# 液压阀柔性杆17-4PH棒料初始 残余应力及加工变形试验研究



刘昊林<sup>1</sup>,刘春青<sup>2</sup>,高尚德<sup>2</sup>,徐瑞<sup>2</sup>,张伟<sup>2</sup>,杨昀<sup>1</sup> 1.西北工业大学,陕西西安 710072 2.航空工业西安飞行自动控制研究所,陕西西安 710076

摘 要:液压阀柔性杆是液压伺服阀的关键零件,负责串连多种零组件,起到重要的连接作用。作为典型的弱刚度零件,此 类零件普遍存在加工变形超差的问题。现有的研究主要集中在切削加工过程中控制零件变形方面,本文主要研究17-4PH 不锈钢棒料不同材料批次、热处理条件下的初始残余应力及其对加工变形的影响。通过X射线衍射法,测量了不同批次棒 料不同热处理工艺下的轴向和周向初始残余应力,分析了残余应力分布规律及材料批次和热处理工艺对残余应力的影响。 通过切削试验,探究了材料批次和热处理工艺对零件最终加工变形的影响,得到了优选的材料批次和热处理工艺,为高精高 效加工液压柔性杆提供了参考。

关键词:初始残余应力;弱刚度;变形控制;17-4PH不锈钢;X射线衍射

### 中图分类号:TH142.2

文献标识码:A

液压阀柔性杆作为飞控系统中电液伺服阀的关键零件,连接直线力矩马达和液压滑阀,起到将电信号产生位移转换为液压信号的重要作用。柔性杆微小的尺寸和形位变化会导致电液伺服阀性能变化,严重时造成卡滞等故障。 柔性杆长径比高达100,直线度要求全长0.1mm,属于极弱 刚度零件,在制造过程中易产生加工变形和尺寸不稳定<sup>[1]</sup> 问题,进而导致零部件的额外返工、校正甚至报废,极大地 影响了生产效率,增加了生产成本。因此,其加工变形问题 一直是高性能液压伺服阀研制面临的严峻挑战之一。

初始残余应力是影响此类弱刚度零件变形的重要因素<sup>[2]</sup>,国内外学者针对此类问题进行了多方面的研究,Nervi 等<sup>[3]</sup>建立了一种数学模型,精确预测了铝板制造的机身部 件因板材制造过程中引入的残余应力而引起的变形,最大 预测误差在40%以内。El-Axir<sup>[4]</sup>提出了一种车削表面最大 残余应力的预测模型,重点研究了加工参数对残余应力分 布的影响建模。叶海潮等<sup>[5]</sup>通过对原始材料内残余应力分 布及力学特性的研究,对加工位置进行优选与原方法比较 减少了零件90%以上的变形。朱亚民<sup>[6]</sup>建立了初始应力影

## DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.12.011

响物体变形的通用模型,其结果更接近实测结果,比传统的 弯曲模型预测精度提高了10%以上。华中科技大学毛宽民 教授团队<sup>[7]</sup>提出了一种通过表面残余应力预测内部残余应 力的方法,该方法避免了对零件造成破坏,为变形研究提供 了一种新的途径。南京航空航天大学何宁教授团队<sup>[8]</sup>在弱 刚度薄壁件变形预测中考虑了薄板表层应力耦合作用,提 高了残余应力预测和仿真的精度,并提出了通过优化余量 分配和加工路径加速应变能转化减小加工变形的工艺方 法。南昌航空大学秦国华教授团队<sup>[9]</sup>研究了初始残余应力 与初始几何误差的耦合影响,提出了一种优化模型的步长 递减算法,使加工的变形相较于原工艺减少了83%。

目前的研究主要集中于对残余应力的预测、加工及加 工过程的优化,进而减少残余应力释放后零件的变形,而不 同批次、不同热处理方式棒料的材料特性有较为明显的差 异,目前对此方面的研究较少。因此,本文通过试验探究不 同批次的原材料初始残余应力分布和特性,探究不同热处 理方式对材料初始残余应力的影响,以及这些影响因素对 柔性杆加工变形的影响。为高效高精度加工此类零件时选

收稿日期:2024-06-14; 退修日期:2024-09-10; 录用日期:2024-10-31 基金项目: 航空科学基金(20220007053001)

引用格式: Liu Haolin, Liu Chunqing, Gao Shangde, et al. Experimental study on initial residual stress and machining deformation of 17–4PH hydraulic valve flexible rod material[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(12):87-95. 刘昊林, 刘春青, 高尚德, 等. 液压 阀柔性杆17-4PH 棒料初始残余应力及加工变形试验研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(12):87-95.

取合理的加工原料和热处理方式提供参考。

# 1 残余应力试验及分析

#### 1.1 试验对象与装置

伺服阀柔性杆(见图1)的制造材料多为17-4PH不锈 钢,该材料是一种沉淀硬化马氏体不锈钢,具有高强度、高 硬度和耐腐蚀的特性<sup>[10]</sup>,基本材料属性见表1。本文以伺服 阀柔性杆不同批次和不同热处理工艺下的棒料为研究对 象,分析其残余应力分布特性及差异。

本文试验所研究的原材料批次共有三种(见表2): (1)进口外径16mm棒料;(2)进口外径10mm棒料;(3)国产 外径10mm棒料。所选用的热处理方式共有5种:(1)不进 行热处理;(2)固溶处理(1040°C);(3)固溶处理(1040°C)后 时效硬化(550°C);(4)时效硬化(550°C);(5)固溶处理 (1040°C)后时效硬化(480°C)。

目前残余应力的测量方法主要分为有损和无损两 类<sup>[11-12]</sup>。破坏性的方法有取条法、切槽法、剥层法、钻孔法 和盲孔法等,都属于应力释放的范畴。非破坏性的方法有 激光干涉法、云纹分析法、X射线衍射法、中子衍射法、磁性 发射法和超声波法等<sup>[13]</sup>。由于试验材料直径较小,较难使 用有损测量方法,因此选用无损测量方法。在无损测量方 法中,X射线衍射法是目前最成熟且应用最为广泛的测试 方法<sup>[14-15]</sup>,测量结果准确、快捷。因此,本文试验均通过X 射线衍射法对残余应力进行测定,为准确测得材料内部残 余应力,使用电解抛光机(见图2)对材料进行剥层(见图 3),此方法在去除材料时不会引入新的残余应力<sup>[16]</sup>,再使用 应力衍射仪(见图4)对材料的残余应力进行逐层测量,最终 可获得原材料的残余应力分布。



Fig.1 Flexible rod connection diagram

	表	1	17-4PH材料属性
Table	1	17	-4PH material properties

密度/(g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	热导率 (W/(m•K))	线碰撞系数
7.75	206	0.272	23.0	$1.1 \times 10^{-9}$

为保证试验的严谨性,所有的试验测试点均测量三次 取平均值,从每一类材料样本中随机抽取两个进行试验并

表2 试验棒料信息汇总

Table 2 Summary of experimental bar material information

棒料来源	棒料直径	棒料热处理方式	棒料编号
		不进行热处理	10-1
		固溶处理(1040℃)	10-2
	10mm	固溶处理(1040℃)后时效硬化(550℃)	10-3
		时效硬化(550℃)	10-4
\# m		固溶处理(1040℃)后时效硬化(480℃)	10-5
近日		不进行热处理	16-1
	16mm	固溶处理(1040℃)	16-2
		固溶处理(1040℃)后时效硬化(550℃)	16-3
		时效硬化(550℃)	16-4
		固溶处理(1040℃)后时效硬化(480℃)	16-5
		不进行热处理	10-1
		固溶处理(1040℃)	10-2
国产	10mm	固溶处理(1040℃)后时效硬化(550℃)	10-3
		时效硬化(550℃)	10-4
		固溶处理(1040℃)后时效硬化(480℃)	10-5



图 2 XF-1型电解抛光机 Fig.2 XF-1 electrolytic polishing machine

取平均值。由于本次试验材料为圆柱形棒料,故选用圆柱 坐标系来描述试验结果,为方便试验结果的展示,对试验对 象残余应力方向作以下规定(见图5): $\sigma_z$ 为轴向应力, $\sigma_r$ 为 径向应力, $\sigma_\theta$ 为周向应力;拉应力为正,压应力为负。

本文试验旨在比较不同热处理和批次材料的残余应力 分布,以研究不同方向上的残余应力规律。因此,试验将对 样本在三个方向(柱坐标)上的残余应力分布进行测量。在 轴向和周向的最外层分别均匀地选择测量点进行测量(见 图6),在径向通过电解抛光的方式测量沿径向的残余应力 (见图7)。

#### 1.2 残余应力沿棒料轴向的测量结果及分析

在此试验中,不涉及半径的影响,分别从国产和进口两 类材料中抽取未热处理的样本在外表面沿轴向均匀地取8



图3 棒料电解抛光及抛光后的样件

Fig.3 Sample of electrolytic polishing and polishing of bar material



图4 Xstress 3000 G2型应力衍射仪 Fig.4 Xstress 3000 G2 stress diffractometer



Fig.5 Stress direction diagram

个点进行残余应力测量,在每个点测量材料的轴向残余应 力和周向残余应力,试验结果如图8和图9所示。

在考虑测量误差情况下,两类材料沿轴向的两向应力 的变化均较小,均匀性较好,且轴向应力的幅值大于周向应 力的幅值,幅值相差大概100MPa。相较于国产材料,进口 材料的应力均匀性较好、残余应力幅值较低。

## 1.3 残余应力沿棒料周向的测量结果及分析

在此试验中,从国产10mm、进口10mm和进口16mm的



棒料中分别根据5种不同热处理方式进行抽样测量,沿棒料 外层的周向均匀地选取5个测量点进行残余应力测量,在每 个点测量轴向和周向应力,结果如图10和图11所示。在国



产棒料10-3的测量过程中,发现在其外表面有一层杂质层 (见图12),无法进行残余应力测量,故此部分数据缺失。

棒料沿周向的残余应力符合均匀分布的特性,经过热 处理之后,棒料沿周向的残余应力幅值有了显著的下降,均 匀性也有不同程度的改变。采用固溶处理(1040℃)热处 理,棒料外层残余应力的均匀性下降明显;采用固溶处理 (1040℃)后时效硬化(550℃)和时效硬化(550℃),棒料外 层残余应力的均匀性更好;采用固溶处理(1040℃)后时效 硬化(480℃),进口10mm棒料的均匀性有所提升,但其余 两种有所下降。在这三种棒料中,进口10mm棒料的外层 整体性能最优,在热处理之后,应力幅值和均匀性都优于其 余两种材料;国产材料的均匀性不好,应力幅值波动很大, 且内部杂质较多,导致一种材料无法进行试验。

## 1.4 残余应力沿棒料径向的测量结果及分析

根据棒料的制造工艺,其沿径向的残余应力为外层幅 值和梯度较大,靠近内部的幅值较小,均匀性好。靠近内部 的残余应力幅值波动很小,所以当连续测量到较小的残余 应力时,由于其内部应力波动小的特性就可以停止测量。 本次试验从国产10mm、进口10mm和进口16mm的棒料中 分别根据5种不同热处理方式进行抽样,测量沿径向的周 向残余应力(轴向应力对棒料的变形影响较小,故不测量), 因杂质层(见图12)影响国产10-3棒料测量,深度有限。测 量结果如图13所示。

热处理前,残余应力的分布均由幅值较大压应力变化 到幅值较小的拉应力,应力梯度较大。进行热处理之后,残 余应力会整体由压应力向拉应力偏移,除去时效硬化 (550℃),其余的三种热处理方式会使棒料的残余应力全部 偏移至拉应力,且应力梯度显著降低;时效硬化(550℃)应





Fig.11 Circumferential residual stress test results



图 12 国产 10mm 棒料中杂质层 Fig.12 Impurity layer in domestic 10mm bar material

力幅值相较于未进行热处理有所降低,但应力偏移和梯度 变化较小,在国产10mm棒料和进口16mm棒料中体现较为 明显,如图13(a)和图13(c)所示。三种棒料中进口10mm 棒料效果最好,整体应力梯度低、幅值小、变化平稳。

# 2 切削变形试验

直线度和外圆圆度是柔性杆的两个重要工艺指标,本 文试验将其作为加工质量评判指标,分别研究了不同热处 理、不同批次棒料以及不同热处理方式对零件的影响。其 中不同热处理是对未加工棒料进行研究,旨在研究其对棒 料初始残余应力的影响;其余两组试验对比了不同处理下 棒料对最终成形零件的加工质量的影响。

## 2.1 不同热处理方式对未加工棒料直线度影响

从未加工的棒料中随机抽取样本进行不同的热处理, 完成热处理之后分别测量其直线度,结果见表3,用测量结 果的均值和标准差进行不同热处理效果的比较,结果如图 14所示。

从结果可以看出,4种热处理方式中,经过时效硬化 (550℃)的棒料直线度误差和方差最小,为最佳热处理方式, 与理论性能和前文残余应力分布规律相符。总体来说,进口 10mm棒料在各热处理条件下的直线度误差和方差小,均匀 性好,加工效果优异,与前文中残余应力测试结果相符。

## 2.2 不同批次棒料对最终零件直线度影响

从三种棒料中分别随机抽取5个样本,采用时效硬化 (550℃)热处理方式,进行实际切削试验以验证残余应力试 验结果,用最终零件的直线度误差作为参考标准,比较三种 棒料的实际加工结果。主要加工流程为:首先去除棒料外 层余量,然后加工出零件的左右两端形状,最后加工零件中 间部分,如图15和图16所示。

加工完成之后,对零件的重要参数直线度进行测量,结 果如表4和图17所示。由图17可得,进口16mm棒料的直 线度误差明显高于国产10mm棒料和进口10mm棒料,国产 10mm棒料和进口10mm棒料的直线度误差较为接近,方差



Fig.13 Radial residual stress test results

表3	2	不同热	Ņ	Ŀ	理方式局	う棒彩	直约	<b>线度误</b> :	탿
	_						-		

 Table 3
 Bar straightness error after different heat treatment methods

棒料来源	棒料编号	棒料1	棒料2	棒料3	平均值
	10-2	0.24	0.7	0.45	0.465
田立	10-3	0.27	0.13	0.22	0.205
四)	10-4	0.63	0.34	0.48	0.485
	10-5	0.03	0.01	0.015	0.02
进口	10-2	0.22	0.12	0.19	0.175
	10-3	0.27	0.13	0.22	0.205
	10-4	0.16	0.18	0.39	0.245
	10-5	0.01	0.015	0.01	0.01
	16-2	0.36	0.18	0.35	0.295
	16-3	0.055	0.21	0.33	0.2
	16-4	0.18	0.13	0.19	0.165
	16-5	0.02	0.015	0.015	0.015

也很接近,进口10mm棒料的平均值略低,整体来说,进口10mm棒料略好。

#### 2.3 不同热处理方式对最终零件外圆圆度影响

加工后的外圆圆度也是柔性杆的重要指标,从加工效 果较好的棒料进口10mm和国产10mm中分别抽取随机样 本进行不同方式的热处理,分别进行加工并测量其加工后 外圆圆度,结果如表5和图18所示。不难看出,时效硬化 (550℃)的棒料在加工后圆度误差最小,为最好的热处理方 式,在此热处理条件下进口10mm棒料和国产10mm棒料在 加工后外圆圆度误差没有明显差异。

## 3 结论

本文使用X射线衍射法对弱刚度零件原材料初始残余 应力的分布规律和特性进行了详细的研究与分析,探究了 不同原料来源和不同热处理方式下的两向残余应力分布规 律,通过切削试验探究了不同原料和热处理方式对加工变 形的影响。试验结果表明:

(1)三种原料在轴向和周向的残余应力分布都比较均匀(符合热轧制造的特点),热处理可以有效降低其应力幅值,其中热处理方式固溶处理(1040℃)后时效硬化(550℃) 和时效硬化(550℃)适用性最好,处理后原材料在两个方向上应力均匀性最好,幅值最小。

(2)在径向的残余应力在热处理之后均向拉应力偏移, 且整体梯度和应力幅值有所下降,热处理方式固溶处理 (1040℃)、固溶处理(1040℃)后时效硬化(550℃)和固溶处 理(1040℃)后时效硬化(480℃)效果较为明显,虽然外层残 余应力幅值在热处理之后有了显著下降,但内层残余应力









#### 表4 棒料加工完直线度误差

Table 4 Straightness error after processing of bar material

棒料	进口10mm	进口16mm	国产10mm
1	0.45	0.82	0.38
2	0.24	0.75	0.41
3	0.23	0.78	0.72
4	0.60	0.93	0.25
5	0.12	0.66	0.33



Fig.17 Cutting experiment results

#### 表5 不同热处理方式下加工后外圆圆度误差

 
 Table 5
 Outer roundness error after processing under different heat treatment methods

热处理方式	国产10mm棒料	进口10mm棒料
固溶1040℃+时效550℃	0.03	0.07
固溶1040℃+时效480℃	0.01	0.05
固溶1040℃	0.05	0.07
时效硬化550℃	0.002	0.002

反而有所升高,而内层应力状态对弱刚度零件最终的变形 影响更大,因此最终热处理方式时效硬化(550℃)的原料会 得到更小的变形。

(3)通过实际切削试验对前文中残余应力分布规律进行了进一步验证,用最终零件的直线度误差和外圆圆度作为参考标准,验证了残余应力试验及其分布规律的正确性。 切削试验结果表明,时效硬化(550℃)为最优的热处理方式,进口16mm棒料的加工效果最差,进口10mm棒料和国



Fig.18 Outer roundness error after processing by different heat treatment methods

产10mm棒料加工效果较为接近,且进口10mm棒料略好, 切削试验结果和前文的残余应力规律一致,即内层残余应 力幅值越小越均匀的棒料,最终加工质量越高。

(4)进口10mm棒料整体应力幅值较小且均匀性较好, 最终加工质量也最好,国产10mm棒料虽然外层应力状态 较大,不利于加工,但其内层残余应力较小,有利于控制最 终的零件变形,且最终加工效果与进口10mm棒料接近,进 口16mm棒料加工效果不如前两者,切削变形试验也验证 了此规律。

### 参考文献

- 孔宪俊,刘世文,侯宁,等.激光加热辅助车削高温合金薄壁件 变形仿真及试验研究[J].航空科学技术, 2024, 35(2):75-80.
   Kong Xianjun, Liu Shiwen, Hou Ning, et al. Simulation and experimental study on deformation of thin-walled superalloy parts with laser heating assisted turning [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(2): 75-80.(in Chinese)
- [2] 张莹,罗睿敏,梁帅.基于热-力耦合的航空发动机叶片堆焊修 复数值模拟[J].航空科学技术, 2024, 35(7): 76-86.
   Zhang Ying, Luo Ruimin, Liang Shuai. Numerical simulation of aero engine blade surfacing repair based on thermal and mechanical coupling [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35 (7):76-86.(in Chinese)
- [3] Nervi S, Szabó B A, Young K A. Prediction of distortion of airframe components made from aluminum plates[J]. AIAA Journal, 2009, 47(7): 1635-1641.
- [4] El-axir M H. A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(9): 1055-1063.

- [5] Ye Haichao, Qin Guohua, Wang Huamin. A machining position optimization approach to workpiece deformation control for aeronautical monolithic components[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(1-2): 299-313.
- [6] 朱亚民.初始残余应力下的机加工零件变形理论与试验研究
  [D].武汉:华中科技大学, 2023.
  Zhu Yamin. Theoretical and experimental study on deformation of machined parts under initial residual stress [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.(in Chinese)
- [7] Wang Feng, Mao Kuanmin, Li Bing. Prediction of residual stress fields from surface stress measurements[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 140: 68-82.
- [8] 夏灵.弱刚性薄壁件加工变形预测与控制技术研究[D].南京:南京航空航天大学, 2019.
   Xia Ling. Research on deformation prediction and control technology of weakly rigid thin-wall parts [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.(in Chinese)
- [9] 林锋,姚婉,秦国华,等.飞机整体结构件加工变形的初始残 余应力-初始几何误差耦合影响与控制[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2731-2742.

Lin Feng, Yao Wan, Qin Guohua, et al. Coupling effect and control of initial residual stress-initial geometric error in machining deformation of aircraft integral structural parts [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2021, 42(12): 2731-2742.(in Chinese)

 [10] 邓德伟, 陈蕊, 田鑫, 等. 热处理对 17-4PH 马氏体不锈钢显 微组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(4): 32-36.
 Deng Dewei, Chen Rui, Tian Xin, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of 17-4PH martensitic stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(4): 32-36. (in Chinese)

- [11] Tang Wu, Deng Longjiang, Xu Kewei, et al. X-ray diffraction measurement of residual stress and crystal orientation in Au/ NiCr/Ta films prepared by plating[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(12): 5944-5947.
- [12] 王贺权,张艳聪,刘元元.X射线衍射法残余应力检测的误差 影响因素分析[J]. 机械强度, 2021,43(1): 90-94.
  Wang Hequan, Zhang Yancong, Liu Yuanyuan. Analysis of error influencing factors of residual stress detection by X-ray diffraction [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021,43(1): 90-94.(in Chinese)
- [13] Ruud C O, Pangborn R N, Dimascio P S. X-ray diffraction measurement of residual stresses in thick, multi-pass steel

weldments[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1985, 107(2): 185-191.

- [14] Fernández Pariente I, Guagliano M. Contact fatigue damage analysis of shot peened gears by means of X-ray measurements[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(3): 964-971.
- [15] Chen Huixian, Li Hao, Feng Haitao. Aero-engine blade deformation control of milling process[J]. Advanced Materials Research, 2011, 308-310: 1198-1204.
- [16] 刘金艳. X射线残余应力的测量技术与应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.

Liu Jinyan. Research on measurement technology and application of X-ray residual stress [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese)

# Experimental Study on Initial Residual Stress and Machining Deformation of 17–4PH Hydraulic Valve Flexible Rod Material

Liu Haolin<sup>1</sup>, Liu Chunqing<sup>2</sup>, Gao Shangde<sup>2</sup>, Xu Rui<sup>2</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>, Yang Yun<sup>1</sup> *1. Northwestern Polytechnical University*, *Xi* an 710072, *China* 

2. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi' an 710076, China

**Abstract:** Hydraulic valve flexible rods are typical components with low rigidity, and such parts commonly experience out-of-tolerance deformation during machining. Existing studies mainly focus on controlling part deformation during the cutting process. This paper investigates the initial residual stress of 17–4PH stainless steel rods from different material batches and under various heat treatment conditions, as well as its impact on machining deformation. Using X-ray diffraction, the axial and circumferential initial residual stresses of rods from different batches and heat treatment processes were measured. The residual stress distribution patterns and the effects of material batches and heat treatment processes on residual stress were analyzed. Through cutting experiments, the influence of material batches and heat treatment processes on the final machining deformation of parts was explored, and the optimal material batch and heat treatment process were determined. This study provides a reference for high-precision and efficient machining of hydraulic flexible rods.

Key Words: initial residual stress; low rigidity; deformation control; 17–4PH stainless steel; X-ray diffraction