

进给参数对旋锻连接强度的影响研究

史建行

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月7日

摘要

以铜铝管旋锻连接为对象, 用理论结合仿真研究进给参数对旋锻连接强度的影响。理论研究结果表明, 径向进给参数通过影响塑性变形的程度进而影响最终的连接强度, 周向进给参数通过影响管件的侧面接触面积来影响连接强度; 仿真结果表明在一定范围内连接强度随着径向进给量的增加而上升, 当径向进给量为0.8 mm时, 连接强度达到最大, 最大拉伸载荷为3200 N, 当径向进给量超过0.8 mm后, 管件会因为产生裂缝、折叠等缺陷使得连接强度降低; 周向进给参数通过影响铜铝管圆度质量进而影响连接强度, 径向进给参数一定时, 连接强度随着周向进给次数的增加而提高, 当周向进给次数为5时, 连接强度达到最大, 最大拉伸载荷为3550 N; 周向进给次数应在保证连接强度的前提下尽量减少。

关键词

铜铝管, 旋锻连接, 连接强度, 径向进给参数, 周向进给参数

Study on the Influence of Feed Parameters on the Strength of Rotary Forging Connections

Jianhang Shi

College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 7th, 2025

Abstract

The study focuses on the spin-forming connection of copper and aluminum tubes, examining the impact of feed parameters on connection strength through a combination of theoretical analysis and simulation. Theoretical research revealed that radial feed parameters influence the degree of plastic deformation, thereby affecting the ultimate connection strength, while circumferential feed

parameters impact connection strength by influencing the lateral contact area of the tube components. Simulation results indicated that within a certain range, connection strength increases with the radial feed amount. The maximum connection strength, achieved at a radial feed of 0.8 mm, corresponds to a maximum tensile load of 3200 N. Beyond this point, excessive radial feed (exceeding 0.8 mm) leads to defects such as cracks and folds in the tubes, reducing connection strength. Circumferential feed parameters affect connection strength by influencing the roundness quality of the copper and aluminum tubes. With a constant radial feed parameter, connection strength improves as the number of circumferential feeds increases, peaking at five feeds with a maximum tensile load of 3550 N. Therefore, the number of circumferential feeds should be minimized while ensuring sufficient connection strength.

Keywords

Cu-Al Pipe, Rotary Forging Joint, Connection Strength, Radial Feed Parameters, Circumferential Feed Parameter

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着制造技术的快速发展，轻质技术在汽车、航空航天行业得到了广泛的运用，这给困难焊接材料的连接带来了巨大的挑战。传统的焊接技术很难再用于异种材料的某些连接情况。因此一些研究者将目光转向利用塑性变形进行材料连接。

目前，国内外学者针对塑性变形连接已经进行了大量的研究。Mori [1]等利用自刺铆接和优化的模具对高强度钢和铝板进行了连接；Alves [2]利用局部塑性失稳连接工艺对薄壁管件进行了连接；Haiyan Yu [3]等通过数值模拟和试验对薄壁管压缩不稳定连接方法进行研究，并详细讨论了几何参数对工艺成形的影响；陈光[4]提出一种感应热铆接涡流冷却阀冷却的无铆塑性连接工艺，研究了钢铝热无铆塑性连接的成形工艺与成形接头的连接质量；欧阳潇[5]等提出了一种新型无模无铆塑性连接工艺，并对其塑性行为和工艺参数进行了研究。

旋锻即旋转锻造，是利用模具对坯料进行高频锻打使其产生塑性变形，是一种渐进成形和近净成形技术，经过长时间的研究，此工艺已经相对成熟且应用范围愈发广泛[6]。文献[7]-[10]分别对无芯棒、含芯棒旋锻进行了研究。旋锻有着局部而连续，无屑且精密的加工特点，而且可以很好地保证产品的成形质量[11]。因此，利用旋锻工艺连接异种材料能够避免热输入，提升材料利用率，提高产品的成形质量。旋锻连接也属于塑性变形连接的一种，张琦等[12]利用旋锻工艺对铜-铜管、铜-铝管以及铜-塑料管进行了连接，验证了旋锻连接的可行性，但并没有研究连接强度的影响因素以及进给参数对连接强度的影响。

旋锻连接首要保证连接强度，本文通过分析旋锻连接的连接机理，研究进给参数(包括径向进给参数和周向进给参数)对旋锻连接强度的影响。通过理论分析旋锻连接强度的影响因素，得到进给参数影响最终的连接强度，并通过有限元仿真分别分析径向进给参数和周向进给参数对连接强度的具体影响，进而验证理论的正确性，为工程上利用旋锻工艺进行材料连接保证和提高连接强度提供理论支持。

2. 材料与方法

本文以某空调铜-铝管旋锻连接为研究对象，旋锻连接模型如图1所示，分析旋锻连接的连接机理，

研究进给参数对连接强度的影响。

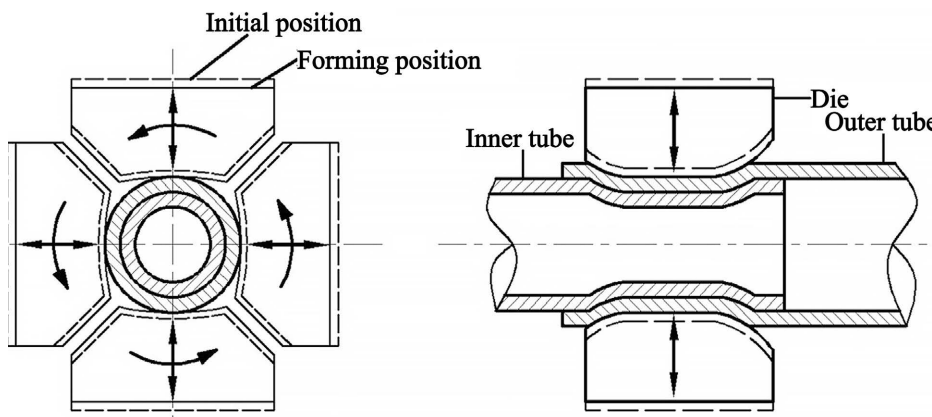


Figure 1. Rotary forging connection model diagram

图 1. 旋锻连接模型图

本文所用内外连接管材料为 6061Al (内管)和纯铜 E-Cu58 (外管), 材料化学成分如表 1 和表 2 所示, 材料尺寸参数如表 3 所示。

Table 1. 6061Al chemical composition (% , mass fraction)

表 1. 6061Al 化学成分(% , 质量分数)

Cu + Ag	Bi	Sb	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	Other
99.90	0.001	0.002	0.005	0.005	0.005	0.002	0.005	0.06	0.005	0.1

Table 2. E-Cu58l chemical composition (% , mass fraction)

表 2. 纯铜 E-Cu58 化学成分(% , 质量分数)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other
97.3	0.06	0.35	0.275	0.075	1	0.195	0.025	0.075	0.1

Table 3. Material size parameter

表 3. 材料尺寸参数

	Outer tube (Cu)	Inner tube (Al)
Outer diameter (mm)	8	6
Inner diameter (mm)	6	4
Wall thickness (mm)	1	1
Length (mm)	50	50

本文通过分析旋锻连接的连接机理, 研究进给参数对旋锻连接强度的影响。通过理论结合仿真来验证研究的正确性, 具体研究步骤为:

(1) 通过旋锻成形本质分析旋锻连接的连接机理, 进而找出影响旋锻连接强度的参数, 并理论研究进给参数对连接强度的影响。

(2) 建立旋锻连接模型, 利用 DEFORM-3D 软件对模型进行旋锻连接有限元仿真; 对不同径向进给参数下的铜铝管连接进行旋锻仿真分析, 并对旋锻后的模型进行拉伸试验模拟仿真, 分析径向进给参数对连接强度的影响。

(3) 对不同周向进给参数下的铜铝管连接进行旋锻仿真分析, 根据旋锻后坯料的最大变形位置和最小变形位置确定周向进给量; 对旋锻后的模型进行拉伸试验模拟仿真, 分析周向进给参数对连接强度的影响。

3. 结果与分析

3.1. 旋锻链接理论研究

旋锻即旋转锻造, 常采用两个或两个以上的模具, 在使其环绕坯料外径旋转的同时, 也向坯料的轴心施加高频率的径向力, 使坯料受径向压缩而按模具型线成形。旋锻连接就是将两个管件重叠放置在一起, 利用旋锻工艺使坯料发生塑性变形从而达到管件连接的目的。如图 1 所示, 通过分析旋锻成形和连接过程可以发现旋锻连接的原理是通过坯料变形所形成的弧形接头和管件侧表面紧密贴合所产生的附加焊接效应来进行连接的。因此, 坯料塑性变形程度以及侧面接触面积直接影响旋锻连接的连接强度。从旋锻连接过程可以得到与旋锻连接相关的参数包括: 模具、坯料和进给参数。因为模具和坯料在实际生产加工时一旦选定轻易不会变换, 本文主要研究进给参数对连接强度的影响, 包括径向进给参数和周向进给参数。

径向进给参数主要是径向进给量影响, 径向进给量是指模具一次径向进给, 坯料在直径上的绝对缩量。分析旋锻连接机理可以得到径向进给量通过影响塑性变形的程度进而影响最终的连接强度。理论上讲, 径向进给量越大, 坯料产生的塑性变形程度就越大, 所形成的接头就更稳定, 但过大的径向进给量, 容易造成坯料损伤。此外塑性变形过大还可能导致坯料内外圆产生凹陷, 即使通过多次周向进给修圆也难以恢复, 甚至产生折叠和裂纹缺陷, 从而降低连接强度。

周向进给参数包括周向进给量和周向进给次数, 周向进给参数通过影响管件的侧面接触面积来影响连接强度, 研究表明[13]周向进给参数会影响旋锻产品的成形质量, 特别是圆度质量, 而圆度质量间接影响内外管件的接触侧面积。圆度质量越好, 内外管件的贴合度就越高, 产品的连接强度越高。模具径向进给锻打坯料后, 坯料相对模具转过一定角度, 对下一位置进行锻打, 坯料与模具之间一次相对运动转过的这一角度称为周向进给量。由于径向进给作用导致坯料产生不均匀的塑性变形, 使坯料由圆状变为不圆状, 周向进给目的是为了使坯料由不圆状重新变为圆状, 从而提高内外圆圆度质量, 进而提高连接强度。周向进给量应根据每次锻打后坯料的最大变形位置和最小变形位置确定。周向进给次数也就是模具径向进给后需要周向修圆的次数, 理论上周向进给次数越多, 修圆效果就越好, 圆度质量越好, 产品的连接强度就越高; 但周向进给次数太多会产生大量的时间成本, 降低加工效率, 所以应该在保证连接强度的前提下尽量减少周向进给次数。

3.2. 径向进给参数仿真研究

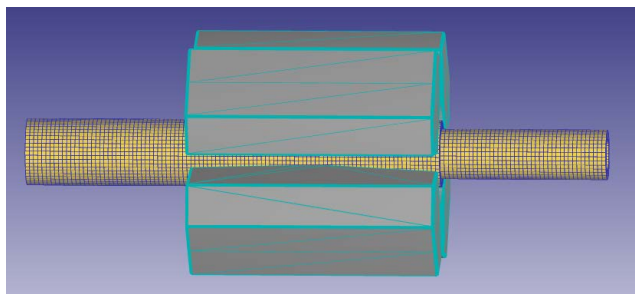
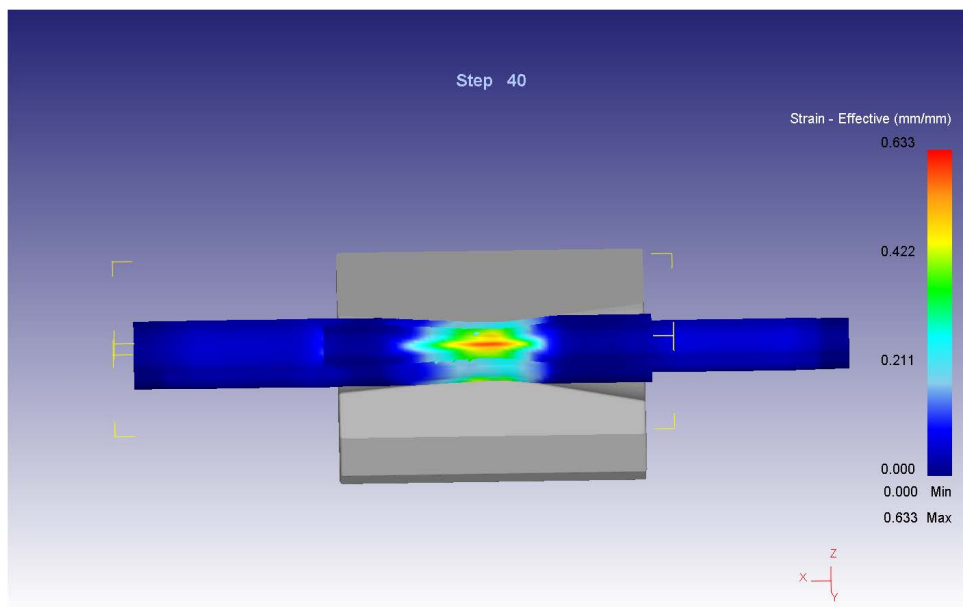


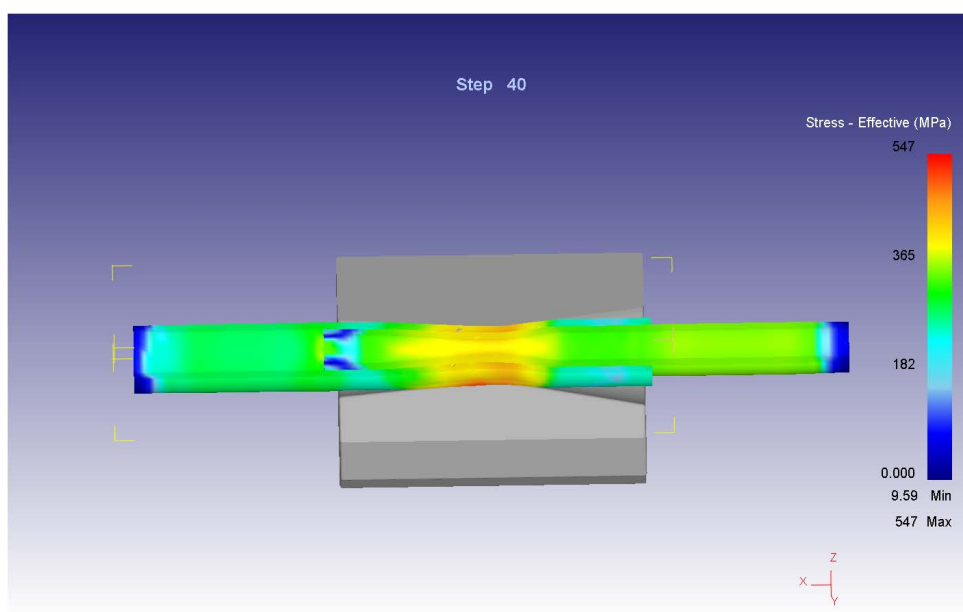
Figure 2. Simulation model of rotary forging connection
图 2. 旋锻连接仿真模型

用 CATIA 软件建立旋锻连接模型导入 DEFORM-3D 软件进行仿真分析, 如图 2 所示。温度设置为 25℃, 外管单元数为 10,400, 内管单元数为 7200。

对径向进给量 0.8 mm 进行旋锻仿真, 铜铝管应力应变如图 3 所示。



(a)



(b)

Figure 3. Stress-strain at 0.8 mm down pressure. (a) stress, (b) strain

图 3. 下压 0.8 mm 时的应力应变。(a) 应力, (b) 应变

由图 3 可以看出, 等效应变和等效应力在锻造区达到最高, 由于弯曲变形类型, 外管的等效应力大于内管的等效应力, 最大应力值为 547 MPa。

分别对径向进给量 0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm、0.6 mm、0.7 mm、0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm

进行旋锻仿真，得到不同径向进给量下铜铝管的应力应变如图 4 所示。

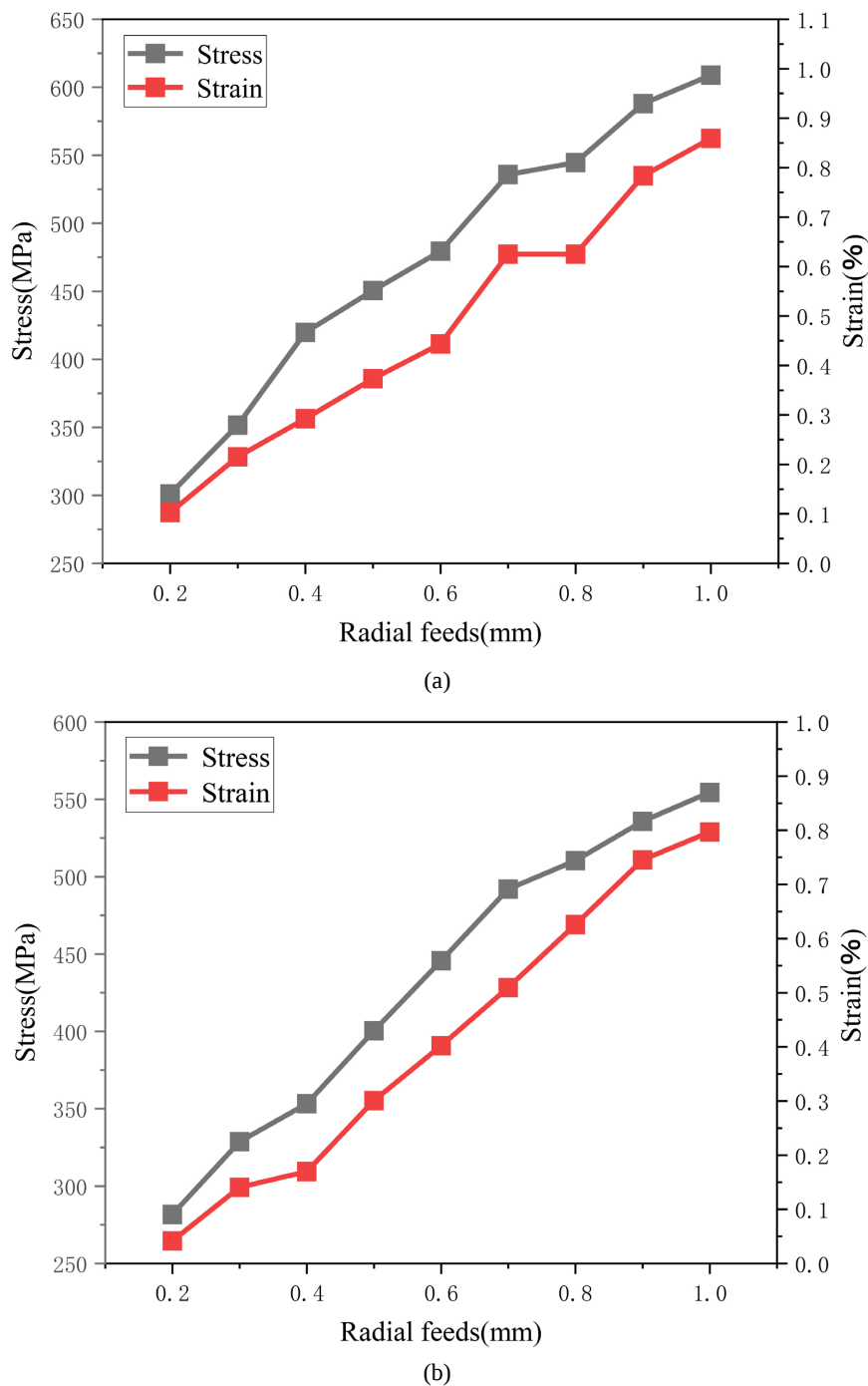


Figure 4. Stress and strain of copper-aluminum tubes under different radial feeds. Copper pipe (a), Aluminum pipe (b)
图 4. 不同径向进给下铜铝管的应力应变。铜管 (a), 铝管 (b)

由图 4 可知，外管的应力应变普遍比内管的更大，这是由于外管在锻打时与模具直接接触导致的；随着径向进给量增加，内外管的应力应变逐渐增加，当管件产生的应力高于材料的抗拉强度时，可能产生断裂、折叠等缺陷。

对不同径向进给量下旋锻后的管件进行拉伸试验模拟仿真，如图 5 所示，对管件两头设置夹具，夹具一端固定，另一端沿 X 轴负向拉伸，拉伸距离为 5 mm，内外管之间的摩擦因素设置为 0.2，得到拉伸过程中载荷随位移的变化曲线如图 6 所示(以 0.8 mm 为例)。

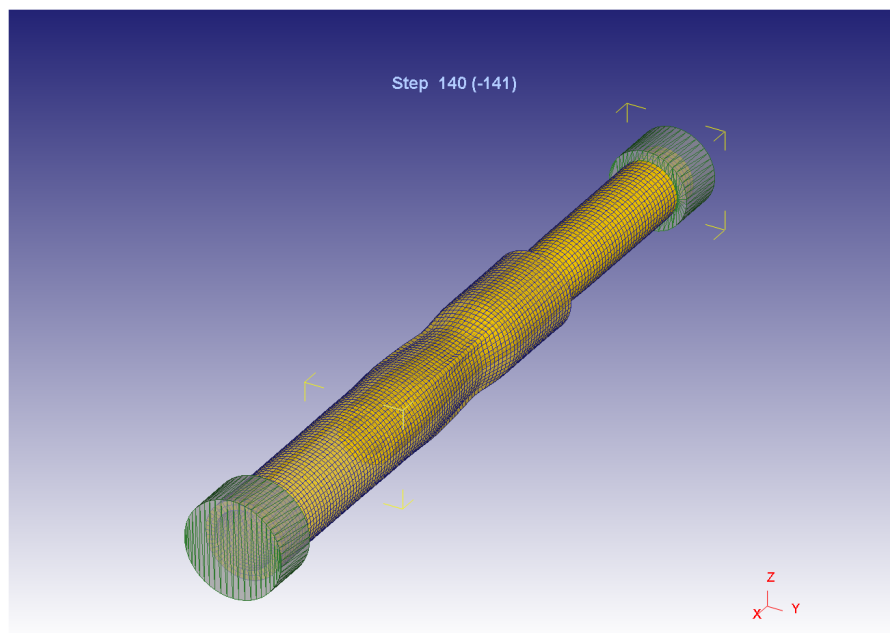


Figure 5. Tensile test simulation setting diagram

图 5. 拉伸试验仿真模拟设置图

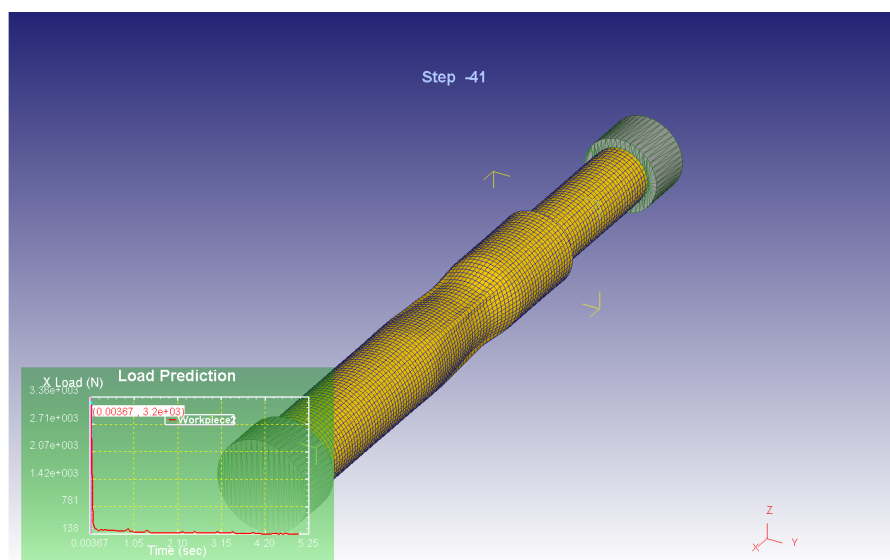


Figure 6. Tensile displacement curve at 0.8 mm

图 6. 0.8 mm 时的拉伸位移曲线

由图 6 可以看出，拉力在开始的瞬间达到最大，随着拉伸的进行逐渐降低，这是由于锻打后内外管件在界面处产生的附加焊接效应。用拉伸载荷刻画连接强度的大小，对数据进行处理，得到不同径向进给量下载荷随位移的变化曲线如图 7 所示。

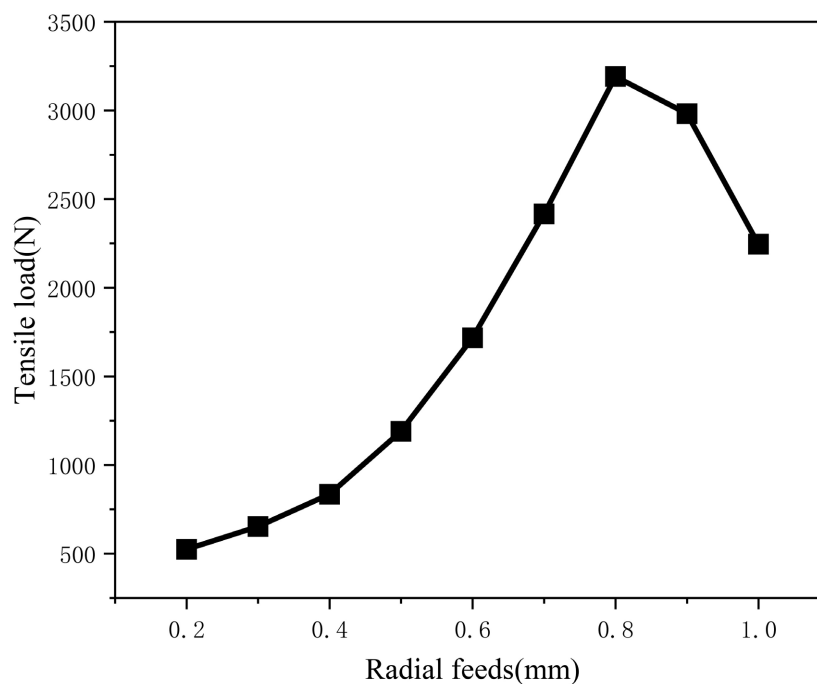


Figure 7. Tensile load diagram under different radial feeds

图 7. 不同径向进给下拉伸载荷图

由图 7 可以看出,随着径向进给量的增加,管件的连接强度逐渐增加,在进给量 0.8 mm 时连接强度达到最大,最大拉伸载荷为 3200 N;继续增大进给,连接强度反而下降,对比应力应变图发现这是因为此时外管受到的应力大于材料的抗拉强度,可能使得外管产生裂缝,从而导致产品连接强度降低。

在一定范围内,旋锻连接的连接强度随着径向进给量的增加而上升,当管件受到的应力高于材料本身的抗拉强度时,旋锻后的管件会因为产生裂缝、折叠等缺陷而使得产品连接强度降低,因此在实际生产中,径向进给参数的确定应首先满足材料的应力约束。

3.3. 周向进给参数仿真研究

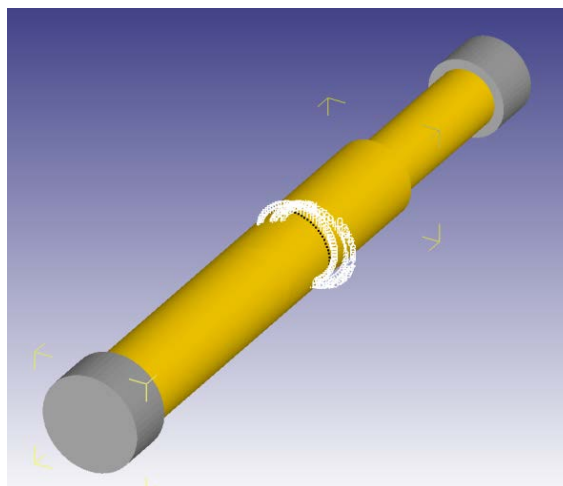


Figure 8. Point trace setting

图 8. 点追踪设置

对径向进给后的旋锻连接模型进行周向进给修圆，由于外管与模具直接接触锻打，所以外管的尺寸变化相对更加明显，因此用外圆圆度来刻画每次锻打后坯料的变形。如图 8 所示，在外管表面设置一系列点，用点追踪的方法来刻画旋锻后产品的圆度变化，径向进给 0.8 mm 后的圆度变化如图 9 所示。

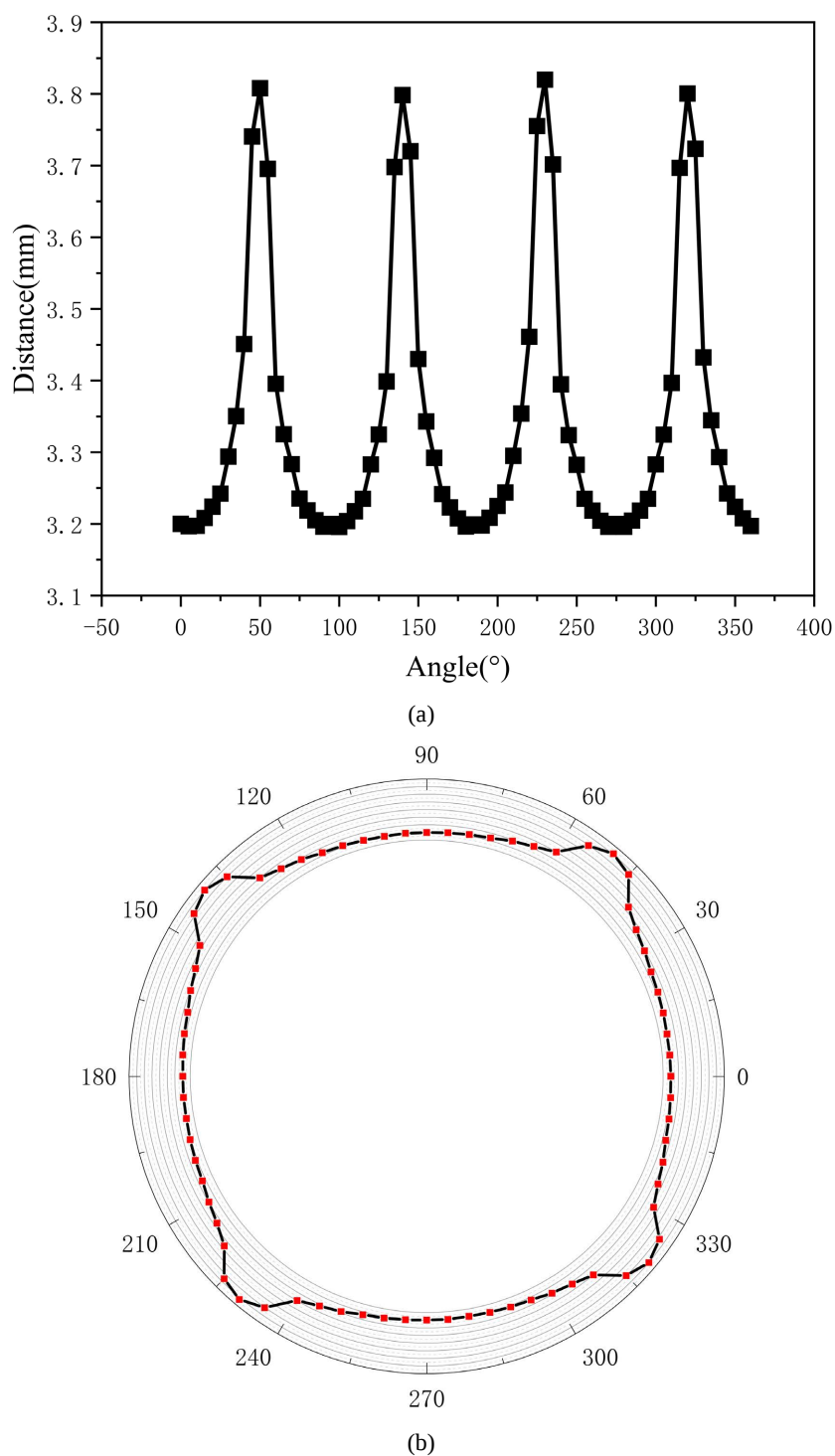


Figure 9. Roundness change after radial feed of 0.8 mm. Vertical (a), Polar (b)
图 9. 径向进给 0.8 mm 后的圆度变化。直角坐标图 (a)，极坐标图 (b)

根据旋锻后坯料的最大变形位置和最小变形位置确定下一次的周向进给量为 50° ，如此反复，确定后面每次的周向进给量分别为 50° 、 50° 、 55° 、 60° 、 60° 、 70° 、 75° 、 75° 、 75° 。

不同周向进给量下产品的圆度变化如图 10 所示。对每次周向进给后的旋锻连接模型进给拉伸试验模拟仿真，得到拉伸载荷随周向进给次数的变化曲线如图 11 所示。

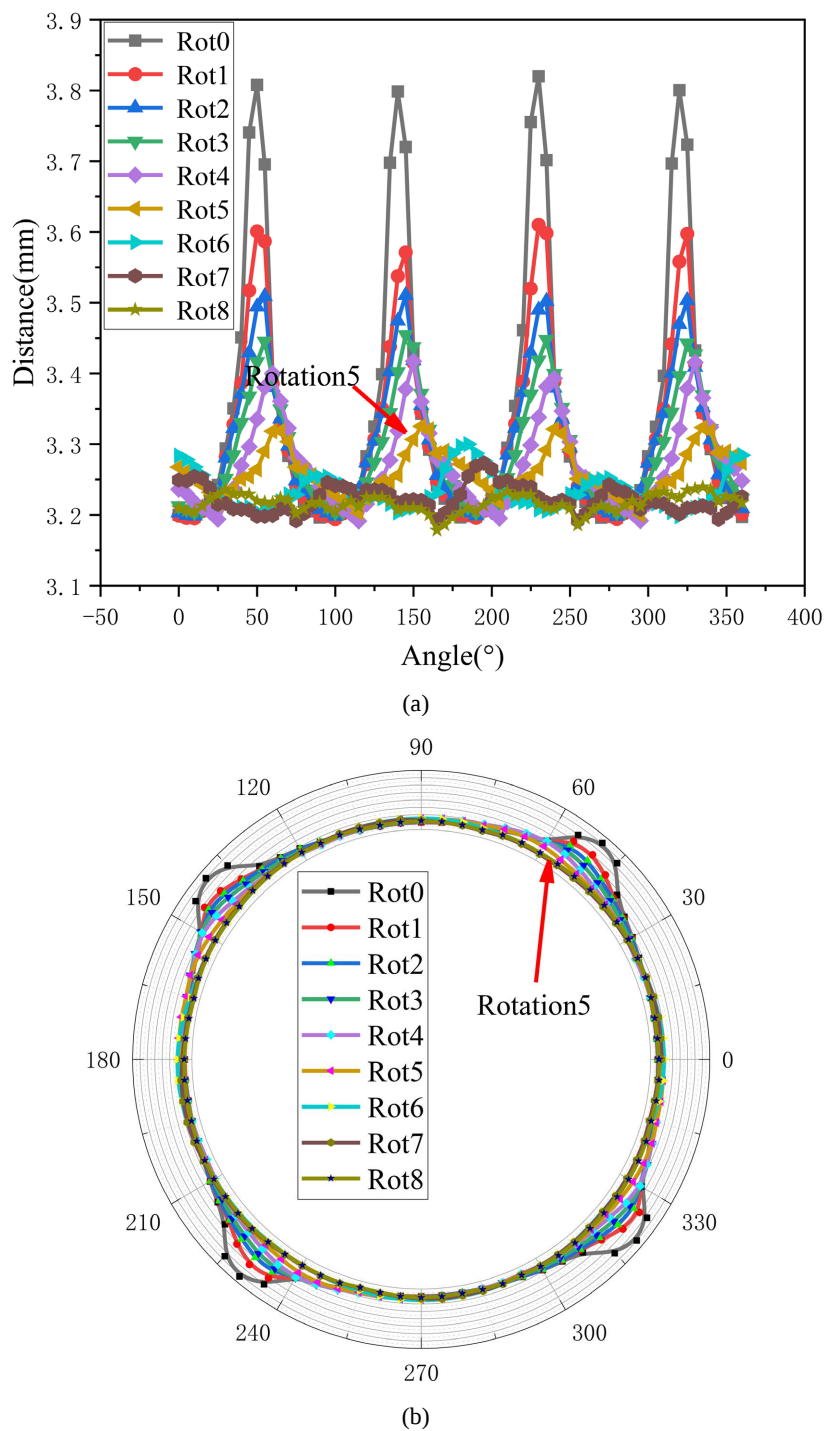


Figure 10. Variation of roundness under different circumferential feeds. Vertical (a), Polar (b)
图 10. 不同周向进给下的圆度变化。直坐标图 (a)，极坐标图 (b)

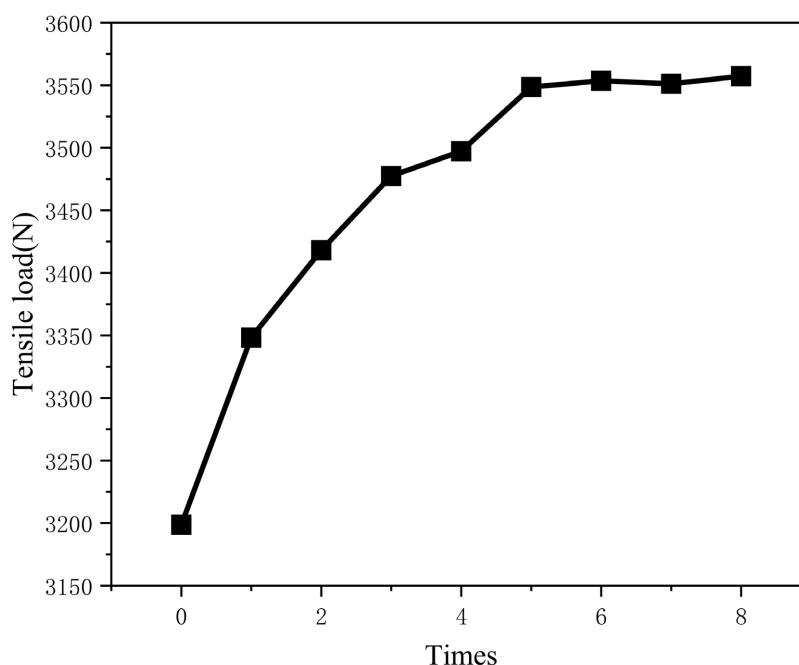


Figure 11. Variation curve of tensile load with circumferential feed times
图 11. 拉伸载荷随周向进给次数的变化曲线

由图 10 和图 11 可知, 随着周向进给次数的增加, 坯料的圆度质量越来越好, 而产品的连接强度也逐渐提升, 当周向进给次数为 5 时连接强度达到最大, 最大拉伸载荷为 3550 N。继续进行周向进给, 坯料的圆度质量基本不再变化, 同时产品的连接强度也不再提升。

周向进给参数通过影响坯料的圆度质量进而影响产品的连接强度。周向进给量根据旋锻后坯料的最大变形位置和最小变形位置确定; 周向进给次数会影响产品的圆度质量进而影响连接强度。随着周向进给次数的增加, 坯料的圆度质量越来越好, 产品的连接强度也逐渐提升, 当周向进给次数达到某一临界时, 坯料的圆度质量基本不再变化, 同时产品的连接强度也不再提升。周向进给次数过多会造成大量的时间成本, 因此在实际生产中, 周向进给次数应在保证连接强度的前提下尽量减少。

4. 结论

本文通过分析旋锻连接的连接机理, 研究进给参数对旋锻连接强度的影响, 为工程上利用旋锻工艺进行材料连接保证和提高连接强度提供技术和理论支持, 具体结论如下:

(1) 理论研究表明, 旋锻连接的连接强度主要通过坯料变形所形成的弧形接头和管件侧表面紧密贴合所产生的附加焊接效应来保证。

(2) 径向进给参数通过影响塑性变形的程度进而影响最终的连接强度; 周向进给参数通过影响管件的侧面接触面积来影响连接强度。

(3) 在一定范围内, 旋锻连接的连接强度随着径向进给量的增加而上升, 在径向进给量 0.8 mm 时连接强度达到最大, 最大拉伸载荷为 3200 N; 当管件受到的应力高于材料本身的抗拉强度时, 旋锻后的管件会因为产生裂缝、折叠等缺陷而使得产品连接强度降低。

(4) 随着周向进给次数的增加, 坯料的圆度质量越来越好, 产品的连接强度也逐渐提升, 当周向进给次数达到 5 次时, 连接强度达到最大, 最大拉伸载荷为 3550 N。

(5) 周向进给量应根据旋锻后坯料的最大变形位置和最小变形位置确定; 周向进给次数应在保证连

接强度的前提下尽量减少。

旋锻连接适用于异种材料的连接，特别是具有一定塑性变形能力的材料，未来可探究旋锻连接在汽车、航空航天等领域的应用。旋锻连接首要关注和亟待解决的难题是如何保证连接强度，如何通过协调各工艺参数提升连接强度。进一步研究各工艺参数(包括但不限于模具尺寸、形状，毛坯尺寸公差、力学特性偏差等)对旋锻连接强度的影响有望找到有效提高连接强度的措施。

参考文献

- [1] Ghaei, A., Karimi Taheri, A. and Movahhedy, M.R. (2006) A New Upper Bound Solution for Analysis of the Radial Forging Process. *International Journal of Mechanical Sciences*, **48**, 1264-1272. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.06.002>
- [2] Alves, L.M., Afonso, R.M., Silva, C.M.A. and Martins, P.A.F. (2018) Joining Tubes to Sheets by Boss Forming and Upsetting. *Journal of Materials Processing Technology*, **252**, 773-781. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.047>
- [3] Yu, H., Li, J. and He, Z. (2018) Formability Assessment of Plastic Joining by Compression Instability for Thin-Walled Tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **97**, 3423-3430. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2128-1>
- [4] 陈光. 钢铝热无铆塑性连接工艺及接头力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- [5] 欧阳潇, 秦登林, 赵升吨, 等. 无模无铆连接接头的塑性变形行为及工艺参数研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(1): 41-49.
- [6] 周大隼. 金属体积冷成形技术与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 392-424.
- [7] 张健, 卢曦. 模具形状对含芯棒旋锻成形几何精度的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(5): 61-67.
- [8] 高文贵, 卢曦, 秦文瑜, 等. 轿车传动半轴含芯棒旋锻工艺中的关键参数[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 57-64.
- [9] 石松, 卢曦. 无芯棒旋锻径向进给参数匹配研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(4): 21-26.
- [10] 孙子莹, 卢曦, 李栋材. 无芯棒旋锻径向进给参数变化匹配研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(2): 104-108.
- [11] 洪慎章. 回转成形实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 236-257.
- [12] 张琦, 张以升, 田天泰, 等. 旋转锻造连接工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4): 274-280.
- [13] 李朋丽, 卢曦. 无芯棒旋锻周向进给参数变化匹配研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(5): 126-131.