

## 基于数据统计的热轧环锻件余量设计方法

杨良会<sup>1</sup>, 谭仲刚<sup>2</sup>, 任乾光<sup>1</sup>, 龚必涛<sup>1</sup>, 杨家典<sup>1</sup>, 张 华<sup>1</sup>

(1. 贵州航宇科技发展股份有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州黎阳航空发动机有限公司, 贵州 贵阳 550014)

**摘要:** 合理的锻件余量设计, 可以减少新产品试制时的废品损失, 也可以减少金属材料的消耗与机加工成本。依据空间向量和算法, 提出一种全新的、基于数据统计的热轧环锻件余量设计方法。该算法将热轧环锻件几何方向的尺寸偏差及产品的表面缺陷视作空间几何向量, 这些向量的叠加产生热轧环锻件的最小机加工余量; 通过对生产线生产的产品进行测量和统计得到以上向量值, 代表了生产线具备的实际生产能力。依据正态分布的概率密度, 可预判产品最终尺寸的合格率。与以往的余量设计方法相比, 该余量设计方法是以生产线生产出的产品的数据为依据, 所设计的热轧环锻件余量更适合生产线的精度需求。该方法的应用可避免新产品试制时余量过大或过小, 有效减少新产品试制时的材料浪费或废品浪费, 也可用于其他如模锻、自由锻等产品。

**关键词:** 热轧; 环锻件; 加工余量; 新产品试制; 公差

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.018

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 09-0134-04

## Allowance design method of hot rolled ring forgings based on data statistics

Yang Lianghui<sup>1</sup>, Tan Zhonggang<sup>2</sup>, Ren Qianguang<sup>1</sup>, Gong Bitao<sup>1</sup>, Yang Jiadian<sup>1</sup>, Zhang Hua<sup>1</sup>

(1. Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

2. Guizhou Liyang Aero-engine Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

**Abstract:** Reasonable allowance design of forgings can reduce the loss of scrap during the trial production of new products as well as reduce the consumption of metal materials and machining cost. Therefore, according to spatial vector summation algorithm, a new allowance design method of hot rolled ring forgings based on data statistics was proposed, which regarded the size deviation in geometry direction of hot rolled ring forgings and the surface defect of product as the spatial geometry vector, and the summation of these vectors produced the minimum machining allowance of hot rolled ring forgings. Then, these vector values were obtained by the measurement and statistics of the products produced by the production line, representing the actual production capacity of the production line, and according to the probability density of normal distribution, the final size qualification rate of product could be predicted. Furthermore, compared with the existing allowance design method, this allowance design method was based on the product data produced by the production line, and the designed rolled ring forgings allowance was more suitable for the accuracy requirements of the production line. The results show that the application of this method can avoid the excessive or insufficient allowance during the trial production of new product and effectively reduce the material waste or scrap waste, which can also be used in other products such as die forging and free forging.

**Key words:** hot rolling; ring forgings; machining allowance; trial production of new product; allowance

环锻件轧制又称环锻件辗扩或扩孔, 是借助环锻件轧制设备轧环机 (又称辗扩机或扩孔机) 使环锻件壁厚减小、直径扩大和截面轮廓成形的一种塑性加工工艺<sup>[1]</sup>, 是一种投资小、成本低的先进制造技术, 在航空航天、石油化工、火车、船舶、汽车和原子能等许多工业领域都具有广泛的应用<sup>[2]</sup>。

加工余量大小直接影响零件的加工质量和生产率<sup>[3]</sup>。加工余量过大, 不仅增加机械加工劳动量, 降低生产率, 还会增加材料、工具和电力的消耗, 增加成本。但若加工余量过小, 又不能消除前工序的各种表面缺陷及加热污染层。因此, 合理地确定加工余量在实际生产中具有重大意义<sup>[4]</sup>。常用的确定锻件加工余量的方法有查表法、经验法和计算法<sup>[5]</sup>。

查表法是基于行业内出版的手册和标准等技术资料, 通过对行业内的生产水平进行调研给出符合行业生产水平的锻件余量, 通过查询这些资料确定锻件的加工余量, 之后通过锻件的实际生产情况进

收稿日期: 2024-01-09; 修订日期: 2024-04-16

作者简介: 杨良会 (1975-), 女, 学士, 高级工程师

E-mail: yanglianghui@gzhykj.net

通信作者: 谭仲刚 (1975-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 24381761@qq.com

行修正。这种方法方便、快速，应用广泛。但由于这些资料代表的是行业内大部分生产线所能达到的水平，因此，对具体的生产线而言，得到的加工余量通常容易偏大或偏小<sup>[6-7]</sup>。

经验法由一些有经验的工程技术人员或工人，根据经验确定加工余量的大小，该方法受主观影响较大。

计算法是通过确定影响加工余量的因素，并结合测量手段以及必要的统计分析资料，采用计算的方法确定加工余量。在掌握各种误差因素的前提下，可以准确计算加工余量。但目前行业内的公开出版物无计算法确定加工余量的详细描述。

本文以热轧环锻件为研究对象，提出了热轧环锻件余量计算公式并给出应用案例。本文所阐述的环锻件余量及公差的设计方法属于计算法，对影响加工余量的各种因素的数据进行收集和分析，通过计算确定环锻件加工余量及公差，依据正态分布的概率密度，可预判产品最终尺寸合格率。经验证，采用该方法设计的环锻件的加工余量合理，可以保证环锻件表面加热污染层缺陷及其他目视可见缺陷能被有效去除。与其他加工余量确定方法相比，该方法确定的加工余量既不会因为余量偏大而造成金属材料 and 后续机加工的浪费，也不会因为余量偏小而造成零件表面存在残留的污染层。由于污染层缺陷在后期无法检出，因此，该方法可避免产品在服役过程中因污染层残留而失效的风险，还可保证产品不至于因余量过小而报废。应用该方法设计热轧环锻件加工余量，在锻件设计初期即考虑锻件的精益生产，又减少了锻件工艺开发后期的精益工作，可有效降低新产品开发成本与周期。

## 1 环锻件加工余量构成因素

环锻件轧制毛坯在高温加热条件下会产生表面氧化、脱碳、合金元素蒸发或其他污染现象，从而导致环锻件表面层的力学性能不合格或产生其他缺陷<sup>[8-9]</sup>。因此，环锻件表面需要进行机械加工，以去除金属污染层和缺陷。环锻件中常见的构成锻件加工余量的因素有锻件的表面缺陷、形状误差、位置误差和机加工装夹误差等<sup>[10]</sup>。环锻件加工余量构成因素及公差见图1，其中， $\Delta Z$ 为环锻件单边加工余量。

### 1.1 表面质量

环锻件表面的裂纹、折叠、连皮、凹坑及加热

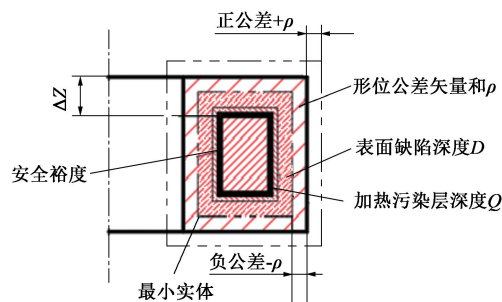


图1 环锻件加工余量的影响因素及公差

Fig. 1 Influence factors and tolerances for machining allowance of ring forgings

污染层应在机加工后去除，其深度与原材料表面缺陷及锻造、热处理工艺有关。其中，污染层深度 $Q$ 与锻件加热时间有关，是未做加热防护的锻件均会产生产生的缺陷。锻造过程中会产生如裂纹、折叠及凹陷等表面缺陷，但并非每件锻件均会产生这些表面缺陷，取在样本空间里出现频率最高的表面缺陷为研究对象，将其深度用 $D$ 表示。

### 1.2 形状公差

环锻件成形过程受坯料体积波动、操作者及设备等因素的影响，锻件实际尺寸与目标尺寸会产生误差，同时伴随着圆柱度、同轴度等误差，即环锻件的形状公差。环锻件尺寸的误差应保证最小有效尺寸在锻件公差范围内。锻件加工余量应保证在锻件尺寸处于下偏差时能去除锻件缺陷，圆柱度公差用 $\rho_1$ 表示，同轴度公差用 $\rho_2$ 表示。

### 1.3 位置公差

环锻件的垂直度偏差应在机加工后消除，一般由于该偏差方向并不与加工表面的垂直方向一致，故用向量 $\rho_3$ 表示。

### 1.4 机加工装夹误差

环锻件机加工时会发生定位误差与夹紧误差，会影响刀具与加工表面的位置从而使加工余量不够，因此，该项误差也应计入加工余量，用 $\varepsilon$ 表示。

## 2 锻件加工余量计算

### 2.1 加工余量计算方法

在坯料加热过程中，除非对坯料进行加热保护，否则坯料表层会产生加热污染层，例如，钢产品会产生脱碳层，高温合金产品会产生合金元素贫化层，钛合金产品会产生 $\alpha$ 层，污染层厚度与加热时间有关。环锻件的形状公差、位置公差和机加工装夹误差等会导致锻件加工余量不够。因此，这些公差应

计入加工余量中。影响环锻件加工余量的因素则可视为不同方向的矢量  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  等, 将各矢量求和, 矢量值加上污染层深度即可为环锻件加工余量, 考虑环锻件加工的装夹误差, 环锻件加工余量可用式 (1) 和式 (2) 计算<sup>[11]</sup>:

$$\Delta Z = Q + D + \rho + \varepsilon \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{|\rho_1|^2 + |\rho_2|^2 + |\rho_3|^2} \quad (2)$$

式中:  $\Delta Z$  为环锻件单边加工余量;  $Q$  为环锻件加热污染层深度;  $D$  为样本空间里出现频次最高的环锻件表面缺陷深度, 表面缺陷有表面裂纹、折叠及凹陷等;  $\rho_1$  为环锻件圆柱度形状公差矢量;  $\rho_2$  为同轴度形状公差矢量;  $\rho_3$  为环锻件垂直度等位置公差矢量;  $\varepsilon$  为对于环锻件的安装误差, 安装误差主要为装夹时的定位偏心, 依据环锻件大小及椭圆变形程度的差异, 一般为 0.3~0.5 mm。

实际生产中, 由于环锻件生产用坯料的下料重量偏差、材料加热烧损、冲芯料重量偏差和热处理时材料体积的变化等因素, 推荐计算出的设计余量应加上 1.0~1.5 mm 的安全裕度。该方法以环锻件内外径表面为研究对象, 所确定的加工余量可用于环锻件内外径表面, 环锻件端面余量可使用该加工余量, 也可使用该方法统计相关数据计算确定。

## 2.2 依据正态分布确定锻件加工余量

企业可依据经验, 将产品直径分为不同区间, 如外径小于  $\Phi 500$  mm 为一个区间,  $\Phi 500 \sim \Phi 1000$  mm 为一个区间, 以生产线的产品为研究对象, 测量影响锻件加工余量的缺陷和形位公差等, 首先计算出平均值和标准差, 依据正态分布密度函数表达式, 取平均值加 3 倍的标准差, 所确定的环锻件加工余量可保证 99.7% 的产品能正常加工<sup>[12]</sup>。

对于表面缺陷深度  $D$  值, 取每件产品缺陷的深度最大值, 且样本空间不低于 50 个 (分析结果过少则与实际偏差大), 取平均值加 3 倍的标准差确定  $D$  值。

对于加热污染层深度  $Q$  值, 因为材料、加热方式以及加热时间不同, 加热污染层深度不同, 因此,  $Q$  值需视具体情况而定, 但如果坯料表面喷涂玻璃润滑剂, 污染层深度就会得到非常好的控制。除非过烧, 正常加热的污染层, 达到一定深度时将不再增加。具体值可查询相关资料确定, 污染层深度取该材料该加热模式下的最大值。

对于形位公差矢量和  $\rho$  值, 测量每件产品形位

公差求矢量和, 且样本空间不低于 50 个, 取样本矢量和的平均值加 3 倍的标准差确定  $\rho$  值。

统计影响环锻件加工余量的相关因素并按式 (1) 和式 (2) 计算, 可确定环锻件加工余量。

## 3 锻件公差

实际环锻件轧制生产中, 由于轧制温度、压力和速度的波动, 轧制孔型和轧制设备状态的变化以及工人操作水平的不同, 尤其是轧制用毛坯重量的误差, 轧制的环锻件的实际尺寸不可能等于其公称尺寸, 应允许两者之间存在一定的误差, 这个误差称为轧制公差<sup>[13]</sup>。环锻件实际尺寸大于公称尺寸的部分称为正公差, 小于公称尺寸的部分称为负公差。环锻件公差下限的选取必须确保环锻件表面所有缺陷, 包括污染层被彻底去除。从式 (1) 可以看出, 环锻件加工余量主要由环锻件表面缺陷深度与各项形位公差的向量和构成, 环锻件的最小实体尺寸必须保证去除表面缺陷与加热污染层, 因此, 环锻件公差应为  $\pm\rho$ , 见式 (2), 也可以简单取为加工余量的 0.33~0.50 倍。

以某生产线生产的钛合金热轧环锻件为例, 取一个尺寸范围的 100 件产品进行测量, 加热污染层最大深度为 0.6 mm; 变形裂纹为出现频率最高、深度最大的表面缺陷, 锻件表面变形裂纹的平均深度为 0.8 mm, 其 3 倍的标准差为 0.4 mm; 平均壁厚差为 3.0 mm, 其 3 倍的标准差为 0.7 mm; 平均圆柱度为 2.0 mm, 其 3 倍的标准差为 0.4 mm; 环锻件端面与外径平均垂直度为 1.5 mm, 其 3 倍的标准差为 0.5 mm。取机加工装夹误差为 0.4 mm, 依据式 (1) 和式 (2), 该类钛合金热轧环锻件的加工余量计算如下:

$$\Delta Z = 0.6 + (0.8 + 0.4) + \rho + 0.4 = 2.2 + \rho \quad (3)$$

$$\rho = \sqrt{(3.0 + 0.7)^2 + (2.0 + 0.4)^2 + (1.5 + 0.5)^2} \quad (4)$$

经计算,  $\rho = 4.8$ , 考虑加上 1.5 mm 的安全裕度, 最终该类钛合金环锻件的设计余量确定为:

$$\Delta Z = 2.2 + 4.8 + 1.5 = 8.8 \text{ mm} \quad (5)$$

公差为  $\pm\rho$ , 即  $\pm 4.8$  mm。

## 4 结语

通过对影响环锻件设计余量的因素进行分析可



知,环锻件的表面缺陷深度、加热污染层深度、形位公差以及后续机加工装夹误差等构成了影响环锻件加工余量的因素。企业可以采用统计方法,精确计算出不同材料类别、不同生产线的环轧产品需要的加工余量,可有效避免环锻件新产品试制时加工余量偏大或偏小的状况,提高新产品一次投产合格率,降低新产品工艺开发成本。该方法在其他类型产品上也可应用。

#### 参考文献:

- [1] 华林,黄兴高,朱春东,等. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2001.  
Hua L, Huang X G, Zhu C D, et al. Theory and Technology of Ring Rolling [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001.
- [2] 柴聪,韩星会,庄武豪. 薄壁高筋框体多自由度摆动辗压塑性成形规律 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (2): 118-125.  
Chai C, Han X H, Zhuang W H. Plastic forming law on multi-degree-of-freedom oscillating rolling for thin-walled and high-rib frame [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (2): 118-125.
- [3] 曾凡飞,庄武豪,王梓熙. 薄壁叉形环轴向辗压成形塑性变形规律研究 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (1): 147-153.  
Zeng F F, Zhuang W H, Wang Z X. Plastic deformation law for axial rolling-forging of thin-walled forked ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (1): 147-153.
- [4] 黄天佑. 材料加工工艺 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.  
Huang T Y. Material Processing Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] 吕明青,邵珠峰,徐道春,等. 基于遗传算法的六连杆机构尺寸优化设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 184-193.  
Lyu M Q, Shao Z F, Xu D C, et al. Optimization design on dimension of six-link mechanism based on genetic algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 184-193.
- [6] 郭良刚,杨合,金坚诚. 环件径向轧制毛坯尺寸设计方法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (24): 1-9.  
Guo L G, Yang H, Jin J C. Design method of blank sizes for radial-axial ring rolling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (24): 1-9.
- [7] 兰箭,左治江,韩星会,等. 内台阶锥形环件辗扩锻件设计方法研究 [J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (2): 51-55.  
Lan J, Zuo Z J, Han X H, et al. Research on design method of conical ring with inner steps for rolling process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13 (2): 51-55.
- [8] 刘光辉,刘百宣,刘华,等. 双法兰式三阀组阀体多向精密成形工艺 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (2): 58-62.  
Liu G H, Liu B X, Liu H, et al. Multi-direction precision forming technology of double flanges tri-valve set body [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (2): 58-62.
- [9] 刘君,杨家典,胡元伟,等. 航空矩形环径向轧制芯辊进给

曲线工程化设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (3): 121-124.

Liu J, Yang J D, Hu Y W, et al. Engineering design on mandrel feeding curve for aviation rectangular ring radial rolling [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (3): 121-124.

- [10] T/CCMI 11—2021, 大型热轧环形锻件机械加工余量与公差 [S].

T/CCMI 11—2021, Design specification for machining allowance and tolerance of large hot rolled ring forgings [S].

- [11] 章建跃,李增沪,李勇,等. 普通高中教科书数学必修第二册 [M]. 北京:人民教育出版社, 2019.

Zhang J Y, Li Z H, Li Y, et al. Ordinary High School Textbook Mathematics Compulsory Volume Two [M]. Beijing: People's Education Press, 2019.

- [12] 盛骤,谢式千,潘承毅,等. 概率论与数理统计 [M]. 北京:高等教育出版社, 2008.

Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y, et al. Probability Theory and Mathematical Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

- [13] 兰箭,张思阳,郑继荣,等. 外壁带凸台环件轧制成形规律 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 144-148.

Lan J, Zhang S Y, Zheng J R, et al. Rolling law of ring with bosses on outer wall [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 144-148.

## 《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益,坚决抵制学术不端行为,积极倡导优良学风,努力为学术创新营造良好氛围,本刊郑重声明:对一稿多投,重复发表,存在署名有争议,引用他人著述未注明出处,抄袭、剽窃、弄虚作假,或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章,坚决拒绝刊登。一经发现,立即撤稿,并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予3~5年不允许刊发其论文的处罚,情节严重者,将以适当方式予以公布,该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部

## 《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自2008年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部