武汉水运工程学院学报
第17卷 第1期 Journal of Wuhan University of Vol. 17 No. 1
1993年3月 Water Transportation Engineering March 1993

TR锻曲轴与疲劳强度的试验研究

杨和庭 彭俊岭 刘正林 李国栋
(船舶机械工程系)

摘要：本文介绍了先进的TR锻锻法制造曲轴毛坯的工作原理。通过TR锻与自由锻两组不同实物曲轴的疲劳试验，得到TR锻曲轴较自由锻曲轴疲劳强度提高16%～22%的结果；以及分析了TR锻曲轴疲劳强度提高的原因有：TR锻材料金属纤维的连续性及锻件内部材质较差部分不致外露、曲轴表面晶粒细小、材料断裂韧性较自由锻材料提高20%。

关键词：曲轴；锻锻；疲劳强度

中图法分类号：TK425；TK426

随着中速柴油机单缸功率的增大，单位功率的柴油机重量和尺度的减小，技术经济指标和工作可靠性要求愈来愈高，因此对其主要零部件的技术要求也相应提高。曲轴是柴油机的主要零部件之一，传统的自由锻造工艺生产的毛坯，因其强度指标所限、机械加工余量大、金属材料利用率低、经济效益较差等原因，已不能满足柴油机技术发展要求。

近年来，我国相继引进了一些国外中速柴油机生产专利，这些专利产品对曲轴制造都要求采用全纤维锻造法。要使引进产品的零部件实现国产化，迫切要求掌握新的曲轴毛坯生产工艺，并在加工质量、机械性能、疲劳强度上满足图纸要求。对此开展了全纤维锻造之一的TR锻锻曲轴的有关试验研究工作。

1 TR锻锻曲轴工艺的原理

锻锻曲轴的坯料，为预先粗车好的台阶轴圆坯。锻造时，将坯料局部加热后，放在锻锻装置的模具上。图1所示，把锻坯上相当于曲拐左右两主轴颈的部位卡在左右工作模块内，把相当于曲销颈的部位卡在上冲头内。将锻锻装置放在水压机横梁下。图2所示，水压机向下压时，上模架1向下移动，使肘杆5转动，左右两肘杆推动两夹紧模块4向中间移动，把锻坯相当于曲柄臂部位的金属锻粗。同时，上冲头3把锻块上相当于曲销颈部位向下错移，直至金属充满模具，曲拐各部分达到锻件尺寸要求为止。一个拐锻完后，按曲拐间要求的角度换定位模块、依次一个拐一个拐相继锻完。

收稿日期：1992-08-02

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

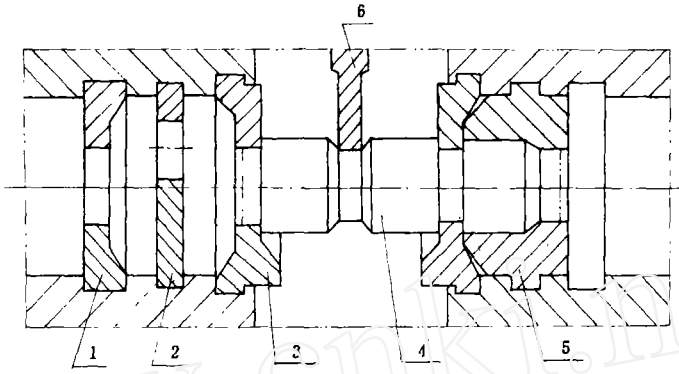


图 1　锻坯安装图

1-主轴颈模块；2-曲销颈模快；3，5-夹紧模快；4-锻坏；6-上冲头

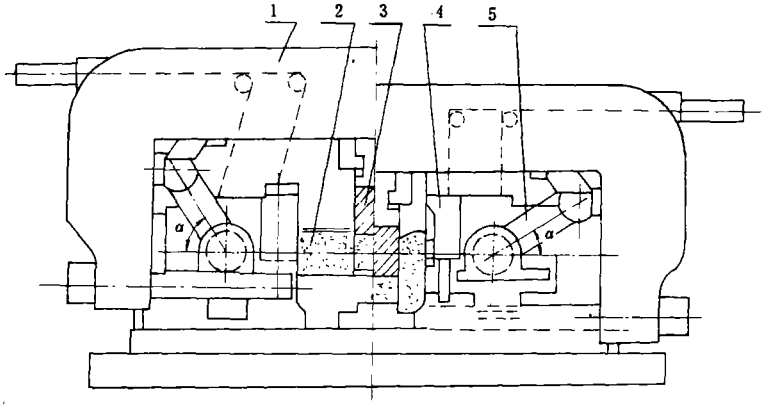


图 2　TR 锻工作原理图

1-上横架；2-锻坏料；3-上冲头；4-夹紧模块；5-肘杆

由于镦锻时，弯曲和镦粗同时进行，使曲轴纤维均匀连续地分布。同时，曲拐角度定位是通过定位模块来实现的，根据产品要求设计各种角度的模块，能够容易地锻出各拐间不同角度的曲轴。另外，还可镦锻出轴的台阶和法兰，满足曲轴各部分形状的要求。

在水压机下行过程中，肘杆倾斜角度可以从 60°变为 20°，由此产生的水平镦粗力随之增大，这与镦粗过程中变形抗力增大相适应，满足镦粗力变化的要求。

由于其水平镦粗力大（约为 RR 锻的 3.5 倍），这样可把曲臂封闭在模具内，类似模锻成形，使曲柄臂外形达到零件要求形状，保证曲柄臂外周在不进行机械加工（黑皮）状态下可装机使用。

样件的机械性能指标（σ_b，σ_s，δ，ψ）和金相检验（氧化物、硫化物、晶粒度、金相组织）均达到图纸要求。通过对实物单拐曲轴的解剖试验，可以看到金属流线分布均匀、致密、连续；在曲柄臂的纵向、径向和切向分别取试样，测得其机械性能指标见表 1 所列。可见该方法得到曲轴具有优良的机械性能。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　曲臂纵向、径向、切向的机械性能

取样方向	σ_b(MPa)	σ_s(MPa)	δ(%)	ψ(%)	HB
纵　向	637	357	22.5	32.0	183
径　向	638	352	22.7	35.0	179
切　向	635	357	25.7	49.0	179

2　TR 镦锻曲轴疲劳强度试验及结果

曲轴在柴油机中承担着将作用于活塞上的爆发压力转变为输出扭矩，承受交变弯曲和扭转负荷，以及各种因素引起的附加弯曲和扭转应力。由于近代船用柴油机装置中能较好地控制附加扭转应力，从而使扭转应力引起曲轴疲劳破坏较少发生，而产生附加弯曲应力的因素众多，因此往往由于弯曲疲劳引起曲轴破坏较多，人们对曲轴的弯曲疲劳强度较为关心。

曲轴是形状复杂、刚性较差的细长零件，在各轴颈与曲臂的过渡圆角处存在严重的应力集中现象。在交变载荷下，曲轴圆角处产生交变拉压应力。进行 TR 锻曲轴疲劳试验研究，对于提高曲轴的疲劳强度具有积极意义。

2.1　试件

TR 镦锻曲轴和自由锻曲轴的单拐试件各一组，每组 6 件，其材料成分及试件尺寸均相同，主轴颈为 ϕ152 mm.

2.2　试验装置

在 CPSQ－1 曲轴共振型弯曲疲劳试验机及测试系统上进行。

2.3　试验结果

根据疲劳试验的试验方法，每一载荷下的循环基数对合金钢材料，取 1×10^7 次。试验结果见表 2 所列。

表 2　疲劳试验结果　　单位：MPa

试件号	TR-1	TR-2	TR-3	TR-4	TR-5	TR-6	ZY-1	ZY-2	ZY-3	ZY-4	ZY-5	ZY-6
疲劳强度	257.41	252.00	250.05	278.29	257.31	264.07	211.69	214.99	217.30	217.00	214.36	220.50

2.4　试验结果分析

由于试件有限，试验结果数据存在分散现象，应用数理统计方法对表 2 中的疲劳强度值进行数据处理，以判断两种不同锻造方法对曲轴疲劳强度的影响。

假设每组曲轴试件数量较多，并且它们的疲劳强度值服从正态分布，每组 6 个试件看作抽样试件，这样可采用 t 分布检验法进行数据处理。

2.4.1　计算各组试件疲劳强度平均值 $\bar{x}$ 和离散度 S，根据公式[1]

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$$

$$S=\sqrt{[\sum_{i=1}^{n}X_i^2-\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n}X_i)^2]/(n-1)}$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中　$\bar{x}$——抽样试件疲劳强度平均值；　X_i——各抽样试件的疲劳强度；

S——抽样试件疲劳强度离散度；　n——抽样试件数。

结果见表 3 所列。

表 3　两组试件 $\bar{x}$ 和 S 值

试　件　组	TR 锻	自由锻
疲劳强度平均值 $\bar{x}$(MPa)	259.81	215.97
疲劳强度离散度	5.74	3.01

2.4.2　F 检验　取显著度 $\alpha=5\%$，查表[1]得 $F_0=7.15$

按公式 $F=\frac{S_1^2}{S_2^2}$ 得　$F=3.63(S_1>S_2)$

式中　S_1^2——镦锻曲轴疲劳强度离散度平方；

S_2^2——自由锻曲轴疲劳强度离散度平方。

因 $F<F_0$，所以两组曲轴总体离散度相等。

2.4.3　t 检验　由 $F<F_0$，所以应用公式[1]

$$t=\frac{\bar{x}-\bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)}}$$

式中　n_1, n_2——TR 镦锻、自由锻试件数；

求得 $t=15.658$，取显著度 $\alpha=5\%$，查表[1]得 $t_0=2.228$，由于 $t>t_0$，说明两组曲轴疲劳强度有显著差异。

2.4.4　区间估计　采用 TR 镦锻工艺时，曲轴疲劳强度较自由锻工艺疲劳强度提高的幅度，应用下式[1]

$$(\bar{x}_1-\bar{x}_2)-t_r S_{12}\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}<\mu_1-\mu_2<(\bar{x}_1-\bar{x}_2)+t_r S_{12}\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}$$

式中　S_{12}——两组试件疲劳强度相关离散度，

$$S_{12}=\sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}};$$

t_r——置信度，取 $t_r=95\%$；

μ_1, μ_2——大批 TR 锻、自由锻曲轴疲劳强度的平均值。

由上式求得 $35.50<\mu_1-\mu_2<54.73$.

因此，在置信度为 95%时，TR 镦锻曲轴疲劳强度比自由锻曲轴疲劳强度提高幅度在 35.5～54.73MPa 之间，即疲劳强度提高 16%～22%.

3　TR 镦锻曲轴疲劳强度提高的原因分析

3.1　材料金属纤维的连续性及锻件的内部材质较差部分不致外露

曲轴的疲劳破坏与其他零件的疲劳破坏一样，都是一个由疲劳裂纹产生→疲劳裂纹亚临界扩展→疲劳裂纹扩展到由于最大循环载荷在剩余截面上产生的应力达到该材料的缺口拉伸

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

强度，或裂纹长度达到材料断裂韧性允许的临界值时，就发生急速破坏的破断过程，要延长曲轴的疲劳寿命，首先要减少疲劳裂纹的产生。过渡圆角处是应力集中的部位。大量的试验和断裂实例表明，疲劳裂纹产生于圆角处，因此要减少过渡圆角处产生裂纹的条件。

对于大型锻件，疲劳裂纹可能是锻造中的缺陷、机械加工造成的划痕或纤维露头。传统的自由锻曲轴，其曲拐的成形是由机械加工方法，将锻件的一块材料挖去，这样致使金属纤维切断，曲轴沿轴向的金属纤维是断续的，且曲柄臂上纤维方向平行于轴向，与所受交变载荷的拉应力方向相垂直，削弱抵抗载荷能力，容易形成疲劳裂纹。尤其当挖去这块金属，形成曲拐时，锻件的内部(即钢锭的心部)成为曲销颈及曲柄臂的内侧表面，这样材质较差的内部成为零件的表面(虽经探伤检查不允许有缺陷存在)，容易产生疲劳裂纹。

用 TR 镦锻法制造的曲轴，单拐纵向解剖试验的金属流线分布连续、均匀、致密，表面与中心的材质均匀，表明 TR 镦锻曲轴消除了自由锻曲轴上述的缺点，减少疲劳裂纹产生的条件，有利于疲劳强度的提高。

3.2 曲轴表面晶粒细小

对于光滑试件疲劳裂纹的萌生模型认为是从滑移带萌生疲劳裂纹，微裂纹在穿过晶粒扩展时，受到晶界的阻碍，晶粒细小则晶界就多，对裂纹扩展的阻碍就大，裂纹扩展慢。如果晶粒大，则微裂纹在穿过晶界数很少时就达到宏观裂纹期，这时裂纹的扩展就受到裂纹尖端应力强度因子的控制，晶粒的大小就不再影响宏观裂纹的生长。

晶界处也常常容易形成疲劳裂纹核心的区域，滑移带到达晶界，滑移方向改变，在晶界处引起高应力区使得滑移不均匀。在应力继续作用下，滑移带在晶界处引起的位移不断增加，应力也不断增加，当应力增加到超过晶界的结合强度时，则晶界处形成裂纹核心。由于大晶粒的晶界长，在晶界上产生的变形量也大，因之引起的局部应力也高，在大晶粒周围优先产生裂纹。

从现有的 TR 镦锻曲轴和自由锻曲轴制造工艺中得到试件，在过渡圆角处分别取样，得到的金相照片，TR 锻的晶粒度在 5～6 级，自由锻的晶粒度为 4 级。可见，TR 锻细小的晶粒有利于疲劳强度的提高。

3.3 断裂韧性 K_{IC} 的提高

断裂韧性 K_{IC} 是材料在平面应变和小范围屈服条件下，I 型裂纹发生失稳扩展时的临界应力强度因子，它表征材料在弹性范围内带裂纹的构件抵抗裂纹扩展的能力。分析曲轴材料的强度指标 σ_b，σ_s 固然重要，作为承受交变载荷的构件当其有裂纹存在时，抵抗裂纹扩展的能力更为重要。TR 锻和自由锻两种不同工艺得到的曲轴，其断裂韧性 K_{IC} 值的差异，正是其疲劳强度差异的原因之一。

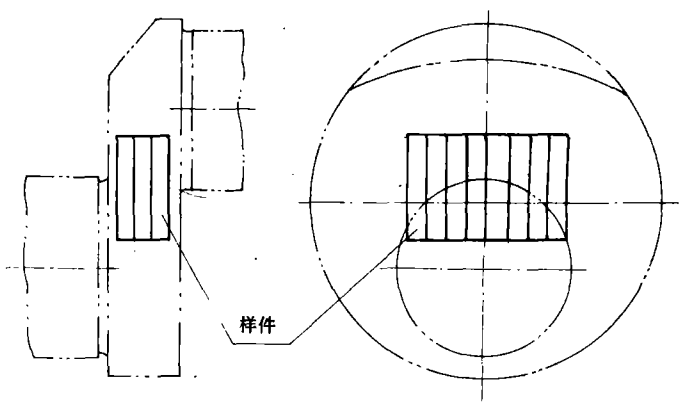


图 3 制取样件部位

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从两种不同工艺得到的曲轴试件上，在曲柄臂上(如图 3 所示)制取样件，经试验测得 TR 锻材料的 $K_{IC}=108MPa\cdot m^{1/2}$，自由锻材料的 $K_{IC}=90MPa\cdot m^{1/2}$，即前者比后者的 K_{IC}值提高 20%.

致谢 本文的试验研究工作得到武汉重型铸锻件厂朱鑫林高级工程师、杜福生工程师及本院金相实验室、材料力学实验室等有关老师和实验人员大力支持和帮助，在此表示衷心感谢！

参 考 文 献

1 浙江大学数学系高等数学教研组. 概率与数理统计. 北京：人民教育出版社，1979

2 彭俊岭. TR 锻级曲轴弯曲疲劳强度的试验研究：[学位论文]. 武汉：武汉水运工程学院，1990

On TR Upsetting Crankshaft and Its Fatigue Strength

Yang Heting　Feng Junling　Liu Zhenglin　Li Guodong

(*Department of Marine Machinery Engineering*)

Abstract

The paper introduces the working principle in making crankshafts by using advanced TR upsetting. Comparting fatigue tests on TR upsetting and open die forging, this paper finds that the fatigue strength of the TR upsetting crankshaft is 16 — 22 percent higher than that of the open die forging crankshaft. This is because due to the fact that the TR upsetting crankshart has the continuity of metal fibers and no bad externals of forging meterials; it has fine grains on the surface; its fracture toughness is 20 percent higher than that of the open die forging crankshaft.

Key words: crankshafts; upsetting; fatigue strength

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net