

6061 铝合金薄壁管-法兰组合接头超低温局部胀-压连接规律

程旺军¹, 张恒源¹, 刘伟², 高强¹, 孙耀宁¹

(1. 新疆大学 机械工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830017;

2. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为解决铝合金薄壁管与薄壁法兰的复杂结构难以高效连接的难题,提出了一种铝合金薄壁管与薄壁法兰超低温局部挤压塑性连接新方法,设计了超低温径向胀形和轴向压紧密封塑性连接模具。在室温和超低温(-196℃)下,数值模拟分析了铝管-塑料-法兰连接件的中间密封层和胀形载荷对径向胀形和轴向压紧密封后连接件的壁厚分布及损伤因子的影响规律。结果表明:胀形载荷越大,轴向压紧密封外凸量越多,同时对材料的塑性要求越高;材料减薄主要发生在径向胀形阶段,相同条件下的外法兰损伤明显小于内管;超低温下试件抵抗损伤的能力明显高于室温,有效抑制了塑性连接件的破裂缺陷。该工艺对制造铝合金薄壁管与薄壁法兰高质量连接结构具有重要参考价值。

关键词:超低温局部挤压;塑性连接;薄壁管;薄壁法兰;胀形载荷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.004

中图分类号: TG376.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0025-07

Joining law of local bulging and extrusion at ultra-low temperature of thin-walled tube and flange composite joint for 6061 aluminum alloy

Cheng Wangjun¹, Zhang Hengyuan¹, Liu Wei², Gao Qiang¹, Sun Yaoning¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To solve the efficient joining problem of the thin-walled tube and thin-walled flange complex structure for aluminum alloy, a novel plastic joining method of local extrusion at ultra-low temperature for thin-walled tube and thin-walled flange for aluminum alloy was proposed. The plastic joining dies used in radial bulging and axial compression sealing at ultra-low temperature were designed. The effect laws of middle sealing layer and bulging load on the wall thickness distribution and the damage factor of the joining part after the radial bulging and axial compression sealing for aluminum tube-plastic-flange joining part at room temperature and ultra-low temperature (-196℃) were analyzed by numerical simulation. The results show that the larger the bulging load is, the more the convex amount of the axial compression sealing is, and the higher the need of material plasticity is. Likewise, the thinning of materials mainly occurs in the radial bulging stage. The damage of outer flange is significantly smaller than that of the inner tube under the same condition. Meanwhile, the damage resistance of specimens at ultra-low temperature is obviously higher than that at room temperature, which effectively inhibits the fracture defects of plastic joining parts. This process plays an important reference role in the manufacturing of joining structures with high quality for thin-walled tube and thin-walled flange of aluminum alloy.

Key words: local extrusion at ultra-low temperature; plastic joining; thin-walled tube; thin-walled flange; bulging load

铝合金薄壁管与薄壁法兰组合接头被广泛应用于航空航天、石油化工以及天然气输运等工业领域^[1-3]。连接结构的强度、耐温性和密封性能是影

响铝合金连接结构使用寿命的关键因素。此类连接通常采用熔焊的方法进行局部连接,整个熔焊过程存在薄壁管易烧穿、焊缝强度低、局部热影响区面积大以及晶粒粗化等特点;同时,熔焊工艺复杂、连接过程中劳动强度大、生产效率低和废品率高,难以满足焊缝服役时对连接结构的高强度和可靠性要求^[4-5]。Henriksen J等^[6]利用冷成形工具(保持器、分段锥形膨胀工具、锥体和液压驱动活塞)将管材塑性变形为改进的标准法兰,此技术在直径范围为 $\Phi 1.905 \sim \Phi 35.560$ cm管材中得到成功应用,

收稿日期: 2023-04-10; 修订日期: 2023-05-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022D01C653); 中国博士后科学基金面上资助项目(2022M722666); 新疆维吾尔自治区“天池英才”高层次人才项目(51052300536)

作者简介: 程旺军(1987-),男,博士,副教授

E-mail: chengwangjun2008@126.com

解决了海上油气成产中不能焊接的问题。Li Q M 等^[7]为降低泄露冲击带来的影响,在橡树岭国家实验室(ORNL)所开发的冻结法兰的基础上对原型法兰组件进行了改进,在有限元模拟分析计算结果的基础上借鉴理想气体热力学模型和数学近似理论对改进的冷冻法兰进行分析。同时,设计了多垫片法兰连接,即在熔盐反应堆法兰连接中引入多个垫圈来降低泄露驱动力,以缓解对熔盐泄露抗力的影响。但是,铝合金管材室温下的塑性和应变硬化性能较差,通过大塑性变形连接较困难,挤压连接时很容易引起结合区开裂和变形不均等缺陷,给铝合金薄壁管和薄壁法兰连接结构的可靠性和安全性带来隐患。因而,为解决铝合金薄壁管与薄壁法兰复杂结构难以高效连接的技术难题,基于铝合金管材超低温变形的“双增效应”^[8],本文提出了一种铝合金薄壁管与薄壁法兰超低温局部挤压塑性连接新方法,设计了相应的超低温胀形充模-压紧密封的局部挤压塑性连接模具,以解决现有铝合金薄壁管

与薄壁法兰熔焊连接存在的技术难题。

1 工艺分析

铝合金薄壁管(内管)、中间密封层与薄壁法兰(外法兰)连接部件的形状与几何尺寸如图1所示。超低温局部胀形塑性连接的工艺原理如图2所示,工艺过程可分4个步骤:(1)定位,将薄壁管、薄壁法兰和中间密封层组装,并放置在模具中心腔体中定位;(2)超低温局部冷却,在连接件和中心腔凹槽中局部充填液氮,保证连接部位完全浸泡在液氮中;(3)超低温胀压,中心腔凹槽中局部施加挤压力,液氮温度下对连接件进行局部胀形,使薄壁管、中间密封层与薄壁法兰的连接件形成外凸;(4)轴向定量压紧密封,利用水平砧板将连接件的凸形环沿轴向压紧密封,最终实现铝合金薄壁管和薄壁法兰的有效塑性连接。为保证局部挤压塑性连接过程中管件和法兰的局部柔性接触,采用聚四氟乙烯(Teflon)作为中间密封层,进行局部挤压密封。

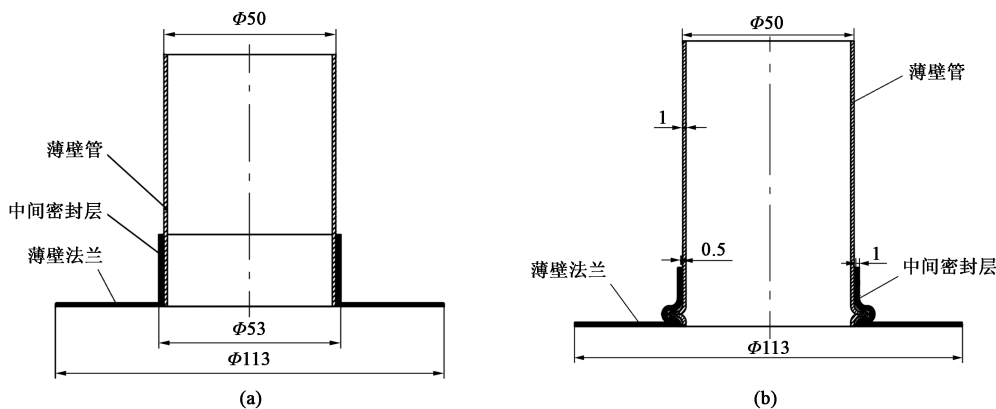


图1 铝合金薄壁管、中间密封层与薄壁法兰的形状与几何尺寸

(a) 塑性连接前 (b) 塑性连接后

Fig.1 Shapes and geometry sizes of thin-walled tube for aluminum alloy, middle sealing layer and thin-walled flange

(a) Before plastic joining (b) After plastic joining

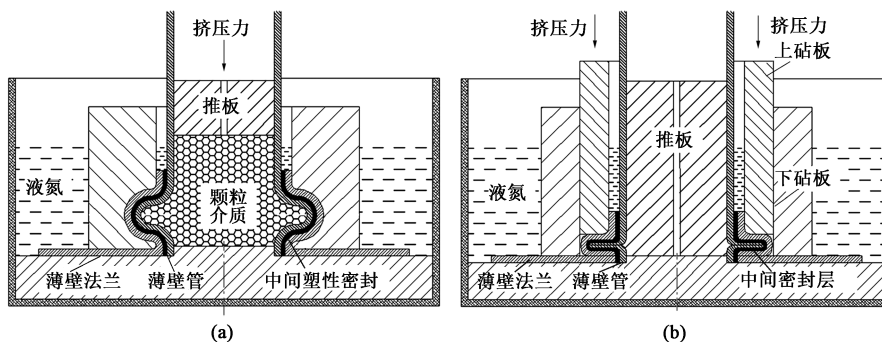


图2 超低温局部挤压塑性连接工艺原理

(a) 径向胀形 (b) 轴向压紧密封

Fig.2 Process principle of local extrusion and plastic joining at ultra-low temperature

(a) Radial bulging (b) Axial compression sealing

该工艺的技术优势为: (1) 通过管材内部胀压形成凸形环, 然后沿轴向定量压紧, 使连接件在法兰根部聚料, 既增大了法兰厚度, 又通过局部聚料增加了强度; (2) 借助铝合金管材液氮温度下塑性和硬化能力提高的特性, 避免管材因复杂应变而局部开裂; (3) 塑性连接过程采用聚四氟乙烯作为中间密封层, 既压紧密封, 又避免材料刚性接触而破裂; (4) 采用局部冷却方式, 局部提高材料成形性能, 降低冷却介质消耗, 节约成本; (5) 超低温胀形过程采用颗粒介质代替超低温流体介质不仅成本低, 而且提升载荷传递的有效性, 使薄壁管连接件在颗粒介质压力下贴合模具来实现薄壁管和薄壁法兰的塑性连接。

2 材料及模拟方案

组合接头材料为退火态 AA6061 铝合金薄壁管和薄壁法兰, 管坯的原始平均壁厚为 0.5 mm, 外径为 $\Phi 50$ mm, 法兰外径为 $\Phi 53$ mm。沿管材轴向取单向拉伸试样, 通过管材单向拉伸测试和胀形测试, 在室温和液氮温度 (-196 °C) 下分别测得其真应力-真应变曲线和成形极限曲线, 如图 3 所示, 其中, 液氮温度下的 FLC_0 (平面应变状态下的应变极限) 明

显高于室温, 说明管材平面应变区的成形极限明显提高。基于弹塑性有限元技术, 利用 Abaqus 6.14 有限元软件对铝合金薄壁管与薄壁法兰超低温径向胀压和轴向定量压紧密封两个阶段进行工艺模拟, 建立的有限元模型如图 4 所示, 模拟过程未考虑颗粒介质的大小和分布, 通过采用在薄壁管和薄壁法兰局部连接部位施加均布介质载荷的方法实现。同时, 将中间密封层设为弹性体, 应变比能采用 Mooney-Rivlin 弹性模型。利用损伤因子来评估铝合金薄壁管和薄壁法兰的塑性连接质量。宏观物理参量可作为判断材料是否发生失效的指标, 数值模拟时韧性断裂准则提供了多个损伤萌生的物理参量标准, 包括成形极限图 (Forming Limited Diagram, FLD)、成形极限应力图 (Forming Limited Stress Diagram, FLSD)、Marciniak-Kuczynski (M-K) 及 Muschenborn-Sonne 成形极限图 (MS-FLD) 损伤等。基于实验获得 FLD 曲线, 采用 FLD 韧性断裂准则作为断裂准则, 即当前的变形状态函数 $\delta_{FLD} \geq 1$ 时, 金属材料发生失效。

$$\delta_{FLD} = \frac{\varepsilon_{ri}}{\varepsilon_r^{FLD}(\varepsilon_\theta, T, f_i)} \geq 1 \quad (1)$$

式中: ε_{ri} 为预定义主应变; ε_r^{FLD} 为当前变形状态下的主应变; ε_θ 为次应变; T 为变形温度, K; f_i 为预定义场变量。

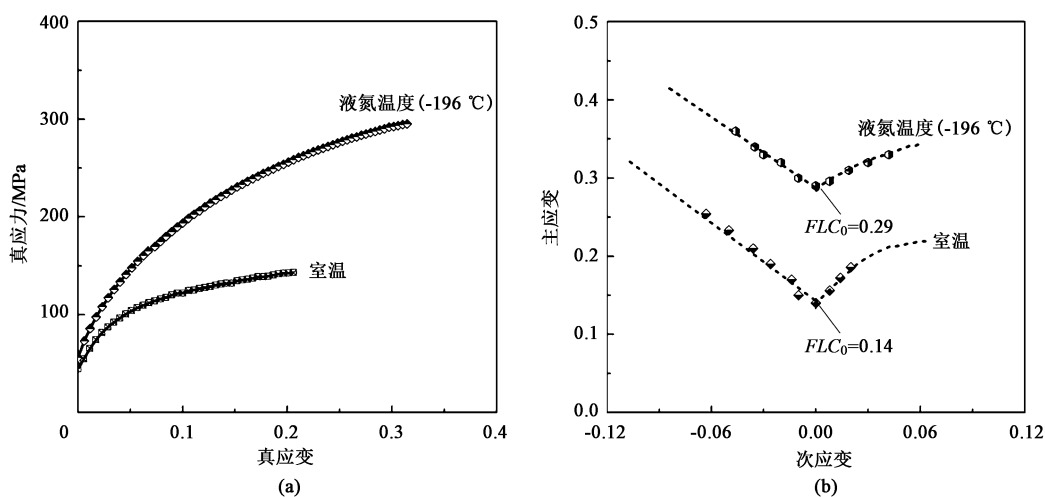


图3 AA6061 铝合金薄壁管材的真应力-真应变曲线 (a) 和成形极限曲线 (b)

Fig. 3 True stress-true strain curves (a) and forming limit curves (b) for AA6061 aluminum alloy thin-walled tube

3 模拟结果与分析

3.1 中间密封层的影响

塑性连接过程主要采用聚四氟乙烯作为中间密封层, 通过压紧铝管-塑料-法兰连接件达到密封效

果^[9-11]。为了研究中间密封层对薄壁管和薄壁法兰连接效果的影响, 分别采用带中间密封层和不带中间密封层的连接件进行数值模拟, 两种情况下连接件采用相同的加载路径, 如图 5 所示。图 6 为不同时间步 (30%、50% 和 80%) 下连接件内管的等效应变云图。可以看出: 初始阶段 (30% 时间步), 最

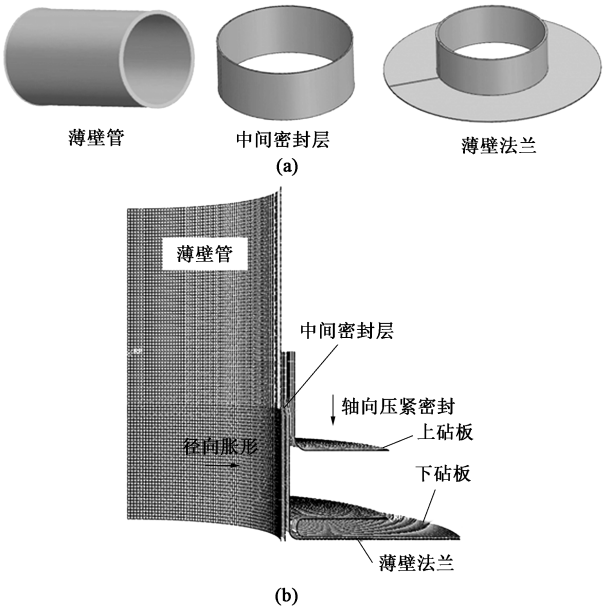


图 4 连接件 (a) 及有限元模型 (b)
Fig. 4 Joining parts (a) and finite element model (b)

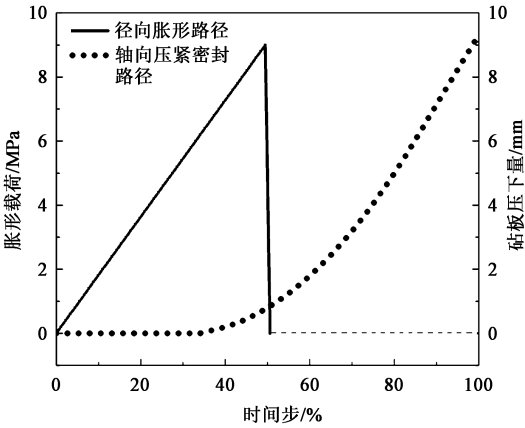


图 5 塑性连接过程的加载路径
Fig. 5 Loading paths in plastic joining process

大变形位置均出现在内管底部与外法兰的连接区，其最大变形量基本相近；当行程为 80% 时间步时，无中间密封层的连接件的最大等效应变为 0.57，而带中间密封层的连接件为 0.54。通过对连接件等效

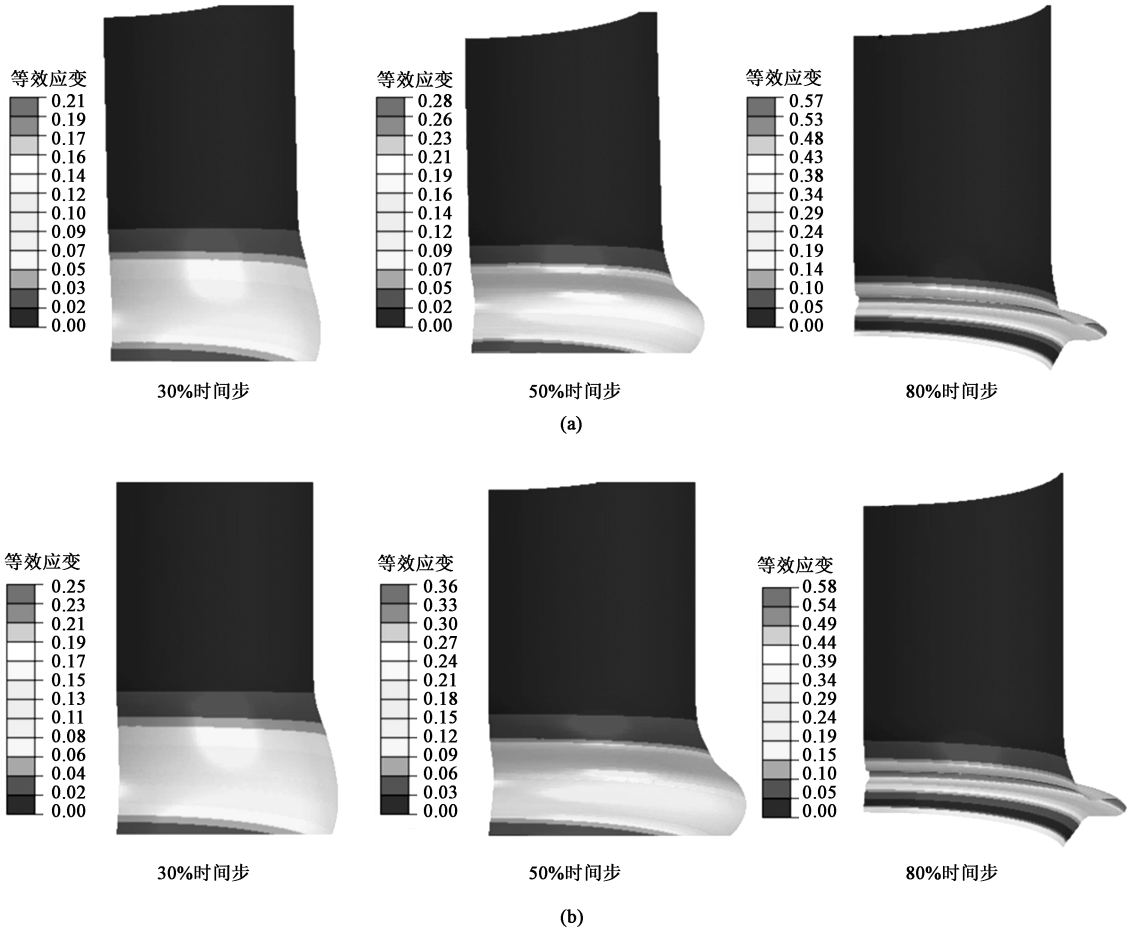


图 6 不同时间步时有无中间密封层的连接件内管的等效应变分布
(a) 不带中间密封层 (b) 带中间密封层

Fig. 6 Equivalent strain distributions of inner tube for joining parts with and without middle sealing layer at different time steps
(a) Without middle sealing layer (b) With middle sealing layer

应变的分析发现, 整个塑性连接过程中, 最大等效应变位置均位于管件胀压的拱顶位置, 这也间接说明中间密封层主要起密封作用, 对管件径向胀形和轴向压紧密封过程的塑性应变影响不显著。

3.2 胀形载荷

胀形载荷即在胀形压力的作用下使薄壁管发生变形, 属于永久载荷。塑性连接过程主要分径向胀形和轴向压紧密封两个过程, 径向胀形载荷的大小直接决定后续轴向压紧密封所需的坯料量和密实程度。不同胀形载荷 (3、6 和 9 MPa) 作用下铝管-塑料-铝管组合体外法兰的胀形高度分布如图 7 所

示。当胀形载荷为 3 MPa 时, 室温和液氮温度下的胀形高度基本相同, 胀形外凸现象不明显; 当胀形载荷为 6 MPa 时, 室温变形的最大胀形高度为 3.03 mm, 而超低温变形的最大胀形高度仅为 1.63 mm; 当胀形载荷增加至 9 MPa 时, 室温下最大胀形高度增加至 4.82 mm, 而超低温变形的最大胀形高度增加至 3.41 mm。通过观察连接件外法兰的胀形高度发现, 液氮温度所需的径向胀形载荷明显高于室温, 室温变形和超低温变形时胀形载荷的理想区间接近 9 MPa。胀形载荷越大, 轴向压紧密封外凸量越多, 对材料的塑性要求越高。

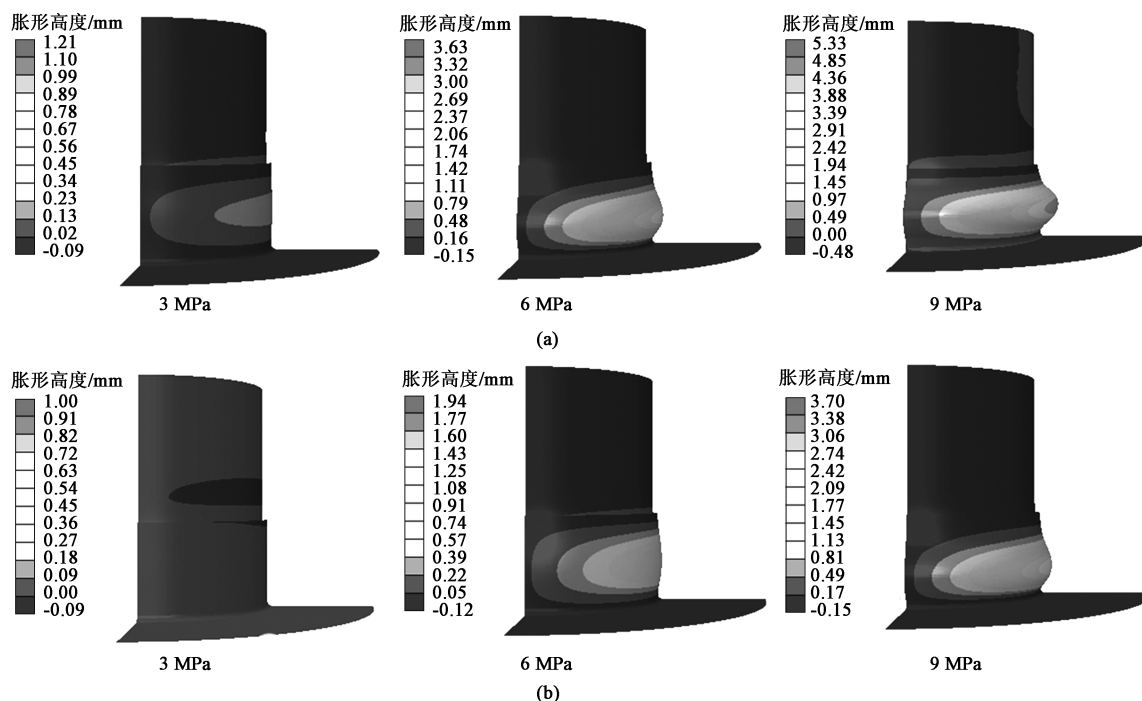


图7 不同胀形载荷作用下连接件外法兰的胀形高度分布

(a) 室温 (b) 液氮温度

Fig. 7 Distributions of bulging height for outer flange of joining part under different bulging loads

(a) Room temperature (b) Liquid nitrogen temperature

3.3 壁厚分布

为研究塑性连接过程中材料变形和壁厚分布规律, 分别对室温和液氮温度下连接件内管和外法兰拱顶的壁厚变化进行分析, 如图 8 所示。当成形时间步小于 50% 时, 内管和外法兰主要发生径向胀形变形, 内管和外法兰拱顶壁厚均出现明显减薄。其中, 胀压变形结束时内管拱顶在室温下的最大减薄率为 10.2%, 而超低温下减薄率为 6.0%; 法兰拱顶在室温下的最大减薄率为 8.1%, 而超低温下为 5.2%。当时间步大于 50% 时, 内管和外法兰主要进行轴向压紧密封, 外法兰拱顶的壁厚减薄明显小于

内管, 轴向压紧密封阶段壁厚基本不发生变化。材料减薄主要发生在径向胀形变形阶段, 该阶段超低温对壁厚的影响比较显著, 而轴向压紧密封阶段对材料的塑性要求相对较低。

3.4 损伤因子

损伤因子的大小和分布可直接反映材料抵抗破坏的能力及失效位置^[12-14]。基于 FLD 损伤模型, 量化分析了室温和液氮温度下连接件内管和外法兰连接区的损伤演化, 如图 9 所示。当成形时间步为 30% 时, 内管和外法兰连接区室温时的最大损伤因子分别为 0.47 和 0.32, 而液氮温度下分别降低至

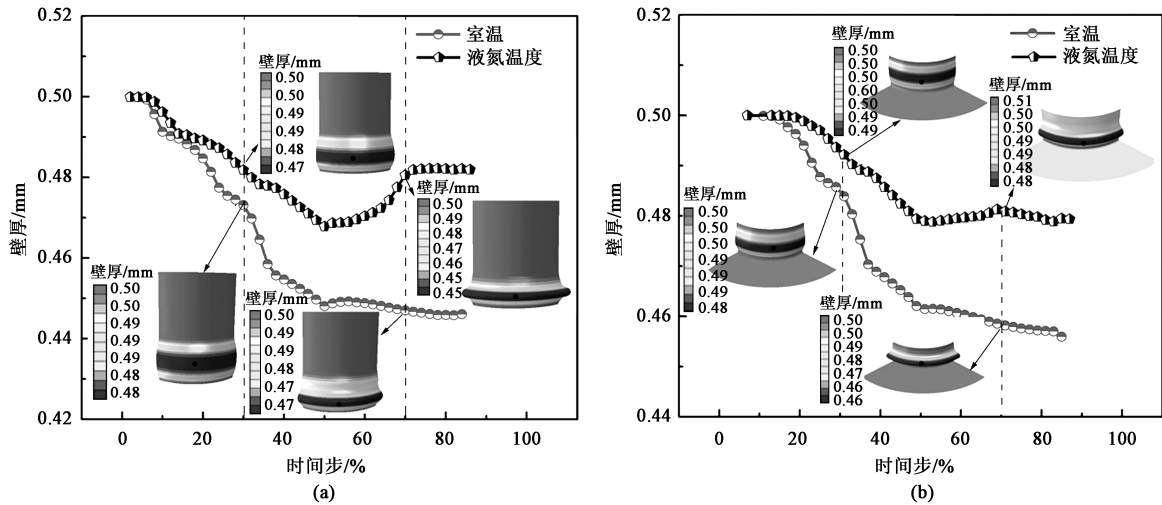


图 8 室温和液氮温度下连接件内管 (a) 和外法兰拱顶 (b) 壁厚变化

Fig. 8 Wall thickness change of inner tube (a) and top of outer flange (b) for joining part at room and liquid nitrogen temperatures

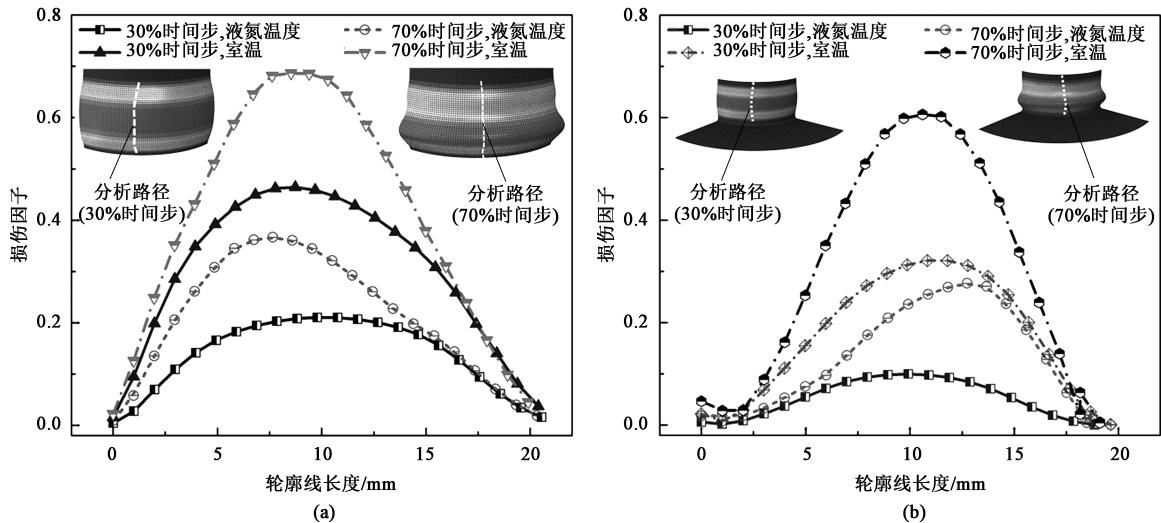


图 9 室温和液氮温度下连接件内管 (a) 和外法兰 (b) 连接区的损伤因子变化

Fig. 9 Damage factor changes in joined zone of inner tube (a) and outer flange (b) for joining part at room and liquid nitrogen temperatures

0.21 和 0.11。当成形时间步增加至 70% 时, 内管和外法兰连接区室温时的最大损伤因子增加至 0.69 和 0.58, 而液氮温度下分别降低 47.8% 和 49.2%。相同条件下, 超低温试件抵抗损伤的能力明显高于室温, 明显抑制了连接件破裂, 同时, 外法兰损伤明显小于内管。整个塑性连接过程中损伤主要发生在轴向压紧密封阶段, 塑性连接区的最大损伤因子均位于内管和外法兰拱顶的折叠位置, 折叠外凸部位因受到较大的拉应力而容易发生破裂。

4 结论

(1) 提出了铝合金薄壁管与薄壁法兰超低温局

部挤压塑性连接新工艺, 设计了超低温局部挤压塑性连接模具。通过超低温局部径向胀形和轴向压紧密封两个工艺过程, 能够有效解决复杂薄壁管和薄壁法兰塑性连接的难题。

(2) 通过工艺仿真比较分析了室温和超低温下铝管-塑料-法兰连接件的中间密封层和胀形载荷对径向胀形和轴向压紧密封两工艺阶段的材料壁厚分布和损伤因子的影响规律。发现中间密封层对管件径向胀形和轴向压紧密封过程的塑性应变影响不显著; 胀形载荷越大, 轴向压紧密封外凸量越多, 同时对材料塑性要求越高。

(3) 材料减薄主要发生在径向胀形阶段, 相同

(下转第 110 页)