38MnSiV5非调质钢在发动机曲轴上的应用

□ 神龙汽车有限公司 / 高阳

为提高汽车发动机曲轴的性能，开发了一种汽车曲轴用中碳钒氮微合金化非调质钢38MnSiV5。本文介绍了曲轴的化学成分、力学性能、金相组织、表面强化处理、疲劳性能测试和发展趋势。结果表明，38MnSiV5非调质钢曲轴具有高的强韧性和优异的综合性能，对先进汽车制造的发展有重要意义。

随着国家节能减排要求的日益提高，增压及增压中冷发动机已成为市场主流，功率和爆发压力增加了，可靠性要求、排放要求也必然提高，对曲轴的性能需求也越来越高（比如复合强化、高的安全系数、轻量化等）。曲轴作为及其重要的安全件，在周期性变化的气体力、惯性及其力矩的共同作用下工作，承受着弯曲和扭转交变载荷，因此需要具有较高的强度、良好的耐磨、耐疲劳性及循环韧性，即优异的综合力学性能和抗疲劳强度，否则曲轴易发生早期弯曲或断裂、轴颈磨损和疲劳失效。

目前，汽车发动机曲轴典型用材有球墨铸铁（含ADI）、调质钢（45、40Cr、40MnB、42CrMo）、非调质钢（C38N2、S38MnSiV、S45CVS、48MnV、49MnVS3）等，各大汽车主机厂近年来逐步广泛应用非调质钢取代调质钢制造汽车关键结构件。本文推荐开发了一种适于生产汽车发动机曲轴用的中碳钒氮微合金化非调质钢38MnSiV5。

38MnSiV5曲轴原材料

现在小排量大功率涡轮增压发动机日渐兴起，根据曲轴的使用性能要求，我公司与国内某知名钢厂联合开发生产了新型中碳钒氮微合金化非调质钢38MnSiV5汽车发动机曲轴，钢厂采用电炉或转炉冶炼（EAF/BOF）+钢包精炼（LF）+真空脱气（VD/RH）+连铸（CC）生产，铸坯至成品轧制比≥8，交货状态为热轧扒皮态，硬度要求≤269HB。

在钢材的横截面酸浸低倍组织或断口试片上不得有肉眼可见的缩孔、皮下气泡、裂纹、夹杂、翻皮、白点和晶间裂纹等缺陷，锭型偏析、中心疏松、一般疏松均应≤2级。

非金属夹杂物按GB/T10561进行检验，各项要求为：A类≤5.0级、B类≤1.5级、C类≤2.0级、D类≤1.5级、DS类≤2.0级，B+C+D≤4.0级。

采用SPECTRO火花直读光谱仪抽样分析化学成分，结果见表1，满足技术要求。

表1　38MnSiV5的化学成分　（质量分数，%）

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Ti	O	N
min	0.36	0.5	1.2	–	0.045	0.1	–	–	–	0.01	0.11	–	–	0.012 5
max	0.4	0.8	1.5	0.02	0.065	0.2	0.15	0.06	0.3	0.04	0.14	0.02	0.001 5	–
实测	0.38	0.683	1.306	0.009	0.053	0.13	0.12	0.03	0.04	0.027	0.128	0.011	0.000 8	0.017 9

（备注：锰当量Mneq=%Mn+0.35%Ni+1.5%Cr+2%Mo+0.17%Cu=1.58~1.68；C允许偏差-0/+0.02%，S允许偏差-0.005/+0%）

38MnSiV5是一种中碳铁素体-珠光体型高强韧非调质钢，在Mn-V非调质钢的基础上加入了Ni、N等元素改善钢的韧性。w_C控制在0.36%～0.40%，既能保证钢具有较高的强度，又使其塑韧性不会出现明显的降低。Si在一定程度上能提高钢的强度，但进一步增加易生产马氏体组织。Mn不仅能提高强度，在一定范围含量还对韧性有帮助，含量低强度表现不足，含量过高不利于钢的韧性和强度。V是重要的析出强化元素，在不影响钢的塑韧性情况下，在铁素体和奥氏体中的析出物能大幅度提高钢的强度，与Cr、Ni、Mo、Ti等合金元素还有细化晶粒的良好作用。O是有害元素，要严格控制；N与钒等易形成氮化物或氮碳化物，将晶粒细化、通过析出强化来提高钢的强韧性，研究结果表明，非调质钢中增氮到0.01%～0.02%对提高钢的性能十分有利。我单位应用的38MnSiV5曲轴材料在保证力学性能的前提下，S的添加量在较高的水平，能显著改善钢的易切削性能。

曲轴试制工艺及性能

1. 制造流程

38MnSiV5曲轴的生产工艺大致为：棒材下料（锯割）→变频加热→温度分选→去氧化皮→锻造→切边+热校正→控温冷却→清理喷丸→表面强化处理→探伤→包装入库。

2. 关键特殊工艺

感应加热的温度不能超过1 300℃，加装温度分选装置，可有效地区分高温料和低温料，高温料直接报废，低温料允许重复加热，但不可超过3次。

锻造主要包括制坯、预锻、终锻工序，因曲轴具有较大的高宽比（2H/W=8.6），带来了较低的材料利用率，所以锻造设备需提供大的变形功。依据现生产工艺试验，技术人员需要确定合理的坯料尺寸及模具设计，采用热模锻压机，其曲柄滑块机构具有固定行程、生产批量大，可多工位连续锻造成型，锻件的尺寸精度高，锻造加热温度为1 250～1 300℃，终锻温度≥1 100℃。锻造设备的选择可参考下列公式：

$$P=1.59\times K\times W^{0.5921}$$

式中 P——设备吨位（MN）；

K——吨位系数，曲轴取4～4.5；

W——经济锻重（kg）。

通过控制坯料的加热温度、终锻温度和冷却速度，有效保障曲轴毛坯的综合力学性能和加工性能。参考38MnSiV5的CCT曲线，严格控制控温冷却线的输送带速度、冷却风扇转速、毛坯进入冷却箱前的温度，使冷却速度在1.5～2.5℃/s的范围，此为关键工序。

分别在曲轴受力较大两头（靠近前端轴和后端轴）线切割取样，取样方式及位置如图1所示。

将钢坯机加工至ϕ50mm的试棒，加热至1 100～1 200℃后保温30min，在静止空气中冷却，然后在预处理试棒的1/2R处提取拉伸试样（ϕ10mm）和冲击试样，测定纵向力学性能，结果见表2。金相组织为F+P，铁素体含量＜30%，无贝氏体出现，奥氏体晶粒度6～7级，如图2所示。

后续关键工序包括机加工以及表面强化处理，表面强化工艺有圆角滚压、感应淬火、软氮化、氮化

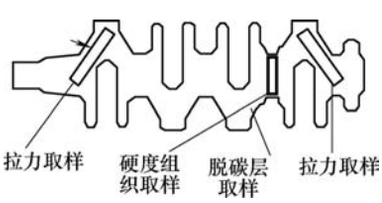
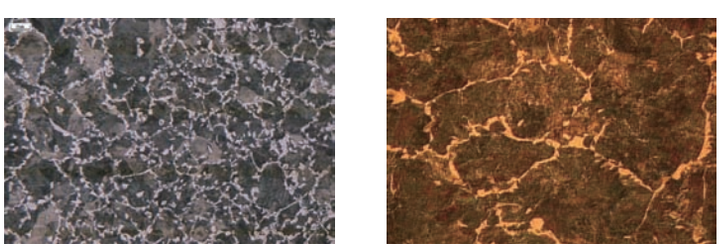


图1 38MnSiV5曲轴的机械性能检测取样示意

表2 38MnSiV5曲轴毛坯的力学性能

性能参数	Rp0.2/MPa	Rm/MPa	A（%）	KU2/J·cm^{-2}	硬度/HB
指标	≥550	850～1000	≥12	≥20	255～302
38MnSiV5	722	968	15	25	285（平均）

（备注：主轴颈、连杆颈中心贝氏体区域显微硬度≤570HV0.1）



（a）100× （b）500×

图2 曲轴毛坯的金相组织

加滚压（或相反）。

曲轴的两大失效方式是轴颈磨损和疲劳断裂，对曲轴表面进行强化成为必然。经表面强化处理后的曲轴，在硬度、耐磨性及抗疲劳强度等方面都有不同程度的提高，从而可有效保证曲轴的最终成品性能，主要强化技术有圆角滚压、喷丸、表面氮化、感应淬火热处理等。

圆角滚压是利用滚轮的压力作用，在曲轴的主轴颈和连杆颈过渡圆角处形成一条滚压塑性变形带，圆角滚压后曲轴的疲劳寿命可提高100%以上，甚至达到200%以上，塑性变形带具有粗糙度改善、硬度提高、产生残余压应力的效果。

氮化包括气体氮化、软氮化（氮碳共渗）、离子氮化和盐浴氮化等，适用于各类曲轴，主要是为了提高曲轴轴颈的硬度、耐磨性和耐腐蚀性，对提高曲轴疲劳强度方面贡献不大，大约30%左右。

经圆角喷丸形成的冷作硬化层也能提高曲轴20%～40%的疲劳强度，因喷丸时需保护轴颈表面，对其他性能无提高功效，故采用较少。轴颈淬火主要是感应淬火，大幅度增加曲轴轴颈表面的硬度和耐磨性，并能提高曲轴的抗疲劳强度。该强化方式应用于球铁曲轴时，能提高疲劳强度的20%左右，而应用于钢曲轴时，可精确控制表面硬度在50～55HRC，提高疲劳强度100%以上，其他强化手段则难以达到。目前采用的感应淬火工艺，淬火区域普遍包含圆角区域，图3中可见感应淬火区域及锻造流线。感应淬火的技术指标主要有表面硬度、硬化区范围、硬化层深度、金相组织、淬火变形量等，制订工艺时要充分考虑曲轴的材料，控制间隙、加热功率、加热时间、冷却时间、工件余热、淬火冷却介质的浓度及压力等这些电参数和热参数。

机械加工含钻孔、磨削、滚压、抛光等，对曲轴的平衡进行必要的严格测试盒检查，如图4所示。EMAG矢量磨削加工凸缘、半径（圆角）和直径（主轴颈、连杆轴颈、轴承面等）位置是一项不错的精细加工新技术，大大削减了成本，为汽车制造商开启了全新的可能性。

目前，在汽车发动机曲轴上应用较多的是复合强化工艺，一般有氮化加圆角滚压和感应淬火加圆角滚压两种。

曲轴疲劳强度测试

1. 疲劳试验

根据对曲轴失效模式的统计表明，弯曲和扭转疲劳断裂是曲轴的主要失效形式，而弯曲疲劳断裂占曲轴的失效总数的95%以上。因此，曲轴疲劳极限主要以测定平面弯曲疲劳极限为主，比如升降法、QCI恒定载荷法等。东风汽车公司工艺研究所起草了《汽车发动机曲轴弯曲疲劳试验方法》，其他的弯曲疲劳试验标准据报道还有FEV某标准、AVL某标准、日本某标准等，法国PSA集团的疲劳极限测试新方法优于传统方法，它实质上是重复法（Itération）和阶梯法（Eescalier）的综合运用。

以我公司的TU5型发动机曲轴为例。重复法是通过试验载荷从极大值和极小值之间不断重复收敛逐渐逼近疲劳极限的试验方法，如图5的疲劳曲线（疲劳极限试验数值结果此处不再列出）；阶梯法是设定最大循环次数N，将载荷按照算术级数间隔的应力水平阶梯进行升降变换，阶梯的阶距d约等于疲劳极限σ_d的2.5%，通过断裂和不断裂顺序界定疲劳极限σ_d。

PSA集团曲轴疲劳试验设备如图6所示，可以任意调节力值，载荷施加在曲轴承载负荷最大的危险截面上（第一主轴颈和第一连杆颈之间），利用一个杠杆臂施加应力，形成的是交变不对称平面弯矩，在危险截面处的应力是拉应力大于压应力，简称“大拉小压”（见图7）。其载荷系数R（表示最小力矩和最大力矩的比例特征）按

图3　曲轴的锻造流线（经过感应热处理后）

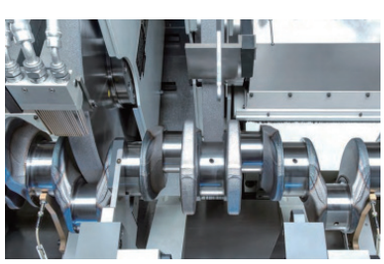


图4　曲轴的机械加工

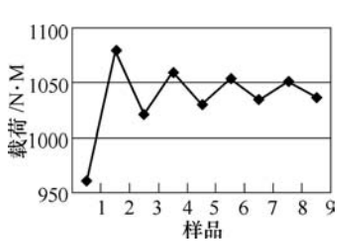


图5　重复法测试TU5曲轴疲劳极限的曲线

如下方式设定：$R=C_{min}/C_{max}=-1/2$。

该方法目前被神龙汽车公司引进并应用，在新车型曲轴的开发和现生产质量保证方面得到了充分应用。它对现生产的控制优于传统的疲劳强度测试方法，是一种非常具有推广价值的疲劳强度测试新方法。

2. 扭转振动

目前，国内对曲轴进行疲劳寿命的考察，扭转疲劳试验的技术手段和积累不多。国外的一些大型车企形成了各自的试验方法，成功应用在产品开发和生产检验上，比如德国的道依茨（DEUTZ）公司采用的是电磁激振式试验机，而非液压伺服式、惯性振动式试验机。

一汽近些年完成了对电液伺服系统、曲轴疲劳试验机、惯性振动式扭转疲劳试验机的开发。

华南理工大学通过测量皮带轮和飞轮间的相对角位移以及各曲轴轴颈的力矩，计算相对角位移和各曲轴轴颈力矩，对V6发动机开发研究了曲轴扭转振动特性及其评价方法。

发展趋势

目前曲轴的常用材料是锻钢和球墨铸铁（含等温淬火奥贝球铁ADI），压力铸造纤维和颗粒增强铝合金复合材料的出现，已经可以部分替代球铁曲轴，但目前工艺尚不成熟，还不能满足大规模工业化生产的要求。在曲轴的选材上，以上几种材料因自身特点各有其应用范围和发展前景。

论性能，锻钢材料最优，球铁次之，铝合金复合材料靠后。但是并非所有的情况下都选择性能最优的钢，而应该从各方面综合考虑，比如性价比等。球铁的适用范围广、成本低，ADI逐步取代了部分锻钢制造中低功率发动机曲轴；锻钢性能好，是现今大功率和增压发动机曲轴的主选，但调质钢变形大能量损耗高，微合金非调质钢替代调质钢制造曲轴仍是主要发展方向。因此，发动机曲轴材料的选择不仅要先满足使用性能，而且得考虑成本、环保、轻量化等一系列要求，表3是我司采用非调质钢取代球铁制造某型号发动机曲轴的对比表。

结语

（1）采用中碳钒氮非调质钢38MnSiV5试制汽车发动机曲轴，原材料各项技术参数（成分、低倍组织、非金属夹杂物、晶粒度等）满足要求。

（2）通过前期冶炼、控轧、锻造控冷以及后续的机加和表面强化处理，38MnSiV5发动机曲轴具备较高的疲劳极限和综合性能，能更好地满足小排量高爆发压力发动机对曲轴的强度要求。

（3）介绍推广了PSA集团对发动机曲轴的疲劳测试新方法。

（4）非调质钢38MnSiV5以其优良的综合性能和节能减排优势，在汽车结构件上应用前景将是十分广阔的。

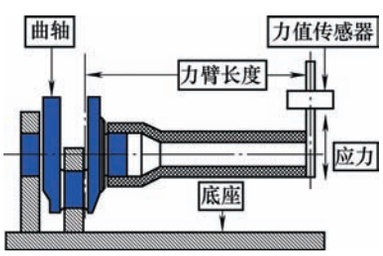


图6　试验装置原理图

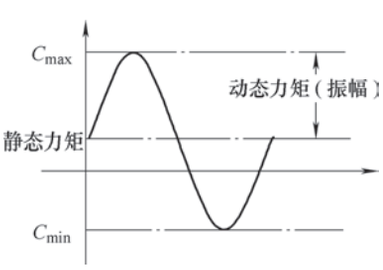
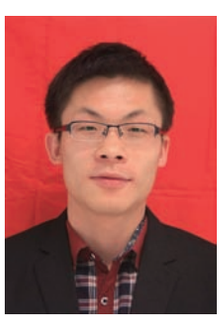


图7　曲轴的应力曲线

表3　38MnSiV5曲轴与球铁曲轴的对比表

指标 / 材料	设计疲劳强度（循环1×106次）/N·M	质量/kg	轻量化效果	疲劳强度增幅
球铁	960	12.1	9%	50%
38MnSiV5	1 440	11		

AUTO1950



高阳

硕士，工程师，毕业于华南理工大学，就职于神龙汽车技术中心，发表论文二十余篇、获得专利13项。