

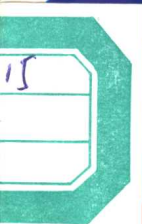
非调质钢

FEI

TIAOZHIGANG

夏国华 朱自成 冯文刚 编著

国防工业出版社



G F G Y C B S

非调质钢

夏国华 朱自成 冯文刚 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

非调质钢/夏国华等编著. —北京:国防工业出版社,
1997.9

ISBN 7-118-01701-9

I. 非… II. 夏… III. 钢,非调质-概论 IV. TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 00958 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 4 101 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:7.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

非调质钢是 70 年代初发展起来的一种在热加工条件下,得到珠光体和铁素体的沉淀硬化型结构钢。由于它在制造中取消了“调质”工序,因此俗称此类钢为“非调质钢”。非调质的采用,带来的好处是显而易见的:省能源,缩短生产周期,避免了因调质热处理带来的疵病或废品等,从而受到各类用户和冶金行业的普遍关注。

20 多年来,非调质钢的研制和应用得到了飞速的发展。德国、日本、美国、英国、法国、瑞典、俄罗斯等工业化国家竞相将非调质钢纳入制造行业,就连印度等经济不发达国家也研制成功数种非调质钢。

我国研制非调质钢始于 80 年代初期。本书作者曾先后和北京钢铁学院、兵器工业五九研究所、长安汽车有限责任公司等单位的工程技术人员一起,通过近 10 年的努力,先后研制成功具有我国自己资源特点的热锻用非调质钢 45MnV, 42MnNbV, 冷锻用非调质钢 6580、6587、7090 等数种,取得了良好的社会效益与经济效益。多年来,我国机械制造行业,汽车行业的专家学者和冶金战线上的专家们一起,研制成功数十种非调质钢,这对实现引进产品材料的国产化和发展我国的民族工业,做出了积极的贡献。

本书共六章,第一、二、三章由朱自成高工编写,第四章由冯文刚工程师和朱自成编写,第五、六两章由夏国华高工编写,并对全书审校和统编。

本书所引用的资料,除作者本人的工作总结外,其余均有出处,由于篇幅有限,未一一说明引用来源,敬请原文作者鉴谅。

本书在编写出版过程中,受到长安汽车有限责任公司的领导江从寿、五九研究所有关领导的关心和支持。长安汽车有限责任公

司和五九研究所有关技术人员刘兴智、黄其慰、宣卫芳、邹毅、彭一萍、陈林等同志参与了部分编写工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平不高,谬误之处在所难免,望广大读者批评指正。

作 者

内 容 简 介

非调质钢是近年来发展起来的一种新钢种。它是在生产过程中因省去调质热处理而得名。这种钢不仅具有较好的力学性能,而且有良好的工艺性。

本书较全面系统地论述了非调质钢的分类、成分、性能和应用,书中有较多的应用举例,以及我国科技人员研究成果介绍等。

本书可供科研人员、工程技术人员和高等院校有关专业师生、研究生参考。

目 录

第一章 概述	1
第二章 非调质钢化学成分及合金化原理	6
第一节 化学成分设计的原则.....	6
第二节 化学成分及合金化原理.....	7
第三章 非调质钢组织与性能	19
第一节 非调质钢的强韧化机制	19
第二节 非调质钢的显微组织	25
第三节 非调质钢的力学性能	33
第四章 非调质钢的工艺性能	40
第一节 非调质钢的压力加工工艺	40
第二节 非调质钢的切削加工性能	54
第三节 非调质钢的焊接性能	59
第四节 非调质钢的热处理性能	61
第五章 非调质钢的分类及选用	66
第一节 概述	66
第二节 常用非调质钢的种类及其性能	69
第三节 非调质钢的标准化	78
第四节 非调质钢的选择与使用	80
第六章 非调质钢应用举例	95
第一节 非调质钢在汽车零部件上的应用	95
第二节 非调质钢在建筑机械上的应用.....	107
第三节 非调质钢在民用枪械上的应用.....	111
第四节 非调质钢在标准件上的应用.....	114

第一章 概 述

在金属材料研究的领域里,人们希望得到不需经热处理、工艺简单、性能较好的新钢种。70年代发展起来的高强度低合金钢(称为HSLA钢),把人们的希望变为现实。这类钢含碳量较低,并加入微合金元素(V、Nb、Ti等)进行微合金化,再通过控制轧制工艺轧成具有良好的综合力学性能和工艺性能(包括高的强度和冲击韧性,良好的脆性破断抗力和焊接性、成形性)的钢材。此外,在生产中省去加工变形后的热处理,并避免由于热处理带来的一些缺陷(如开裂、弯曲等),从而可获得更大的经济效益。

然而,这类钢必须通过实施热变形工艺过程,才能使它的良好力学性能得到充分地发挥。因此,HSLA钢多为冶金生产的控制轧制的钢材,而且主要限于管、板、棒和线材等。欧美各国及日本把HSLA钢广泛用于汽车制造、船舶、桥梁、建筑、海上石油钻采平台、大口径石油和天然气输送管线上。

但是,在机械制造和汽车结构件中锻件占有很大的比例。众所周知,为了保证锻件有必要的强度和韧性,一般都采用中碳结构钢或低合金结构钢制造。对受力要求严格的钢锻件,锻后还需进行淬火和高温回火,即调质处理,才能达到抗拉强度($\sigma_s \geq 800\text{N/mm}^2$),并具有一定的塑性和韧性。这是对结构钢的锻件一般的要求。

从对轧制的HSLA钢的研究中,人们得到了启示:能否把微合金化技术推广到锻造碳钢中,通过控制锻(轧)热加工制度,来控制钢的碳氮化合物均匀的弥散析出,晶粒细化,从而使钢强化,随后不再进行热处理,就能得到满意的力学性能。这样,不但节省了设备投资,节约能源,同时还简化生产工序,避免了由于热处理而产生的缺陷,使生产成本降低。

因此,非调质钢是近年来继 HSLA 钢发展起来的一类新钢种。它是在低、中碳钢中添加微量的合金元素(V、Nb、Ti 等)形成碳氮化合物,并用控制锻(轧)热加工制度(加热温度、变形量、终锻(轧)温度和随后冷却速度等)使钢晶粒细化和微合金元素的碳氮化合物弥散析出,从而达到使钢强化的目的。由于这类钢在生产过程中省去调质热处理,而性能又达到调质钢水平,故称为非调质钢。

60 年代发展起来的微合金化技术为非调质钢的产生提供了理论和生产基础,而 70 年代初期发生的能源危机则直接促成非调质钢的出现及发展。1972 年,德国蒂森公司率先在中碳锰钢成分的基础上添加微量合金元素钒,研制成的新钢 49MnVS3 微合金非调质钢^[1]。自从第一个非调质钢 49MnVS3 问世后,人们愈发认识到此类钢的优越性。20 多年来世界上工业化国家都竞相研究和开发应用非调质钢。早期所进行的研究工作,主要是用这类钢制做汽车曲轴。瑞典研制和开发的非调质钢,其强度可达到 $800 \sim 900 \text{N/mm}^2$ 。英国和美国所进行的研制工作,主要是提高这种钢的强度。目前,英国正在致力于开发强度超过 1000N/mm^2 甚至 1100N/mm^2 的非调质钢。导致发展更高强度钢的主要原因,是要用非调质钢来代替低合金钢,而不是碳钢,从而获得更大的经济效益^[2]。

近年来,日本在非调质钢的研制开发活动方面颇为活跃,各钢铁公司纷纷建立起自己的非调质钢的体系,钢号的品种繁多。其中多以加钒为主,但亦有复合添加合金元素铌、钛等,开发出一些专利的非调质钢。前苏联虽然起步稍迟,但进展较快,先后研制出一些适用于制造汽车零件的非调质钢,用来取代一些低合金调质钢。

我国对非调质钢的研制起步较晚,落后于国外 10 多年。但通过“六五”和“七五”攻关,已研制出十几种非调质钢,成功地应用于汽车,拖拉机和机床等行业,获得良好的经济效益和社会效益。

各国为了改善和满足对非调质钢的某种或某些性能的要求,在最初研制的非调质钢的基础上,近年来又开发出了一些新类型

的非调质钢,如高强度非调质钢、高韧性非调质钢、易切削非调质钢、贝氏体非调质钢等。

目前,非调质钢热加工后空冷态的性能已达到调质钢的水平,近期内又新开发出了一些强度大于 1000N/mm^2 的高强度非调质钢。但是,非调质钢与调质钢相比,其突出的特点是强度有余而韧性不足,这就限制了它在强冲击条件下的应用,而主要用来代替一些非合金淬火回火钢。要使非调质钢获得更广泛的应用,必须提高其韧性。为此,人们在为改进非调质钢的韧性而努力,并已取得很大的进展,研制成功了一些既有高强度又有高韧性的非调质钢。研究工作表明,通过合理设计合金成分,降碳增锰、增加硅含量及复合添加多种合金元素,或者有效地控制热加工制度(如降低终锻温度、锻后快速冷却等);或者在热加工后再经过一次正火处理;以及控制热加工后空冷态的显微组织形态及显微组织参数的比例等,都有利于改善和提高非调质钢的韧性。

从研究中可知,非调质钢和调质钢力学性能虽相近,但是二者的显微组织及强韧化机制是不同的。非调质钢的显微组织主要是铁素体和珠光体加上弥散析出细小沉淀相,其力学性能受显微组织形态及参数的制约;铁素体晶粒尺寸和珠光体团的尺寸,铁素体与珠光体的比例;珠光体片间距及合金元素析出沉淀作用。同时还受热加工制度的控制。而调质钢的显微组织是索氏体,其力学性能主要受化学成分和热处理工艺参数的影响。

非调质钢不但有较好的力学性能,而且具有良好的工艺性能。非调质钢的硬度在零件各断面上分布较均匀,便于切削加工,而且铁屑排放流畅,加工后表面光洁性好。刀具磨损小,可延长刀具使用寿命。用高速钢刀具单点切削试验结果表明,其切削性能相当于调质钢;而用高速钢钻头钻削,无论钻削力,还是钻削扭矩,非调质钢都要比调质钢好^[3]。

非调质钢与调质钢一样可实施焊接。可焊性试验说明^[4],在采用中合金钢焊接参数时,可用摩擦焊或 CO_2 气体保护焊进行非调质钢与碳钢焊接,其焊接接头具有适合需要的力学性能。

非调质钢可进行表面强化处理,来满足某些零件特殊使用性能要求,扩大其应用范围。例如:充分利用非调质钢的良好氮化性能,进行氮化处理,渗氮速度高于普通钢,具有较深的渗氮层。非调质钢也可以进行中高频感应加热表面淬火处理,工艺稳定。

由于非调质钢在生产应用中具有许多优点,因此,世界各国都在努力优化非调质钢的性能,以扩大它的应用范围。目前,国外在机械制造部门,特别是在汽车制造上对非调质钢的应用十分广泛。西德 Gerlach 工厂在 1985 年前用非调质钢制造小汽车曲轴达 700 多万件,制造载重汽车曲轴 19 万件。美国 Volvo 公司 50% 锻件用非调质钢生产。日本大同公司每月生产的非调质钢锻件超过 5×10^6 千克^[5]。日本到 1984 年已有 75% 汽车连杆和 55% 的曲轴用非调质钢制造^[6]。前西德的奔驰汽车、意大利菲亚特汽车的发动机曲轴由非调质钢代替 40CrMn 调质钢制造。美国的福特、日本的三菱及丰田汽车公司,也都用非调质钢制做曲轴、连杆等零件^[7]。

我国长春第一汽车制造厂与齐齐哈尔钢厂联合研制的 40MnV 非调质钢代替 40Cr 调质钢制做的 CA15 发动机连杆,抗疲劳极限优于 40 钢和 55 钢调质连杆,CA6102 发动机连杆也试用非调质 40MnV 钢制造^[6]。广州标致轿车连杆用非调质 YF45MnV 钢取代法国 45M5UA2 钢生产的,性能满足图纸要求^[8]。天津由日本引进的大发、夏利汽车发动机连杆采用非调质钢生产,使国产化将成为现实^[9]。

1990 年,由上钢五厂和上海汽车锻造总厂合作试制的曲轴钢 49MnVS3,经过对发动机 1400h 台架试验及 3 台轿车 6 万 km 道路试验,结果一切正常,并得到上海大众汽车有限公司对曲轴性能与质量的认可。随后,便正式批量生产,并向大众汽车有限公司提供国产非调质钢曲轴。桑塔纳轿车发动机曲轴应用非调质钢,具有简化热处理工艺、切削性能良好以及节能等优点。这种曲轴今后还将应用于奥迪、捷达及五十铃等车型,具有推广应用价值^[10]。

因此,作为增效节能型钢种之一的非调质钢,因具有简化生产工序、降低能耗、改善切削加工性能、提高劳动生产率等优点而倍

受青睐,并有着广阔的发展前景。

参 考 文 献

- 1 徐佐仁. 中碳高韧性微合金非调质钢的研究. 机械工程材料, 1991(5)
- 2 Chambers, A. R. 微合金化锻钢的切削性能. 张梅青译. 国外金属材料, 1985(5) 1
- 3 朱自成. 微合金非调质钢发展及应用. 金属成形工艺, 1995(1) 47
- 4 Petrunenkov, A. A. 微合金工程钢. 纪梦尹译. 锻造工业, 1990(12): 24
- 5 赵量. 非调质结构钢近期发展概述. 国外金属材料, 1988(9) 1
- 6 庄哲峰. 连杆材料的应用及发展. 车用发动机, 1991(4) 57
- 7 余祥卫等. 曲轴用非调质钢的开发与应用研究. 汽车工艺与材料, 1995(1) 26
- 8 董瀚等. 非调质钢 YF45MnV2 的性能及其在标致轿车连杆上的应用. 汽车工艺与材料, 1995(2)
- 9 刘金忠. 高强度非调质钢连杆的研制. 汽车工艺与材料, 1995(5) 26~29
- 10 施爱莉. 国产化非调质钢 49MnVS3 在桑塔纳轿车曲轴上的应用. 汽车技术, 1994(8) 36~39

第二章 非调质钢化学成分及合金化原理

第一节 化学成分设计的原则

一、满足经济上的需要

在满足使用性能要求条件下,设计及选择钢材应注意以下几点:凡可用碳素钢时,不采用合金钢;凡可以添加少量合金元素,不应添加多量的合金元素,以充分发挥多元素复合的作用;凡可以用价格便宜的元素,不用价格昂贵的合金元素;要充分利用国有资源。

以上几点似乎是人所共知的,但在实际设计及选择钢材时,并不是所有人都会给予充分的考虑和付之实施的,从而造成很大的浪费。

二、工艺方法简单实用

对任何新钢种而言,都应尽量使其全部冶炼和加工工艺过程最为简单。譬如,在冶炼过程中,合金元素的添加是否容易控制,是否会带来更多的冶金缺陷、偏析、气泡、夹杂等,以致产生废品。热加工制度实施的繁难程度,以及是否充分利用了热加工制度,从而发挥钢的性能潜力。除此之外,钢种还应具有良好的切削加工性能。对有的钢种还要有良好的可焊性,否则由于焊接性不佳,会限制钢在某些方面的应用。

总之,上述各点乃是对非调质钢设计的最基本的要求,也是应遵循的设计原则。

第二节 化学成分及合金化原理

一、中碳非调质钢的化学成分及合金化原理

中碳非调质钢是研制开发最早的钢种,其基体钢为中碳钢,添加微量($\leq 0.25\%$)合金元素(V、Nb、Ti等),控制锻(轧)热加工制度,通过微合金化技术,使这类钢在锻(轧)后空冷状态达到调质钢的性能水平。

(一)碳和锰在钢中的作用

1. 碳的作用

钢的锻件一般都要求一定的强度和硬度,而基体钢的硬度取决于含碳量。因此,锻造用非调质钢通常为中碳钢。随着含碳量的增加,使钢中的铁素体和珠光体变细,并由于珠光体量增加,使钢的硬度和强度提高,但韧性变坏。因此,在设计钢的成分时,对钢中的碳含量控制要适当。目前,国内外研制开发的中碳非调质钢中的碳含量大都控制在 $0.25\% \sim 0.55\%$ 的范围内为宜。

2. 锰及其他常存元素的作用

在非调质钢的碳素基体钢中,无论用什么原料及冶炼方法都不能避免锰、硅、硫、磷等元素或多或少地进入钢中,硅是以硅铁的状态在冶炼过程中加入的。硫和磷也不能除净。因此,这些元素的含量应被控制在限制的范围内。一般硅应控制在 $0.12\% \sim 0.30\%$ 、磷应控制小于或等于 0.05% 、硫应控制小于或等于 0.06% 。而锰在非调质钢中是有意加入的,高于一般碳素钢中的锰含量。锰在钢中由于降低临界转变温度,可使铁素体变细,珠光体团变小,珠光体百分数增加,两者都使钢的强度提高。但是,当锰含量过高时,会引起钢的晶粒粗化趋势增大,在空冷条件下钢中会出现贝氏体组织,这对钢的塑性和韧性是不利的。因此,锰的含量一般都控制在 1.6% 以下。

(二)微量合金元素在钢中的作用

钒、铌、钛等合金元素是非调质钢中最常添加的碳氮化合物形

成元素,与铁相比,它们在钢中与碳和氮有更强的化学亲合力,形成更稳定的碳氮化合物,并通过细化晶粒和沉淀析出改善非调质钢的力学性能。

1. 微量合金元素钒的作用

钒是非调质钢中主要添加元素,在最简单的情况下,钢用钒合金化,可以使 γ 相向 α 相的相变温度降低,形成较弥散的珠光体。钒在奥氏体中固溶温度较低,但扩散速度相当快。在加热和均热阶段,沉淀物发生溶解,在热加工期间保持溶解状态,而随后冷却时弥散沉淀析出使钢的强度增加而韧性下降。在此,借助于组织细化来提高韧性,以补偿由强度制约而降低的韧性。随着钢中钒含量增加,钢的强度呈直线上升,但更多的钒含量($V > 0.2\%$)对钢的进一步强化作用并不大。对于Fe-0.1V-0.5C合金中的钒溶解量和加热温度关系的实测表明,在加热到 800°C 时有50%V溶解,在 1100°C 时V可完全溶解⁽¹⁾。因此,在常规锻造加热温度下,非调质钢中的钒可完全溶解于奥氏体中,故钒的利用率高,对沉淀析出强化贡献大,成为非调质钢中主要添加的合金元素。在钢中钒的添加量,一般控制在 $0.08\% \sim 0.13\%$ 。

在设计钒非调质钢的化学成分时,在冶炼试验前,为了估算所设计的钢成分能否达到预期的强度设计要求,可只对所设计的钢种强度作出定量的描述。其方法可借助于计算淬透性及力学性能的非线性方程中的有关部分进行计算⁽²⁾。

$$M = \frac{(4 + \text{Mn}) \times \text{Mn} + 8\text{Si}}{(4 + \text{Si}) + 5 \times (\sqrt{V} - V) + 1.2} \quad (2-1)$$

$$\sigma_b = \frac{(16 \times M) \times (\sqrt{M} + 10) + 2160}{40 + \sqrt{D} \times \left[\left(\frac{C}{0.6 + C} \right)^2 \times (3 - C) + 0.5 \right]} \quad (2-2)$$

式中

M ——合金化当量;

σ_b ——拉伸强度(N/mm^2);

D ——试样直径(mm);

C、Mn、Si、V——各元素含量百分数。

例：现设计一种非调质钢要求 $\sigma_b \geq 800 \text{ N/mm}^2$ 。下面就可先对设计的钢种进行定量计算。假设设计的钢种为 45MnV。钢的化学成分为：

0.45% C、0.3% Si、1.1% Mn、0.1% V, $D=20 \text{ mm}$ 。

将上面的数据代入公式(2-1)及式(2-2)中得：

$$M = 5.61 + 0.55 + 1.08 + 1.2 = 8.44$$

$$\sigma_b = 840 \text{ N/mm}^2$$

计算表明，所设计的 45MnV 非调质钢强度可满足设计要求，并与试验中实测的力学性能基本相符。

2. 微合金元素铌的作用

铌是非调质钢中另一添加的主要元素。铌要求高的奥氏体化温度，在加热温度高达 1200°C 时也能有效抑制奥氏体晶粒尺寸的长大，推迟奥氏体再结晶，有强烈细化晶粒的作用。溶解于奥氏体中的铌阻止 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变，从而促使珠光体体积分数提高。

按奥氏体溶解度体积关系式计算出，在 Fe-0.1Nb-C 钢中，当碳含量为 0.3%~0.4% 时，铌完全固溶的温度为 $1325 \sim 1360^\circ\text{C}$ 。化学分析表明，当加热到 1100°C 时，铌几乎没有固溶，在 1300°C 时只有 50% 固溶^[1]。铌的固溶量少，在奥氏体中扩散慢，在热加工时诱导沉淀的碳氮化合物体积减少，因此它的沉淀强化作用小。由于提高加热温度在实际生产中不易实施，故用于热锻的非调质钢，一般不宜单独添加铌。当复合添加铌、钒时，既能提高钢的强度，又能改善钢的韧性。

3. 微合金元素钛的作用

非调质钢中添加少量的钛，在加热温度低于 1100°C 时，形成细小的氮化钛，对抑制奥氏体晶粒长大是非常有效的。进一步增加钛含量，会形成尺寸大于 $1\mu\text{m}$ 的第一类氮化物。它作为形核中心，使得容易发生再结晶和奥氏体分解。当含 0.06% Ti 时，除形成氮化物外，还形成碳氮化合物和碳化钛，这些质点在整个热变形温度范围都能析出，有效地阻止奥氏体晶粒的长大。析出物的比例变

化,确定珠光体硬度和破断特征与含钛量之间不是单调的关系^[3]。

由试验可知,微量合金元素(当它们共同添加时)对中碳钢的性能和显微组织参数无叠加作用,从所得到的回归方程中存在的相互作用项也证明了这点。回归方程描述了珠光体区尺寸 D_n (μm)、珠光体含量 V_n (%)、 σ_k (N/mm^2) 以及 a_k (J/cm^2)。回归方程随含碳量(0.2%~0.6%)、含锰量($\leq 2\%$)、含铬量($\leq 1\%$)及微合金添加剂铌和钒的变化有以下关系^[3]:

$$\Delta \bar{D} = 40C + 125\text{Cr} + 10\text{Mn} - 4V - 22\text{Nb}$$

$$\Delta V_n = 170C + 71\text{Cr} + 40\text{Mn} - 16V + 132\text{Nb}$$

$$+ 125V \cdot \text{Nb} - 125V^2 - 1126\text{Nb}^2$$

$$\Delta \sigma_k = 735C + 272\text{Cr} + 171\text{Mn} + 563V$$

$$+ 1197\text{Nb} - 7764\text{Nb}^2$$

$$\Delta a_k = 220C + 33\text{Mn} - 300V + 1600V^2 + 300\text{Nb}$$

从描述钒和铌影响的回归方程可以看出,这些元素的相互作用使得强化程度减少,冲击韧性有较大的增高。碳氮化钒的质点的弥散强化作用比在钒钢中小,因为有一部分钒过渡到复合的碳氮化合物(Nb, V)(C, N)中。 X 射线结构分析证明了这点。

钒和铌复合添加的微合金钢的最终组织弥散度和均匀性的提高,可促使在提高强度的同时亦提高韧性。复合添加铌和钛的钢,在加热到 1200°C 温度也能得到均匀细小晶粒奥氏体,表明钛增强铌的效果。而在钒钢中单独添加钛改善了钢的韧性却降低了强度。如果钛的含量添加过高,由于形成粗大 TiN 质点,反而使钢的强度和韧性都降低。

上面仅概括地说明了添加合金元素钒、铌和钛(单独或复合)在非调质钢中的主要作用,而它们对非调质钢组织与性能的影响,将在第三章进行讨论。

二、其他类型非调质钢成分及合金化原理

近年来,为了扩大非调质钢的应用,满足非调质钢的某种或某些性能要求,又研制了一些新品种非调质钢。