

小尺寸厚壁环形件轧制开裂机理探究

刘 君, 朱 林, 罗鸿飞, 李德军, 李泽东, 杨兴彪, 杨 旭

(四川德兰航空科技发展有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 为解决航空环形锻件轧制过程中经常出现的内、外径开裂缺陷问题, 首先, 对轧制开裂形貌及轧制过程进行了观察, 发现开裂基本上均匀分布在内径或外径面、内径开裂程度大于外径、开裂基本始于棱边并向轴向及径向扩展, 开裂类型基本为塑性开裂, 并且小尺寸厚壁环形件开裂比例最大。而后, 侧重研究了小尺寸厚壁环形件的开裂机理, 并根据小尺寸厚壁环形件的轧制过程特征, 建立了新的轧制成形几何模型。最后, 推导出了适合于工程应用的内径轧制量表达式。为小尺寸厚壁环形件轧制开裂的分析及控制提供了内径轧制量的定量分析依据, 也为轧制参数制订提供了理论支撑。

关键词: 小尺寸壁厚环形件; 环轧; 开裂; 内径轧制量; 轧制几何模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.017

中图分类号: TG335; V261.3⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2025) 06-0141-04

Exploring of rolling cracking mechanism for small-sized thick-walled ring pieces

Liu Jun, Zhu Lin, Luo Hongfei, Li Dejun, Li Zedong, Yang Xingbiao, Yang Xu

(GATD-Sichuan Delan Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: In order to solve the problem of inner and outer diameter cracking defects that often occurred in the rolling process of aviation ring forgings, first of all, the rolling cracking morphology and the rolling process were observed, and it was found that the cracking was basically evenly distributed on the inner or outer diameter surface, the inner diameter cracking degree was greater than the outer diameter, the cracking basically started from the edges and extended in the axial and radial directions, the cracking type was basically plastic cracking, and the proportion of cracking for small-sized thick-walled ring pieces was the highest. Then, the cracking mechanism of small-sized thick-walled ring pieces was studied in detail, and based on the rolling process characteristics of small-sized thick-walled ring pieces, a new rolling forming geometric model was established. Finally, an expression for the inner diameter rolling amount suitable for engineering applications was derived, which provides a quantitative basis for the inner diameter rolling amount to analyze and control the rolling cracking of small-sized thick-walled ring pieces, and also provides theoretical support for the formulation of rolling parameters.

Key words: small-sized thick-walled ring pieces; ring rolling; cracking; inner diameter rolling amount; rolling geometric model

环轧是一种典型的轧制成形工艺方法^[1-2], 并且与常规轧制存在极大的差异。环轧时, 主辊与芯辊直径不同; 常规轧制时, 两侧轧辊直径相同。环轧时, 锻件回转、连续成形, 并表现为扩径现象; 常规轧制时, 型材从轧机穿过, 并且不回转, 表现为长度方向伸长。环轧时, 主辊与芯辊间距持续减小; 常规轧制时, 两侧轧辊间距基本固定。

环轧的轧制变形特性, 致使环形锻件轧制成形工艺难度大于常规轧制, 并且需要在环轧过程中确保环形锻件的尺寸精度及形位公差^[3-7], 加之航空环形锻件材料难变形、易裂, 从而导致航空环形锻

件轧制工艺^[8-10]难度大。

实际生产过程中, 航空环形锻件轧制开裂频繁发生, 严重影响产品质量、制造成本、生产效率。常规解决开裂的方法有: 缩短轧制时间、减小轧制量、对环形件增加保护 (如轧制专用玻璃润滑剂、软硬包套工艺方法), 这些方法均在易裂材料环形锻件轧制生产中得到广泛应用并有一定的抑制开裂效果, 但不能彻底解决环形件开裂问题。为此, 需要探索新的抑制易裂材料轧制开裂的控制措施。

1 环形件开裂调查及分析

通过观察现场环形件轧制开裂形貌 (图 1), 可以发现如下特征。

(1) 内径开裂程度大于外径。这是由于芯辊直

收稿日期: 2024-07-08; 修订日期: 2024-10-10

作者简介: 刘 君 (1982-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: liujun5268@sina.com



图 1 环形件轧制开裂形貌

Fig. 1 Rolling cracking morphology of ring piece

径小于主辊直径、内径咬入角大于外径、内径轧制进给量大于外径以及内径轧制变形程度大于外径轧制变形程度导致的。

(2) 开裂基本上均匀分布在内径或外径面。这是因为环轧在圆周方向是连续的, 并且圆周各点的受力、轧制状态基本一致, 某点处开裂说明环形件该处的塑性不足, 则圆周其余各点也会出现塑性不足的情况。

(3) 开裂基本始于棱边, 并向轴向及径向扩展, 轴向开裂长度大于径向开裂深度。这是因为棱边降温幅度最大, 塑性最差, 最易导致开裂, 随着棱边开裂, 将顺势沿径向及轴向延展。

(4) 径向开裂方向基本上与开裂处圆弧法线方向呈 45° 。

(5) 高温合金、钛合金易裂, 特别是 GH4698、GH141、GH738、GH4169D 和 718Plus 高温合金, 以及 TA7、TA12A 和 TA15 钛合金, 这些材料变形抗力大、锻造温度区间小、材料变形流动性差、塑性差, 为易于开裂材料。

通过对轧制过程进行仔细观察, 发现环形件轧制开裂的时机经常为咬入阶段末期或主轧制阶段前中期。环形件完成咬入后, 需要立即过渡至主轧制阶段, 但为了使环形件快速成形, 此时, 必然造成环形件长大速度的突变, 从而变现为瞬时轧制变形量突增, 内径轧制量偏大, 同时, 环形件经过咬入阶段, 内径温度下降, 导致环形件塑性降低, 从而使得环形件产生塑性开裂, 也即开裂的原因为轧制时环形件局部塑性差而未能满足轧制变形要求。

通过对现场开裂产品进行统计, 发现小尺寸厚壁环形件开裂比例超过 60%, 为此, 本文重点研究小尺寸厚壁环形件轧制几何模型, 从轧制成形理论上寻找开裂构成因素。

2 小尺寸厚壁环形件轧制模型

通常, 环形件制坯后, 坯料由实心圆柱体转变为空心圆柱体, 此时, 环形件内径小、壁厚大, 呈现为小尺寸厚壁的几何特征。根据小尺寸厚壁环形件轧制过程特征, 建立如图 2 所示的几何模型, 其中, R 为主辊半径, r 为芯辊半径, R_t 和 r_t 为 t 时刻的环形件外径和内径, α_1 为主辊咬入角, α_2 为芯辊咬入角, Δh_1 为外径轧制量, Δh_2 为内径轧制量, L_1 为外径轧制弧长, L_2 为内径轧制弧长。

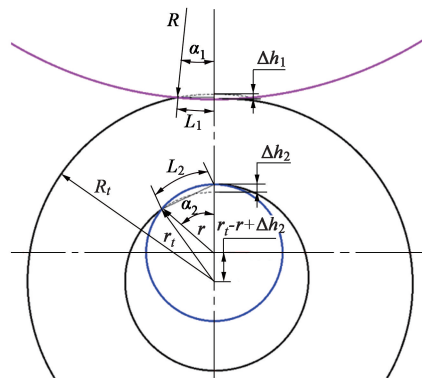


图 2 小尺寸厚壁环形件轧制几何模型

Fig. 2 Rolling geometric model of small-sized thick-walled ring piece

当环形件内径与芯辊内径差异较小时, 此时主辊咬入角 α_1 较小, 但芯辊咬入角 α_2 较大, 则根据三角形余弦定理可知:

$$\cos \alpha_1 = \frac{R^2 + (R_t + R - \Delta h_1)^2 - R_t^2}{2R(R_t + R - \Delta h_1)} \quad (1)$$

常规环轧轧制模型中, 当 α_1 较小时^[11-13], 可近似认为 $\alpha_1 \approx \frac{L_1}{R}$, 则:

$$\Delta h_1 = \frac{L_1^2}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_t} \right) = \frac{\alpha_1^2 R}{2} \left(1 + \frac{R}{R_t} \right) \quad (2)$$

同理可得:

$$\cos \alpha_2 = \frac{2(r_t - r)(r - \Delta h_2) - \Delta h_2^2}{2r(r_t - r + \Delta h_2)} \quad (3)$$

工程上, 芯辊规格按环坯内径减 10 mm 设计; 令 $r = r_t - 5$, 即采用与环形件内径相近的芯辊进行轧制。

$$\Delta h_2^2 + (10 + 2r \cos \alpha_2) \Delta h_2 - 10r(1 - \cos \alpha_2) = 0 \quad (4)$$

去掉负根, 则:

$$\Delta h_2 = \sqrt{r^2 (\cos \alpha_2)^2 + 10r + 25} - 5 - r \cos \alpha_2 \quad (5)$$

常规环轧轧制模型中的 α_2 通常较小，近似认为 $\alpha_2 \approx \frac{L_2}{r}$ ，则：

$$\Delta h_2 = \frac{L_2^2}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_i} \right) \tag{6}$$

通过比较式（5）和式（6），可以发现小尺寸厚壁环形件轧制模型与常规环轧轧制模型计算出的内径轧制量存在极大差异。

以工程应用为例，取 $\alpha_1 = 5^\circ$ 、 $\mu = 0.7$ ，根据摩擦角 $\beta = \tan^{-1} \mu$ 可得 $\beta = 34.99^\circ$ ，根据 $\beta \geq \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$ 可知， $\alpha_2 \leq 64.98^\circ$ ，取 $\alpha_2 = 64.98^\circ$ ，两种模型计算得到的内径轧制量如表 1 所示。

表 1 小尺寸厚壁环形件轧制模型与常规环轧轧制模型的内径轧制量对比（mm）

Table 1 Comparison of inner diameter rolling amount between small-sized thick-walled ring piece rolling model and conventional ring rolling model（mm）

r_i	r	内径轧制量 Δh_2	
		常规环轧轧制模型	小尺寸厚壁环形件轧制模型
45	40	0.397	4.75
50	45	0.402	4.90
55	50	0.406	5.03
60	55	0.410	5.15
65	60	0.413	5.25
70	65	0.415	5.34
75	70	0.417	5.41
80	75	0.419	5.48
85	80	0.421	5.55
90	85	0.422	5.61

由表 1 可知，小尺寸厚壁环形件采用与其内径相近的芯辊轧制时，内径单圈轧制进给量基本达到 5 mm，为常规环轧轧制模型计算值的 10 倍。对于易开裂材料而言，内径单圈 5 mm 的轧制进给量是偏大的，特别是当咬入时间过长，内径面降温严重，此时内径塑性降低，大轧制量时，环形件内径易裂。

3 结论

（1）通过仔细观察环形件内径面开裂形貌，定性分析认为，内径面轧制量大且伴随着内径面温降，导

致塑性降低，从而内径面开裂，开裂类型为塑性开裂。
（2）构建了小尺寸厚壁环形件轧制几何模型，推导出了内径轧制量的表达式，为小尺寸厚壁环形件轧制开裂提供了内径轧制量的定量分析依据，也为轧制参数制定提供了理论支撑。

参考文献：

[1] 李春天，黄欣. 环件轧制技术及其在国内的应用 [J]. 锻压装备与制造技术，2004（5）：8-13.
Li C T, Huang X. Ring rolling technology & its application domestic [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2004（5）：8-13.

[2] 华林，赵仲治，王华昌. 环件轧制原理和设计方法 [J]. 机械工程学报，1996，32（6）：66-70.
Hua L, Zhao Z Z, Wang H C. Principle and design method for ring rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 1996，32（6）：66-70.

[3] 华林，梅雪松，吴序堂. 环件轧制运动学规律和参数 [J]. 热加工工艺，1998，27（2）：20-22.
Hua L, Mei X S, Wu X T. On kinematical variables in ring rolling [J]. Hot Working Technology, 1998，27（2）：20-22.

[4] 华林，梅雪松，吴序堂. 环件轧制中的形状和精度 [J]. 汽车技术，1998（2）：30-32.
Hua L, Mei X S, Wu X T. Shape and precision in ring rolling [J]. Automobile Technology, 1998（2）：30-32.

[5] 华林，梅雪松，吴序堂. 环件轧制过程的稳定性 [J]. 重型机械，1999（3）：17-19.
Hua L, Mei X S, Wu X T. On process stability of ring rolling [J]. Heavy Machinery, 1999（3）：17-19.

[6] 朱春东，黄尚宇，张猛. 径向辗环过程尺寸控制的新方法 [J]. 锻压机械，1998，33（3）：29-31.
Zhu C D, Huang S Y, Zhang M. A new method to control ring-rolling deformation [J]. Metalforming Machinery, 1998，33（3）：29-31.

[7] 朱春东，黄尚宇. 径向辗环变形的数学模型与尺寸控制方式 [J]. 金属成形工艺，1997，15（5）：40-42，48.
Zhu C D, Huang S Y. Mathematical model of ring rolling deformation and controlling dimension method [J]. Metal Forming Technology, 1997，15（5）：40-42，48.

[8] 董晓传，吴润谋，姜玉洁，等. 2A14 铝合金环件轧制缺陷分析及工艺优化 [J]. 塑性工程学报，2022，29（6）：113-118.
Dong X C, Wu R M, Jiang Y J, et al. Rolling defects analysis and process optimization of 2A14 aluminum alloy ring part [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022，29（6）：113-118.

[9] 王龙祥，洪意飞，温彤. 异形环件轧制的表面流线缺陷分析与控制研究 [J]. 模具技术，2019（5）：1-6.
Wang L X, Hong Y F, Wen T. Analysis and control of surface streamline defect in rolling of irregular ring parts [J]. Die and Mould Technology, 2019（5）：1-6.

（下转第 152 页）