mm , 旋压区温度平均升高约 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大温升高达 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可见, 减薄量对管坯的生热升温有很大的影响, 对滚珠旋压过程中管坯温度场的变化规律发挥决定性作用。

由上述各工艺参数对变形区温升变化的计算与分析可知, 减薄量对温升变化影响最大。因此, 为了得到进一步的温升值, 采用大减薄量对其温升过程进行计算, 其结果如图 10 所示。由图 10 可见, 当减薄量达到 0.7 mm 时, 即相对减薄量达到 46% 时, 变形区最高温度可达到 $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 达到了镁合金的再结晶温度。

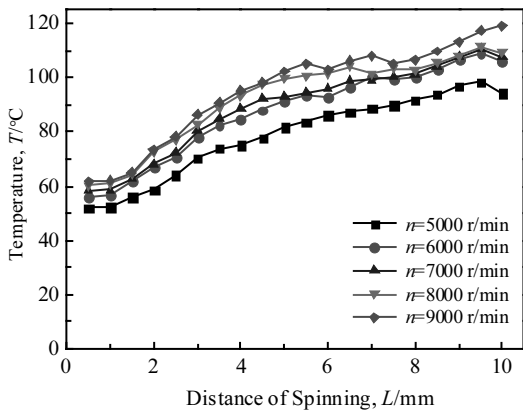


图 8 不同转速下的旋压变形区温度变化图

Fig.8 Temperature changes of spinning deformation zone at different speeds

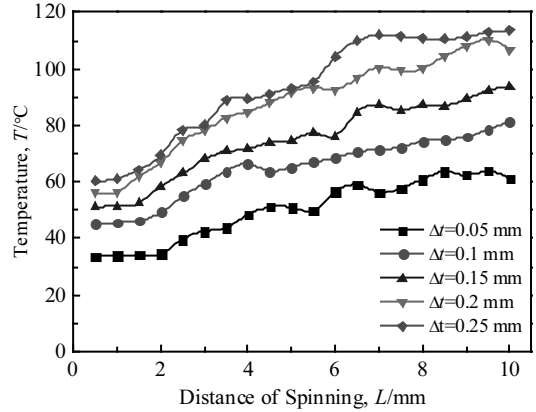


图 9 不同减薄量下的旋压区温度变化图

Fig.9 Temperature changes of spinning zone with different amounts of thinning

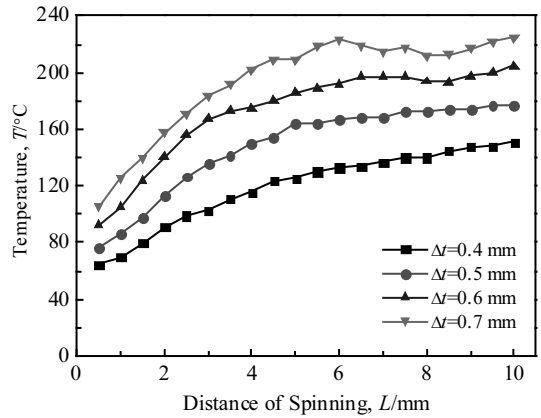


图 10 大减薄量下的旋压区温度变化图

Fig.10 Temperature changes of spinning zone with a large amount of thinning

2.4 不同摩擦系数的温升变化规律

选取工艺参数 $n=6000 \text{ r/min}$, $f=0.2 \text{ mm/r}$, $\Delta t=0.6 \text{ mm}$, 滚珠与管坯间的摩擦系数 $\mu=0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$, 模拟计算不同摩擦系数下管坯表面的温度变化如图 11 所示。从图 11 中可以看出, 滚珠旋压过程中, 随着摩擦系数的增大, 旋压区变形温度升高, 但是其变化量很小。摩擦系数从 0.1 增加到 0.3 时, 稳定后的管坯旋压区温度上升了 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右; 摩擦系数每增大 0.05 , 旋压区温度平均升高约 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可见, 虽然滚珠与管坯之间的摩擦系数对管坯的生热升温有着一定程度的影响, 但与上述 3 种工艺参数相比其影响效果很小。

3 实验与仿真结果对比

所采用的实验设备如图 12, 包括卧式高速滚珠旋压机, 最高转速 6000 r/min , 红外线测温仪以及终端

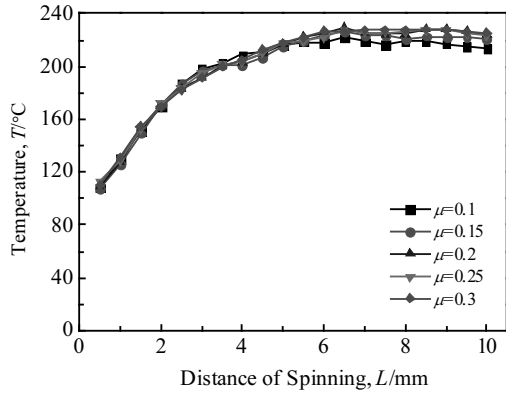


图 11 不同摩擦系数下的旋压区温度变化图

Fig.11 Temperature changes of spinning zone with different friction coefficients

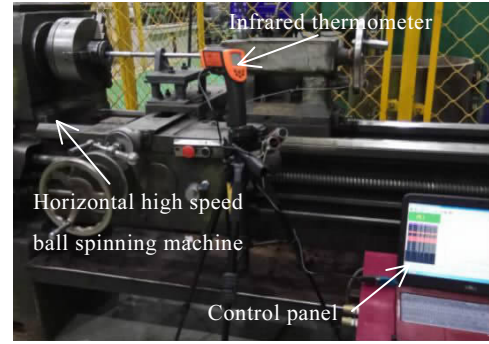


图 12 实验设备图

Fig.12 Experimental device

表 5 实验工艺参数

Table 5 Experimental process parameters

Experiment group	$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	$\Delta t/\text{mm}$	$f/\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$	N
1	6000	0.2	0.1	12
2	6000	0.1	0.1	12
3	5000	0.2	0.1	12
4	6000	0.2	0.2	12

控制面板。实验中，红外线测温仪的测量位置为滚珠与管坯接触区域，终端控制面板实时显示温度测量结果。

实验中所采用的实验材料参数与仿真模型一致，芯模材料为 42CrMo 钢；滚珠材料为 42CrMo 钢，直径为 $\Phi 5.5 \text{ mm}$ ；模环锥角为 2.5° 。考虑到实际操作性能，采用管坯长度 150 mm，实际旋压长度 100 mm。为了与实验数据对比，相应的模拟计算所用的管坯长度也设为 100 mm。本实验所采用的工艺参数如表 5。

选取实验组 1 和实验组 2 进行仿真模拟与实验测温，其结果如图 13。从图 13 中可以看出，实测值变化趋势与仿真值变化趋势基本一致。比较不同减薄量下的实测值，旋压区温度随着减薄量的增加而增大，当减薄量从 0.1 mm 增大到 0.2 mm 时，旋压区温度升高了 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，与仿真结果一致。

选取实验组 1 和实验组 3 进行仿真模拟与实验测温，其结果如图 14 所示，可以看出，实测值变化趋势与仿真值变化趋势基本一致。比较不同转速下的实测值，旋压区温度随着转速的提高而增大，当转速从 5000 r/min 增大到 6000 r/min 时，旋压区温度升高了 $8 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，与仿真结果一致。

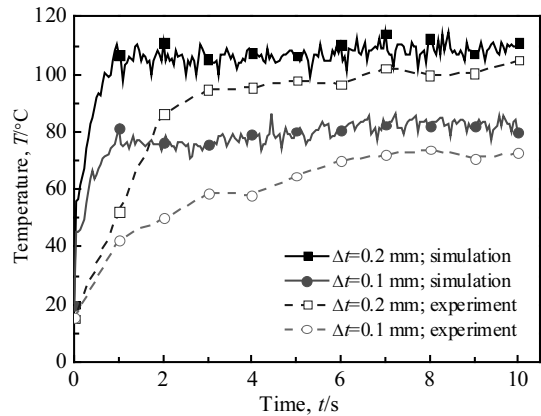


图 13 不同减薄量下旋压区温度仿真值与实测值对比图
Fig.13 Temperature contrast for different amounts of thinning

选取实验组 1 和实验组 4 进行仿真模拟与实验测温，其结果如图 15 所示。可以看出，实测值变化趋势与仿真值变化趋势基本一致。比较不同进给速下的实测值，旋压区温度随着进给比的增大而增大，当进给比从 0.1 mm/r 增大到 0.2 mm/r 时，旋压区温度升高了 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，与仿真结果一致。

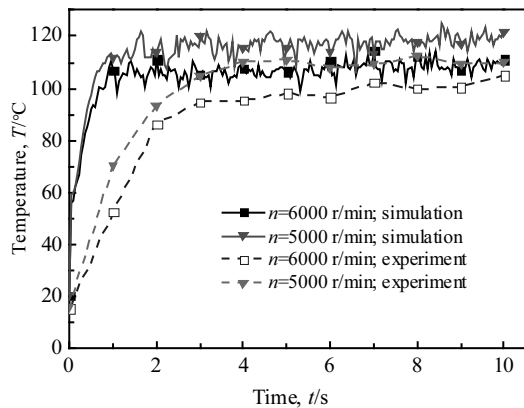


图 14 不同转速下旋压区温度仿真值与实测值对比图

Fig.14 Temperature contrast at different speeds

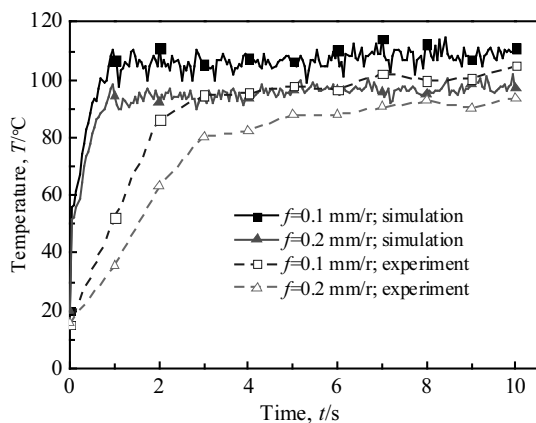


图 15 不同进给比下旋压区温度仿真值与实测值对比图

Fig.15 Temperature value comparison under different feed ratios

通过图 13~图 15 分析可以发现, 高速滚珠旋压过程中管坯表面旋压区温度的仿真结果与实验测量结果基本吻合。在相同工艺参数下, 旋压区温度实测值略低于仿真值, 这是由于实际测量位置为滚珠与管坯接触附近区域, 与仿真结果提取的变形区存在一定的差别; 在旋压开始阶段, 实测值温升速度比仿真值缓慢, 这是由于环境因素与测温设备的局限性, 导致在开始阶段实测值温升速度比仿真值缓慢一些, 但在旋压的随后阶段实测值与仿真值均趋于稳定。

为了验证大减薄量下的温升情况, 选取工艺参数 $n=6000$ r/min, $f=0.2$ mm/r, $\Delta t=0.7$ mm, 进行高转速和大减薄量下的管坯旋压区温度测量, 实测结果与相同参数下的仿真结果如图 16 所示。可以看出, 当在高转速 (6000 r/min) 和大减薄量时, 实测值变化趋势与仿真值变化趋势基本一致, 仿真值温度最终稳定在 220~230 °C 之间, 实验值温度经过短暂的上升后也达

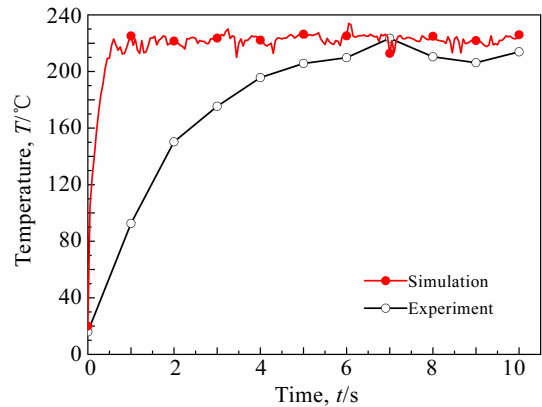


图 16 高转速大减薄量下的旋压区温度仿真值与实测值对比图

Fig.16 Temperature contrast with high speed and a large amount of thinning

到了 210 °C 以上。可见, 镁合金管在高转速、大减薄量下进行滚珠旋压时, 由于摩擦热与变形热引起的管坯温升可以达到其再结晶温度, 满足其温热成形温度要求。

但是在多次大减薄量滚珠旋压实验过程中也发现, 旋后管件的表面粗糙度不稳定和表面裂纹的情况, 这是因为镁合金自身的塑性较差, 在大减薄量下应变增大而导致了表面质量下降。

4 结论

1) 高速滚珠旋压过程中, 减薄量、进给比和转速对管坯的变形区生热升温都有较大的影响, 其中减薄量的变化对管坯的温升影响最显著, 进给比和转速次之; 滚珠与各接触体的摩擦系数对变形区生热升温的影响最小; 减薄量、进给比、转速和摩擦系数与管坯的生热升温都呈正比关系, 随着减薄量的增大, 管坯温度持续上升, 但是随着进给比和转速的增大, 管坯温升速率逐渐减缓。

2) 在采用高转速和大减薄量时, 镁合金管在滚珠旋压过程中的摩擦与变形热引起的最高温度超过了其再结晶温度, 可以达到其温热成形温度, 但是过大减薄量下的 AZ31 镁合金管塑性成形极限需要进一步探讨。

参考文献 References

- [1] Rotarescu M I. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1995, 54(1-4): 224
- [2] Abd-Eltwab A A, El-Abden S Z, Khaled I E *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2017, 134: 399

- [3] Ahmed K I E. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*[J], 2011, 39(1): 15
- [4] Li Maosheng(李茂盛), Kang Dachang(康达昌), Zhang Shihong(张士宏) *et al. Materials Science & Technology*(材料科学与工艺)[J], 2004, 12(2): 125
- [5] Li Yong(李勇), Xu Zechuan(许泽川), Tang Yong(汤勇). *Journal of South China University of Technology, Natural Science Edition*(华南理工大学学报, 自然科学版)[J], 2010, 38(1): 128
- [6] Kuss M, Buchmayr B. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 224: 213
- [7] Kuss M, Buchmayr B. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 234: 10
- [8] Zhang Guangliang, Zhang Shihong, Li Bing. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 184: 393
- [9] Jiang Shuyong, Zhang Yanqiu. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(3): 781
- [10] Fan Youfa(范有发), Li Dongnan(李东南), Chen Wenzhe(陈文哲). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2012, 23(11): 1272
- [11] Chai Guoqiang(柴国强), Li Defu(李德富). *Forging & Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2015(11):112
- [12] Li Hu(李虎), Zhan Mei(詹梅), Yang He(杨合). *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2008(6): 187
- [13] Murata M, Kubokita T, Muraib T. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 162-163: 540
- [14] Yoshihara S, Mac D B, Hasegawa T *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 153-154: 816
- [15] Shen Liquan(申利权), Yang Qi(杨旗), Jin Li(靳丽) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(9): 2195
- [16] Zhan Mei, Yang He, Guo Jing *et al. Transaction of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(6): 1732
- [17] Lugt J V D, Huetink J. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 1986, 54(2): 145

Finite Element Simulation of Heat Generation of Magnesium Alloy Tube by Ball Spinning

Zhao Chunjiang, Zhang Feitao, Liu Yanwei, Su Mengying

(Collaborative Innovation Center of Taiyuan Heavy Machinery Equipment, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Ball spinning requires a continuous cooling of the deformation zone due to the large amount of deformation heat generated by the continuous point-by-point molding characteristics. According to the low forming temperature of magnesium alloy, friction and deformation heat can be used to replace the heating process of the thin-walled magnesium alloy tube in ball spinning process. The heat generation laws under different process parameters were calculated by finite element simulation. The results show that the temperature in the spinning deformation zone increases with the increase of rotating speed, thinning amount, feed ratio and friction coefficient. For these four parameters, the friction coefficient has the least effect on the temperature rise, the amount of thinning has the most obvious effect on the increase of temperature, while the effect of mold speed on the rising of temperature is slight. Under high speed and a large amount of thinning, the temperature of the deformation zone can reach above 220 °C, which can meet the temperature requirement of hot forming of magnesium alloy. The results of non-contact temperature measurement in the deformation zone show that the simulation results are in good agreement with the measured results.

Key words: AZ31B magnesium alloy; thin-walled tube; ball spinning; temperature rising in deformation zone; finite element

Corresponding author: Zhao Chunjiang, Ph. D., Professor, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, E-mail: zhaochj75@163.com