

转子锻件材料利用率的统计分析

■ 时立佳，曹志远，郑会赛，季雪

摘要：长期以来，受设备落后、粗放式生产、转子性能要求严格等因素影响，转子锻件的钢锭利用率较低。为分析实际生产利用率与工艺利用率的关系，随机抽取近三年生产的高中压、低压和发电机转子合格锻件各5支。通过对比发现，锭身和钢锭的工艺利用率在一定条件下还有理想的提升空间。从产品上来说，高中压转子的工艺利用率提升潜力较小，低压和发电机转子提升空间较大。

关键词：转子；锻件；利用率

大型转子锻件是本公司锻件制造领域的传统优势产品，主要包括汽轮机高中压转子、低压转子及发电机转子等锻件。该类型转子锻件截面尺寸大，工作环境十分复杂，通常在高速旋转下承受巨大的离心力、扭矩、弯矩、振动和热应力等的复合作用。作为汽轮机、发电机的“心脏”，转子稳定性要求极为严格，若其在工作过程中出现性能不稳、弯曲、开裂等失效现象，往往会导致灾难性事故的发生，后果不堪设想。因此，大型锻件产品有着严格的探伤要求，如该类锻件外圆表面需全部进行超声波、磁粉检测及锻件各截面应全部进行力学性能检测等工作。

长期以来，受设备落后、粗放式生产、转子性能要求严格等因素影响，转子锻件的钢锭利用率在本公司轴类锻件中是最低的，多数位于54%~60%。随着生产设备的改造升级，大吨位水压机和先进热处理设备相继投入使

用，同时冶炼、锻造等技术水平也不断提高，为转子锻件利用率的提高创造了有利条件。

本文随机抽取了近三年生产的300~600MW高中压、低压和发电机转子合格锻件各5支，分别对转子锻件的钢锭利用情况进行统计分析，依据转子卡号调出转子工艺准备数据，如材质、交货重、粗加工重、锻件重、钢锭

重等，并计算出钢锭及锭身的工艺利用率。此外还查阅了这些转子锻件第一热处理后的锻件毛坯交检尺寸，计算出锻件的实际重量，并核算出钢锭及锭身的实际利用率。

1. 转子锻件利用率的数据统计

(1) 高中压转子锻件利用

表1 随机抽取高中压转子工艺准备数据

序号	名称	卡号	交货重/kg	粗加工重/kg	锻件重/kg	钢锭重/t
1	高压转子	1303095	34850	53 708	66 490	119
2	高中压转子	1201758	34850	53 697	66 490	119
3	高压转子	1300559	26500	38 775	51 220	93
4	高压转子	1306592	23370	33 225	43 570	76
5	高中压转子	1307664	25208	39 043	52 510	97

表2 高中压转子工艺准备与实际利用率对比 (%)

序号	锭身利用率			钢锭利用率		
	工艺准备	生产实际	差值	工艺准备	生产实际	差值
1	73.9	82.1	8.2	56.0	62.1	6.1
2	74.0	82.0	8.0	56.0	62.0	6.0
3	71.0	82.3	11.3	55.0	63.9	8.9
4	73.6	84.5	10.9	57.4	65.8	8.4
5	72.7	84.2	11.5	55.0	63.3	8.3

率统计 随机抽取的高中压转子锻件工艺准备数据见表1,其工艺利用率与实际利用率对比情况见表2。

由表2可见,随机抽取的高中压转子实际生产利用率要高于工艺准备利用率。从统计情况来看实际生产中高中压转子的最大锭身利用率为84.5%,最大钢锭利用率达65.8%。与工艺利用率相比,实际锭身利用率最大可提高11.5%,最小提高了8%,平均提高了9.98%;实际钢锭利用率最大提高了8.9%,最小提高了6%,平均提高了7.54%。

(2) 发电机转子利用率数据统计 随机抽选的发电机转子的工艺准备技术数据见表3,其工艺利用率与实际利用率对比情况见表4。

由表4可见,随机抽取的发电机转子实际生产利用率要高于工艺准备利用率。从统计情况来看实际生产中发电机转子的最大锭身利用率为86.1%,最大钢锭利用率达64.4%。与工艺利用率相比较,实际锭身利用率最大可提高7.1%,最小提高了0.3%,平均提高了4.82%;实际钢锭利用率最大提高了5.3%,最小提高了0.2%,平均提高了3.56%。

(3) 低压转子利用率数据统计 随机抽选的低压转子的工艺准备技术数据见表5,其工艺利用率与实际利用率对比情况见表6。

从表3可以看出随机抽取的低压转子实际生产利用率要高于工艺准备利用率。从统计情况来看实际生产中低压转子的最大锭身利用率为90.8%,最大钢锭利

用率达68%,与工艺准备的利用率相比较,实际生产的锭身利用率最大可提高13.9%,最小提高了1%,平均提高了5.7%;实际生产的钢锭利用率最大可提高10.4%,最小提高了0.7%,平均提高了4.2%。

2. 转子利用率的分析

(1) 随机抽取的转子数据

分析 随机抽取的三类转子的工艺利用率统计情况见表7,实际生产利用率统计情况见表8,锻件实际生产利用率与工艺利用率对比见表9。

从表7和表8的统计数据统计分析表明电站转子的锭身平均工艺利用率约为73%~80%,钢锭平均工艺利用率约为55%~59%;实际生产转子锻件的平均锭身利用

表3 随机抽取发电机转子工艺准备数据

序号	名称	卡号	交货重 /kg	粗加工重 /kg	锻件重 /kg	钢锭重 /t
1	转轴锻件	1202969	69577	100 509	110 410	187
2	发电机转子	1300584	67515	81 800	100 450	172
3	发电机转子	1306249	67515	81 800	100 450	172
4	转轴锻件	1401180	61785	72 155	89 610	154
5	发电机转子	1303860	67515	81 800	100 450	172

表4 发电机转子工艺准备利用率与实际利用率对比 (%)

序号	锭身利用率			钢锭利用率		
	工艺准备	生产实际	差值	工艺准备	生产实际	差值
1	78.9	86.0	7.1	59.0	64.3	5.3
2	80.4	86.1	5.7	58.4	62.6	4.2
3	80.4	80.7	0.3	58.4	58.6	0.2
4	79.2	84.9	5.7	58.2	62.4	4.2
5	80.4	85.7	5.3	58.4	62.3	3.9

表5 随机抽取低压转子工艺准备数据

序号	名称	卡号	交货重量 /kg	粗加工重 /kg	锻件重 /kg	钢锭重 /t
1	低压转子	1202969	59 918	98 181	119 960	205
2	低压转子	1300584	77 281	88 600	121 550	205
3	低压转子	1306249	65 191	80 747	100 550	172
4	低压转子	1401180	61 851	96 703	122 000	211
5	A低压转子	1400804	61 580	99 690	121 490	211

表6 低压转子工艺准备利用率与实际利用率对比 (%)

序号	锭身利用率			钢锭利用率		
	工艺准备	生产实际	差值	工艺准备	生产实际	差值
1	79.3	86.4	7.1	58.5	63.7	5.2
2	80.4	81.4	1.0	59.3	60	0.7
3	80.4	83.9	3.5	58.5	61	2.5
4	77.2	80.1	2.9	57.8	60	2.2
5	76.9	90.8	13.9	57.6	68	10.4

率约为83%~85%，钢锭利用率为62%~64%。其中高中压转子利用率范围偏下限，发电机和低压转子偏上限。从转子锻件实际生产的利用率与工艺利用率的对比统计数据表9分析可知，转子锻件的实际生产利用率与工艺利用率的平均差值高中压转子较大，发电机和低压转子较小；偏差统计数据表明高中压转子偏差最小，发电机转子偏差次之，低压转子偏差最大。

(2) 转子的工艺性分析 转子的材料对比分析。高中压转子材质为30Cr1Mo1V材料，发电机转子材质为25/26Cr2Ni4MoV材料，低压转子与发电机转子材质接近，其为30Cr2Ni4MoV材料。在高温状态下，同等温度条件的30Cr1Mo1V材料变形抗力要高于发电机25/26Cr2Ni4MoV和低压转子30Cr2Ni4MoV材料，即高温塑性（可锻性）要低于发电机和低压转子材料。

转子锻件的规格及锭型选取的对比分析。300~600MW机组的高中压、发电机及低压转子的轮廓示意图见图1~图3，锻件主要参数见表10。

从整体形状比较，发电机转子细而长，低压转子粗而短，高中压转子介于两者之间。从锻件轮廓上比较，高中压转子轮廓复杂，轴身变径多，台阶多，低压转子次之，发电机转子最为简单一般为3~5个台阶。从表10的数据上高中压与发电机转子的轴身直径尺寸明显低于低压转子轴身直径；轴身长度上高中压转子最短，低压次之，发电机转子轴身最长；三者轴身的长径比高中压

表7 三类转子工艺利用率统计 (%)

名称	锭身工艺利用率				
	最大值	最小值	平均值	偏差幅度	偏差范围
高中压转子	74.00	71	73.04	3	-2.04~+0.96
发电机转子	80.40	78.90	79.86	1.50	-0.97~+0.52
低压转子	80.40	76.90	78.85	3.50	-1.95~+1.55
名称	钢锭工艺利用率				
	最大值	最小值	平均值	偏差幅度	偏差范围
高中压转子	57.40	55	55.88	2.40	-0.88~+1.52
发电机转子	59.00	58.20	58.50	0.80	-0.30~+0.56
低压转子	59.30	57.60	58.34	1.70	-0.74~+0.96

表8 三类转子工艺利用率统计 (%)

名称	实际生产锭身利用率				
	最大值	最小值	平均值	偏差幅度	偏差范围
高中压转子	84.50	82.00	83.02	2.50	-1.02~+1.48
发电机转子	86.10	80.70	84.68	5.40	-3.98~+1.42
低压转子	90.80	80.10	84.52	10.70	-4.42~+6.28
名称	实际生产钢锭利用率				
	最大值	最小值	平均值	偏差幅度	偏差范围
高中压转子	65.80	62.00	63.33	3.80	-1.44~+2.36
发电机转子	64.40	58.60	62.06	5.80	-3.46~+2.34
低压转子	68.00	60.00	62.54	8	-2.54~+5.46

表9 锻件实际生产利用率与工艺利用率对比 (%)

名称	实际锭身利用率差值				
	最大值	最小值	平均值	偏差幅度	偏差范围
高中压转子	11.50	8	9.98	3.51	-1.98~+1.52
发电机转子	7.10	0.30	4.82	6.80	-4.52~+2.28
低压转子	13.90	1	5.68	12.90	-4.68~+8.22
名称	实际钢锭利用率差值				
	最大值	最小值	平均值	偏差幅度	偏差范围
高中压转子	8.90	6	7.54	2.90	-1.54~+1.36
发电机转子	5.30	0.20	3.56	5.10	-3.36~+1.74
低压转子	10.40	0.70	4.20	9.70	-3.50~+6.20

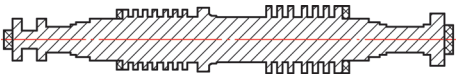


图1 高中压转子轮廓

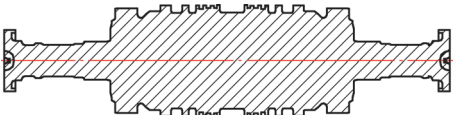


图2 低压转子轮廓

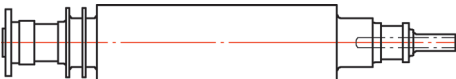


图3 发电机转子轮廓

表10 三类转子锻件主要参数

机组容量/MW	转子名称	锻件主要尺寸/mm	锻重/t
300~660	高中压转子	$(\phi 1270\sim\phi 1355) \times (1715\sim 2015) / (8925\sim 9310)$	82~132
300~660	发电机转子	$(\phi 1200\sim\phi 1300) \times (5460\sim 7095) / (11200\sim 14605)$	132~187
300~660	低压转子	$(\phi 1640\sim\phi 1835) \times (3520\sim 4016) / (7352\sim 8457)$	187~219

一般小于1，低压约为2，发电机则一般大于4；转子总长上高中压转子基本与低压转子相当，两者长度远小于发电机转子；重量上同等机组容量的低压转子最重，发电机转子次之，高中压转子重量最小。

300~600MW高中压转子按本公司现有钢锭系列，其锭型选取主要分布于24棱上注82~132t范围内，锭型间的平均间隔约为8t；发电机转子锭型选取主要分布于24棱上注132~178t范围内，锭型间的平均间隔约为11t；低压转子锭型选取主要分布于24棱上注187~219t范围内，锭型间的平均间隔约为11t。

转子的锻造工艺性对比分析。水锻工艺上三类转子均采用第一火次预切水口的工艺形式，一般工艺要求切除量为6%~8%，以避免水口沉积堆夹杂性缺陷进入转子锻件本体。高中压、发电机和低压转子的锻造工艺差异性

主要体现在低压转子工艺性复杂，一般较高中压和发电机转子多一次锻拔火次。

3. 结语

实际生产的锻件利用率是锻件毛坯在钢锭冶炼、浇注及锻造等一系列制造工序下，在其内在质量得以保障的前提下所占锭身或钢锭真实比重，也是衡量热加工技术水平的重要指标。理想状态下实际锻件尺寸要在工艺锻件要求的公差范围内，随机统计数据结果显示转子锻件的实际锭身利用率要高于工艺利用率4.8%~10%，实际钢锭利用率高于于工艺利用率3.5%~7.5%。实际利用率与工艺利用率的差异主要是由于大锻件的表面存在如裂纹、折伤、重皮、折叠等缺陷，需增大局部锻件尺寸以及受附具磨损、压机的行程误差、锻件的尺寸测量精度等复杂因素影响而形成。

通过以上分析可得出以下结论：（1）在考虑转子锻件预切除锭身的6%~8%的前提下，本公司转子锻件的实际锭身利用率可达到83%~85%，钢锭利用率可达到62%~64%，相应的工艺利用率锭身有3%~9%的理想提升空间，钢锭有4%~7%的理想提升空间。

（2）受转子锻件的各种复杂因素影响，高中压转子的工艺利用率提升潜力较小，低压和发电机工艺利用率提升潜力较大。

（3）实际锻件尺寸满足工艺锻件尺寸公差要求是提高利用率的关键点，锻件的表面裂纹清理、锻造过程中的尺寸测量、锻件的无氧化处理等方面是提高利用率的有效解决措施。

作者简介：时立佳、曹志远、郑会赛、季雪，天津重型装备工程研究有限公司。

MW 20160506

《金属加工（冷加工）》2016年第19期要目

汽车发动机制造业的思考

汽车发动机缸体端面铣削加工技术分析

铸铁缸体缸孔珩磨工艺及检测技术探究

轿车发动机缸体加工工艺思考

柴油机阀座阀面精密加工定位夹具

铝合金侧墙整体加工方法与技巧

不完整球面以铣代车加工

高速列车轮对加工工艺优化

钛及钛合金在船舶中的应用

曲轴连杆颈磨床分度装置改进

铣叶片装配背弧可调整夹具设计

复合机床在曲轴加工中的应用

提高30CrMnSiA深孔零件加工效率

复合斜面铣削方法及加工实例探讨

数控刀架刀盘互换工艺

大模数大规格弧齿锥齿轮刮削及应用