毛坯力学特性对旋锻连接强度的影响研究

史建行,卢 曦*

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年5月6日; 录用日期: 2025年5月30日; 发布日期: 2025年6月6日

摘要

以某空调铜铝管旋锻连接为对象,用理论结合仿真的方法研究毛坯力学特性对旋锻连接强度的影响。理 论研究结果表明,旋锻连接依靠塑性变形产生的弧形接头和管件重叠部分产生的附加焊接效应保证连接 强度;毛坯力学特性变化影响旋锻连接强度。对不同硬度下的毛坯进行旋锻连接和拉伸试验模拟仿真, 结果表明:在材料能力范围内,随着毛坯硬度的增加,旋锻连接强度随之增加;毛坯力学特性和旋锻连 接强度之间呈正相关,且为非线性;当毛坯硬度超过材料能力范围时,旋锻连接可能出现缺陷,连接强 度降低。研究结果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。

关键词

毛坯力学特性,铜铝管,旋锻连接,连接强度

Study on the Influence of Blank Mechanical Properties on the Strength of Rotary Swaging Connections

Jianhang Shi, Xi Lu*

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

Received: May 6th, 2025; accepted: May 30th, 2025; published: Jun. 6th, 2025

Abstract

This study focuses on the rotary swaging connection of copper-aluminum tubes in air conditioning systems, employing a combination of theoretical analysis and simulation to investigate the influence of blank mechanical properties on the strength of rotary swaging connections. Theoretical research indicates that the strength of rotary swaging connections is ensured by plastic deformation

*通讯作者。

and the additional welding effect generated by the overlapping sections of the tubes. Variations in the mechanical properties of the blank significantly affect the connection strength. Simulations of rotary swaging and tensile tests were conducted on blanks with different hardness levels. The results demonstrate that, within the material's capability range, the strength of the rotary swaging connection increases with the hardness of the blank, showing a positive, nonlinear correlation between the blank's mechanical properties and the connection strength. However, when the blank hardness exceeds the material's capability range, defects may occur in the rotary swaging connection, leading to a reduction in connection strength. The findings provide technical and theoretical support for ensuring and enhancing connection strength in engineering applications utilizing rotary swaging processes for material joining.

Keywords

Blank Mechanical Properties, Copper-Aluminum Tubes, Rotary Swaging Connection, Connection Strength

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/

1. 引言

在现代工业制造中,金属管材的连接技术是工程应用中的关键环节之一。随着科学技术的快速发展, 铜铝管凭借其出色的导热、导电性能以及耐腐蚀特性,在制冷、空调、汽车制造及航空航天等多个领域 得到了广泛应用[1]。早期的铜铝管连接技术主要采用焊接和钎焊的方法,焊接技术虽然可以实现铜铝管 的高强度结合,但其热影响区较大,且容易引发裂纹和变形等问题[2]。

近年来,很多研究者将目光转向利用塑性变形进行材料连接。Mori 等[3]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 [4]利用局部塑性失稳连接工艺对薄壁管件进行了连接; Haiyan Yu 等[5]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。与传统的焊接或钎焊相比,采用塑性变形法连接避免了热量输入,产生的热量极少,从而节省了 巨大的能源资源,消除了对材料的热影响。

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,而且可以很好的保证产品的成形 质量[11]。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,但并未研究连接强度的影响因素以及毛坯力学特性对连接强度的影响。

旋锻连接是一种新兴的固态连接技术,属于塑性变形连接方法的范畴。旋锻连接首先要保证的就 是连接的可靠性,也就是连接强度。毛坯作为旋锻过程中首要的一环,也是非常重要的一环,旋锻连 接过程中,毛坯的力学特性对旋锻连接强度的影响尚未得到充分研究。本文通过分析旋锻连接的连接 机理,研究毛坯力学特性对铜铝管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 到毛坯力学特性影响最终的连接强度,并通过有限元仿真分析毛坯力学特性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技术和理论 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, 分析旋锻连接的连接机理, 研究 毛坯力学特性对连接强度的影响。



 Figure 1. Model diagram of rotary forging connection

 图 1. 旋锻连接模型图

本文采用的内外连接管材料为 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. Chemical Composition of 6061Al (%, mass fraction)

 表 1. 6061Al 化学成分(%, 质量分数)

Cu + Ag	Bi	Sb	Fe	Ni	Pb	Sn	S	0	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. Chemical Composition of pure copper E-Cu58 (%, 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 parameters

表 3.	材料	रज	参致
表 3.	材料	रज	参致

	外管(Cu)	内管(Al)
外径(mm)	8	6
内径(mm)	6	4
壁厚(mm)	1	1
长度(mm)	50	50

本文通过分析旋锻连接的连接机理,研究毛坯力学特性对铜铝管旋锻连接强度的影响。通过理论分 析和仿真相结合,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,并理论研究毛 坯力学特性对连接强度的影响。

(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;分析旋锻连接机 理,验证理论研究的正确性。

(3) 对不同毛坯硬度下的铜铝管进行旋锻连接仿真分析,并对旋锻后的模型进行拉伸试验模拟仿真, 分析力学特性变化对连接强度的影响。

3. 结果与分析

3.1. 旋锻连接理论研究

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沿模具型线成形。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,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:毛坯、模具和进给参数。其中毛坯是进行生产加工的第一 步,也是最重要的一步,毛坯的选择和匹配直接影响到旋锻过程,毛坯力学特性不合理或变化过大可能 导致旋锻加工困难、成型质量下降、设备损耗加剧、工艺调整困难等不良影响。因此本文主要研究毛坯 力学特性对连接强度的影响。

毛坯力学特性(如硬度、屈服强度等)变化会对旋锻连接强度产生影响。在旋锻加工过程中,随着坯料 的变形会产生加工硬化,即毛坯的强度、硬度上升,塑性下降。铜和铝的硬度差异较大,旋锻连接过程 中也需要合理匹配两者的硬度。如果硬度偏差过大,可能导致接触区域的变形不均匀,影响最终的连接 强度。硬度较高的毛坯需要更大的旋锻力才能实现变形,这可能导致局部应力集中,甚至在连接区域产 生裂纹。相反,硬度较低的毛坯虽然更容易变形,但可能会因为材料强度不足影响连接的可靠性。力学 特性偏差还会影响连接区域的微观组织结构,硬度较高的材料在旋锻过程中可能会发生更显著的晶粒细 化,从而提高局部强度,但也可能降低韧性。总而言之,毛坯力学特性对铜铝管旋锻连接的连接强度有 显著影响,需要通过合理的设计和工艺优化来确保连接的可靠性和强度。

3.2. 毛坯力学特性范围确定

在进行铜铝管旋锻连接研究之前,需先确定毛坯的力学特性范围。硬度是材料局部抵抗变形的能力, 对于旋锻工艺的研究一般都会重点考虑毛坯硬度的影响,因此本文用硬度代表力学特性。毛坯硬度过低 不利于成形,也会影响产品的连接强度;硬度过高不仅导致需要的更大锻打力,并且会造成坯料与模具 的损伤。由旋锻连接机理可知旋锻过程中,坯料不断地受到锻打,塑性变形量不断增加,导致加工硬化 强度也越来越大,毛坯的初始硬度如果过高会导致其可旋锻能力降低。旋锻毛坯硬度要求如图2所示。

在图 2 中, A 区域的毛坯硬度小于 185 HB, 在这个区域下的毛坯硬度适合旋锻; B 区域的毛坯硬度 在 185~230 HB 之间,此硬度区间下的毛坯进行旋锻容易发生设备事故; C 区毛坯硬度高于 230 HB,则 不能采用旋锻工艺成形。因此旋锻的毛坯硬度一般在 185 HB 以下。除此之外,毛坯范围还受到材料本身 的约束,根据相关标准,本文所选空调铜铝管的毛坯硬度范围如表 4 所示。

由此可知铜铝管毛坯硬度较为适合旋锻加工,满足旋锻加工要求。本文以铜铝管最低硬度确定以20 HB为间隔,选择铜管80HB、100HB、120HB硬度、铝管70HB、90HB、110HB硬度,用交互作用 分析法将不同硬度进行组合,设计全因子试验方案,整体研究铜铝管毛坯硬度对旋锻连接强度的影响。 全因子试验设计方案如表5所示。

为了仿真输入,需要知道不同硬度下的毛坯材料应力应变曲线。硬度与屈服强度之间存在一定的



Figure 2. Relation between rotary forging capacity and blank hardness 图 2. 旋锻能力与毛坯硬度关系

Table 4. Material hardness range 表 4. 材料硬度范围

	外管(Cu)	内管(Al)
最低硬度(HB)	80	70
最高硬度(HB)	120	110

 Table 5. Design scheme of blank hardness full factor test

 表 5. 毛坯硬度全因子试验设计方案

6061Al (HB) E-Cu58 (HB)	80	100	120
70	方案一 70/80	方案二 70/100	方案三 70/120
90	方案四 90/80	方案五 90/100	方案六 90/120
110	方案七110/80	方案八 110/100	方案九 110/120

相关性,常用的经验公式如下:

$\sigma = k \cdot HB$

其中, k 为经验系数, 对于大多数金属而言 k 的取值范围一般为 3.3~3.6 (MPa/N/mm²),本文铜铝管旋锻 连接中经验系数取值 k = 3.45,纯铜材料屈强比取 0.68,6061Al 屈强比取 0.78。由此可以获得铜铝管不 同硬度下的材料屈服强度与抗拉强度,如表 6 和表 7。

不同硬度下材料纯铜 E-Cu58 和 6061Al 的真实应力应变曲线如图 3 和图 4 所示。

毛坯硬度(HB)	屈服极限(MPa)	强度极限(MPa)
80	276	405
100	345	507
120	414	608

 Table 6. Different blank hardness values of copper pipes and their corresponding strengths

 表 6. 铜管不同毛坯硬度值及其所对应强度

 Table 7. Different blank hardness values of aluminum tubes and their corresponding strengths

 表 7. 铝管不同毛坯硬度值及其所对应强度

毛坯硬度(HB)	屈服极限(MPa)	强度极限(MPa)
70	241	308
90	310	397
110	380	487



Figure 3. Stress-strain curves of E-Cu58 under different hardness 图 3. 不同硬度下 E-Cu58 的应力应变曲线

3.3. 旋锻连接仿真研究

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 5 所示。温度设置为 25℃,外管单元数为 125,125,内管单元数为 69,321。

导入毛坯材料的应力应变曲线,设置径向进给量为 0.8 mm 进行旋锻连接仿真[13],为了研究连接过 程中的塑性变形和金属流动行为,研究了锻件区域的速度和应力应变分布。图 6 显示了旋锻连接管上的 速度分布,在模具的中心线附近,金属沿径向流动,而远离中心线的金属沿轴向流动。由于金属流动, 管件发生径向颈缩,从而形成弧形接头,这就是两根管件能够连接在一起的原因。



Figure 4. Stress-strain curves of 6061Al under different hardness 图 4. 不同硬度下 6061Al 的应力应变曲线



Figure 5. Simulation model of rotary forging connection 图 5. 旋锻连接仿真模型



Figure 6. Velocity distribution of rotary forging connected pipe 图 6. 旋锻连接管速度分布

图 7 显示了铜铝管旋锻后的应力和应变分布。在锻造区域,等效应力和等效应变均达到最高,因为 管件在锻造区域发生的塑性变形最严重。最大等效应力发生在外管上;最大等效应变发生在内管上。



Figure 7. Rotary swaging after the stress and strain. (a) Stress; (b) strain 图 7. 旋锻后的应力应变。(a) 应力; (b) 应变

对表中不同方案进行旋锻连接仿真,并将旋锻连接后的应力应变数据整合处理,得到旋锻连接应力 应变随铜铝管毛坯硬度的变化曲线如图 8 所示。



Figure 8. Stress-strain curve with the hardness of copper-aluminum tube blank 图 8. 应力应变随铜铝管毛坯硬度的变化曲线

由图 8 可以看出旋锻连接后的应力和应变随铜铝管毛坯硬度的变化趋势基本相当,随着铜铝管硬度的增加,旋锻连接后产生的应力应变随之增加。九种方案中,方案一的铜铝管硬度最小,应力应变也最小,最小应力为 381 MPa,应变为 0.124; 方案九的铜铝管硬度最大,应力应变也最大,最大应力为 559 MPa,应变为 0.733。

对比方案一四七、二五八和三六九发现,铝管硬度的变化对应力应变的影响相对较小,增加的趋势 相对不明显;而对比方案一二三、四五六和七八九发现,铜管硬度的变化对应力应变的影响更敏感,增 幅趋势比较明显,这是由于最大应力出现在铜管上,也是因为在旋锻连接时铜管与模具直接接触锻打导 致的。

为了研究毛坯硬度超出材料自身能力约束后对旋锻连接应力应变的影响,额外选择铜管硬度 140 HB、 铝管硬度 130 HB 进行旋锻连接仿真,仿真结果如图 9 所示。





(b)

Figure 9. Stress and defects of downward rotary forging with copper 140 HB and aluminum 130 HB hardness. (a) Stress; (b) defects

图 9. 铜 140 HB、铝 130 HB 硬度下旋锻的应力和缺陷。(a) 应力;(b) 缺陷

由图发现,虽然旋锻连接后的应力依然很大,但放大中间的锻打部分如图 9(b)所示,发现此时铜铝管的内部已经出现裂痕。这可能是因为毛坯硬度超出材料自身约束,使得坯料塑性变形所需的锻打力过大,由于硬度过大,在旋锻过程中出现局部应力集中导致的。

综上所述,在自身材料约束范围内,旋锻连接后产生的应力应变与铜铝管毛坯硬度呈正相关,且为 非线性。当硬度超出极限时,旋锻后的应力应变仍在增加,但此时已经出现细微的旋锻缺陷。

3.4. 拉伸试验模拟仿真研究

为了更直观地研究毛坯力学特性对旋锻连接强度的影响,对旋锻后的管件进行拉伸试验模拟仿真,如图 10 所示,对管件两头设置夹具,夹具一端固定,另一端延 X 轴负向拉伸,拉伸距离设置为 5 mm,内外管之间的摩擦因数设置为 0.2,得到旋锻连接管的拉伸载荷变化如图 11 所示。



Figure 10. Setting diagram of tensile test simulation 图 10. 拉伸试验仿真模拟设置图



Figure 11. Variation of tensile load of rotary forging connected pipe 图 11. 旋锻连接管的拉伸载荷变化

由图 11 可以看出, 拉伸载荷在开始的瞬间达到最大, 随着拉伸的进行载荷迅速降低, 这是由于锻打

后内外管件在界面处产生的附加焊接效应。用拉伸载荷作为评价连接强度的指标,对不同方案进行拉伸 试验模拟仿真得到的数据进行整合处理,得到拉伸载荷随毛坯硬度的变化曲线如图 12 所示。



Figure 12. Variation curve of tensile load under different hardness combinations 图 12. 不同硬度组合下的拉伸载荷变化曲线

由图 12 可以看出旋锻连接强度随铜铝管毛坯硬度的变化趋势与应力应变基本相当,旋锻连接强度随 铜铝管毛坯硬度的增加而增加。九种方案里面,方案一的铜铝管硬度最小,连接强度也最小,最小拉伸 载荷为 1943 N;方案九的铜铝管硬度最大,连接强度也最大,最大拉伸载荷为 3500 N。

对比方案一四七、二五八和三六九发现,铝管硬度的变化对旋锻连接强度的影响相对较小,增加的 趋势相对不明显;而对比方案一二三、四五六和七八九发现,铜管硬度的变化对连接强度的影响更敏感, 增幅趋势比较明显,这也是由于在旋锻连接时铜管与模具直接接触锻打导致的。

为了研究毛坯硬度超出材料自身能力约束后对旋锻连接强度的影响,对铜管硬度 140 HB、铝管硬度 130 HB 旋锻连接后的模型进行拉伸试验模拟仿真,仿真结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出,随着拉伸试验模拟仿真的进行,铝管逐渐被拉断。这是由于毛坯硬度超出材料能 力范围,在旋锻时所需的旋锻力过大,迫使材料发生塑性变形,导致铜铝管旋锻连接时已经出现细微缺 陷,以至于在进行拉伸时无法承受使其变形所需的拉伸载荷而断裂。

综上所述,在自身材料约束范围内,旋锻连接强度与铜铝管毛坯硬度呈正相关,且为非线性。当硬 度超出极限时,可能导致旋锻连接缺陷产生,从而降低连接强度。因此,在保证旋锻连接强度的同时, 需要合理匹配毛坯力学特性范围,避免旋锻连接缺陷的产生。

4. 结论

本文通过分析旋锻连接的连接机理,研究毛坯力学特性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:



Figure 13. Tensile results of copper 140 HB and aluminum 130 HB hardness under rotary forging 图 13. 铜 140 HB、铝 130 HB 硬度下旋锻拉伸结果

(1) 理论研究表明,旋锻连接的连接强度主要通过坯料塑性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,毛坯力学特性通过影响塑性变形程度进而影响旋锻连接强度。

(2) 在锻造区域,等效应力和等效应变均达到最高,铜铝管在锻造区域发生的塑性变形最为严重。外 管受到的应力普遍大于内管,而内管的变形普遍大于外管。

(3) 在自身材料约束范围内,旋锻连接后产生的应力应变与铜铝管毛坯硬度呈正相关,且为非线性。

(4) 在材料约束范围内,旋锻连接强度和力学特性呈正相关,且为非线性。当硬度超出材料能力极限,可能导致旋锻连接缺陷产生,降低连接强度。

参考文献

- [1] 赵越, 黄聿川, 左铁军. 实现铝代铜是制冷行业发展的必然趋势[J]. 家电科技, 2007, 237(9): 35-37.
- [2] 朱恒铸. 铜铝管联接的两种方法[J]. 家用电器, 2000(7): 10.
- [3] 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
- [4] 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. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.047</u>
- [5] 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
- [6] 周大隽. 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,编著. 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] Zhang, Q., Jin, K. and Mu, D. (2014) Tube/Tube Joining Technology by Using Rotary Swaging Forming Method. Journal of Materials Processing Technology, 214, 2085-2094. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.002</u>