

复杂曲面螺杆头模锻冷挤压快速成形组合工艺 研究与应用

管敏超, 俞健勇, 陈永明, 曹良, 谢学兴, 王挺, 生伟

海天塑机集团有限公司 浙江宁波 315821

摘要: 为提高复杂曲面螺杆头的加工效率, 研究并改变了传统机械切削加工方式, 通过创新引入热锻、冷挤压及局部切削整形的组合工艺模式, 从工艺流程优化、模具开发、工艺参数等方面研究, 经批量验证, 采用组合工艺制造的螺杆头无开裂缺陷, 表面质量优良, 能完全取代常规机械加工, 降低生产制造成本, 实现螺杆头生产效率大幅提升。

关键词: 复杂曲面; 螺杆头; 快速成形; 模锻; 冷挤压; 组合工艺

Research and application of rapid prototyping combination technology for complex curved screw head forging and cold extrusion

GUAN Minchao, YU Jianyong, CHEN Yongming, CAO Liang, XIE Xuexing, WANG Ting, SHENG Wei

Haitian Plastics Machinery Group Co., Ltd., Ningbo 315821, Zhejiang, China

Abstract: In order to improve the processing efficiency of complex curved screw heads, traditional mechanical cutting methods have been studied and changed. A combination process mode of hot forging, cold extrusion, and local cutting shaping has been innovatively introduced. From the aspects of process flow optimization, mold development, and process parameters, batch verification has been conducted. The screw heads manufactured by the combination process have no cracking defects, excellent surface quality, can completely replace conventional mechanical processing, reduce production costs, and achieve a significant improvement in screw head production efficiency.

Keywords: complex surfaces; screw head; rapid prototyping; die forging; cold extrusion; combination process

1 序言

螺杆头是注塑机塑化的主要零件之一, 在预塑时将塑化好的熔体放流到储料室(前机筒)中, 而在高压注射时, 又能有效地封闭螺杆头前部的熔体, 防止倒流。由于长期和高频次地承受高温熔融塑料作用, 螺杆头也是典型的注塑机易损件, 因此制造过程中如何降本提效, 是摆在塑料机械行业技

术人员面前的持续性课题。

2 螺杆头模锻冷挤压局部整形组合新工艺的确定

2.1 螺杆头传统机械切削工艺

螺杆头从毛坯到成品共有近20道工序, 其中整体淬火前的工序为圆棒轧制下料、粗车外圆、半精车头部、半精车柄部、铣头部凹槽和修抛等6道工序

序, 痛点在于头部凹槽的铣削加工速度慢, 长时间占用数控加工中心, 需要有较丰富经验的机械加工作业人员, 同时从圆棒到成形的原材料浪费严重, 导致整体成本居高不下。

2.2 组合工艺的可行性分析

(1) 模锻加局部切削整形 减少加工余量除铸造外, 锻造也能提供成品零件^[1], 直接精密模锻可达成螺杆头外形的一次成形, 如图1所示。优点在于可大幅节省原材料, 但表面有较粗大的锻造后颗粒痕迹, 头部对称的3个凹槽面表面粗糙度在 $6.4\mu\text{m}$ 以上, 无法满足螺杆头凹槽表面粗糙度 $\leq 0.8\mu\text{m}$ 的要求。过大的表面粗糙度值经后道整体淬火工序后, 表面硬度达45HRC, 使精加工耗时更长, 刀具磨损和时间成本成倍增加。



图1 模锻后螺杆头实物

(2) 冷挤压加局部切削整形 由于模锻无法满足表面粗糙度要求, 因此尝试将圆棒料采用冷挤压直接成形。因为螺杆头结构复杂性, 通常需要分两次分别进行螺杆头柄部和头部挤压, 且凹槽挤压量非常大, 所以受到的挤压力大幅增加。

图算法是计算挤压过程单位压力的常用方法^[2], 分别有德国工程师协会VDE、国家冷锻协会ICFG及国内基于此的改进版本, 适用于国产钢材。40Cr钢强度在未经调质处理下与42CrMo钢几乎一致。假定挤压变形是一个均衡的变形过程, 且毛坯料经退火、表面磷化和润滑处理, 即表面挤压抗力处于较优状态下, 根据挤压前后尺寸变化, 算得断面减缩率, 并结合毛坯高度修正, 查阅参考关系图可得单位挤压力, 并经计算得出所需总挤压力。

若采用热挤压, 虽然也可以大幅降低挤压力, 但同样面临表面氧化皮和表面粗糙度问题。

(3) 模锻冷挤压加局部切削整形 采用圆棒料快速感应加热并模锻出螺杆头外形轮廓和柄部台阶, 再冷挤压将头部凹槽快速精密成形, 最后进行局部切削整形的方式, 既能满足表面质量要求, 又能实现代替常规机械加工切削。

直接挤压与组合工艺方案的挤压力对比见表1。从表1可看出, 模锻与冷挤压组合, 形状从圆棒一次成形转变为圆弧挤压成形, 且原毛坯直径由45mm变更为圆弧直径25mm, 总挤压力从1923kN减少到785kN, 降低了60%, 不仅挤压设备吨位需求降低, 而且可更有效地减少因表面挤压拉应力过大而导致的撕裂风险。综合考虑下, 最终选择模锻与冷挤压组合工艺成形方案。

表1 直接挤压与组合工艺方案的挤压力对比

方案	毛坯直径/mm	毛坯长度/mm	挤压后直径/mm	断面减缩率(%)	单位挤压力/MPa	总挤压力/kN
直接冷挤压成形	45	194	31	53	2550	1923
模锻后冷挤压成形	25	194	20	36	2500	785

3 螺杆头模锻冷挤压及局部切削组合工艺实施

3.1 坯料表面处理

由表1可知, 计算得2500MPa单位挤压力下, 常规涂刷润滑剂会被完全挤掉, 起不到润滑作用。对于合金钢较常采用磷化+皂化工艺两道工序达到挤压前良好的表面状态, 完成后表面呈灰色。磷化除了常规意义的耐腐蚀效果外, 其磷酸盐薄膜由细小片状结晶组织构成, 结晶间存在大量孔隙, 成为储存润滑剂的天然场所, 磷化能将钢件表面摩擦系数从0.108降低至0.013, 可大幅减少挤压变形抗力。磷化后采用工业皂片进行润滑处理, 得到硬脂酸盐有效地附着在磷化表面层, 可进一步降低挤压力。为了确保挤压后螺杆头表面粗糙度达到 $0.8\mu\text{m}$ 以内, 在挤压过程添加石墨加强润滑。

3.2 挤压后表面麻点问题解决

初次挤压试制后, 加工成品发现螺杆头凹槽边缘处有较多麻点, 如图2所示。观察可知, 此缺陷与挤压前的模锻表面一致, 且在螺杆头的3个凹槽边缘, 仅有1~2个凹槽出现此情况, 判断是挤压时螺杆头因未能保持垂直受力而偏心, 从而使单侧挤

压，另一侧挤压量减少，导致残留模锻原始表面。



图2 挤压试验后螺杆头凹槽处表面缺陷

鉴于此，第二次试制时将螺杆头端部圆角的平台直径加大，增加垂直受力稳定性，确保挤压过程处于竖直状态，同时挤压模具也匹配同步修正。顺利完成挤压后的螺杆头如图3所示。



图3 冷挤压后的螺杆头实物表面状态

4 模锻冷挤压快速成形组合工艺应用效果

4.1 快速成形螺杆头理化分析结果

冷挤压为典型的金属塑性加工工艺，挤压时受摩擦作用，表层金属流动慢，心部金属流动快，晶粒发生变形，导致挤压后金属结构组织不均匀^[3]。为验证模锻冷挤压工艺对后续热处理的影响，将其与常规热轧圆棒切削加工工艺进行对比。

不论采用哪种工艺，螺杆头原材料化学成分（见表2）均按国家标准执行。由表2可知，两者化学成分几乎一致，均符合技术要求。

图4所示为淬火前两种工艺螺杆头横截面的低倍组织。从图4可看出，直接切削螺杆头纵向分布的轧制流线组织明显，经锻造后柄部的流线得到改善，但在螺杆头的头部仍能观察到较明显的挤压流线组

织。相比直接切削的热轧圆棒螺杆头，模锻冷挤压的低倍组织均匀程度略好。

表2 两种工艺螺杆头化学成分（质量分数）（%）

试样	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
常规切削	0.45	0.29	0.71	1.1	0.22	0.085
模锻冷挤压	0.43	0.28	0.76	1.13	0.23	0.048
国家标准	0.38~0.45	0.17~0.37	0.5~0.8	0.9~1.2	0.15~0.25	≤0.03



a) 直接切削螺杆头



b) 模锻冷挤压螺杆头

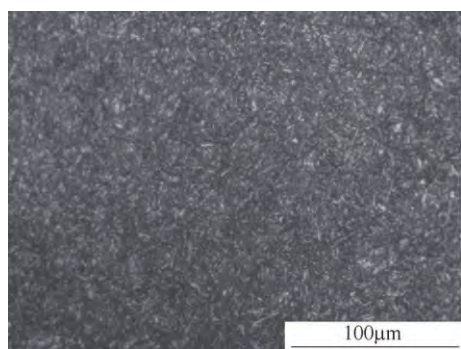
图4 淬火前两种工艺螺杆头横截面的低倍组织

螺杆头淬火后，直接切削与模锻冷挤压两种方式成形状的沿长度和截面方向硬度分布记录见表3。从表3可看出，直接切削硬度34~40.5HRC，模锻冷挤压硬度分布为32~38.5HRC，两者的整体分布范围基本一致，从表面至心部的最大硬度差值3HRC，除去原材料本身化学成分差异及淬火自然形成的硬度梯度，切削料的轧制组织和冷挤压料的流线组织均未对硬度均匀性造成影响。

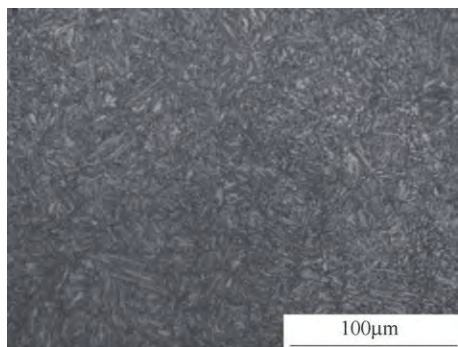
表3 淬火后两种工艺螺杆头横截面的硬度分布

工艺状态	沿长度方向检测点距离/mm									
	尾部	20	40	60	80	100	120	140	160	头部
	硬度HRC									
直接切削表面	34.5	33.5	38	40.5	40	39	39.1	36	38	37.2
直接切削心部	34	34	38.6	39.5	39	39.5	38.9	39	36.5	37.2
模锻冷挤压表面	33.5	31.8	36.2	37.3	37.5	38.5	37.5	37.3	32	35.1
模锻冷挤压心部	34	32.4	38.1	37.2	38.5	37.6	33.8	35.5	35.1	32

图5所示为对应的螺杆头整体淬火后金相显微组织。从图5可看出，两者为均匀的回火屈氏体和贝氏体混合组织。



a) 直接切削螺杆头



b) 模锻冷挤压螺杆头

图5 淬火后两种工艺螺杆头凹槽处的金相显微组织 (500×)

综上所述可知,无论是化学成分、低倍组织均匀性、淬火后的硬度分布均匀性,以及金相组织等螺杆头成品技术指标看,模锻冷挤压工艺与常规切削加工工艺几乎一致,满足后续淬火要求。

4.2 快速成形螺杆头经济效益

批量生产后经现场观察,包含上下料、装夹时间在內,45型螺杆头圆棒感应加热模锻每个耗时约1min,冷挤压过程每个约0.5min,头柄部修整每个3min。而按照常规切削加工方式,每个螺杆头需耗

(上接第14页)

热速度,让晶胞的相变缓慢进行,以降低相变和热应力聚集的可能。铸坯的炉前预热是常用的措施之一。

4) 在同样的热送状态下,含微合金化元素(如Al、Nb、V、Ti)的钢种,表面裂纹产生的概率要远高于不含微量元素的一般普通钢种,特别是 $w_C=0.10\%\sim 0.20\%$ 的微合金化钢种,裂纹产生的概率很高,这与微量元素在钢中的析出状态有关。

5) 连铸坯喷涂防护涂料后进入炉内加热,可有效地减少氧化铁皮的产生量,降低了氧化铁皮对板坯内部传导传热的影响,铸坯表面热导率相对稳

定,温度的均匀性消除了轧制开裂的可能。

5 结束语

1) 对于复杂曲面螺杆头,采用热锻冷挤压和局部修整的创新组合工艺,经实践证明能代替传统机械加工成形,同时提高生产效率6.7倍,每年产生经济效益116万元以上,可有效解决机械加工效率低、工序多的问题,实现制造的降本增效。

2) 对于42CrMo这样具有较高DI值的中碳合金钢材料,挤压前进行磷皂化润滑处理,并在冷挤压过程中额外添加润滑石墨,可提高挤压后表面质量,降低表面挤压抗力,避免表面折叠甚至破损开裂。冷挤压过程需确保螺杆头保持竖直状态,防止因偏心而导致挤压后产生表面麻点缺陷,可通过优化头部台阶直径来增强其冷挤压工序的稳定性。

3) 模锻冷挤压组合成形工艺的螺杆头,淬火前低倍组织显示比热轧圆钢略好,淬火后表面与心部硬度均匀性好,仅相差3HRC,且金相显微组织均匀良好,符合技术要求。

参考文献:

- [1] 邵潭华. 材料工程基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [2] 贾俐俐. 挤压工艺及模具[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.

MW 20240506

参考文献:

- [1] 杨慧贤, 杨昊, 赵英利, 等. 压力容器用钢表面裂纹分析与控制[J]. 金属热处理, 2017 (11): 187-191.
- [2] 孙坤. 高强度螺纹钢热送横裂纹控制研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44 (4): 82-84.
- [3] 何航, 王子超, 曾杰, 等. 连铸坯表面纵裂纹的形成与控制研究现状[J]. 连铸, 2024 (2): 1-7.
- [4] 刘志明, 张炯明. 微合金钢连铸坯热送热装析出物的研究[J]. 炼钢, 2013, 29 (3): 49-52.

MW 20240710