

模具

超低温度下 42CrMo 模具钢拉深凸模温度场模拟与实验研究

高 强, 程旺军, 孙耀宁, 赵 跃, 马 恩

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 拉深凸模表面温度分布均匀性对超低温拉深构件的成形性能具有重要影响。根据热力学第一定律建立了凸模温度场导热模型, 利用 Abaqus 6.14 软件对凸模超低温冷却过程中的温度场进行模拟, 并通过超低温冷却实验对数值模拟的准确性进行验证。结果表明: 凸模腔体在超低温冷却过程中的温度场呈阶梯型均匀变化, 当冷却时间为 40~45 min 时, 深孔 5 处的温度率先趋于稳定, 实验最低温度接近 -121 °C, 与模拟温度 -125 °C 相比相差 3.3%; 当冷却时间为 50~55 min 时, 深孔 1~深孔 4 处的温度基本趋于稳定, 最低温度为 -176 °C, 与模拟温度 -185 °C 相比误差仅为 5.1%。同时, 冷却过程中的热流密度与模具腔体厚度呈反比关系, 而导热量与模具腔体厚度呈正比关系, 冷却时间和液氮消耗量随着模具腔体厚度增大呈指数型增大。研究结果为超低温拉深过程中模具的深冷温度场求解提供了理论支撑。

关键词: 超低温; 模具; 温度场; 热流密度; 导热

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.028

中图分类号: TG938

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0226-08

Simulation and experimental research on temperature field of deep-drawing punch for 42CrMo die steel at cryogenic temperature

Gao Qiang, Cheng Wangjun, Sun Yaoning, Zhao Yue, Ma En

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: The uniformity of temperature distribution on the surface of drawing punch has an important influence on the forming performance of cryogenic temperature drawn components. According to the first law of thermodynamics, a thermal conductivity model of the temperature field for punch was established, and the temperature field of punch during the cryogenic temperature cooling process was simulated by software Abaqus-6.14. Then, the accuracy of numerical simulation was verified by the cryogenic temperature cooling experiment. The results show that the temperature field of punch cavity during the cryogenic temperature cooling process presents a step-type uniform change. When the cooling time reaches 40 to 45 min, the temperature at deep hole 5 tends to be stable first, and the lowest experiment temperature is close to -121 °C, which is 3.3% different from the simulated temperature of -125 °C. When the cooling time reaches 50 to 55 min, the temperatures at deep hole 1 to deep hole 4 tends to be basically stable, and the lowest temperature reaches -176 °C, which is only 5.1% different from the simulated lowest temperature of -185 °C. At the same time, the heat flow density during the cooling process is inversely proportional to the thickness of punch cavity, while the heat conductivity is directly proportional to the thickness of punch cavity. The cooling time and liquid nitrogen consumption increase exponentially with the increasing of the thickness of punch cavity. Thus, the research provides theoretical support for the solving of deep cooling temperature field of punch during the cryogenic temperature deep drawing process.

Key words: cryogenic temperature; die; temperature field; heat flux; thermal conductivity

模具是工业生产中重要的基础工艺装备, 高质

量的模具能提高零件的生产效率, 同时保证了产品的可靠性和一致性^[1]。在热成形和低温成形中往往伴随着复杂温度场变化, 而模具温度分布的均匀性直接影响到零件的成形性能^[2-3]。在金属板材成形中, 通常使用金属模具, 因其具有良好的导热性能, 模具可以快速冷却, 有利于提高成形效率^[4-5]。而模具温度分布不均不仅会导致成形过程中模具容易龟裂, 缩短模具的使用寿命, 还会使零件出现起皱、开裂等现象, 降低零件的成形质量^[6]。在热成形和

收稿日期: 2024-06-03; 修订日期: 2024-09-10

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2022M722666); 国家自然科学基金资助项目 (52365052); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目 (2022D01C653); 新疆维吾尔自治区重点研发专项 (2024B01003-2)

作者简介: 高 强 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1125789841@qq.com

通信作者: 程旺军 (1987-), 男, 工学博士, 副教授

E-mail: chengwangjun2008@126.com, chengwangjun@xju.edu.cn

低温成形过程中, 实现对模具温度场的精确控制是提高零件成形质量和模具寿命的关键。国内外学者对模具温度分布均匀性进行了大量的研究。庞立娟等^[7]对热成形过程中的保压冷却阶段进行温度场分析, 并优化了模具的冷却系统, 提高了成形零件的力学性能。赵一鸣等^[8]对玻璃钢复合材料构件成形模具的温度场均匀性进行数值模拟, 结果发现, 阶梯型和梯形非等厚型板能够使得复合材料成形模具的表面温度分布均匀, 对零件的成形质量有很大程度的改善。胡云等^[9]发现模具温度对钛合金异形曲面钣金件影响较大, 模具温度过高或过低均会导致构件成形质量降低。Agazzi A 等^[10]使用有限元代码 Comsol 基于形态学方法, 找到了膨胀的三维冷却表面上的最佳温度分布, 改善了冷却阶段零件表面的温度均匀性。Gniatczyk 等^[11]研究发现框架式模具不仅能够使得模具结构轻量化, 还改善了成形模具的导热性能和温度均匀性。上述主要研究了热成形过程中模具的温度场均匀性, 对低温成形过程中模具温度场的研究相对较少, 相关理论也不成熟。

本文建立了拉深凸模温度场理论模型, 对拉深凸模温度分布进行计算, 利用 Abaqus 6.14 软件对模具温度场变化进行模拟; 然后, 通过超低温拉深模具的深孔温度冷却实验来验证仿真结果的可靠性, 实现对模具温度均匀分布和所需模具温度的精准控制; 最后, 在超低温下进行铝合金板材拉深成形实验和质量分析, 为超低温拉深凸模温度分布均匀性和实现模具温度场精确控制提供理论支撑。

1 拉深凸模温度场理论

1.1 导热模型

拉深凸模内腔为超低温环境, 外腔为室温环境, 热量由外壁面流向内壁面, 根据热力学第一定律 (能量守恒定律), 建立拉深板坯的导热模型, 如图 1 所示, 可得微元体的各几何参数。图 1 中, r 为圆柱坯微元体半径, θ 为 X 轴与 Y 轴的夹角; dr 为圆柱板坯微元体半径方向的厚度自变量, $rd\theta$ 为圆柱板坯微元体半径方向的厚度, dZ 为圆柱板坯微元体高度方向的自变量。而板坯微元体的热力学能量变化由导入微元体的热量与导出微元体的热量之差, 再加以微元体在某段时间内产生的热量计算得到, 其导热方程如式 (1) 所示:

$$\rho c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \cdot \frac{\partial T}{\partial r})_r + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta})_\theta + \frac{\partial}{\partial Z} (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial Z})_Z + \dot{q}_v \quad (1)$$

式中: ρ 为板坯的密度; c 为板坯的比热容; λ 为低温下板坯的热导系数; T 为圆柱板坯温度; ΔT 为温度在 X 方向随时间 t 的变化; Δt 为单位时间; \dot{q}_v 为板坯内产生的热量。

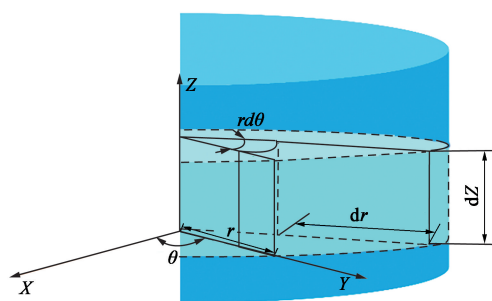


图 1 圆柱板坯微元体

Fig. 1 Micro-element of cylindrical slab

1.2 拉深凸模导热方程的求解

通过建立的导热模型对拉深凸模温度分布进行求解。假设模具内拉深腔和外柱体的半径分别为 r_1 和 r_2 , 其内、外表面分别维持均匀恒定的温度 T_1 和 T_2 。可假设为沿模具腔体半径方向 r' 的一维传热问题, 建立低温拉深模具温度场的求解模型如图 2 所示, 其中, 热腔代表环境温度, 冷腔代表液氮温度。

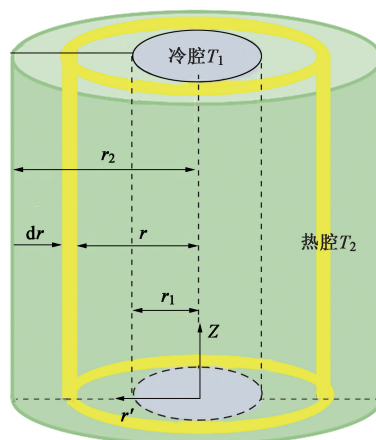


图 2 模具温度场的求解模型

Fig. 2 Solution model of die temperature field

因此, 式 (1) 可简化为:

$$\frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \cdot \frac{\partial T}{\partial r})_r = 0 \quad (2)$$

对式 (1) 进行两次积分得:

$$T(r) = \frac{C_1 \ln r}{\lambda} + C_2 \quad (3)$$

式中: C_1 和 C_2 分别为模具热腔和冷腔的热量。

边界条件 1:

$$r = r_1, T(r_1) = T_1 \quad (4)$$

边界条件 2:

$$r = r_2, T(r_2) = T_2 \quad (5)$$

根据边界条件, 可求出:

$$C_1 = \lambda(T_1 - T_2) \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (6)$$

$$C_2 = T_2 - \frac{(T_1 - T_2) \ln r_2}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (7)$$

模具的温度分布为:

$$T(r) = T_2 + \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \cdot \ln \frac{r}{r_2} \quad (8)$$

根据傅里叶定律得到热流密度 q 为:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (9)$$

则总的导热热量 Q 为:

$$Q = \frac{2\pi r \lambda (T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (10)$$

通过计算得到温度场变化过程中的热流密度和导热量的变化, 实现对拉深凸模温度分布的精确控制, 有利于优化工艺参数和提高零件的成形效率。

2 实验方法

本文设计了一种拉深凸模温度场测试实验装置, 如图 3a 所示。该装置由拉深凸模、自增压液氮罐、热电偶、数据采集系统、电磁阀和连接管道组成, 冷却介质为液氮, 液氮具有制冷效果好、绿色无污染、价格便宜的优点。在凸模厚度方向钻取直径为 $\Phi 4.0$ mm 的深孔, 深孔 1~深孔 5 的模具腔体厚度分别为 $H_1 = 1.0$ mm、 $H_2 = 2.0$ mm、 $H_3 = 4.0$ mm、 $H_4 = 6.0$ mm、 $H_5 = 8.0$ mm。液氮 (LN_2) 由自增压杜瓦瓶通过连接管道输入模具腔中, 电磁阀控制液氮流量, 热电偶插入凸模深孔中, 数据采集系统记录每个热电偶的温度变化和液氮消耗量。实验中温度偏差控制在 ± 5 °C 范围内, 冷却时间以打开液氮控制电磁阀开始计时, 直至深孔内热电偶温度趋于稳定时, 关闭电磁阀。图 3b 为拉深凸模温度场实验过程。

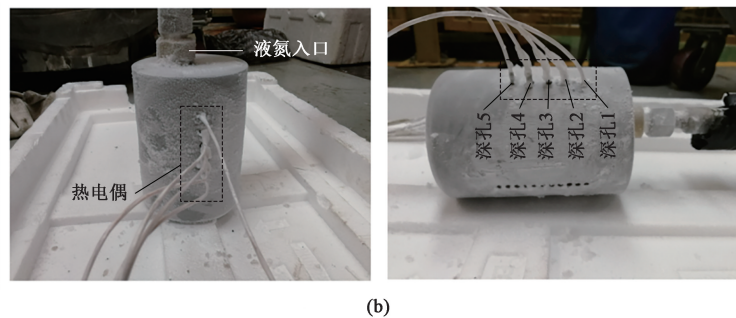
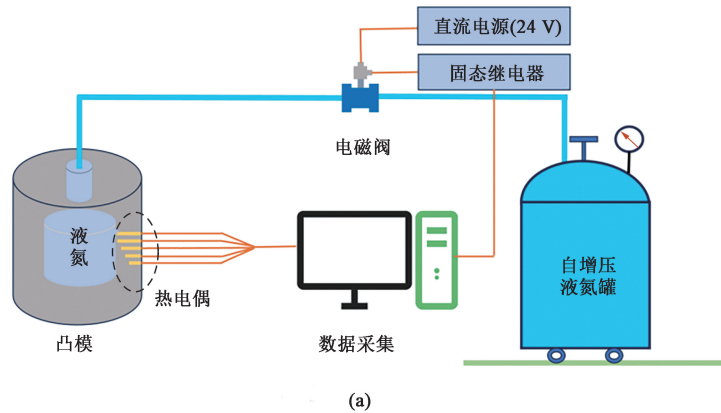


图 3 凸模冷却示意图 (a) 和凸模冷却实验 (b)

Fig. 3 Schematic diagram of punch cooling (a) and punch cooling test (b)

3 圆形凸模温度场数值模拟

3.1 建立几何模型

利用 Abaqus 6.14 对拉深凸模的温度场进行分析。首先，建立拉深凸模的 1 : 1 模型，如图 4a 所示，凸模材料为 42CrMo 模具钢，其主要元素成

分含量如表 1 所示，材料属性如表 2 所示。凸模高度为 135 mm，底面直径为 $\Phi 100$ mm，内拉深腔高度为 75 mm，内拉深腔直径为 $\Phi 40$ mm， $H_1 \sim H_5$ 分别为 1.0、2.0、4.0、6.0 和 8.0 mm。为提高模型的运算速率，在不影响凸模温度场变化的前提下，对模具型腔进行部分简化。

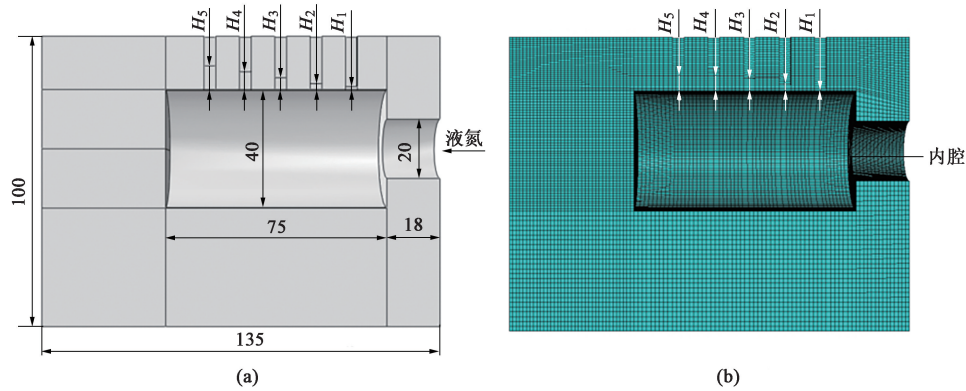


图 4 凸模模型 (a) 和网格划分 (b)
Fig. 4 Punch model (a) and mesh generation (b)

表 1 42CrMo 模具钢的元素成分和含量 (%, 质量分数)

Table 1 Compositions and contents of elements in 42CrMo die steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
0.38~0.45	0.17~0.37	0.5~0.8	0.03	0.03	0.9~1.2	0.3	0.3	0.15~0.25	余量

表 2 42CrMo 模具钢的材料属性

Table 2 Material properties of 42CrMo die steel

材料属性	质量密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ K^{-1}	热传导率/($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	比热容/($\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$)
数值	7.85	209	0.33	2.74×10^{-3}	28.6	0.46

3.2 边界条件

在模拟过程中，采用液氮为冷却介质，外部温度为室温，热传导类型为瞬态热传导，时间步长为 3600 s。边界条件中设置内腔温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，表面温度和环境温度均为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，液氮换热系数为 $1\text{ kW} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。凸模毛坯网格单元尺寸为 $1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ ，网格控制属性为六面体结构网格，网格单元数量为 392616 个，网格单元类型为热传递。拉深凸模热传导模型网格划分如图 4b 所示。

4 结果与讨论

4.1 数值模拟结果

模具温度场模拟结果能够有效反映模具腔体表面温度分布。图 5 为腔体冷却开始阶段到冷却结束阶段的温度分布图。液氮通入内腔时温度逐渐开始

变化，如图 5a 所示。随着冷却时间的增加，腔体温度逐渐降低且温度均匀变化，当时间步长为 10 min 时，热电偶部位的温度开始降低，如图 5b 所示，这是因为低温介质在冷却过程中，环境温度下的模具需冷却至低温环境，凸模腔体的冷却过程可看作一维稳态导热^[12]；当冷却时间步长为 45 min (图 5c) 时，腔体温度逐渐趋于稳定状态，热电偶部位的温度缓慢下降。当腔体与内腔的热交换达到平衡状态 (图 5d) 时，凸模表面温度达到最低的 $-121\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，内腔温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且凸模表面温度分布均匀，这可以实现对凸模表面温度场的精准把控。

模具温度分布的差异会影响拉深件的应力分布，从而影响拉深件的成形质量；温度越低，对模具冷却系统的要求越严格^[13]。图 6 为模具腔体模拟冷却过程中不同模具腔体厚度的温度随时间变化的冷却

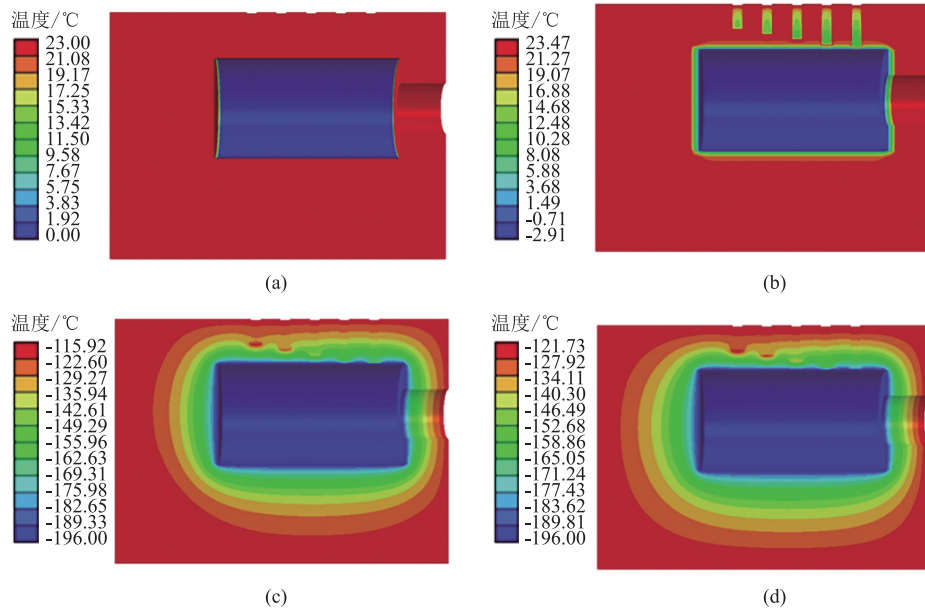


图 5 温度分布云图

(a) 初始阶段 (b) 10 min (c) 45 min (d) 稳定阶段

Fig. 5 Cloud maps of temperature distribution

(a) Initial stage (b) 10 min (c) 45 min (d) Stable stage

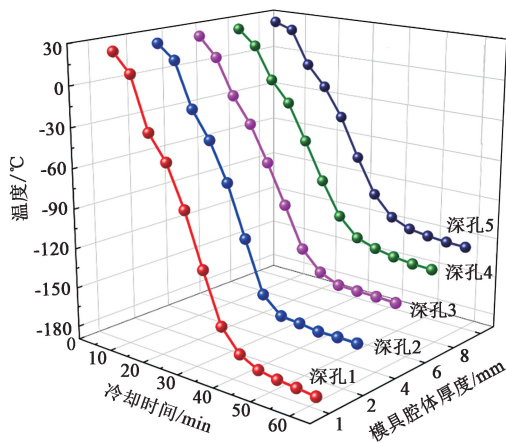


图 6 模拟中凸模冷却温度随时间的变化

Fig. 6 Variation of cooling temperature of punch with time in simulation

曲线。当冷却时间小于 10 min 时, 热电偶深孔 1~深孔 5 处的温度缓慢下降; 随着时间的增加, 腔体的温度快速降低, 深孔 1 处的温度下降速度最快, 深孔 5 处的温度下降较为缓慢。当冷却时间达到 45 min 时, 深孔 5 处的温度逐渐趋于平衡, 平衡温度为 -125°C ; 随着冷却时间的增加, 深孔 1~深孔 4 处的温度也逐渐趋于平衡。当冷却时间为 55 min 时, 深孔 1 处的温度也趋于稳定状态, 达到最低的 -185°C , 深孔 2 处的温度为 -161°C , 而深孔 3~深孔 5 处的最低温度为 -144°C 。

4.2 拉深凸模温度场实验验证

在拉深成形过程中, 为提高成形件的质量, 需保持模具与坯料的温度一致, 因为模具与坯料之间进行接触传热, 若模具温度分布均匀, 则有利于成形出性能好和组织均匀的零件^[14]。凸模模具冷却过程中不同模具腔体厚度的冷却温度随时间的变化过程如图 7 所示。当冷却时间在 10 min 以内时, 模具深孔处的温度变化表现得不显著。随着冷却时间的推移, 深孔的温度降低速度加快, 深孔 1 处热电偶的温度下降最快, 深孔 2 次之。随着孔的深度减小, 冷却速度逐渐降低, 深孔 5 处热电偶的冷却速度最为缓慢。当冷却时间达到 45 min 左右时, 深孔 5 处的热电偶温度逐渐趋于平衡状态, 最低温度达到 -121°C , 而其他 4 个位置的温度继续下降, 与模拟结果 -125°C 相比, 误差仅为 3.3%。当冷却时间达到 55 min 时, 所有深孔位置的热电偶温度均趋于平衡状态, 深孔 1 和深孔 2 处的温度低于超低温 -150°C , 深孔 1 处的温度甚至达到最低的 -176°C , 与模拟的最低温度 -185°C 相比, 误差仅为 5.1%, 误差在可控范围之内。而深孔 3、深孔 4 和深孔 5 处的冷却温度未达到 -150°C , 温度最低为 -138°C , 与模拟结果 -144°C 的误差仅为 4.3%。

实验和数值模拟中模具腔体不同模具腔体厚度处的热流密度与导热量的变化如图 8 所示。随着模具腔

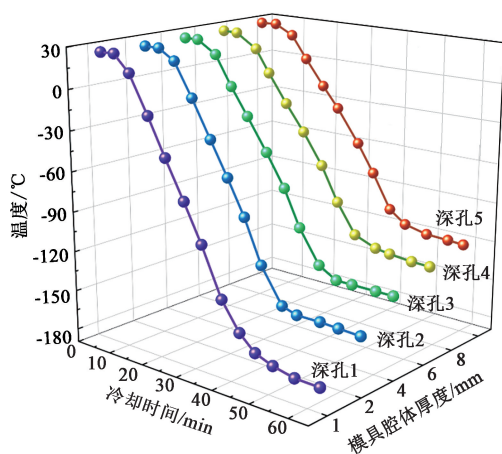


图7 实验中凸模冷却温度随时间的变化

Fig. 7 Variation of cooling temperature of punch with time in experiment

体厚度的增加, 热流密度随之降低, 这是因为模具腔体厚度的增加, 导致热阻增加, 热量通过腔体内部的分子之间的碰撞进行传递, 而模具腔体厚度增大会增加热量传递路径^[15]。导热量与模具腔体厚度呈正比关系, 这是因为模具腔体越厚, 两侧的温度差越大, 导致传递的热量也越大。虽然数值模拟与实验中深孔1处的温度场仅相差 5.1%, 二者在深孔1处热流密度分别为 7.44×10^6 和 $13.52 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者的热流密度相差很大, 这是因为当模具腔体厚度相同时, 腔体两侧温度差越小, 热流密度也相对较小; 随着模具腔体厚度的增加, 腔体两侧温差增大, 深孔5处模拟与实验的热流密度分别为 0.87×10^6 和 $0.92 \times 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。实验与模拟中的导热量分别从深孔1处的 84.95 和 $46.72 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 增长至深孔5处的 369.55 和 $349.84 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 并且从图8可以看出, 随

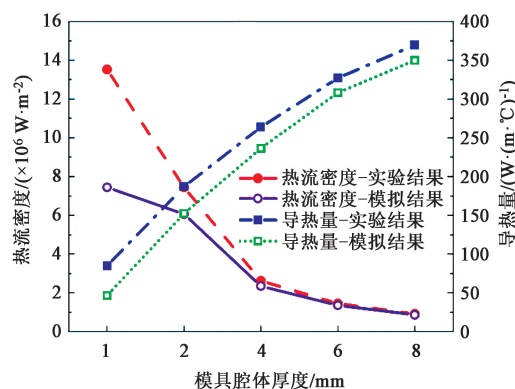
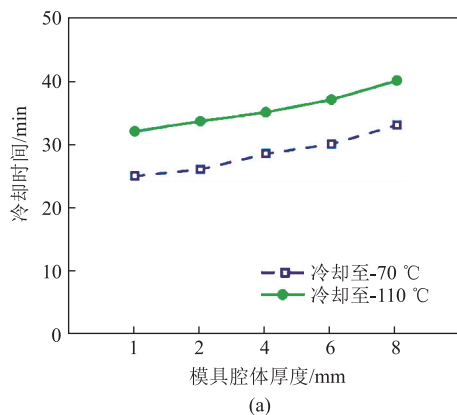


图8 热流密度和导热量随模具腔体厚度的变化

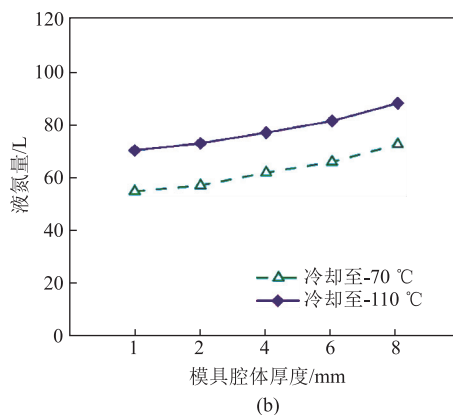
Fig. 8 Variation of heat flux and thermal conductivity with die cavity thickness

着模具腔体厚度的增加其导热量呈线性增加, 这是因为模具腔体厚度增加, 导致腔体两侧的温度差也随之增大, 腔体两侧温差越大, 腔体中的热量迁移也越大, 热量变化也越大。

图9为凸模模具分别冷却至 -70 和 -110 ℃需要的时间(图9a)和消耗液氮(LN_2)量(图9b)。当模具冷却至 -70 ℃时, 深孔1处所需要的冷却时间和液氮消耗量分别为 25 min 和 55.0 L; 随着模具腔体厚度增加, 冷却时间和液氮消耗量逐渐增加, 这是因为低温流体传输中产生气化损失^[16], 深孔5处需要的冷却时间和液氮消耗量增加至 33 min 和 72.6 L。当模具需冷却至 -110 ℃时, 深孔1处冷却至目标温度需要的时间和液氮消耗量分别增加至 32 min 和 70.4 L, 深孔5处需要的冷却时间和液氮消耗量分别为 40.5 min 和 88.0 L, 分别提高了 23.4% 和 25%。



(a)



(b)

图9 不同模具腔体厚度下的冷却时间(a)和消耗液氮量(b)

Fig. 9 Cooling time (a) and consumed amount of liquid nitrogen (b) with different die cavity thicknesses

上述结果表明, 模具冷却时间和液氮消耗量随着模具腔体厚度的增加呈指数型增加, 使得模具冷

却的成本大大提高; 模具越厚, 冷却效率越低, 冷却时间越长, 且冷却温度很难达到 -150 ℃以下。这

使得成形过程中模具与坯料的温度波动增大,产生热应力,不仅会影响模具寿命,还使零件在成形过程中因温度分布不均出现开裂、起皱、局部橘皮等问题。因此,需要的冷却方式应使模具整体温度冷却至 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,保证模具与坯料之间的应力场和温度场波动降低,成形出性能更好的零件^[17]。

5 板材超低温成形质量与应用

5.1 成形质量分析

基于铝合金在低温下表现出延伸率和加工硬化

率同时提高的双增效应^[18],在室温和超低温 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行 2219-O 铝合金薄板的拉深实验,结果如图 10 所示。常温下成形的零件圆角区出现明显的开裂,且构件表面出现明显划痕,这是板材与模具接触时的严重摩擦引起的。而在超低温条件下,铝合金板材成形相同高度时,构件未出现开裂现象,表面无明显划痕,说明在构件一次成形的条件下,超低温环境中铝合金板材的成形性显著提高。

5.2 应用分析

高性能铝合金构件的制造离不开优质的模具,尤其在航空航天、汽车制造、建筑建造、船舶制造



图 10 室温和超低温下 2219-O 铝合金薄板成形实验

(a) 室温 (b) 超低温 ($-160\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 10 Forming experiments of 2219-O aluminum alloy sheets at room and cryogenic temperatures

(a) Room temperature (b) Cryogenic temperature ($-160\text{ }^{\circ}\text{C}$)

等领域^[19]。高强度、高韧性、轻质构件能够大幅提升装备的承载能力、安全性能和使用寿命,这得益于优质模具的开发与应用。在超低温成形中模具作为板材成形的载体,其温度场分布对板材成形性能至关重要。通过对 42CrMo 模具钢拉深凸模在超低温下的温度场模拟与实验发现,超低温下不仅提高模具的承载能力,还能提高板材的成形质量。通过对模具温度场传热分析,超低温下板材的成形质量远高于室温,为超低温成形模具冷却系统的设计与制造提供理论支撑。

6 结论

(1) 模具冷却至超低温 ($-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下) 需要一定冷却时间的累积,所需温度越低,累积冷却时间越长。冷却时间为 40~45 min 时,深孔 3~深孔 5 处的温度率先趋于稳定,但稳定温度未达到 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;当冷却时间为 50~55 min 时,深孔 1 和深孔 2 处的温度逐渐趋于稳定,最低温度分别为 -176 和 $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 模具厚度是影响热流密度和导热量的重要因素。低温成形实验中,随着模具厚度增加,热流密度从深孔 1 处的 $13.52 \times 10^6\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 降至深孔 5 处的 $0.92 \times 10^6\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,变化呈反比关系;导热量从深孔 1 处的 $84.95\text{ W}(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 增加至深孔 5 处的 $369.55\text{ W}(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

(3) 随着模具厚度增加,冷却时间和液氮消耗量呈指数型增加。当需冷却至 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,模具厚度从深孔 1 增加至深孔 5 时,冷却时间和液氮消耗量分别从 25 min 和 55.0 L 增加至 33 min 和 72.6 L;当需冷却至 $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,深孔 5 比深孔 1 处的冷却时间和液氮消耗量分别提高了 23.4% 和 25%,这很大程度增加了模具的冷却成本,降低了冷却效率。

参考文献:

- [1] 夏海元. 模具制造技术的发展与创新 [J]. 模具制造, 2024, 24 (1): 67-70.
Xia H Y. Development and innovation of die & mould manufacturing technology [J]. Die & Mould Manufacture, 2024, 24 (1):

- 67-70.
- [2] 花蕾蕾, 安鲁陵, 匡海华, 等. 复合材料构件热压罐成型模具温度均匀性分析 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (3): 357-365.
- Hua L L, An L L, Kuang H H, et al. Analysis of temperature field uniformity of composite mold in autoclave [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51 (3): 357-365.
- [3] 杨钦文, 仪传明, 肖罡, 等. 18Ni300 模具钢 SLM 成形质量评价及工艺优化 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (12): 90-97.
- Yang Q W, Yi C M, Xiao G, et al. Quality evaluation and process optimization of selected laser melting for 18Ni300 die steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (12): 90-97.
- [4] 王永贵, 梁宪珠, 曹正华, 等. 热压罐工艺成型先进复合材料构件的温度场研究综述 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2009 (3): 81-85.
- Wang Y G, Liang X Z, Cao Z H, et al. Review of the temperature field research of autoclave molding for advanced composite components [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009 (3): 81-85.
- [5] 李永哲, 李晨鹏, 周怡君, 等. 大型金属构件多机协同增材制造前沿进展 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (5): 664-678.
- Li Y Z, Li C P, Zhou Y J, et al. Progresses in multi-robot cooperative additive manufacturing of large-scale metal parts [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (5): 664-678.
- [6] 陈国恩, 汪学阳, 黄志垣, 等. 压铸模具温度场的 CAE 模拟分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (3): 271-273.
- Chen G E, Wang X Y, Huang Z Y, et al. CAE simulation analysis of temperature field of die-casting die [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38 (3): 271-273.
- [7] 庞立娟, 张雪峰, 黄治勇. 热冲压成型模具冷却系统的设计研究 [J]. 粉末冶金工业, 2018, 28 (4): 71-76.
- Pang L J, Zhang X F, Huang Z Y. Research and design on cooling system of hot stamping die [J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28 (4): 71-76.
- [8] 赵一鸣, 安鲁陵, 匡海华, 等. 复合材料构件成型模具温度场均匀性改善研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61 (5): 84-88, 94.
- Zhao Y M, An L L, Kuang H H, et al. Study on improvement of temperature field uniformity of composite mold [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61 (5): 84-88, 94.
- [9] 胡云, 林彬. 钛合金曲面类零件的热冲压工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 95-98.
- Hu Y, Lin B. Hot stamping process of titanium alloy curved surface parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (3): 95-98.
- [10] Agazzi A, Sobotka V, Legoff R, et al. Optimal cooling design in injection dieing process-A new approach based on morphological surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52 (1): 170-178.
- [11] Gniatezyk, Jeffrey L A, George R D, et al. Composite molding tools and parts and processes of forming molding tools [P]. US: US 6, 309, 587 B1, 2001-10-30.
- [12] 袁凯, 丛茜, 王永青, 等. 基于 AMESim 的液氮可控传输性能分析 [J]. 低温工程, 2017, (3): 49-54.
- Yuan K, Cong Q, Wang Y Q, et al. Analysis on controllable transmission performance of liquid nitrogen based on AMESim [J]. Cryogenics, 2017, (3): 49-54.
- [13] 岑升波. 基于 ABAQUS 双 U 型前防撞梁热冲压成型过程的温度场数值模拟 [J]. 内燃机与配件, 2020 (9): 34-36.
- Cen S B. Numerical simulation of temperature field in hot stamping and forming process of double U-shaped front bumper beam based on ABAQUS [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020 (9): 34-36.
- [14] 崔小龙, 王敏杰, 魏兆成, 等. 3D 打印随形冷却模具零件的温度场和应力场数值模拟 [J]. 模具制造, 2022, 22 (7): 58-65.
- Cui X L, Wang M J, Wei Z C, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of 3D printed conformal cooling mold parts [J]. Die & Mould Manufacture, 2022, 22 (7): 58-65.
- [15] 刘智强. 低温相变条件下多孔介质传热研究 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2023.
- Liu Z Q. Investigation on Heat Transfer with Phase Transition in Porous Media at Low Temperature [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [16] 吕维敏, 黄钢妹, 章忠敏, 等. 低温微创手术液氮传输过程的压力和传热分析 [J]. 低温工程, 2008 (3): 55-60.
- Lyu W M, Huang G M, Zhang Z M, et al. Analysis of pressure change and heat transfer of liquid nitrogen transmissive process in cryosurgical minimal invasive surgery [J]. Cryogenics, 2008 (3): 55-60.
- [17] 吕佳镁, 马贵春, 郭靖宇, 等. 基于 COMSOL 的热压罐成型模具温度场分析 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (5): 412-418.
- Lyu J M, Ma G C, Guo J Y, et al. Analysis of temperature field of autoclave molding mold based on COMSOL [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42 (5): 412-418.
- [18] 刘伟, 程旺军, 郝永刚, 等. 铝合金超低温双增效应与成形性能 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32 (7): 1845-1854.
- Liu W, Cheng W J, Hao Y G, et al. Dual enhancement effect and formability of aluminum alloys at cryogenic temperatures [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32 (7): 1845-1854.
- [19] 陈广. 低温液体氧化氮改善 H13 型模具钢耐铝液腐蚀和磨损性能的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2022.
- Chen G. Studies on the Improvement of Molten Aluminum Corrosion and Wear Resistance of H13 Die Steel by Low-temperature Liquid Oxy-nitriding [D]. Sichuan: Sichuan University, 2022.