

## 综 述

## 大型轴类锻件产生小当量超声波探伤密集缺陷的原因及改善途径

李兆劲

(太原重型机械集团公司, 山西 030024)

**摘 要** 通过解剖发电机转子等大型轴类锻件, 确认了锻件内部小当量超声波探伤密集缺陷的实质和产生原因。应用新的锻造工艺理论, 根据生产锻件质量统计, 确定只有控制砧宽比、料宽比、锻粗高径比、加热温度、变形量、应力状态等工艺参数锻造生产, 才能提高轴类锻件质量。

**关键词** 轴类锻件 探伤缺陷 焊合 砧宽比 料宽比 高径比

## 1 前言

轴类锻件在生产过程中超声波探伤检查时, 常出现小当量密集缺陷超标而报废, 其原因过去认为主要是在冶炼和浇注、凝固过程中带来的夹杂物和气体聚集于钢锭的上部偏析区或下部沉积堆区所造成。但是在冶炼方面采用了 LF-VD 真空精炼、ESR 重熔和钢锭模底部吹氩等精炼手段后, 锻制的大型轴类锻件仍然大量产生上述缺陷。例如发电机转子锻件中直径较大的 120MW 转子本体部分(直径 $\varnothing 780\text{mm}$ ), 仍经常有超标的当量为 $\varnothing 2 \sim \varnothing 3$  的密集缺陷, 比较太重厂历年来转子锻件探伤合格率可以看出: 90 年代在采用精炼手段后, 与 60 年代到 80 年代未采用精炼手段时期相比, 钢水中的含氢量虽由 3.38ppm $\sim$ 4.54ppm 下降为 1.78ppm $\sim$ 3.42ppm。[H]含量的减少, 应该说产生白点的敏感性大为降低, 但是轴类锻件的探伤合格率并未见提高, 相反有的锻件如 3MW 转子的废品率反而增加了。在比较了前后工艺和操作后得出, 原因是 90 年代随意将 3MW 转子改变为用 18t 大锭型, 锻制 3MW 转子的工艺参数  $W/H$  和  $B/H$  都改变了, 使锻件内部轴向拉应力和横向拉应力增大。

## 2 有缺陷轴类锻件的解剖试验

为进一步弄清此类超探超标缺陷的性质, 我

们先后对 4 支转子进行了解剖试验, 解剖结果见表 1。上述 4 件解剖锻件的超声波探伤缺陷特征, 均为在转子大轴身有 $\varnothing 2 \sim \varnothing 3$  当量缺陷密集, 而直径较小的两端台阶轴部分没有超标缺陷。解剖取样部位就在缺陷表现集中处, 如 95D-518-1-5 转子锻件取样在非打号端距本体一端 205mm 处切片; 95D-445-1-1 取样在非打号端距本体一端 265mm 处切片取样。

大锻件中的白点大都是以疏松, 或未锻合的显微空隙缺陷或密集的非金属夹杂物为核心, 向基体强度弱的方向扩展的氢致裂纹缺陷。上述 4 件解剖锻件只有 97S-12-1 有白点缺陷, 其余 3 件并没有发现白点, 而却有数量较多的微细裂纹、疏松、连续的孔洞、针孔存在, 这些缺陷周围有的有夹杂物存在。在超探屏幕上反映的小当量密集超标缺陷, 就是这些未锻合的较多的微细裂纹、疏松、连续的孔洞、针孔等。要想锻合这些内部缺陷必须从锻造工艺、锻造工模具的改进上着手。只有锻造工艺参数的改进, 才有可能从根本上杜绝微细裂纹的产生。只有用能控制毛坯变形区中心不出现轴向及横向拉应力的锻造方法, 才能避免疏松、针孔、微细裂纹的产生, 才能避免相应的小当量探伤缺陷的产生。当然前提是要提供冶金质量较纯净的钢锭。

表1 轴身大截面解剖结果

锻件号 锻件名称	材质 锻型	解剖低倍试验结果	解剖高倍试验结果
95D-518-1-5 6MW 转子	34CrMo1A 15t 八角锭	有2条微裂纹及多处小针孔,白斑4处	有棱角状疏松、微裂纹及带状脆性夹杂
95D-445-1-1 6MW 转子	34CrMo1A 15t 八角锭	有6条3~5mm微裂纹及较多疏松点,断口有3处灰色2~4mm斑点	凹坑处有微裂纹未贯通,有脆性夹杂物
96D-603-1-30 6MW 转子	34CrMo1A 14t 八瓣锭	轴身3#低倍有条状裂纹	有连续孔洞和裂纹及脆性夹杂物
97S-12-1 12MW 转子	34CrMo1A 16t 电渣锭	轴身低倍有微裂纹、孔洞,断口上有3处白点	在裂纹底部有夹杂物

### 3 用新的锻造工艺理论指导解决大型轴类锻件超探超标缺陷

新的锻造工艺理论认为,平砧间拔长矩形截面毛坯,要实现毛坯中心无轴向拉应力作用,应控制砧宽比  $W/H \geq 0.8 \sim 0.9$ ;要实现毛坯中心无横向拉应力作用,应控制料宽比  $B/H$  在  $0.85 \sim 1.18^{[1,2]}$ 。大型轴类锻件目前超探超标的致命缺陷多发生在轴身本体部分,在用原有的锻造工艺、原有的砧宽为  $W=450 \sim 600\text{mm}$  的上、下普通平砧间拔长时,由表2和表3可知,7种轴类锻件中,只有3MW转子锻件(用普通八角9t钢锭)能满足不形成轴向拉应力的砧宽比  $W/H$  ( $W/H=0.83$ ),和不形成横向拉应力的料宽比  $B/H$  要求 ( $B/H=1.17$ )。因而3MW转子锻件产生超标缺陷较少,历年来其探伤合格率是很高的,均在90%以上。1997年后在用18t钢锭锻制3MW转子锻件时,其第三火方坯拔长,由于料宽比  $B/H$  远远大于1.18(为1.60),因而在变形区的水平对称面附近产生剧烈的剪切变形而萌生层状横向裂纹源。在用450mm窄砧时,12MW转子等锻件拔长中在变形体内就有两向拉应力存在,这个中心部位的两向应力就极易在晶界薄弱处形成新的裂纹源。这两个裂纹源都产生在毛坯轴身本体内部的同一位置——靠中心部位的一个圆柱体内,由于反复变形的结果,而形成微细裂纹缺陷。

对大型轴类锻件超探超标报废后进行改锻,只要合理选择锻造温度、变形量等锻造工艺参数,使锻件内部处于合理应力状态下,改锻修复锻件内部缺陷完全是可行的。太重厂将报废的12MW转子改锻为6MW转子,由于其  $W/H$  达到0.86

和  $B/H$  达到1.11,参数比较理想(见表2、表3),在整个主变形过程中保证了中心无拉应力存在,因而原锻件中的微细裂纹均得到焊合。焊合锻件内部微裂纹等缺陷的首要条件是足够高的加热温度,同时还要在压应力状态下进行足够的变形。这样不但能将其内部的微裂、疏松等缺陷修复,而且还可改善其内部的塑性夹杂、偏析的分布。

12MW转子锻件无论用普通八角23t钢锭,还是用电渣17t钢锭,其在变形过程中的大部分瞬时截面不能满足砧宽比  $W/H \geq 0.8 \sim 0.9$  和料宽比  $B/H = 0.85 \sim 1.18$  的条件(见表2及表3),因而转子锻件轴身本体内部存在着较大的轴向拉应力和横向拉应力。

表2 太重厂转子锻件锻制时的砧宽比  $W/H$ 

锻件名称	所用 锻型	第一火 倒棱	第二火 墩粗	第三火方坯 拔长开始	
				用450mm 窄砧	用600mm 宽砧
12MW 转子	普八角 23t	0.54	0.36	0.47	0.63
6MW 转子	普八角 15t	0.60	0.40	0.50	0.67
3MW 转子	普八角 9t	0.75	0.48	0.63	0.83
3MW 转子	普八角 18t	0.57	0.36	0.47	0.63
12MW 转子	电渣锭 17t	0.62	0.36	0.47	0.63
6MW 转子	电渣锭 13t	0.69	0.40	0.50	0.67
6MW 转子	废12MW 改锻	—	—	0.64	0.86

表3 太重厂转子锻件锻制时的料宽比  $B/H$ 

锻件名称	所用锭型	第一火倒棱	第二火锻粗	第三火方坯拔长
12MW转子	普八角23t	1.0	0.58	1.25
6MW转子	普八角15t	1.0	0.57	1.21
3MW转子	普八角9t	1.0	0.58	1.17
3MW转子	普八角18t	1.0	0.44	1.60
12MW转子	电渣锭17t	1.0	0.58	1.25
6MW转子	电渣锭13t	1.0	0.57	1.21
6MW转子	废12MW改锻	—	—	1.11

按刚塑性力学模型拉应力理论,由于电渣锭17t和13t的原始高宽比  $H_0/D_0 > 2$  (为2.47和2.52), (见表4), 因而锻粗体的外形易呈双鼓形。在锻粗过程后期的高径比  $H_z/D_z < 2$  而  $> 1$ , 即  $2 > H_z/D_z > 1$  时, 此时被动塑性变形区内, 径向拉应力  $\sigma_r$  增大。越接近  $H/D=1$  的毛坯进行锻粗时, 刚性区圆锥体的两个顶点越接近重合, 因而  $\sigma_r$  拉应力区越小。

表4 太重厂转子锻件锻粗时的高径比  $H_z/D_z$ 

锻件名称	所用锭型	钢锭尺寸 mm		钢锭高宽比 $H_0/D_0$	锻粗后期的高径比 $H_z/D_z$
		$H_0$	$D_0$ 平均		
12MW转子	普八角23t	2156	1108	1.94	1.30
12MW转子	普八角23t切底部	1941	1108	1.75	1.17
6MW转子	普八角15t	1788	997	1.79	1.19
3MW转子	普八角9t	1666	804	2.72	1.33
3MW转子	普八角18t	1970	1044	1.88	1.57
12MW转子	电渣锭17t	2400	970	2.47	1.45
6MW转子	电渣锭13t	2200	870	2.52	1.47

表4第2项切掉底部后的普通八角23t钢锭和第3项普通八角15t钢锭, 其  $H_z/D_z$  分别为1.17和1.19, 比较接近于1, 故第二火锻粗时其内部  $\sigma_r$  径向拉应力区非常小, 因而  $\phi 2 \sim \phi 3$  当量密集缺陷区亦较少。

表4的第5项普通八角18t锭锻制3MW转子, 和第6项17t电渣锭、第7项13t电渣锭, 其  $H_z/D_z$  远离1, 它们的径向拉应力  $\sigma_r$  区较大, 因而易产生小当量  $\phi 2 \sim \phi 3$  的密集缺陷区。

#### 4 结论

(1) 大型轴类锻件超声波探伤时, 出现的  $\phi 2 \sim \phi 3$  小当量密集缺陷的实质, 除了部分是白点外, 更多的是微细裂纹、微区疏松、孔洞、针孔等缺陷。

(2) 大型轴类锻件在钢水纯净度较好的情况下, 如在采用了LF-VD真空精炼后, 或ESR电渣重熔和模底吹Ar精炼条件下, 仍然产生小当量超探密集缺陷, 则应从合理的锻造工艺参数入手解决。

(3) 已经在生产中产生小当量超探密集缺陷的大型轴类锻件, 可以通过改锻得到焊合修复和改善。

(4) 防止产生锻件小当量密集缺陷的锻造工艺, 应注意提高始锻温度和在高温下保持时间; 增加平砧的宽度以改变变形条件, 创造良好的内部应力状态。锻后应及时装炉, 锻后热处理等温扩散时间应足够, 使气体和应力得到缓减。

#### 参考文献

- 1 刘助柏. 平砧拔长矩形截面毛坯的新理论. 机械工程学报. 1994, 30(5)
- 2 刘助柏、李纬民. 新FM法锻造法机械工程学报. 1994, 30(4)

(2000年11月1日收稿)

责任编辑 傅冬梅

**重要消息** 因邮电局线路调整,《大型铸锻件》编辑部电话已改为0838-2342462, 敬请留意。