

钛合金型材热张力矫形过程温度均匀性控制研究

冯红超, 代 春, 徐 哲, 张少丹

(宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘 要: 钛合金型材截面形状复杂, 热挤压后由于截面各处散热不均, 易产生扭拧、弯曲等形状缺陷, 矫形难度大。热张力矫形是实现钛合金型材矫形的最有效方式, 而矫形过程中型材温度的均匀性控制是实现高精度矫形的关键。以 TA15 钛合金薄壁锐角 L 型材为研究对象, 研究了加热及冷却过程中型材截面各处温度的分布规律。结果表明, 钛合金型材热张力矫形时, 加热过程中随着加热温度的升高, 型材头部、中部、尾部的温差逐渐增大, 中部温度高于两端, 加热至设定温度 700 °C 时温差达 50 °C。冷却过程中, 型材同一截面其边部温降较角部快, 最高温差达 100 °C, 随着冷却温度的降低, 这种温差逐渐减小。在钛合金型材热张力矫形时, 加热到设定温度后持续通电约 2 min, 冷却过程中用石棉布包裹型材可有效提高温度的均匀性, 实现高精度矫形。

关键词: 钛合金型材; 热张力矫形; 温度均匀性

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)04-038-04

Research on Temperature Uniformity Control of Titanium Alloy Profile in Thermal Tension Reshaping Process

Feng Hongchao, Dai Chun, Xu Zhe, Zhang Shaodan

(Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: The cross section of titanium alloy profile is complex. And after hot extrusion, due to uneven heat dissipation at different positions of the cross section, shape defects such as twisting and bending are prone to occur, making it difficult to reshape. Thermal tension reshaping is the most effective way to achieve reshaping of titanium alloy profiles, and the temperature uniformity control of profile is the key to achieving high-precision correction. Taking TA15 titanium alloy thin-walled acute angle L-shaped profile as the research object, the distribution law of temperature at different positions of the profile cross section during heating and cooling processes was studied. The results show that during the thermal tension reshaping of titanium alloy profile, the temperature difference between the head, middle, and tail of the profile gradually increases with the increase of heating temperature during the heating process. The temperature in the middle of profile is higher than that at both ends, and the temperature difference reaches 50 °C when heated to the set temperature of 700 °C. During the cooling process, the temperature at the edges of the same section of the profile decreases faster than at the corners, with a maximum temperature difference of 100 °C. As the cooling temperature decreases, the temperature difference gradually decreases. During the thermal tension reshaping of titanium alloy profiles, heating to the set temperature and continuously energizing for about 2 minutes, wrapping the profile with asbestos cloth during the cooling process can effectively improve temperature uniformity and achieve high-precision correction.

Key words: titanium alloy profile; thermal tension reshaping; temperature uniformity

钛合金型材是航空、航天等飞行器使用的关键结构

材料。美俄等国从 20 世纪 60 年代就开始进行钛合金型材试制, 其生产技术已十分成熟^[1]。国内航空用钛合金型材的生产尚处于起步阶段, 现阶段这类材料基本依赖进口。随着我国钛材加工技术的不断进步, 国内企业开展了 TC4、TA15、TC2 等多种钛合金型材的试

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB306200)

通信作者: 冯红超 (1977—), 男, 高级工程师。

制, 在挤压模具设计与制造、挤压-润滑、热处理、表面处理等方面取得了技术突破^[2], 但挤压后异型截面的钛合金型材强度高、回弹大、截面形状复杂, 弯曲、扭拧等外形缺陷的矫形难度非常大^[3-5]。这也是国产钛合金型材尚未实现航空领域批量应用的主要原因之一^[6]。

异型截面的钛合金型材挤压过程中, 不同部位的金属流动速度差异大, 热挤压后角部、边部等散热不均, 易造成弯曲、扭拧及角度波动等问题。尽管通过优化挤压模具结构参数可以改善挤压过程中金属流动的均匀性, 减少由于散热不均产生内应力进而引起的外形偏差, 但仍无法彻底消除扭拧、弯曲等问题^[5], 因此挤压后的型材需要进行矫形处理。宝鸡钛业股份有限公司曾采用三点弯曲的压力矫直方法进行钛合金型材的矫形工艺研究, 但由于温度均匀性控制难度大、型材截面各处回弹存在差异、变形协调性差等原因, 存在矫形精度不高、效率低、型材长度受限等问题^[7-9], 特别是该工艺方法对型材扭拧的矫形效果很不理想。因此, 压力矫直方法仅适用于截面简单且长度较短的钛合金型材矫形, 无法满足工程化批量生产。为满足钛合金型材的工程化生产, 宝鸡钛业股份有限公司于 2022 年自主设计并制造出低电压高电流的电接触自阻加热钛合金型材专用矫形设备。该设备实现了型材在线电接触自阻加热, 加热速度快、温控精度高、均匀性好, 夹持端可 360°自由旋转, 能够全方位精确控制型材在线加热、拉伸和扭转, 而且材料受氧、氢等气体污染少^[10-12]。

热张力矫形是在拉伸张力的作用下, 使型材各截面产生均匀的拉伸变形, 是实现钛合金型材矫形的最有效方式之一^[13]。利用型材专用矫形设备进行钛合金型材矫形时, 矫形设备自阻加热和冷却的同时, 型材自身也在与周围空气对流散热。由于型材截面为非对称分布, 即非圆形等厚截面, 故截面各处温度的均匀性差, 很难实现高精度矫形。因此, 矫形过程中型材截面温度的均匀性控制是实现高精度矫形的关键因素。

为保证钛合金型材矫形过程温度的均匀性, 以 TA15 钛合金薄壁锐角 L 型材为研究对象, 利用型材热张力矫形设备, 开展了型材矫形过程中温度分布规律的研究, 揭示了热张力矫形加热过程型材头部、中部、尾部各处的温度分布以及冷却过程截面各处的温度分布规律, 提出了型材热张力矫形过程温度均匀性控制的措施, 为实现钛合金型材的高精度矫形提供了有力支撑。

1 实 验

实验材料为采用热挤压成型的 TA15 钛合金薄壁

锐角 L 型材, 截面尺寸见图 1。该型材不等边、不等厚、角度非直角, 为典型非对称截面。

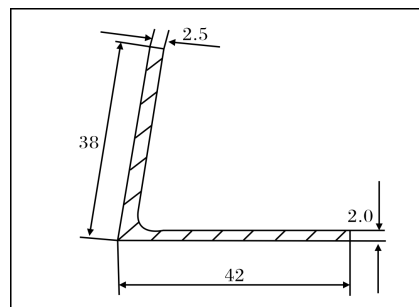


图1 钛合金型材截面尺寸

Fig.1 Section dimensions of titanium alloy profile

热挤压后的钛合金型材实物照片见图 2。从图 2 可见, 型材扭拧、弯曲等外形缺陷较为明显。型材长度为 4000 mm, 经热处理后装配于型材专用矫形机上, 施加一定预张力, 通电自阻加热, 加热过程中型材始终处于张力拉伸状态, 利用矫形机上的红外测温装置实时测量型材头部温度, 当温度升至设定温度后, 断电冷却。加热过程中利用便携式红外测温仪每隔 2 min 对型材头部、中部、尾部温度进行同步实时测量并记录。为保证测量温度的可对比性, 实验前利用便携式红外测温仪和矫形机红外测温装置进行同点测温对比, 在室温到 1000 °C 的范围内, 二者测温差在 0.8 °C 以内。

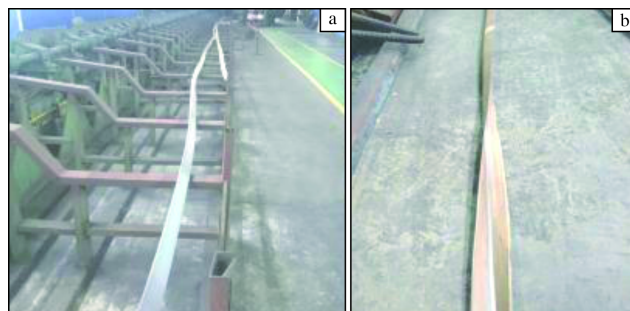


图2 挤压后钛合金型材照片

Fig.2 Photos of extruded titanium alloy profiles: (a) bend; (b) twist

2 结果与分析

2.1 加热过程沿长度方向温度分布

图 3 为钛合金型材通电加热至设定温度过程中, 型材头、中、尾各部位实时温度的测量结果。由图 3 可见, 整个加热过程中, 前 15 min 型材温升速率较快, 约为 80 °C/min, 当温度达到 550 °C 左右时, 温升速率明显降低。整个加热过程中, 型材头部、中部、尾部温度差异并不大, 头部和尾部基本一致, 中

部温度稍高于两端，且加热温度越高，这种差异越明显，加热到设定温度 700℃时，温差约 50℃。这种温差主要是由于型材两端是通过夹持钳口与机架相连，加热的型材与常温下的机架存在较大温度差，热传导损失了部分热量，加热温度越高，型材与机架间的温度梯度也就越大，热传导越显著。

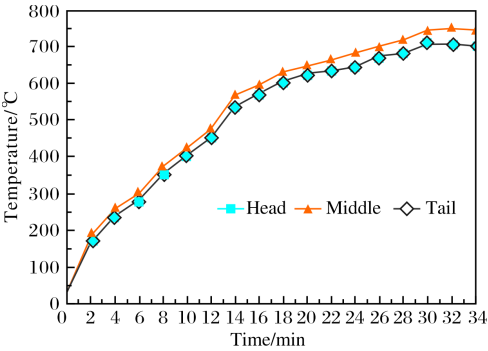


图 3 加热过程中钛合金型材不同位置的实时温度
Fig.3 Real time temperature at different positions of titanium alloy profile during heating process

TA15 钛合金型材采用电接触自阻加热方式，升温过程中型材不同部位的温度差异较小。随着加热温度的升高，型材中部温度高于尾部，当加热至设置温度 700℃时温差最大，约为 50℃。

2.2 冷却过程截面各处温度分布

型材加热到设定温度，完成矫形后断电自然冷却。异形截面的型材由于结构的特殊性，同截面上各部位冷却效率差异较大。温度不均易在材料内部产生较大的残余内应力，导致型材二次弯曲，因而温度均匀性控制尤为重要。为探究冷却过程型材截面各处温度的分布情况，在型材冷却过程中对其截面各点的温度进行实时测量，温度检测点示意图见图 4，测量结果见图 5。由图 5 可见，冷却过程中钛合金型材角部（A 点）温度相对中部（B 点）和边部（C 点）温度偏高；型材温度冷却至 500℃左右时，各点温差达到最大值，角

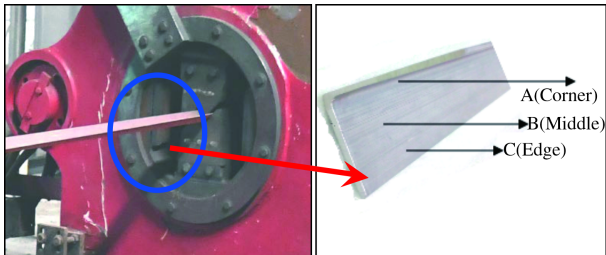


图 4 钛合金型材截面温度检测点示意图
Fig.4 Temperature measurement points at cross section of titanium alloy profile

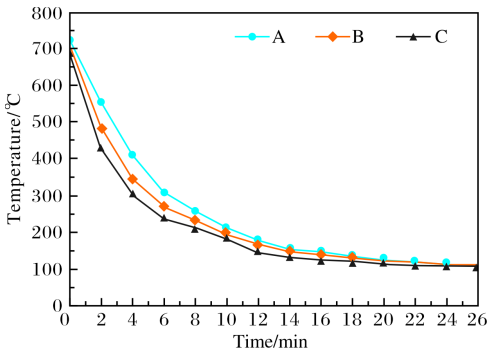


图 5 冷却过程中钛合金型材截面不同位置的实时温度
Fig.5 Real time temperature at cross section of titanium alloy profile during cooling process

部（A 点）较边部（C 点）的温度高出约 100℃。由此可见，在钛合金型材冷却过程中，截面各处温度差异较大，这种温差将会造成型材各处的张力变形不均匀，矫形后易产生不均匀的残余内应力，在张力卸载后易出现二次弯曲，严重影响矫形精度。导致出现这种温差的主要原因是 L 型材的角部（A 点）为夹角区，此处材料厚度大、热阻高，依靠空气对流的散热效率相对较低，而边部（C 点）与周围空气对流充分，散热效率高。

3 改进措施及效果

3.1 加热过程温度均匀性控制

为保证钛合金型材热张力矫形加热过程温度均匀性，当加热温度达到设定温度 700℃后，分别保持通电 1、2、3、4 min，随后对型材头部、中部和尾部的温度进行测量，结果见表 1。

表 1 不同持续通电时间下钛合金型材各部位的温度（℃）
Table 1 Temperature of different positions of titanium alloy profile under different continuous power on time

Position	Power on time/min				
	0	1	2	3	4
Head	700	700	702	703	701
Middle	743	735	711	716	711
Tail	703	705	706	709	705
Temperature difference	43	35	9	13	10

由表 1 可见，当型材加热到设定温度 700℃后，头、中、尾部温度存在较大差异。持续通电 1 min 后，温差略有减小，为 35℃；通电 2 min 后温差减小到 9℃；继续保持通电，温差不再减小。这是由于在对型材通电加热的同时，其自身也在散热，形成了一种动

态平衡。为使型材矫形过程中各段温度均匀, 实现均匀变形, 矫形加热温度不宜过高; 加热到设定温度后应继续保持通电一段时间, 以保证型材各段温度的均匀性。以上结果表明, 型材自阻加热到设定温度后, 持续通电 2 min 左右时, 型材头、中、尾部温差最小, 温度均匀性好。

3.2 冷却过程温度均匀性控制

要保证型材矫形后冷却过程中温度均匀, 需采取措施以减小由于截面各处散热不均而引起的温差。为此, 在型材降温过程中采用耐热石棉布对整个型材进行包裹后(见图 6), 任意选取型材中间部位某一截面, 按照图 4 对型材角部(A点)、中部(B点)、边部(C点)的温度进行实时测量, 测量时间间隔为 2 min, 结果见图 7。



图6 冷却过程中采用石棉布包裹型材

Fig.6 Titanium alloy profile wrapped with asbestos cloth during cooling process

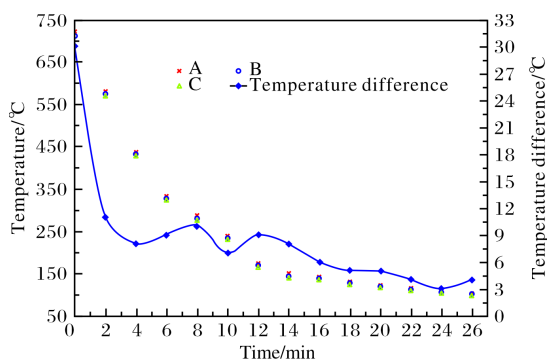


图7 石棉布包裹后冷却过程中钛合金型材截面不同位置的实时温度

Fig.7 Real time temperature at cross section of titanium alloy profile wrapped with asbestos cloth during cooling process

由图 7 可见, 钛合金型材热张力矫形冷却过程中采用石棉布包裹后, 整个冷却过程中型材截面各处的温度基本一致。冷却前型材截面 3 个部位的温差高达 30 °C, 包裹后冷却过程中, 随着型材温度的降低, 温差逐渐减小, 前 2 min 温差较大, 最大为 11 °C, 16 min

后, 型材截面 3 个部位的温差小于 5 °C。该方法可有效消除由于异形截面结构差异引起温降不均的问题, 保证型材冷却过程中温度均匀一致性, 大幅减小型材内部的残余应力, 提高型材矫形效果。

4 结 论

(1) 钛合金型材热张力矫形自阻加热过程中, 头部、中部、尾部的温度存在差异, 中部温度较头部、尾部偏高, 头部、尾部温度基本一致。随着加热温度的升高, 中部与头部、尾部的温差呈增大趋势。

(2) 钛合金型材热张力矫形冷却过程中, 同一截面上角部冷速慢, 边部冷速最快, 在 500 °C 左右时最大温差可达 100 °C。

(3) 钛合金型材热张力矫形加热温度不宜过高, 到温后保持 2 min, 冷却过程采用石棉布包裹, 可有效降低截面温度差异, 温差可控制在 11 °C 以内。

参考文献 References

- [1] 王国宏, 宁兴龙. 俄罗斯钛合金型材和壁板挤压工艺的开发[J]. 钛工业进展, 1996(6): 9-14.
- [2] 马忠贤, 冯军宁, 胡志杰. 钛及钛合金型材研究进展[J]. 世界有色金属, 2016(24): 52-53.
- [3] 张明杰, 黄利军, 齐立春, 等. 钛合金薄壁型材热拉伸变形行为及本构模型建立[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 92-96.
- [4] 邓同生, 李尚, 卢娇, 等. 钛合金型材精密挤压技术国内外研究现状[J]. 锻压技术, 2018, 43(6): 1-9.
- [5] 张云鹏. 大曲率复杂钛合金零件成形工装设计研究[J]. 航空制造技术, 2013(16): 116-118.
- [6] 曹凤超, 曾元松, 刘宝胜, 等. 电流辅助钛合金 L 型材拉弯工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(9): 1437-1442.
- [7] 曹凤超, 曾元松, 刘宝胜, 等. TC4 钛合金 L 型材热拉伸变形本构方程研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(5): 132-140.
- [8] 郝新, 马志超, 郭洪飞, 等. 大型钛合金零件内加热超塑性成形模具设计[J]. 锻压技术, 2006, 31(3): 89-91.
- [9] 赵鹏, 吴为, 付雪松, 等. TC4 钛合金 L 型材高温弯曲蠕变的数值模拟研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(1): 211-216.
- [10] 尚建勤. 钛合金 TC1 整流内罩热成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2000, 45(2): 17-18.
- [11] 王玉庭. 钛合金电阻加热拉弯成形工艺研究[J]. 宇航材料工艺, 1986(2): 4-7.
- [12] 韩宝成, 应家骊. 钛合金电阻加热成形工艺[J]. 航空工艺技术, 1981(9): 5-6.
- [13] 邹子和. 钛合金型材的热挤压[J]. 稀有金属, 1987, 2(6): 12-15.