

·专题讨论·

汽车用微合金化非调质钢的进展

刘瑞宁^{1,2} 王福明¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 石家庄钢铁有限责任公司技术中心, 石家庄 050031)

摘要 与淬回火调质钢比较, 空冷非调质钢不但能降低成本, 而且可避免热处理所引起的零件变形, 减少机械性能的偏差。介绍了空冷铁素体-珠光体高韧性非调质钢、贝氏体和马氏体非调质钢的进展以及当前国内非调质钢的生产和应用。

关键词 非调质钢 高韧性 进展 应用

Advance in Microalloying Non-Quenched-Tempered Steels for Auto

Liu Ruining^{1,2} and Wang Fuming¹

(1 School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Shijiazhuang Iron and Steel Co Ltd, Shijiazhuang 050031)

Abstract By comparison with quenching and tempering steels the non-quenched-tempered steels not only decrease production cost but also can avoid deformation of parts by heat treatment and decrease deviation of mechanical properties. The advance in ferrite-pearlite high toughness non-quenched-tempered steels, bainite and martensite non-quenched-tempered steels and current production and application of domestic non-quenched-tempered steel are presented.

Material Index Non-Quenched-Tempered Steel, High Toughness, Advance, Application

1 上世纪非调质钢发展概况

机械制造用钢的基本条件是要求达到给定的强度和韧性, 对于大量的机械制造零件, 一般用中碳钢或中碳合金钢经淬火-回火的调质处理来达到高的强度和良好的韧性。锻成的零件经高温加热淬火和回火必然产生两个不利的因素: (1) 在热处理过程中产生大量的能耗和其他消耗, 即增加了工序和生产成本; (2) 在调质过程中工件严重变形, 易开裂, 这不但影响零件成品率, 还因零件内有大量残留应力造成使用时的过早失效。

20 世纪 70 年代因石油危机的推动发展起来的非调质钢是非调质中碳微合金结构钢的简称, 又称为微合金锻钢、空冷钢等, 主要是简化工艺省去调质处理以代替部分中碳调质钢^[1-5]。将淬回火调质钢改成空冷非调质钢的主要驱动力是降低成本。通过下列全部或部分工艺路线可降低总的制造成本: (1) 省去热处理; (2) 不需再进行校正; (3) 缩短订货至交货时间; (4) 减少再加工。

在性能上非调质钢零件比较普通热处理调质钢的优势为: (1) 减少变形; (2) 减少机械性能的偏差; (3) 整个断面上性能均匀一致; (4) 改善切

削加工性能。

20 世纪 70 年代初期, 德国发展了锻态微合金化中碳钢 49MnVS3, 主要用作汽车发动机的曲轴, 80 年代非调质钢得到迅速发展。曲轴用传统调质钢 CK45 (相当于 SAE1045, C 0.42% ~ 0.45%, Mn 0.5% ~ 0.8%, 即 45 钢) 需要进行淬火处理, 且能耗高, 在淬火时有淬裂的危险, 变形程度大; 但是在采用非调质钢 49MnVS3 时 (C 0.47%, Mn 0.75%, V 0.10%, S 0.05%), 则不需要热处理设备及有关热处理工艺所需之费用, 同时排除了工件产生裂纹和变形的危险^[6]。

日本汽车工业也在 20 世纪 70 年代末期接受了该钢类并加以发展。到 80 年代中期, 日本锻造连杆的 75%、锻造曲轴的 55% 是由微合金非调质钢制造; 当时欧洲锻造连杆、曲轴和前轴梁有 30% ~ 35% 是由非调质钢制造^[7], 随即非调质钢的应用范围又扩大到美国。

英国工程用钢公司和瑞典实验室在 70 年代联合开发的 Vanard 系列非调质钢覆盖的强度范围为 700 ~ 1 000 MPa, 主要用来制作曲轴、连杆、轮轴和轮毂^[1,8]。图 1 为 Vanard 非调质钢、调质合金钢和 SG 球墨铸铁机械性能对比。

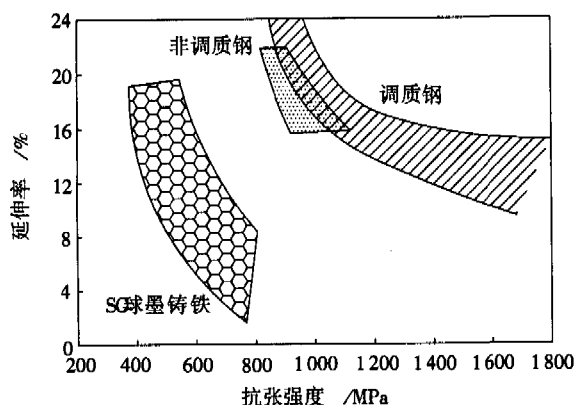


图1 微合金化非调质钢与调质合金钢、SG球墨铸铁机械性能的比较

Fig.1 Comparison of mechanical properties between microalloying non-tempered steels, quenched-tempered steels and SG spherical graphite cast iron

非调质钢的经济性已在应用中得到体现, Rover集团声称,在A系列1.31发动机曲轴使用微合金非调质钢,按1982年价格每年已经节省50万英镑^[9]。日本日产汽车公司有90%的曲轴都已采用非调质钢制造,只是采用非调质钢制造汽车前轮轮毂后,就使该项生产成本降低45%^[10]。

2 空冷铁素体-珠光体非调质钢

通过适当地选择钢中的碳、锰、硅和钒等元素的含量,空冷铁素体-珠光体非调质钢的强度可达750~1150 MPa^[8,9,11],主要用来制造曲轴、连杆、轮轴和轮毂。虽然铁素体-珠光体非调质钢的冲击韧性低于相等强度的调质钢,但仍可满足多种锻制品的使用要求,且其冲击韧性高于铸铁。为提高韧性,一种办法是加微量钛形成氮化钛以细化晶粒;另一种办法是即使奥氏体组织较粗,可在原奥氏体晶粒内形成大量晶粒内铁素体核心,生成细的铁素体-珠光体组织^[12]。用VC和VN作为形成晶内铁素体的核心,这种晶内铁素体型钢(Intragranular ferrite-type steel)比加钛微合金化钢的铁素体-珠光体组织更细。

2.1 强度和韧性

德国的DIN 49MnVS3(0.49% C-0.75% Mn-0.1% V-0.05% S)在空冷状态下的强度极限超过850 MPa,它是通过高体积百分比的相对“稀释”(Dilute)珠光体(低的平均碳含量)和在多角铁素体和珠光体型铁素体(共析铁素体)中的V(C,N)沉淀进行强化^[13],替代Mn和Mn-Cr型调质钢。

可以通过增加钢材锻后的冷却速度来提高零

件的强度,因为冷速的提高(由自然冷却改为风冷)可以得到大量的细珠光体^[1]和更小的V(C,N)沉淀。应提出的是加0.1% V可有效地在连续冷却转变(CCT)图上将珠光体向贝氏体转变移向较快的冷却速度,因而减少了在以后正常的工艺下产生后一种转变。

一般空冷非调质钢是在碳素钢的基础上添加少量元素Nb、V、Ti或Mo($\leq 0.25\%$),与含较高合金元素的调质钢相比,微合金化非调质钢使成分与热加工工艺相结合以获得高的性能。在这种情况下,非调质钢的组织可能含75%的珠光体和25%的铁素体^[14]。

实践表明,降低碳含量,增加Mn或Cr含量有利于提高非调质钢的韧性。降低碳含量对钢的强度损失较大,但显著提高冲击韧性^[15,16],主要原因是减少钢中的珠光体数量。适当地提高钢中的Mn含量,当Mn含量由0.85%增加至1.15%~1.30%时,则在同一强度下非调质钢的韧性提高30 J/cm²,与调质碳钢相当。

通常采用加微量钛细化奥氏体晶粒,以便形成很细的先共析铁素体晶粒和珠光体,来改善钢的韧性。虽然降低轧制和锻造温度也有利于改善非调质钢的韧性,但会增加锻造和轧制的能耗,降低锻轧设备的生产能力。

非调质钢的强度和韧性一般都随热加工后的冷却速度的增加而提高,且韧性的提高更为显著。但如果冷却速度高于65 °C/min,尽管可以获得较细的晶粒,但韧性明显降低。为了获得细晶粒,锻造后在700 °C以上温度应迅速冷却,而后缓冷到600 °C以下,600~700 °C区间相当于相转变温度,冷却速度对转变产物铁素体和珠光体的形态,及两相的相对量都有重要影响。如将加热后的非调质钢冷却到800 °C左右再进行适量的热作变形,或将终加工温度降至800 °C以下,可以显著提高非调质钢的韧性。

2.2 高韧性非调质钢的发展

铁素体-珠光体非调质钢通常为中碳钢,加入钒等微量元素,通过增加珠光体量和碳化钒等沉淀强化来提高钢的强度,如成分和热加工工艺合理,完全可以达到淬火回火钢900~1000 MPa的强度水平。但非调质钢为铁素体-珠光体组织,其韧性一般都低于调质钢的回火索氏体组织,再加上共析析出物的沉淀强化,则进一步降低了钢的

韧性,使非调质钢在承受冲击负荷零部件上的应用受到限制。为了克服非调质钢韧性不足,促进了高韧性非调质钢的发展。

调质钢的强韧性主要受化学成分和热处理工艺的影响,而非调质钢的强韧性除受化学成分影响外还受加热温度、热加工和冷却速度的影响。热加工的应变影响碳化物的析出,进而影响再结晶过程。应变量大,析出物的孕育期和完成期就较短^[17]。微合金化非调质钢用工艺手段细化铁素体晶粒尺寸,减少珠光体中 Fe_3C 的片厚和片间距,既可提高钢的强度又可提高钢的韧性。所以对非调质钢来说,除合理选择和精确控制钢的成分外,严格锻、轧工艺是钢材获得高强韧性能的必要条件。

2.2.1 化学成分对非调质钢强韧性的影响

化学成分对非调质钢的强度和韧性的影响可归纳如下^[2]:

(1) 提高强度,降低韧性的元素有C、N、V、Nb、P。

(2) 提高强度同时还能改善韧性的元素有Mn、Cr、Cu + Ni、Mo。

20世纪80年代已开发了中碳锰铬非调质钢(%) : 0.45C-1Mn-0.5Cr-0.1V,称之为IVA1000。其抗拉强度和疲劳强度均优于调质钢水平,冲击韧性可通过热加工和低温正火得到改善^[18]。

(3) 固溶Al对强度和韧性几乎没有影响,但以AlN形式存在可以细化晶粒,改善钢的韧性。

(4) Ti在非调质钢中的作用是降低强度,改善韧性。在Mn含量为1.0%~2.5%时,加入0.01%~0.05%Ti,可以有效地改善钢的韧性。

采用回归分析的方法可得出各元素对V形缺口冲击值和硬度的影响。

为了得到高质量和性能稳定的非调质钢,有的采用超纯净钢冶炼技术,使化学成分控制在很窄的范围内,如曲轴用非调质钢,要求成分波动范围为:C 0.03%, Mn 0.10%, V 0.03%,同时限定Cr、Mo含量。

2.2.2 晶粒细化对非调质钢韧性的影响

除上面提到的加入适当Ti、Al、N来细化钢的奥氏体晶粒外,加工工艺也是影响奥氏体晶粒的重要因素。加工温度高,再结晶速度快,奥氏体晶粒大,冷却后钢中珠光体量增加,强度增高,韧性下降。加工温度低时,因产生形变诱发析出,再结

晶核心增加,再结晶后的晶粒长大的驱动力小,晶粒细化,钢的强度变化不大,但可以大幅度提高韧性。研究表明,随着精轧温度的降低,冲击值提高。在同一温度下加工量增加,强度和韧性可以同时提高。

热加工后冷却速度亦影响钢的晶粒大小,如热变形是在珠光体转变的温度以上变形,在变形后对于断面尺寸较大钢材或锻件的冷速应加快以防止晶粒长大。冷却速度过慢也会使析出物的颗粒变粗,亦不利于韧性的提高。对小规格的钢材或锻件应避免加工后过快的冷却,否则会产生残余应力,并且有可能生成贝氏体组织,从而影响钢的室温韧性提高。

2.2.3 形成晶内铁素体(Intragranular Ferrite Formation)改善非调质钢的韧性

虽然采用加钛形成弥散的TiN颗粒能有效地阻止奥氏体晶粒粗化,但与淬回火调质钢相比,含微量Ti的非调质钢的韧性仍显不足。因为在这种情况下,当钢加热至1250℃时难以保持钢的奥氏体晶粒比7级还细。

非调质钢在热加工后的冷却过程中,首先铁素体沿奥氏体晶界成核生长,其余奥氏体转变成珠光体团。这种由铁素体网包围的珠光体的组织结构的韧性很差。

从另一方面来看,如果能在原奥氏体晶粒内产生大量的铁素体晶核,则即使奥氏体晶粒粗大,也可以获得细小的铁素体-珠光体组织。VC和VN可作为晶内铁素体的核心,为了生成晶内铁素体必须同时加钒和氮。研究发现当钢中硫含量增加,晶内铁素体量增加,这样能明显增加热锻材的韧性^[12]。

当增加钢中N、S含量时,AlN和VN首先在形成的MnS夹杂上析出,同时析出的AlN和VN成为铁素体晶核,则增加晶内铁素体的数量。非调质钢加S、N后的韧性不但远远高于原有非调质钢,而且还高于调质钢^[12]。

近年来又提出氧化物冶金的概念,认为 Al_2O_3 与MnO、FeO形成复合氧化物有利于MnS在其上析出,(Ti, Mn) $_2O_3$ 颗粒上亦有MnS和TiN成核析出,和VN的作用类似,有利于晶内铁素体析出。但其机理目前尚不太清楚,但这一点是明确的:钢中存在适量Al对钢的晶粒细化和改善钢的韧性显然有利。

3 贝氏体非调质钢

为进一步改善非调质钢的韧性,于 20 世纪 80 年代中期发展了贝氏体非调质钢。贝氏体钢分两类:一类为低碳贝氏体钢,碳含量一般在 0.1% 以下,不需要回火处理,另一类为中碳贝氏体钢,碳含量在 0.2% 以上,有时需进行回火处理^[19]。

低碳贝氏体钢的 Mn 在 1% 以上直至 3%, Cr1% ~ 2%, 另加 V、Ti、B 等微量合金元素。低碳含硼的贝氏体非调质钢,特别是在锻造后温水冷却的情况下比一般调质钢和非调质钢表现出更好的强韧性。

低碳贝氏体钢所需合金元素的量较大,当碳含量在 0.2% ~ 0.3% 时, Mn 当量小于 2.0 时,可以获得较好的强韧性配合。在 Mn(Cr, N) 大于 1.5% 的情况下,碳含量在 0.3% 以上时,所生成的贝氏体含碳较高,虽然强度较高,但韧性下降,一般非调质钢不希望出现这种高碳贝氏体组织。

4 马氏体非调质钢

1988 年美国 Chaparral Steel 的 Wright 首次提出了第 3 代非调质钢的概念^[20], 此类钢具有低碳回火马氏体组织。与贝氏体非调质相似,得到低碳马氏体非调质也能兼顾高强度和高韧性的要求,目前已经在汽车行业部件和建筑机械方面得到应用。

同时,继铁素体-珠光体(F-P)型、贝氏体(B)型、马氏体(M)型非调质钢开发应用以后, F-B 型、F-M 型复相非调质钢因成本低,性能优而逐渐被开发利用^[21]。各种热锻非调质钢的强韧性的位置示于图 2。

5 国内非调质钢的开发和应用

近几年来,宝钢、攀钢、东北特钢、兴澄特钢等特钢企业和科研院所合作,成功地将我国自行开发的铁素体-珠光体、贝氏体、低碳马氏体型等非调质钢应用于制作汽车发动机曲轴、连杆、汽车前桥等零件;其中,一汽先后应用 35MnVS、38MnVTi、42VS、40MnVS 代替 55 钢、40MnB、45 钢、40Cr 钢在 CA6102 连杆、CA141 半轴、滑动叉、轻型车扭臂等零件进行了试验研究;二汽自 1978 年开发应用非调质钢以来,已先后对东风系列汽车的 20 余种零件采用非调质钢进行了试制,采用 35MnV 代替 40MnB 生产 EQ6100 发动机连杆,采用 48MnV 代

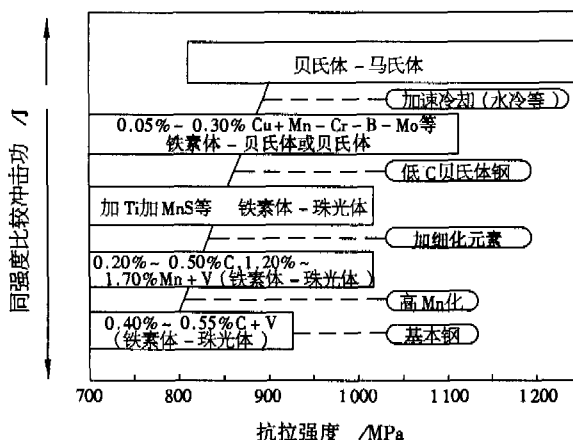


图 2 热锻用非调质钢强韧性的位置

Fig.2 Comparison of toughness between various hot forging non-quenched-tempered steels

替 40Cr 生产康明斯发动机曲轴等,部分已实现大批量生产。另外,江铃汽车、南京汽车、天津汽车等汽车制造厂的非调质钢用量也逐年大幅度增加。从用材工艺技术分析,在汽车车身、车身附件及零件、变速箱总成、驱动桥总成、悬挂减震器、离合器及零件、转向系统及零件中有 15% 的钢结构零件可用非调质钢代替^[22]。2003 年全国非调质钢的生产和应用量达到了 10 万 t 规模,2005 年的应用量约为 20 万 t。部分用户使用情况如表 1。

表 1 部分用户使用非调质钢(棒材)情况

Table 1 Application of domestic non-quenched-tempered steel bars

用户厂	代表钢号	规格/mm	产品名称	配套单位	生产厂
一汽锻造	50MnV	Φ60	轴件	自用	抚顺特钢
白城精锻	C70S6	Φ42	连杆	一汽捷达	德国
二汽锻造	48MnV	125 × 125	曲轴	玉柴	兴澄特钢
江铃汽车	12Mn2VBS	Φ80 ~ 100	前桥	自用	唐贝、宝钢
南京汽车	35MnVN	Φ48	连杆	自用	攀钢
天汽内机	S43CVS1	Φ55	连杆	天津夏利	日本
安徽六拖	YF40MnV	Φ25、28	轴件	自用	首钢特钢
济宁丝杠	YF45MnV	Φ30、36	轴件	自用	首钢特钢

目前国内生产非调质钢的厂家主要集中在特钢企业,除攀钢、兴澄特钢、东北特钢等企业外,年产量大都在万吨以下。主要生产流程为:电弧炉冶炼→LF(VD)→模铸(连铸)→轧钢(控轧)→成品(控冷)。

目前国内非调质钢的生产厂以特钢厂电弧炉冶炼(短流程)为主,只有个别生产厂转炉冶炼(攀钢、宝钢等),具体企业见表 2。

1996 年 3 月 1 日实施的非调质机械结构钢

表2 部分生产厂非调质钢生产情况

Table 2 Production of domestic non- quenched- tempered steels

序号	单位	代表钢号	主要用途
1	上钢五厂	49MnVS3	汽车曲轴
2	大连钢厂	30Mn2SiV	抽油杆等
3	大冶	35MnV	转向节等
4	首钢	YF40MnV	轴类(花键轴)
5	宝钢、兴澄、唐贝	12Mn2VB	汽车前桥
6	攀钢	35Mn2SiV	穿管
7	石钢	SG45	轴件

GB/T15712-1995 标准中,按加工方法的不同,将非调质钢分为锻造和切削用两类共 9 个钢号,全部属于铁素体-珠光体型。而冷作强化非调质钢、高强度高韧性非调质钢等(包括铁素体-珠光体型、低碳贝氏体型、低碳马氏体型)均未列入该标准。按照调质钢强度级别 BS970 标准,把非调质钢划分为 4 个强韧性级别。我国研制的非调质钢种(GB/T15712-1995)已达到前两个级别标准,与国际上 20 世纪 90 年代初期水平相当。

目前执行的“非调质机械结构钢”标准涵盖钢种面较小,约占目前用户所使用非调质钢钢号的 30%。国内一些合资汽车制造厂在引进生产工

艺、技术的同时,所使用的材料为进口非调质钢,虽然部分材料已逐步国产化,但仍按相应国外标准要求生产,如上汽、长安汽车、江铃汽车使用德国牌号 49MnVS3 生产汽车发动机曲轴等,该类用户约占 20%。随着非调质钢的快速发展,国家标准内的钢号已不能适应用户的需求。大多用户根据自己的设计要求及加工使用情况,向材料生产厂提出性能以及低倍、非金属夹杂物等具体的技术、质量指标要求,与材料生产厂家签订供货技术协议,该类用户约占 50%。

6 结束语

(1) 自 20 世纪 70 年代以来,因非调质钢具有节约能源、减少工件变形和开裂、减少环境污染等优点,受到世界各主要工业化国家的普遍重视,尤其是改善非调质钢韧性新技术的采用,完善了非调质钢系列产品,扩大了非调质钢的使用范围,并大规模应用于机械制造业,尤其是汽车工业。

(2) 我国非调质钢在应用上、标准水平和实物质量稳定性等方面均有所进展,但应开发高性能非调质钢。

参考文献

- Milbourn D J. Air-cooled Forging Steels for Automotive Applications. *Steel Times*, 1996, 224(10): 351
- 雍岐龙, 马鸣图, 吴宝榕. 微合金钢-特殊和力学冶金. 北京: 机械工业出版社, 1989: 591
- Stuart H. The Properties and Processing of Microalloyed HSLA Steel. *JOM*. 1991, 43(1): 35
- Pauls J R. Developments in HSLA Steel Products. *JOM*. 1991, 43(1): 41
- Thewlis G, Naylor D J. New Alloys Help Cut the Cost of Forged Steel Components. *Metals and Materials*, 1981, Dec: 21
- Razim C. Materials Aspects of the Automobile and the Environment. *Ironmaking and Steelmaking*, 1992, 19(4): 268
- Baxter Jr D F. Editorial: Role of Microalloyed Steel. *Metal Progress*, 1985, 128(4): 9
- Beaumont R. Developments in Engineering Steels for Automobiles. *Steel Times International*. 1990, 14(2): 19
- Vickers A L. Steels for Automotive Industry. *Ironmaking and Steelmaking*, 1992, 19(4): 277
- 耿文范. 非调质钢的发展现状. *钢铁研究学报*, 1995, 7(1): 74
- Naylor D J. The Future for Engineering Steel. *Ironmaking and Steelmaking*, 1990, 17(1): 17
- Ochi T, Takahashi T, Takada H. Improvement of the Toughness of Hot Forged Products Through Intragranular Ferrite Formation. *I&SM*, 1989, 16(2): 21
- Roberts W. Recent Innovations in Alloy Design and Processing of Microalloyed Steels. *HSLA Steels Technology & Applications, Conf. Proceed. ASM*, 1984: 33
- DeArdo A J. HSLA Steels-Processing, Properties and Applications, *Conf. Proceed. TMS*, 1992: 21
- Platts C K, Vassiliou A D, Pickering F B. Developments in Microalloyed High-Strength Low-alloy Steels: an Overview. *The Metallurgist and Material Technologist*, 1984(9): 447
- Pickering F B. The Spectrum of Microalloyed High Strength Low Alloy Steel. *HSLA Steels Technology & Applications, Conf. Proceed. ASM*, 1984: 1
- Quispe A, Medina S F, Valles P. Recrystallization-Induced Precipitation Interaction in a Medium Carbon Vanadium Microalloyed Steel. *ISIJ*, 1997, 37(8): 783
- Olliainen V, Hurmola H, Pontinen H. Mechanical Properties and Machinability of a High Strength, Medium Carbon, Microalloyed Steel. *HSLA Technology & Applications, Conf. Proceed. ASM*, 1984: 1101
- 汪学瑶. 新型非调质钢的发展. *特殊钢*, 2001, 22(2): 1
- 董成瑞, 任海鹏, 金同哲, 等. 微合金非调质钢. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- 刘云旭, 季长涛, 朱启惠, 等. 中高碳 F + P 非调质钢的成分设计. 2000 年微合金非调质钢学术年会论文集, 2000: 37
- 徐国庆, 张全, 包雪鹏, 等. 延伸钢铁汽车产业链, 推动非调质钢事业发展. 2005 年微合金非调质钢学术年会会议, 2005

刘瑞宁(1967-), 男, 高级工程师, 从事炼钢工艺技术研究。

收稿日期: 2006-01-06