doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160809002

齿轮钢30CrMnTi磨削强化试验

乔治',梁志强',赵文祥',李宏伟^{1,2},黄迪青',王西彬'

(1.北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室,北京100081;2.北京北方车辆集团有限公司,北京100072)

摘 要: 30CrMnTi钢广泛应用于齿轮的生产制造中,为提高齿轮的抗疲劳性能及探讨磨削工艺参数对其表面强化的影响,开展了齿轮钢30CrMnTi的磨削试验,分析了磨削速度和磨削深度对磨削表面强化层显微组织、强化层深度、表面显微硬度和强化层残余应力的影响规律。结果表明,齿轮钢30CrMnTi磨削加工后得到一定强化层,表面显微组织为针状马氏体、碳化物和少量残余奥氏体,且强化层马氏体组织由磨削表面到心部呈"细—较粗"的变化趋势,硬度先增大后减小,强化层深度随磨削深度或磨削速度的增大而增加,磨削后表面显微硬度提高2%~13%,随磨削速度降低或磨削深度增大而增大。磨削过程对残余应力的影响在表面表现为拉应力,沿层深向内逐渐转化为压应力。磨削表面残余压应力的值随磨削速度或磨削深度的增大而降低。通过合理的磨削参数可实现齿轮钢30CrMnTi的表面磨削强化。

关键词:齿轮钢;磨削;强化;显微硬度;残余应力

中图分类号: TG580.6

文献标志码:A

文章编号:1007-9289(2017)01-0026-07

Grinding Hardening of 30CrMnTi Gear Steel

QIAO Zhi¹, LIANG Zhi-qiang¹, ZHAO Wen-xiang¹, LI Hong-wei^{1,2}, HUANG Di-qing¹, WANG Xi-bin¹

Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
 Beijing North Vehicle Group Corporation, Beijing 100072)

Abstract: The gear steel 30CrMnTi is widely used for the fabrication of gear. In order to improve the anti-fatigue performance of the gear and clarify the effect of grinding process parameters on the surface grinding-hardening, symmetrical grinding experiments on 30CrMnTi were carried out. Microstructure and thickness of the hardening layer, surface micro-hardness and residual stress at different grinding speeds and depths were analyzed. The results show that the hardening layer of gear steel 30CrMnTi is formed in grinding procedure, and its microstructure includes acicular martensite, carbide and residual austenite. In the hardening layer, the microstructure of the martensite becomes coarser from the surface to the inner, and the micro hardness increases firstly and then decreases along the direction. The thickness of the hardening layer increases with the increase of grinding speed or the increase of depth. The residual stress on the grinding process is tensile stress, which gradually transforms into compressive stress when the depth reaches a critical value. The value of the residual compressive stress on the grinding surface decreases with the increase of grinding depth and speed. The gear steel 30CrMnTi can be hardened by the appropriate grinding parameters.

Keywords: gear steel; grinding; hardening; micro hardness; residual stress

收稿日期: 2016-08-09; 修回日期: 2016-12-23

通讯作者:梁志强(1984—),男(汉),副教授,博士;研究方向: 难加工材料切削磨削; E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn

QIAO Z, LIANG Z Q, ZHAO W X, et al. Grinding hardening of 30CrMnTi gear steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 26-32.

网络出版日期: 2017-01-04 14:26; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170104.1426.006.html

基金项目: 国防基础科研项目(A0920132008); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB059900)

Fund: Supported by Basic Research Projects of National Defense(A0920132008) and National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2015CB059900)

引文格式: 乔治,梁志强,赵文祥,等.齿轮钢30CrMnTi磨削强化试验[J].中国表面工程,2017,30(1): 26-32.

0 引 言

30CrMnTi作为一种高强度高淬透性合金钢^[1], 由于其强度高,韧性好的特点,广泛应用于齿 轮,尤其是螺旋伞齿轮等重载齿轮的生产制造。 而对于齿轮来说,齿面的表面显微硬度、强化层深 度、显微组织、残余应力以及表面粗糙度等都会对 齿轮齿根的抗弯疲劳、抗冲击能力、齿面接触疲劳 等起到决定性作用,最终影响齿轮生产合格率。 开展齿轮钢30CrMnTi的表面性能研究对其生产制 造意义重大。

目前齿轮的生产流程普遍采用"铣齿—热处 理—磨齿"工艺, 磨削作为齿轮加工环节中的最 后一步,可以修正热处理环节中产生的变形误 差。在传统的工艺路线中,为了防止磨削环节中 产生的磨削热引起的热损伤,往往采用湿磨的方 式降低磨削温度以避免磨削烧伤。但近年来,许 多学者研究发现,可以在干磨的条件下通过优化 工艺参数的方法来达到相似目的,同时主动利用 磨削环节中干磨产生的磨削热, 仿制高、中频淬火 热源,在磨削加工的途中达到对钢件表面性能进 一步强化的目的^[2],相比喷丸和电火花等表面强化 方式[3],有效地将强化工艺集成到机加工生产线 中,具有生产周期短,成本小,污染少等优点, 具有显著的经济和社会效益。德国的 BRINKSMEIER和BROCKHOFF首先提出利用磨 削热对钢件表层进行强化处理,使用刚玉砂轮磨 削40CrMnMo钢,通过大量试验研究验证了这项 工艺的可行性[4-5]。南京航空航天大学顾珅珅通过 磨削试验研究了渗碳淬硬20CrMnTi材料磨削用量 与磨削力、磨削比能、磨削温度和淬硬层深度之间 的关系,进而对有效控制磨削残余应力,实现低 应力磨削提出了参考性意见。东北大学张修铭针 对磨削强化过程中磨削液对磨削力和磨削温度场 的影响,建立了非调质45钢磨削强化过程的仿真 模型,分析了不同磨削液参数对工件表面硬度值 及其表面完整性参数的影响「?」。东北大学史小亮以 45钢为对象,进行了预应力磨削强化实验,测量 了磨削表面后的硬度,得到了预应力对45钢屈服 强度和马氏体相变的影响规律^[8]。

针对齿轮钢30CrMnTi材料,通过磨削试验分 析磨削加工前后强化层组织和应力的转变情况, 然后以不同磨削速度和磨削深度进行磨削强化试 验,研究强化层显微硬度梯度、强化层深度、磨削 表面显微硬度和磨削表面残余应力的变化规律, 为齿轮钢30CrMnTi磨削表面强化加工方法提出指 导理论。

1 试验设计

磨削试验在德国ELB公司高精度数控平面磨 床N10 Kombi KGT 840D上进行,试验装置如 图1所示。

砂轮采用粒度46的溶胶凝胶(sol-gel)工艺合成 并经烧结制成的微晶氧化铝砂轮(SG砂轮),相比 传统刚玉磨料,具有磨耗比高,工件表面加工质 量好,砂轮修整量少,磨削效率高等优势,更适 用于齿轮钢的磨削。工件为表面渗碳淬火后 30CrMnTi钢(渗碳温度900℃,渗碳层深为1.0~ 1.4 mm,淬火温度800℃,油冷降温,回火温度 180℃,空冷),尺寸为30 mm×20 mm、且 保证渗碳层为磨削面,其成分和材料性能见 表1和表2。



图 1 磨削试验装置示意图



表 1 30CrMnTi的化学成分

Table 1 Main composition of 30CrMnTi					(<i>w</i> /%)
Element	С	Si	Cr	Mn	Ti
Content	0.24-0.32	0.17-0.37	0.80-1.10	1.00-1.30	0.04-0.10

表 2 30CrMnTi的材料性能

Table 2 Material properties of 30Cr	Mn I 1
Physical property Parameters	
Tensile strength, $\sigma_{\rm b}$ / MPa	≥1 470
Reduction of area, $\psi / \%$	≥40
Elongation, δ_5 / %	≥ 9
Impact energy, A_{kv} / J	≥47
Impact toughness, α_{kv} / (J·cm ⁻²)	≥59 (6)

为了保证磨削环节中产生大量的磨削热,使 用空气冷却的方式。试验采用单因素试验法,考 察磨削速度和磨削深度对表面性能的影响,具体 磨削参数见表3。

加工完成后使用FM300显微硬度计测量强化 层梯度硬度以及磨削表面显微硬度。然后采用体 积分数为4%的硝酸酒精溶液对磨削表层进行抛光 腐蚀处理,使用基恩士3D激光共焦显微镜观察表 层显微组织。使用爱斯特X-350A型X射线应力测 定仪结合电解抛光的方法测量表层残余应力,磨 削后的残余应力检测方向为垂直磨削方向。

表 3	磨削强化试验条件

Table 3	Test conditions	of grinding	hardening
1 abic 5	i est conuntions	of grinding	naruening

Factors	Parameters	
Wheel diameter / mm	400	
Grit designation	46	
Grinding speed, $v_{\rm s} / ({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	15.2, 17.8, 20.3, 22.8, 25.3	
Grinding depth, $a_p / \mu m$	10, 30, 50, 70, 90	
Table speed, $v_{\rm w} / (\rm mm \cdot min^{-1})$	1 200	
Grinding method	Up-grinding	
Cooling	Dry	

2 试验结果分析

2.1 强化层组织分析

图2显示了30CrMnTi磨削加工前后(v_s= 20.3 m/s, *a_p*=50 μm)表面和心部的高倍显微组 织。可以看到表面的组织为针状马氏体、碳化物和 少量残余奥氏体,且磨削后与磨削前表面显微组 织相比,针状马氏体的组织更为细小。这是因为 磨削加热时间很短,形成的奥氏体晶粒大小极 细,所以得到的马氏体组织更为细小。并且因为 磨削引起二次淬火的原因,热处理过程中来不及 转化的残余奥氏体进一步转化为了马氏体,所以 磨削后表面残余奥氏体含量下降。磨削对心部组 织的改变较小,心部组织为板条状马氏体+铁素 体,存在铁素体的原因是因为心部实际淬火的温 度处于Ac₁~Ac₃ 两相区之间,升温过程中铁素体 组织不能完全奥氏体化,所以在降温过程中组织 中存有剩余的铁素体。

此外,将30CrMnTi磨削后沿截面线切割切 开,得到的强化层显微组织如图3所示。图中可以 看到,表层未出现明显白层和暗层组织,强化层



(a) Surface layer before grinding

(b) Surface layer after grinding

(c) Inner layer





图 3 磨削后强化层断截面显微组织

Fig.3 Microstructure of longitudinal section of hardening layer after grinding

内的马氏体随磨削表面到心部呈"细—较粗"的 变化趋势,由针状马氏体过渡为片状和板条状的 混合形态,且残余奥氏体含量逐渐减少。这是因 为30CrMnTi材料中Ti元素起到了细化晶粒的作 用,另外由于Cr元素和Mn元素带来的高淬透性, 组织成分较为均匀。可以看到磨削加工过后很好 的保留了渗碳层的组织成分。

2.2 强化层深度分析

图4为未经磨削加工的原始试样至表面不同距 离的硬度。图中可以看出试验工件渗碳层深约为 1.0~1.2 mm,且渗碳层显微硬度在685 HV左右变



Fig.4 Microhardness of sectional original workpiece

化不大。距表面1.2 mm以后,碳含量逐渐下降, 所以显微硬度随之减小。到1.8 mm深后,到达基 体组织,碳含量保持不变,基体显微硬度维持在 475 HV左右。

为探讨磨削参数对强化层深度的影响,着重 研究渗碳层(1 mm以内)磨削加工后显微硬度的变 化情况,其结果如图5所示。



图 5 不同磨削参数下强化层硬度梯度

Fig.5 Microhardness gradient of hardening layer under different grinding parameters

由图5可以看到,磨削过后强化层显微硬度均 有一定提高,且强化层梯度硬度均保持先增大后 减小的规律。由2.1节分析可知,磨削过后强化层 马氏体组织细小,这种针状马氏体相比基体板状 马氏体硬度较高,故强化层硬度提高。而梯度硬 度先增大后减小是因为靠近磨削表面存在残余奥 氏体,导致磨削表面显微硬度略有降低,随着至 表面距离增加,残余奥氏体含量逐渐减少,故显 微硬度达到最大值。以大于原始渗碳层显微硬度 685 HV区域的长度记为强化层深,得到强化层深 随磨削参数的变化趋势如图6所示。

通过图6可以看到,随着磨削深度增加 (vs=20.3 m/s),强化层深度呈增大趋势。这是因为 磨削深度增大,工件的接触弧长增长,参与磨削 的有效磨粒数增加,单颗磨粒未变形切削厚度增 大,这些共同导致传入工件的能量增加,使得工 件表面强化层厚度增加。磨削速度增加时(a_n= 50 µm),强化层深度同样增大。这是因为磨削速 度增加,单位时间内参与磨削的有效磨粒数增 多,切削变形能增大,单颗磨粒的平均未变形切 削厚度变小,加剧了挤压和摩擦作用,使得磨粒 在工件表面滑擦次数增多,造成摩擦加剧,传入 工件表层的磨削热相应增加, 使得表层内达到淬 火温度的层深距离变大,最终造成工件表面强化 层厚度增加。所以为了获得较深的强化层和高表 面硬度,可以适当增加磨削深度以及提高磨削速 度。但对齿轮来说,除了表面显微硬度,还需要 综合考虑表面粗糙度、表面残余压应力等其他技术 指标,单纯的提高磨削深度会导致表面粗糙度增



图 6 磨削参数对强化层深度的影响

Fig.6 Influence of the grinding parameters on hardening layer thickness

大,砂轮磨损加剧,磨削烧伤严重等问题,所以 为得到齿轮钢30CrMnTi磨削最佳表面性能,需要 对磨削参数进行优化控制。

2.3 表面显微硬度分析

齿轮在啮合传动过程中,两个轮齿的表面往 往需要接触并承受很大的载荷,表面硬度不够则 会造成齿轮磨损、开裂等严重问题,同时有研究表 明¹⁹¹,齿面硬度的提高可以使得齿轮接触疲劳的极 限应力增大,提高齿轮的疲劳寿命,研究齿轮钢 30CrMnTi磨削后表面显微硬度同样十分重要。

不同磨削速度和磨削深度所对应的工件磨削 表面显微硬度如图7所示。由图7可以看到,磨削 后表面显微硬度相比磨削前表面显微硬度均有提 高,硬化程度在2%~13%之间,且由于表面存在残 余奥氏体的原因,磨削表面硬度大小略低于强化 层内最高硬度。当其他参数保持不变时,随着磨 削速度增加表面显微硬度逐渐减小,随着磨削深 度增大表面显微硬度逐渐增大。

这是因为磨削加工中影响加工表面硬化的因 素有两方面,一方面是磨削力产生的塑性变形作 用,它会使晶格发生扭曲,晶粒拉长甚至碎化, 这些都会使磨削加工后的工件表面硬度提高。另 一方面是磨削热的作用,磨削热会使塑性变形产 生回复和再结晶,失去加工硬化,从而形成软化 作用。但如果磨削区温度过高,超过了材料的相 变温度,还会使工件表面发生二次淬火,由以上 探讨已知,这种磨削加工后形成的针状马氏体组 织细小且硬度较高。









50 µm), 磨削表面显微硬度降低。这是因为磨削 表面组织成分差别不大,组织引起的硬度差别较 小,而单颗磨粒的平均未变形切削厚度减小,降 低了每颗磨粒上的磨削力, 磨削力减小导致塑性 变形变小,冷作硬化程度减小,硬化程度相应降 低。与此同时磨削速度增加,单位时间内的工作 磨粒数增加,加剧了挤压和摩擦作用,使得磨粒 在工件表面滑擦次数增多,造成磨削热的提高。 虽然传入工件的能量增多使强化层深度增大,但 由于磨削表面温度的进一步升高相应引起的软化 作用增强。这些原因共同导致工件表面显微硬度 有所降低。当磨削深度增大时(v_s=20.3 m/s),显微 硬度增大。这是因为随着磨削深度增大,参与磨 削的有效磨粒数增加,单颗磨粒未变形切削厚度 增大,砂轮接触弧长增长,这些共同导致磨削过 程中的磨削变形力和摩擦力增大,所以磨削力和 磨削热都相应增大。磨削力增大使得工件表面塑 性变形变大,冷作硬化程度加强,相比磨削热产 生的软化作用,起到主导因素,所以最终导致加 工硬化程度增强。所以从提高齿轮钢30CrMnTi磨 削后表面显微硬度的角度来说,可适当增大磨削 深度和减小磨削速度。

2.4 表层残余应力分析

对齿轮来说,残余应力控制不当会使齿面发 生变形,造成齿面误差,影响齿轮啮合传动,合 适的残余压应力可以提高工件疲劳强度,而残余 拉应力过大,高于工件所能承受的疲劳极限时会 使表面产生磨削裂纹,影响齿轮的使用寿命。所 以需要开展齿轮钢30CrMnTi磨削后强化层的残余 应力研究。

对于文中试验采用工件,磨削前由于渗碳淬 火处理的原因在表层已经存在了一定的残余应力 层,而磨削后表面的最终残余应力σ由毛坯表面层 原始应力σ₀和磨削过程残余应力Δσ两部分组 成^[10]。研究磨削后的表面残余应力σ首先需要对工 件原始残余应力σ₀进行分析。对未经磨削时工件 原始应力状态σ₀沿层深的变化规律,得到结果如 图8所示。

通过图8可以看到,工件渗碳层区域表现为残 余压应力,表面残余应力约为-225 MPa,且在大 约0.4 mm深处表现为残余压应力极大值,大小约 为-360 MPa,沿层深继续向内,残余压应力的值





逐渐减小,到渗碳层至心部的过渡层区域时,残 余应力发生了压应力向拉应力的转变。开展磨削 过程对表层残余应力影响的研究,选用磨削速度 *v*_s=20.3 m/s、磨削深度*a*_p=50 μm的工件,磨削去除 量约为0.2 mm,测得磨削加工后表层的残余应力 *σ*如图9所示。

由图9可知,磨削过后强化层残余应力分布状况有变化,一方面来自于磨削过程本身引起的残余应力,另一方面源于磨削加工中磨削去除量减少了压应力层的保留程度,最终得到的磨削后表层残余应力是这两者综合作用的结果。而磨削过程引起的残余应力Δσ即为减少磨削余量去除层后原始工件和磨削后工件表层残余应力的差值,如图10所示。

由图10可知, 磨削过程残余应力Δσ在表面表 现为拉应力,沿层深向内逐渐转化为压应力。这 是因为对于渗碳淬火后的30CrMnTi工件, 磨削加 工过后表面的针状马氏体更为细小,但组织成分





Fig.9 Residual stress in surface layer after grinding process

没有改变,故组织产生的应力转变较小,对表面 残余应力起主导作用的是热应力产生的拉应力。 则基于磨削过后表面残余压应力尽可能大的目的 可考虑将齿轮钢30CrMnTi的磨削去除余量控制在 0.3~0.4 mm。

为进一步研究磨削速度和磨削深度转变对表 面最终残余应力的影响规律,开展磨削表面残余 应力的单因素试验,磨削去除量皆控制在0.2 mm 左右。得到的结果如图11所示。

图11中表面残余压应力的值随磨削速度的增加逐渐减小(*a*_p=50 μm)。这是因为随着磨削速度 *v*_s的增加,单位时间内参与磨削的磨粒数增多,磨 削热增大,导致磨削热造成的拉应力变大,同时 由于磨削力减弱对材料的挤压作用减小,导致冷 塑性变形引起的表面残余压应力将会不断减小, 两者共同作用使得残余压应力的值呈下降趋势。 当磨削深度增大时表面残余压应力的值同样逐渐 降低(*v*_s=20.3 m/s)。这是因为磨削深度增大,磨削









图 11 磨削参数对表面残余应力的影响

Fig.11 Influence of the grinding parameters on surface residual stress

力和磨削热都相应增大,但起主导作用的是磨削 热增大引起的残余拉应力,所以残余压应力的值 逐渐减小。

同时在磨削深度 $a_p \ge 50 \ \mu m 或者磨削速度$ $v_s \ge 20.3 \ m/s 的情况下,表面残余压应力的值存在$ 较大的减小趋势。所以为使磨削过后保留较高的压应力层,磨削深度和磨削速度不宜过大,在保证效率的前提下提高强化层的性能。

3 结 论

(1)齿轮钢30CrMnTi磨削加工后表面显微组织为针状马氏体+碳化物+少量残余奥氏体,强化层马氏体组织比较均匀且由磨削表面到心部呈"细一较粗"的变化趋势。

(2) 磨削加工后,30CrMnTi表层存在一定程度 的强化层,硬度随表面深度增加保持先增大后减 小的规律,强化层深度随磨削深度或磨削速度的 增大而增加。

(3) 磨削后30CrMnTi表面显微硬度相比磨削前 表面显微硬度均有提高,硬化程度在2%~13%之 间,表面显微硬度随磨削速度降低或磨削深度增 大而增大。

(4) 渗碳钢30CrMnTi经磨削加工后表层的残余 应力 σ 由表层原始应力 σ_0 和磨削过程残余应力 $\Delta \sigma$ 两 部分组成。磨削过程对残余应力的影响在表面表 现为拉应力,沿层深向内逐渐转化为压应力。磨 削表面残余压应力的值随磨削速度或磨削深度的 增大而降低。为使磨削过后得到较高的表面残余 压应力,应将磨削去除余量控制在 $0.3\sim0.4$ mm, 磨削深度 $a_p \leqslant 50 \mu$ m,磨削速度 $v_s \leqslant 20.3$ m/s。

参考文献

- [1] 潘清林, 薛松柏. 金属材料科学与工程[M]. 长沙: 中南大学 出版社, 2006.
 PAN Q L, XUE S B. Metallic materials science and engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2006 (in Chinese).
- [2] 刘菊东, 王贵成, 陈康敏. 磨削用量对40Cr钢磨削淬硬层的

影响[J]. 中国机械工程, 2006, 17(17): 1842-1845.

LIU J D, WANG G C, CHENG K M. Effect of grinding parameters on the grinding-hardened layer of 40Cr steel[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(17): 1842-1845 (in Chinese).

- [3] 李程,梁志杰,张平,等.大功率电火花表面强化工艺对涂 层性能的影响[J].中国表面工程,2007,20(6):32-35.
 LI C, LIANG Z J, ZHANG P, et al. Effect of grinding parameters on the grinding-hardened layer of 40Cr steel[J]. China Surface Engineering, 2007, 20(6): 32-35 (in Chinese).
- [4] BRNIKSMEIER E, BROCKHOFF T. Utilization of grinding heat as a new heat treatment process[J]. Annals of the CIRP, 1996, 1: 283-286.
- [5] BROCKHOFF T. Grind-hardening: a comprehensive view[J]. Annals of the CIRP, 1999, 1: 255-260.
- [6] 顾珅珅. 渗碳淬硬 20CrMnTi低应力磨削研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014, 3.
 GU S S. Research on low residual stress grinding of hardened 20CrMnTi[D]. Nanjing: nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 3.
- [7] 张修铭,修世超,王雨时.磨削液参数对磨削强化表面微结 构损伤的影响[J].东北大学学报,2015,36(10):1491-1495.
 ZHANG X M, XIU S C, WANG Y S. Effect of grinding fluid parameters on microstructure damageof grinding hardening surface[J]. Journal of Northeastern University, 2015, 36(10):1491-1495 (in Chinese).
- [8] 史小亮, 刘明贺, 张修铭, 等. 预应力淬硬磨削下强化层金 相组织的转变机理[J]. 东北大学学报, 2016, 37(2): 208-212.
 SHI X L, LIU M H, ZHANG X M. Transformation mechanism of microstructure in hardening layer under the PSHG [J]. Journal of Northeastern University, 2016, 37(2): 208-212 (in Chinese).
- [9] 徐辉. 两种不同硬度匹配齿轮的接触疲劳强度试验研究
 [J]. 机械传动, 1994, 18(1): 33-36.
 XU H. Experimental study on contact fatigue strength of two gears with different hardness[J]. Mechanical Transmision, 1994, 18(1): 33-36 (in Chinese).
- [10] 王西彬, 李相真. 结构陶瓷磨削表面的残余应力[J]. 金刚石 与磨料磨具工程, 1997, 102(6): 18-22.
 WANG X B, LI X Z. Grinding residual stress in the surface of structural ceramics[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 1997, 102(6): 18-22 (in Chinese).