

管材成形

5A02 铝合金变径管电磁成形工艺及材料性能

门向南¹, 刘昊², 邓涛¹, 张晓林³, 苏红亮¹, 张虹桃¹, 张松¹,
唐天宇², 黄亮²

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 中航成飞民用飞机有限责任公司, 四川 成都 610073)

摘要: 基于5A02铝合金变径管电磁成形工艺, 采用数值模拟和成形实验, 并结合断口形貌分析, 研究了线圈匝数和放电电压对变径管成形精度的影响规律, 探明了电磁成形后5A02铝合金性能变化的原因。结果表明: 随着放电线圈匝数的增加, 磁场作用范围增大, 当线圈匝数 n 为20时, 管件能够实现良好的贴模; 随着放电电压的逐渐增大, 加工硬化和脉冲电磁场效应的共同影响导致材料的伸长率先增大后减小, 抗拉强度和硬度增大后几乎不变, 当放电电压为8 kV时, 管件最大贴模间隙为0.12 mm, 小于0.20 mm, 满足成形要求; 同时, 随着放电电压的增大, 管件拉伸断口的韧窝数量逐渐减少, 但当放电电压升高至8 kV时, 韧窝数量有所增加。

关键词: 5A02 铝合金; 电磁成形; 变径管; 线圈匝数; 放电电压; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.015

中图分类号: TG391

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 05-0115-10

Electromagnetic forming process and material properties of 5A02 aluminium alloy reducer pipe

Men Xiangnan¹, Liu Hao², Deng Tao¹, Zhang Xiaolin³, Su Hongliang¹, Zhang Hongtao¹, Zhang Song¹,
Tang Tianyu², Huang Liang²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. AVIC Chengfei Commercial Aircraft Co., Ltd., Chengdu 610073, China)

Abstract: Based on the electromagnetic forming process of 5A02 aluminum alloy reducer pipe, the influences of coil turns and discharge voltage on the forming accuracy of reducer pipe were studied by numerical simulation and forming experiments combined with fracture morphology analysis, and the reasons for the performance changes of 5A02 aluminum alloy after electromagnetic forming were explored. The results show that with the increasing of coil turns, the range of magnetic field action increases. When the number of coil turns n is 20, the pipe fittings could achieve good mold adhesion. As the voltage gradually increases, the combined effect of work hardening and pulse electromagnetic field leads to increase first and then decrease in the elongation of material. The tensile strength and hardness almost unchange after increasing. When the discharge voltage is 8 kV, the maximum die gap of pipe fittings is 0.12 mm, which is less than 0.2 mm meeting the forming requirements. Simultaneously, with the increasing of voltage, the number of ductile dimples on the tensile fracture surface of pipe fittings gradually decreases. However, when the voltage reaches 8 kV, the number of ductile dimples increases to some extent.

Key words: 5A02 aluminum alloy; electromagnetic forming; reducer pipe; coil turns; discharge voltage; mechanical properties

5A02 铝合金是一种 Al-Mg 合金, 具有伸长率好、

抗拉强度高、耐腐蚀性和疲劳性能好的优点, 被广泛应用于航空管路等航空关键零件的制造^[1]。变径管广泛用于航空管路中不同直径管的过渡连接。目前, 常见的变径管成形工艺主要包括: 挤压成形、内高压成形、旋压、冲压焊接和铸造等^[2-4]。但是, 传统成形方法需要复杂的工装模具, 设备成本高, 生产周期长, 并且容易产生起皱、表面粗糙、拉裂及壁厚不均等缺陷, 导致废品率增加。

收稿日期: 2024-01-21; 修订日期: 2024-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB3407000); 国家自然科学基金资助项目 (52274382)

作者简介: 门向南 (1983-), 男, 博士研究生, 高级工程师

E-mail: mxn19830726@163.com

通信作者: 黄亮 (1981-), 男, 博士, 教授

E-mail: huangliang@hust.edu.cn

电磁成形是一种高能率成形技术,其基本原理为线圈进行脉冲放电产生变化的磁场并在工件上产生感应电流,工件受到洛伦兹力的作用发生高速塑性变形,进而使工件得以成形^[5-6]。电磁成形技术可以应用于板件、管件加工,具有设备简单、回弹小、可提高材料成形性、非接触成形表面质量优等优势,在航空航天、汽车轻量化等领域具有广阔的应用前景,其为变径管成形提供了一种新的途径^[7-8]。电磁成形工艺在管件成形领域的研究较为广泛。Li J J 等^[9]研究了一种用于成形变径管的梯度电磁成形法,通过分段线圈产生梯度电磁力场,提高了变径管件的成形精度。Xiong Q 等^[10]提出了一种在电磁管件吸引成形中应用集磁器改善磁场分布的方法,并利用有限元仿真的方式验证了集磁器可以提高变形均匀性的结论。Zhang W 等^[11]提出了一种借助洛伦兹力分布的自动反馈控制来实现管的均匀变形的的方法,管材的变形均匀性可以提高约 2.7 倍。Li Z 等^[12]提出了一种同时进行胀形和缩径的双管电磁成形技术,所提出的双管模型成形效率提高了 34.3%。

电磁成形由于成形过程中存在电效应、磁效应、热效应和应变率效应,因而对材料性能具有明显的影响^[13]。航空管路需要承受管内液体或气体的压强以及飞行过程中的过载和振动,这对于电磁成形后管件性能提出了较高要求^[14]。学者们针对电磁成形对材料力学性能的影响进行了研究。Li G Y 等^[15]研究了 AA5182 铝合金在准静态-动态复合拉伸过程中的拉伸性能,表明 AA5182 铝合金板材对准静态预变形不会影响动态拉伸性能。Li F Q 等^[16]通过不同应变状态下的电磁成形实验,证明在电磁成形过程中, Ti-6Al-4V 钛合金板料的成形极限得到了明显提升。Xie B X 等^[17]研究了固溶态 2195 铝锂合金在不同成形电压和应变的电磁成形过程中的变形行为,发现电磁成形有效提高了固溶态 2195 铝锂合金的成形性能。Dong P X 等^[18]基于电磁胀环实验研究了涡流热效应和变形温度对成形性的影响,发现在 AA5083 铝合金电磁胀环过程中材料的塑性先升高后降低。Ma H J 等^[19]基于电磁胀环实验研究了 AA5052-O 铝合金的动态力学性能,应变速率达到 3300 s^{-1} 时,材料的显微硬度相比准静态增加了 21.21%。然而,上述文献只是研究了电磁成形过程中材料动态力学性能和成形性能的变化,很少有学者对电磁成形后成品零件力学性能的变化进行研究。

本文针对 5A02 铝合金变径管的电磁成形工艺,

建立有限元模型,通过数值模拟和实验验证研究了线圈匝数和放电电压对变径管成形精度的影响,随后通过准静态单轴拉伸实验并结合微观表征的方法,研究了不同放电电压下电磁成形后 5A02 铝合金的性能变化,揭示了放电电压对 5A02 铝合金变径管性能的影响规律。

1 材料及方法

1.1 实验材料

电磁成形用材料为退火态 5A02 铝合金,其化学成分如表 1 所示,管坯外径为 $\Phi 70\text{ mm}$,管厚为 1 mm。

表 1 5A02 铝合金的元素含量(%,质量分数)
Table 1 Element contents of 5A02 aluminum alloy
(%, mass fraction)

Mg	Cr	Fe	Si	Cu	Ti	Al
2.60	0.25	0.20	0.10	0.05	0.05	余量

采用 AG-IC 100 kN 材料高温持久性能实验机,在 $1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的拉伸速率下进行准静态拉伸实验。采用的试样尺寸和实物图如图 1 所示,取得工程应力-工程应变曲线后经过计算得到如图 1 所示的真实应力-真实应变曲线。5A02 铝合金的主要材料参数如表 2 所示。

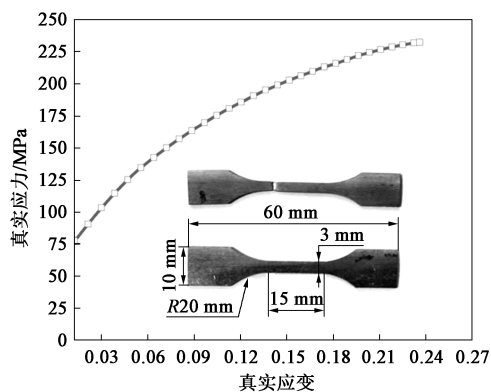


图 1 5A02 铝合金的真实应力-真实应变曲线

Fig. 1 True stress-ture strain curve of 5A02 aluminum alloy

表 2 5A02 铝合金的主要材料参数

Table 2 Main material parameters of 5A02 aluminum alloy

参数	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
数值	77.72	183.96	28.20

1.2 有限元仿真模型

本文基于有限元分析软件 LS-DYNA R8.0 进行

有限元分析建模。由于工作部件主要为线圈、凹模和管件, 因此, 建立如图 2 所示的电磁胀形有限元模型, 其中 n 为线圈匝数。在确保模拟精度的前提下, 为提升数值计算效率并减少内存空间的占用, 将有限元模型进行一定的简化。考虑到管件变形过程中材料

的主要变形区域为凹模过渡区及扩径区 A 以及直径不变的区域 B, 因此, 将管件分成两个部分, 对区域 A 部分的网格进行局部细化, 并对区域 B 材料施加周向位移约束以优化模具结构, 管件和模具之间的摩擦因数设置为 0.15, 采用罚函数方法计算接触应力。

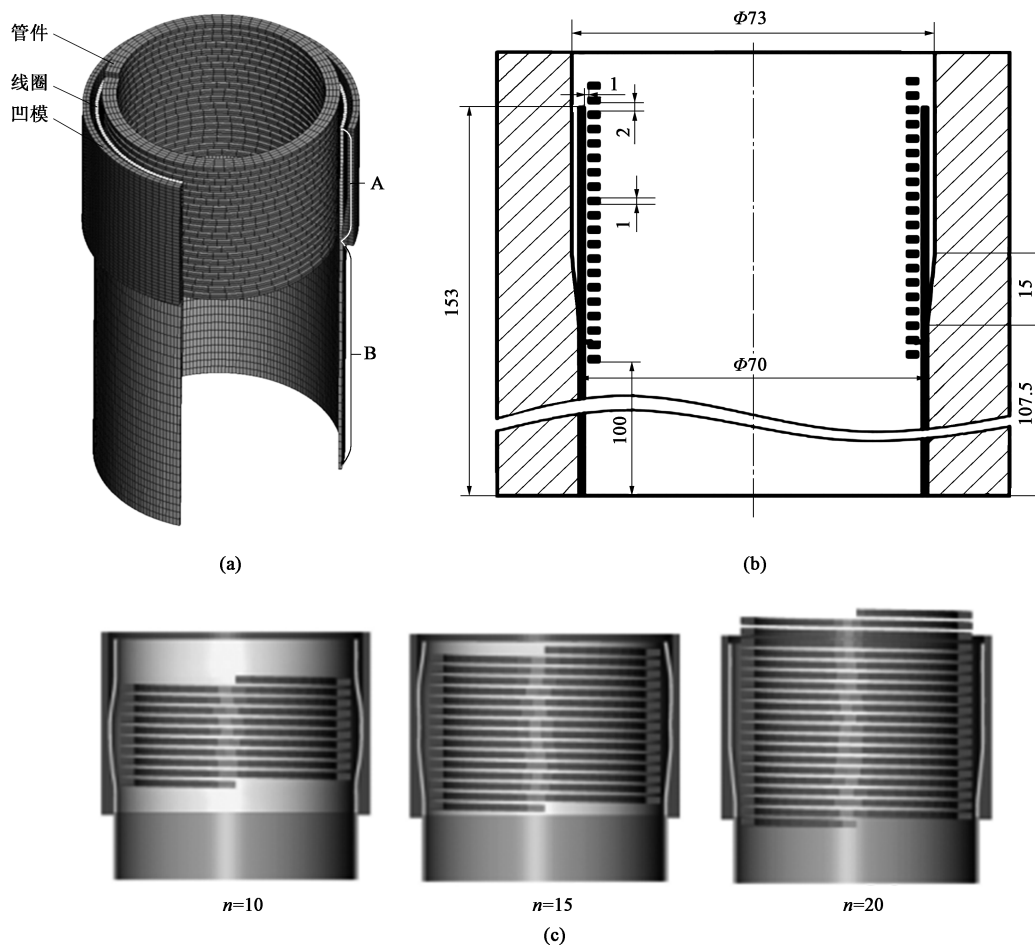


图 2 仿真所用的有限元模型

(a) 有限元模型 (b) 几何尺寸 (c) 不同匝数的线圈对比

Fig. 2 Finite element model used for simulation

(a) Finite element model (b) Geometric dimensions (c) Comparison of coils with different turns

管件的材料参数选择 LS-DYNA 中的 24 号材料模型。24 号材料模型为分段线性材料模型, 基于分段函数逼近单向拉伸的实验结果, 通过导入 1.1 节中的真实应力-真实应变曲线以描述准静态条件下材料的本构行为。该材料模型采用基于各向同性强化假设的 Mises 屈服准则作为材料的屈服准则, 并采用 Cowper-Symonds^[20-21]模型作为计算材料的应变率效应的乘子。电磁成形属于高速率成形, 一般准静态的材料本构模型难以描述在高速率条件下材料的本构行为, 因此, 采用 Cowper-Symonds 模型描述高应变率条件下 5A02 铝合金的本构行为。

$$\sigma = R_{eL} \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{B} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (1)$$

式中: σ 为流动应力; R_{eL} 为材料准静态条件下的屈服强度; $\dot{\epsilon}$ 为材料的应变速率; B 和 P 为材料常数, 对于铝合金材料, 一般取 $B = 6500 \text{ s}^{-1}$, $P = 4$ 。

基于 LS-DYNA 的 EM 模块建立结构场和电磁场-温度场的耦合。在 6 kV 的放电电压下, 通过罗氏线圈测量放电电流, 获得电磁场仿真所采用的基准电流曲线, 如图 3 所示。电磁成形通常在第 1 个半波时已经成形完毕, 但为了考虑后续放电电流对成形的影响, 并减少仿真时间, 选择图 3 中虚线框

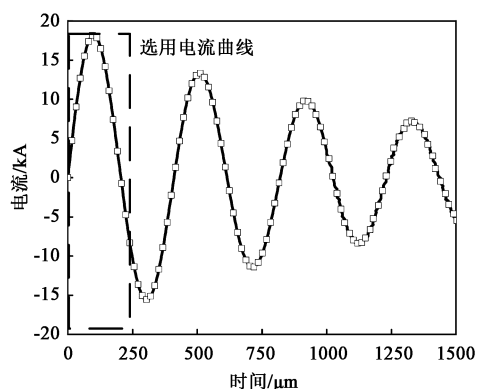


图 3 数值模拟所采用的电流曲线

Fig. 3 Current curve used in numerical simulation

选的 0~250 μs 的电流波形输入仿真软件。根据输入模型的电流计算公式即式 (2)~式 (4), 在基准电流曲线的基础上进行纵坐标缩放, 可获得不同电压下通过放电线圈的电流曲线^[9]。

$$i = U \sqrt{\frac{C}{L}} \exp(-\alpha t) \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$\alpha = R/2L \quad (3)$$

$$\omega = 1/\sqrt{LC} \quad (4)$$

式中: i 为流过放电线圈的电流; U 为放电电压; C 为成形系统充电选择的电容值; L 为整个电磁成形系统的等效电感值; α 为衰减系数; ω 为振荡频率; t 为

放电时间; R 为整个电磁成形系统的等效电阻值。

由于电磁成形过程中温度变化速度快, 存在模具遮挡等问题, 而且温度的变化难以原位测量, 因此, 采用电磁场-结构场-温度场多场耦合数值模拟的方法解析管件温度场。模型的温度上升, 主要是螺线管线圈对管件进行感应加热造成的, 因此, 需要在模型中输入 5A02 铝合金和紫铜材料的相关热参数, 如表 3 所示^[22-23]。

表 3 仿真中的主要热参数

Table 3 Main thermal parameters in simulation

参数	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	比热容/ ($\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
5A02 铝合金	150.7	0.879	2.67
紫铜	401.0	0.385	8.90

1.3 实验设备与工装

实验用电磁成形机型号为 HMF-30/213-150, 最大放电能量为 192 kJ, 放电电压为 0~30 kV, 总电容为 426 μF , 可按实际需求选择模块设置 106.5、213 和 426 μF 共 3 个档位。

工装的基本结构如图 4 所示, 主要包括成形线圈、凹模、线圈压板、下模板、支撑柱和紧固螺栓等。通过线圈顶部伸出的两个接线柱与电磁成形机相连接。

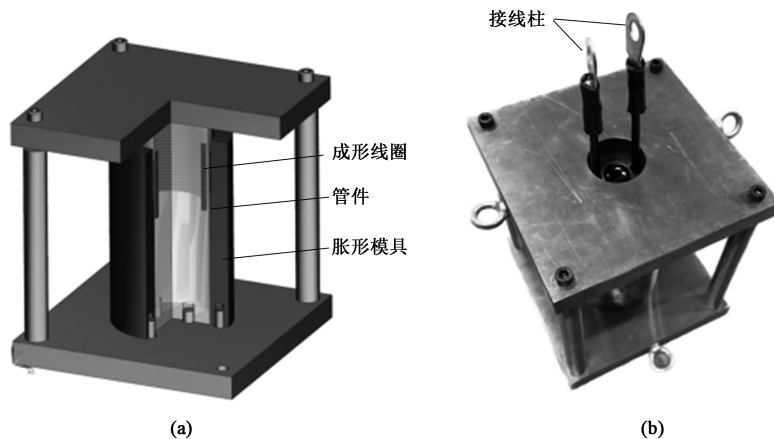


图 4 电磁成形的模具工装

(a) 三维模型 (b) 实物图

Fig. 4 Die tooling used in electromagnetic forming

(a) Three-dimensional model (b) Physical picture

2 管件变形分析

2.1 线圈匝数对成形精度的影响

放电线圈作为电磁成形中最关键的部件之一, 其结构尺寸将直接影响电磁力的分布, 进而决定了

工件的成形质量。考虑到线圈的加工周期长、成本高, 所以, 适合采用数值模拟的方法进行线圈参数研究。为方便线圈绕制加工, 通常选择 2 mm×4 mm 的矩形截面导线制作线圈。式 (5)~式 (7) 为线圈电感和电阻的公式^[24], 结合式 (1)~式 (4) 可

知, 线圈匝数影响放电电流波形和线圈轴向长度, 是线圈设计的重要参数。

$$L_{\text{coil}} = 2\lambda\mu_0\pi n^2 a^2 b^2 \quad (5)$$

$$l \approx \pi \times n \times \frac{D_1 + D_2}{2} + K \quad (6)$$

$$R_{\text{coil}} = \rho \times \frac{l}{S} \quad (7)$$

式中: L_{coil} 为线圈电感; λ 为长冈系数; μ_0 为真空磁导率; n 为线圈匝数; a 和 b 分别为线圈的外半径和长度; l 为线圈的总长度; D_1 和 D_2 分别为线圈的内径和外径; K 为线圈不足一圈的长度; R_{coil} 为线圈电阻; ρ 为线圈材料电阻率; S 为线圈截面积。

图 5 为在不同放电电压下管件磁场的分布云图, 式 (8)~式 (10) 是螺线管线圈轴向磁场分布与径

向电磁力大小的计算公式^[25]。由图 5 可知, 在线圈的截面形状、匝间距和直径相同的情况下, 线圈匝数越多, 线圈磁场的作用范围越大, 管件相同位置的磁场强度也越大, 该处电磁力也越大。

$$B_z = \frac{\mu_0 a n i}{4\pi} \Pi(l, z) \quad (8)$$

$$B'_z = \frac{(\mu_0 a + \Delta)}{4\pi} \Pi(l', z)' \quad (9)$$

$$p_r = (B_z + B'_z) J \delta \quad (10)$$

式中: B_z 和 B'_z 分别为线圈和管件上产生的磁感应强度; Δ 为线圈和管件之间的间隙; z 为轴向高度; $\Pi(l, z)$ 和 $\Pi(l', z)'$ 分别为与线圈总长度 l 和管件总长度 l' 正相关的变限积分函数; p_r 为径向磁压力; J 为工件上的感应电流值, 其与线圈匝数成正比; δ 为集肤深度。

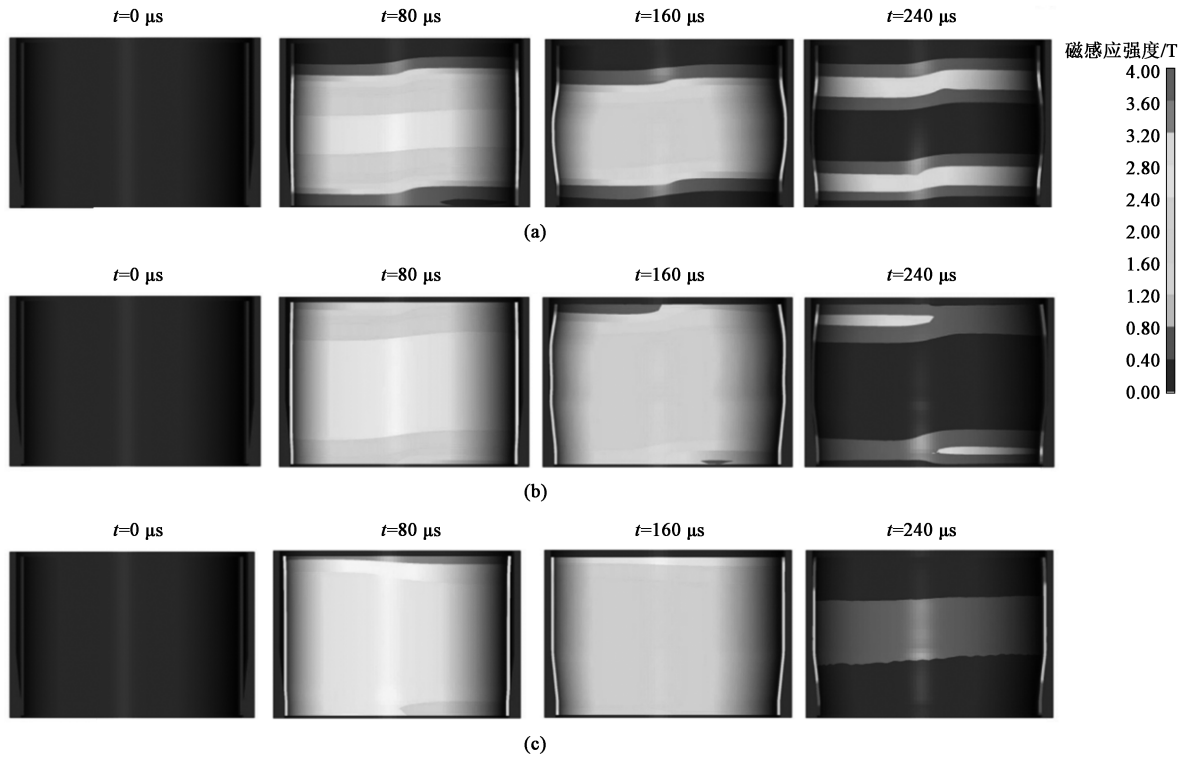


图 5 不同放电时刻下不同线圈匝数时管件的磁感应强度云图

(a) $n=10$ (b) $n=15$ (c) $n=20$

Fig. 5 Nephograms of magnetic induction intensity of pipe fittings with different coil turns at different discharge moments

当线圈匝数为 20 时, 由于线圈的轴向长度超出管件边缘, 感应电流因边缘效应在管端产生聚集, 使得磁感应强度峰值分布于管件边缘附近。图 6 显示了线圈匝数对成形结束后等效塑性应变分布的影响。随着线圈匝数的增加, 相同位置处等效塑性应变越大。当线圈匝数为 20 时, 管件顶端的等效塑性应变最大, 这是由于此处发生边缘效应导致洛伦兹力偏大造成的。图 6 也显示了线圈匝数对成形效果

的影响, 线圈匝数越多, 管件成形效果越好、成形精度越高。造成这种现象的原因为: 线圈匝数较少时, 磁场作用范围小, 造成管件边缘未能贴模; 线圈匝数较大时, 造成管件边缘产生边缘效应, 此处受到的洛伦兹力较大, 造成边缘反弹, 但是第 2 个电流波形起到校形作用使得管件最终贴模。

2.2 放电电压对成形精度的影响

基于 2.1 节研究, 采用线圈匝数 n 为 20 进行不

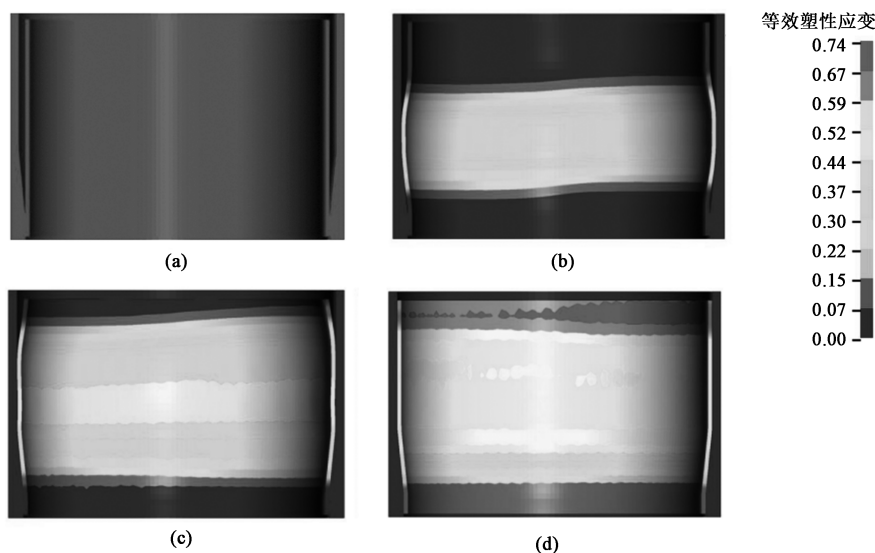


图 6 相同时刻下不同线圈匝数时管件的等效塑性应变云图

(a) $n=0$, $t=250 \mu\text{s}$ (b) $n=10$, $t=250 \mu\text{s}$ (c) $n=15$, $t=250 \mu\text{s}$ (d) $n=20$, $t=250 \mu\text{s}$

Fig. 6 Equivalent plastic strain nephograms of pipe fittings with different coil turns at the same time

同放电电压下的管件胀形研究。图 7 为不同放电电压下管件的贴模质量，当放电电压为 4 kV 时，管件几乎不贴模；当放电电压为 6 kV 时，除管件扩径区未贴模完全外，其余部位均贴模；当放电电压为 8 kV 时，完全贴模。因此，在一定范围内，随着放电电压的增大，贴模性越好，成形精度越高。这主要是由于放电电压越大，管件表面的磁场强度越大，导致管件受到的洛伦兹力越大，管件变形更加充分，因此贴模效果更好。图 8a 为不同放电电压下的成形实验结果，图 8b 为不同放电电压下管件成形直径，可见随着电压逐渐增大，管件贴模性变好，成形精度增加，其中成形电压为 8 kV 时的成形精度最高。图 8c 进一步就 8 kV 放电电压下的贴模精度进行分析，模拟预测结果与实验测量结果基本一致，实验

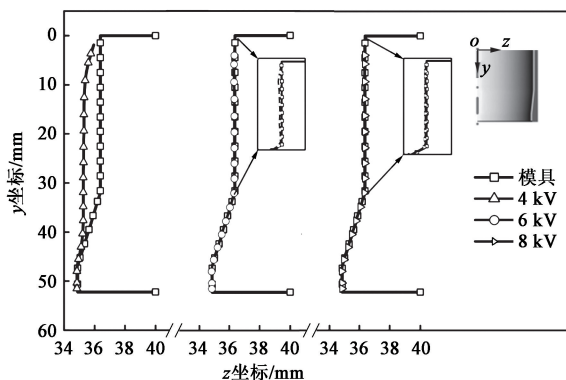


图 7 不同放电电压下的管件成形仿真结果

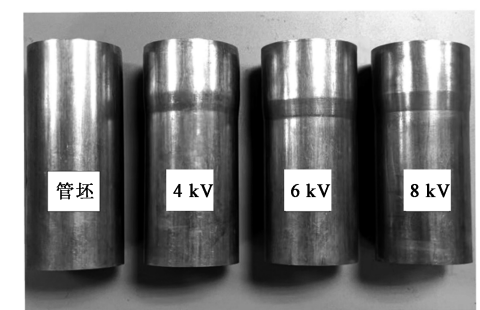
Fig. 7 Simulation results of pipe fittings forming under different discharge voltages

测得最大贴模间隙为 0.12 mm，低于要求的贴模间隙 0.20 mm，因此，该工艺条件下电磁成形能得到符合尺寸要求的变径管。其中，贴模间隙为负值的原因可能为管件脱模后已变形区域对未变形区域的牵拉作用。

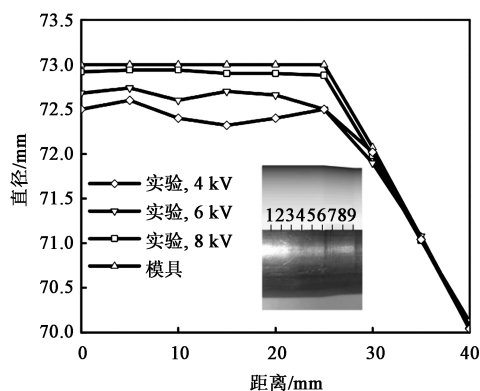
3 管件性能变化分析

3.1 力学性能变化

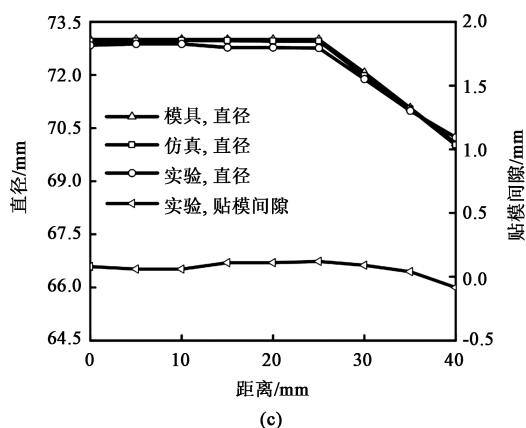
为研究经过电磁成形后的 5A02 铝合金变径管力学性能的变化，分别选取在 4、6 和 8 kV 放电电压下成形后的管件，在图 9b 所示的区域取试样，采用材料高温持久性能实验机，在 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的应变速率下进行准静态拉伸实验，经过处理得到材料抗拉强度和断后伸长率随放电电压的变化规律，并在如图 9b 所示位置切取尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的试样并测量此试样硬度。材料抗拉强度、断后伸长率和硬度随放电电压的变化如图 10 所示。随着放电电压的不断增大，材料的抗拉强度逐渐增大，断后伸长长的先减小后增大，硬度先增大后减小。其中，6 kV 放电电压下的抗拉强度相比管坯的抗拉强度增大 6.85%，硬度增加了 15.26%，伸长率减小了 37.92%；8 kV 放电电压下的抗拉强度和硬度相比 6 kV 的几乎不变，但伸长率增大了 10.29%。这说明材料的塑性先减小后增大，材料的强度先增大后几乎不变，材料的加工硬化程度逐渐增大。



(a)



(b)



(c)

图8 不同放电电压下管件成形实验结果

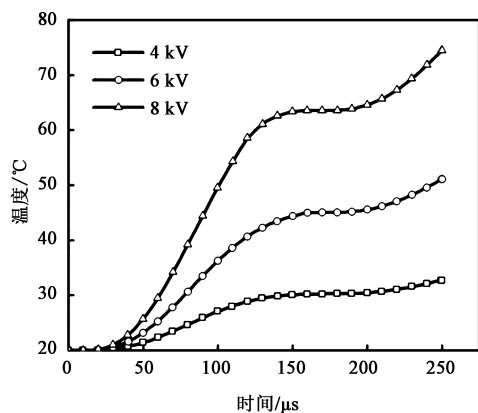
(a) 实物图 (b) 直径-距离曲线 (c) 8 kV 放电电压下的成形精度

Fig. 8 Experimental results of pipe fittings forming under different discharge voltages

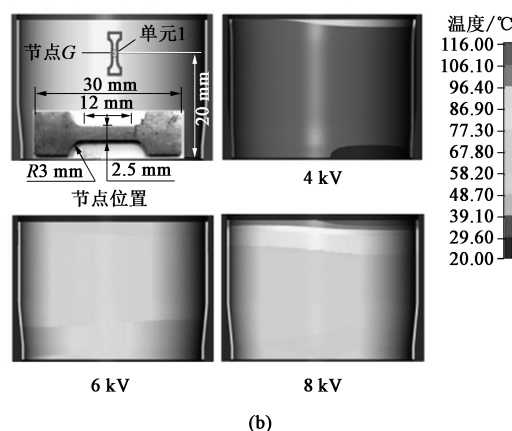
(a) Concrete figure (b) Diameter-distance curve

(c) Forming accuracy at discharge voltage of 8 kV

电磁成形后塑性提升的原因主要为在电磁成形过程中产生的加工硬化效应和脉冲电磁场效应的动态平衡^[26]。由于电磁感应效应的存在, 管件产生表面感应电流, 电流做功产生焦耳热, 造成管件温升^[27]。通过建立的多场耦合仿真模型对温度场进行分析, 提取切取试样处的中心位置节点 G 处的温度数据, 绘制不同放电电压下的温度随时间的变化曲



(a)



(b)

图9 不同放电电压下的管件温度

(a) 节点 G 处温度随时间的变化曲线 (b) $t = 250 \mu s$ 时管件的温度分布云图

Fig. 9 Temperatures of pipe fittings under different discharge voltages

(a) Change curve of temperature with time at node G

(b) Temperature distribution nephograms of pipe fittings at $t = 250 \mu s$

线, 如图 9a 所示, 发现温度随时间的增加逐渐上升, 放电电压越高温度越高, 放电电压为 8 kV 时达到最高温度 74.50 °C。图 9b 为不同放电电压下 t 为 250 μs 时的温度场分布云图, 可见磁感应强度较大的区域温度较高。

在管件扩径过程中, 远离管件边缘的直壁区处于双向拉应力状态, 受到周向和轴向的拉应力影响, 因而管件发生了塑性变形, 产生加工硬化。图 11a 为不同放电电压下单元 1 处等效塑性应变随时间的变化规律。相同放电电压下, 等效塑性应变随着板料的成形逐渐增大, 而放电电压越大等效塑性应变越大, 这导致管件加工硬化程度逐渐增加。分别取 4、6 和 8 kV 放电电压下试样的中心位置处, 有限元模型上对应单元 1 的轴向应力 σ_l 、周向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r , 绘制三向主应力随时间的变化曲线, 如图 11b 所示。可以发现, 放电电压为 6 和 8 kV 时, 管件在放电时间分别为 110 和 154 μs 时与

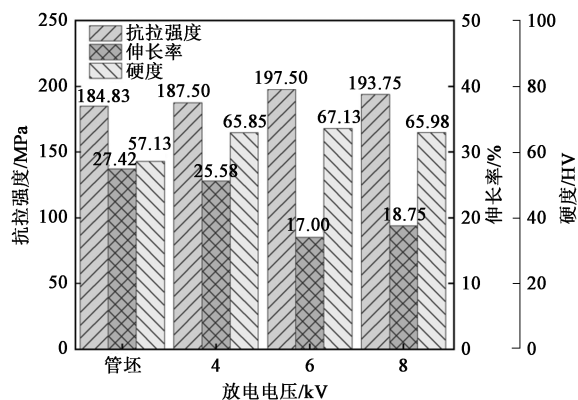
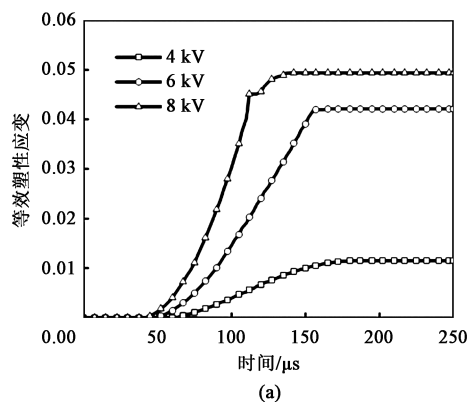


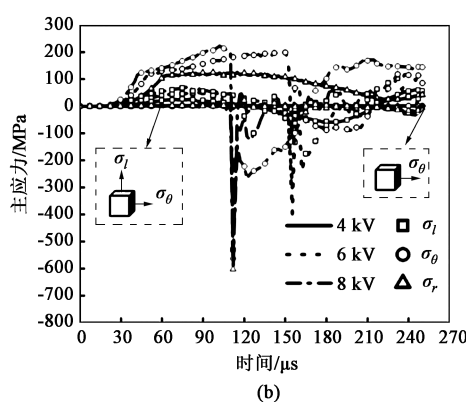
图 10 不同放电电压下的抗拉强度、断后伸长率和硬度变化

Fig. 10 Changes of tensile strength, elongation after fracture and hardness under different discharge voltages

模具发生碰撞。在发生碰撞之前，管件受到周向的



(a)



(b)

图 11 不同放电电压下的管件等效塑性应变和主应力变化曲线

(a) 等效塑性应变-时间 (b) 主应力-时间

Fig. 11 Equivalent plastic strain and principal stress change curves of pipe fittings under different discharge voltages

(a) Equivalent plastic strain-time (b) Principal stress-time

3.2 断口微观形貌

为从微观层面研究 5A02 铝合金在电磁成形后力学性能发生的变化，基于管坯和放电电压为 4、6 和 8 kV 的管件成形试样，切取如图 9b 所示位置和尺寸的试样，对其准静态拉伸断裂后的断口进行 SEM 分析，得到不同放电条件下材料断口的微观形貌，如图 12 所示。从图 12 可知，管坯切取的试样材料的断口形貌主要由大小不同的韧窝组成，有着明显的韧性断裂特征，结合解理面的存在，可判断发生了韧-脆混合断裂。随着放电电压的增大，韧窝的尺寸逐渐减小。这说明随着放电电压的不断升高，由于材料的塑性应变量不断增大，从而导致材料的加工硬化程度增加，成形后的材料再加工性能变低，塑性变差。而随着放电电压的增加，8 kV 放电电压下的断口相比 6 kV 放电电压下的断口韧窝数量增加，说明了随着放电电压的继续升高，材料在

拉应力和轴向的拉应力，随后管件与模具发生剧烈碰撞导致管件的应力状态发生变化，由平面应力状态转变为周向的单向拉伸应力状态。根据 Xu J H 等^[28]的研究，当放电电压较低时，涡流温升软化效应占主导，当放电电压超过第 1 临界值时，脉冲磁场引起的硬化效应开始起效，但涡流温升的软化效应仍然占据主导地位，当放电电压超过第 2 临界值时，脉冲磁场引起的位错间作用力硬化效应与涡流温升软化效应相互动态平衡。因此，随着放电电压的增大，管件表面温度逐渐增加，占主导地位的涡流软化效应逐渐增强。因此，材料力学性能变化的原因可能为受到加工硬化效应和脉冲电磁场效应的共同影响，导致电磁成形后材料的塑性先减小后增大，强度先增大后减小。

脉冲磁场作用下软化，塑性变好。

4 结论

(1) 研究了不同放电参数与结构参数对管件电磁成形的影响，结果表明，线圈匝数越多，线圈磁场的作用范围越大，管件相同位置的磁场强度也越大。当线圈匝数为 20 时，线圈长度超出板料边缘，磁场会产生严重的边缘效应，此处受到洛伦兹力较大，造成边缘反弹，但第 2 个电流波形起到校形作用使得管件最终贴模。放电电压越大，管件受到洛伦兹力越大，管件成形精度越高，当放电电压为 8 kV 时，最大贴模间隙为 0.12 mm，电磁成形的管件满足尺寸要求。

(2) 随着放电电压不断增大，经过电磁成形后 5A02 铝合金在准静态拉伸条件下的抗拉强度先增大

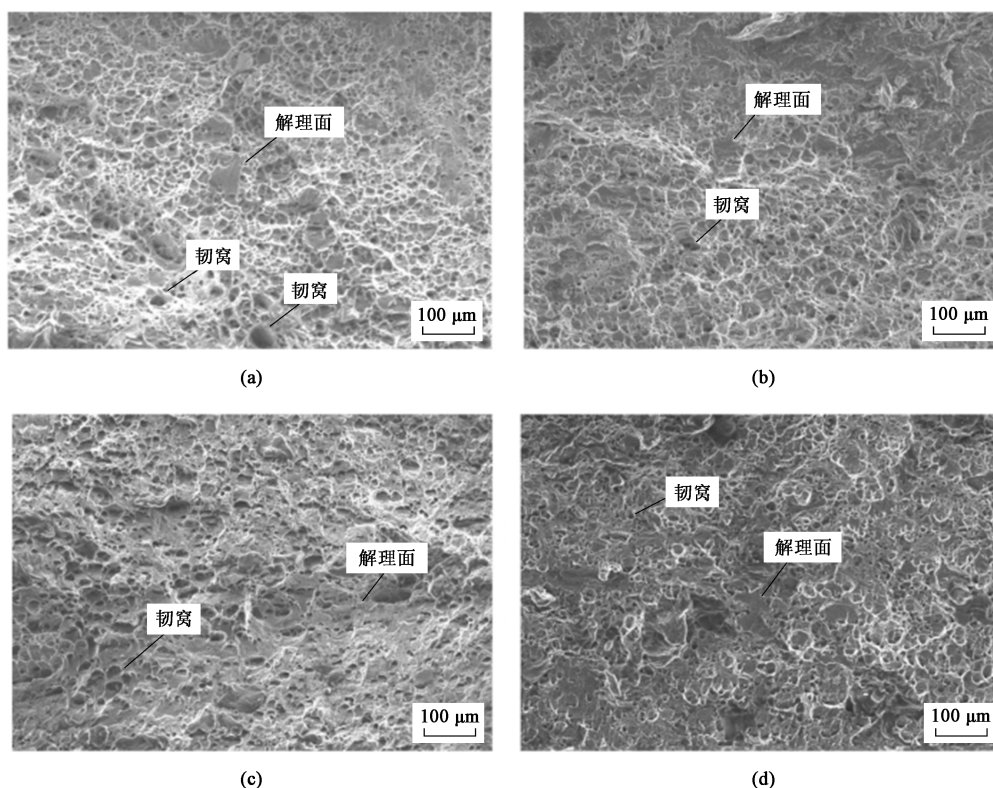


图 12 不同放电电压下试样准静态拉伸断裂后的断口形貌

(a) 管坯 (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV

Fig. 12 Fracture morphologies of broken sample after quasi-static tensile under different discharge voltages

(a) Tube blank (b) 4 kV (c) 6 kV (d) 8 kV

后减小, 伸长率先减小后增大, 其中 6 kV 放电电压下的抗拉强度相比管坯增大了 6.85%, 伸长率减小了 37.92%, 硬度增加了 15.26%, 8 kV 放电电压下的抗拉强度和硬度相比 6 kV 几乎不变, 但伸长率增大了 10.29%。研究表明, 随着放电电压的升高, 管件内部加工硬化和脉冲电磁场效应两者对材料性能的共同影响可能最终导致了成形管件性能变化。

(3) 对不同放电电压下管件断口形貌进行观察, 管坯切取的试样, 其准静态拉伸断口具有明显的韧-脆混合断裂特征, 随着放电电压的增大, 材料加工硬化增加, 韧窝逐渐减小; 而随着放电电压继续增大至 8 kV, 断口韧窝数量增多, 与材料性能变化规律相符合。

参考文献:

- [1] 李晓冬, 徐雪峰, 魏科, 等. 5A02 铝合金管材缩口增厚的影响显著性及成形规律研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 63-69.
- Li X D, Xu X F, Wei K, et al. Study on influence significance and forming law of necking and thickening of 5A02 aluminum tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 63-69.

- [2] Guo X Z, Li B, Jin K, et al. A simulation and experiment study on paraxial spinning of Ni-based superalloy tube [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 4399-4407.
- [3] 郭训忠, 陶杰, 李华冠, 等. CLAM 钢异径管冷成形数值模拟及实验研究 [J]. 核科学与工程, 2011, 31 (2): 111-115.
- Guo X Z, Tao J, Li H G, et al. Numerical simulation and experimental study of cold forming for CLAM steel reducer [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2011, 31 (2): 111-115.
- [4] 郑伟龙, 张治民, 庄泉涌, 等. 变径管温挤压成形工艺数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (9): 109-110.
- Zheng W L, Zhang Z M, Zhuang Q Y, et al. Numerical simulation of warm extrusion process of reducer pipe [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (9): 109-110.
- [5] 白雪山, 尹延广, 赵天章. 航空 5A02 铝合金 T 型三通管翻边电磁成形 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 24-29.
- Bai X S, Yin Y G, Zhao T Z. Electromagnetic flanging of 5A02 aluminum alloy T-shaped tube for aviation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 24-29.
- [6] 邱立, 何琴, 刘洪池. 基于磁场变换器的管件电磁压缩电磁力分布及变形均匀性分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (5): 245-253.

- Qiu L, He Q, Liu H C. Analysis on electromagnetic force distribution and deformation uniformity for tube electromagnetic compression based on magnetic field converter [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (5): 245-253.
- [7] 尹朋磊, 邱立, 王斌. 双管件电磁翻边的电磁力分布与成形性能 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (7): 107-114.
- Yin P L, Qiu L, Wang B. Electromagnetic force distribution and forming performance for double-tube electromagnetic flanging [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (7): 107-114.
- [8] 崔学习, 万敏, 吴向东, 等. 基于电磁辅助成形的汽车覆盖件成形工艺研究 [J]. *精密成形工程*, 2021, 13 (5): 66-71.
- Cui X X, Wan M, Wu X D, et al. Research on the forming process of automobile panel based on electromagnetic assisted forming [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13 (5): 66-71.
- [9] Li J J, Qiu W, Huang L, et al. Gradient electromagnetic forming (GEMF): A new forming approach for variable-diameter tubes by use of sectional coil [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 135: 65-77.
- [10] Xiong Q, Gao D, Li Z, et al. Electromagnetic attraction bulging of small aluminum alloy tube based on a field shaper [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117: 511-521.
- [11] Zhang W, Ouyang S W, Du L M, et al. Electromagnetic forming with automatic feedback control of Lorentz force distribution: A new forming method and its application to high-uniformity tube deformation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 313: 117869.
- [12] Li Z, Abu-siada A, Zhu H, et al. Study on the efficiency of simultaneous tube compression and expansion electromagnetic forming [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 30035-30042.
- [13] 吴佳玮. 电磁成形中电-热-高速效应对铝合金变形行为的作用及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Wu J W. Research on the Thermal Effect, Electric Effect and High-speed Effect on the Deformation Behavior and Mechanism of Aluminum Alloy in Electromagnetic Forming [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [14] 刘欣, 杨景超, 李恒, 等. 管路构件塑性变形连接技术研究进展及挑战 [J]. *航空学报*, 2022, 43 (4): 179-199.
- Liu X, Yang J C, Li H, et al. Critical review on tube joining by plastic deformation [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43 (4): 179-199.
- [15] Li G Y, Deng H K, Mao Y F, et al. Study on AA5182 aluminum sheet formability using combined quasi-static-dynamic tensile processes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 373-386.
- [16] Li F Q, Mo J H, Li J J, et al. Formability evaluation for low conductive sheet metal by novel specimen design in electromagnetic forming [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88: 1677-1689.
- [17] Xie B X, Huang L, Xu J H, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanism of Al-Li alloy during thermo-electromagnetic forming process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 315: 177922.
- [18] Dong P X, Wu J W, Cao Q L, et al. Influence of the deformation temperature on the formability of AA5083 during electromagnetic forming [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126: 1639-1655.
- [19] Ma H J, Mao W J, Su H L, et al. Rate-related study on mechanical properties and fracture characteristics in aluminium alloy via electromagnetic ring expansion test [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 209: 106712.
- [20] 严思梁, 胡磊, 张晓丽, 等. 电磁成形中材料本构模型研究进展 [J]. *塑性工程学报*, 2023, 30 (6): 10-21.
- Yan S L, Hu L, Zhang X L, et al. Investigation progress of material constitutive model for electromagnetic forming [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30 (6): 10-21.
- [21] Liu W, Wu J J, Li J Q, et al. Electromagnetic forming limit diagram of AA5182-O aluminum alloy sheet: Marciniak-Kuczynski model, simulation and experiment [J]. *International Journal of Material Forming*, 2022, 15 (6): 74.
- [22] 杨东. 5A02 铝合金管热-力-弹性体耦合差温推弯成形极限研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
- Yang D. A Study on Forming Limit of 5A02 Aluminum Alloy Tube by Thermo-mechanical-elastomer Coupling Differential Temperature Push Bending [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.
- [23] 王冬. 7500A 低压开关柜主母线系统设计与铜排多物理场仿真分析 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- Wang D. 7500A Low Voltage Switchgear Main Bus-bar System Design and Copper Bar Multiphysics Simulation Analysis [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [24] 朱树峰. 管件电磁成形线圈结构参数的研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- Zhu S F. Research on the Structural Parameters of the Coil in the Processing of Tube Electromagnetic Forming [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [25] 孙圣朋. 钛合金板材及管件电磁成形技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2017.
- Sun S P. Research on the Electromagnetic Forming Technology of Titanium Alloy Sheet and Pipe Fitting [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017.
- [26] Li H W, Yan S L, Zhan M, et al. Eddy current induced dynamic deformation behaviors of aluminum alloy during EMF: Modeling and quantitative characterization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 263: 423-439.
- [27] Su H L, Huang L, Li J J, et al. Formability of AA 2219-O sheet under quasi-static, electromagnetic dynamic, and mechanical dynamic tensile loadings [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 70 (11): 125-135.
- [28] Xu J H, Huang L, Xu Y K, et al. Effect of pulsed electromagnetic field treatment on dislocation evolution and subsequent artificial aging behavior of 2195 Al-Li alloy [J]. *Materials Characterization*, 2022, 187: 11872-118883.