

锰含量对中碳低硅贝氏体钢显微组织及力学性能的影响

于金瑞¹, 于鑫泓¹, 张禹¹, 冯以盛^{1,2}, 赵而团^{1,2*}

(1. 山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东星泉科技有限公司, 山东 淄博 255049)

摘要: 设计并熔炼了四种锰含量(质量分数分别为 0.76%、1.29%、1.53%、1.85%)的中碳低硅贝氏体钢, 利用 OM、SEM、XRD 仪器和拉伸、冲击试验机等研究了锰含量的添加对试验钢显微组织和力学性能的影响。结果表明, 锰元素抑制了铁素体与珠光体相变; 锰元素的添加降低了贝氏体的形核驱动力, 减少了贝氏体最大转变量, 使得贝氏体转变停滞而剩余的过冷奥氏体尺寸增大, 含量增加; 这些奥氏体在后续等温过程中大部分分解为粗大碳化物和铁素体混合组织, 并围绕在贝氏体板条周围, 形成了局部粗化组织, 少部分保存至室温形成残余奥氏体; 随着锰含量的增加, 试验钢的屈服强度和冲击韧性逐步下降, 抗拉强度由于合金化和组织粗化两因素的相互竞争先升高后降低; 综合考虑贝氏体钢热处理难度与力学性能, 锰含量为 1.29% 时最适合作为弹簧用钢。

关键词: 低硅贝氏体钢; 锰含量; 碳化物; 残余奥氏体

中图分类号: TF76, TG142.12

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)03-0147-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Effect of Mn content on microstructure and mechanical properties of medium carbon low Si bainitic steel

Yu Jinrui¹, Yu Xinhong¹, Zhang Yu¹, Feng Yisheng^{1,2}, Zhao Ertuan^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 2. Star Spring Technology Co., Ltd., Zibo 255049, Shandong, China)

Abstract: Four medium-carbon low-Si bainitic steels with different Mn contents (0.76%, 1.29%, 1.53%, 1.85%) were designed and smelted. The effect of manganese content on the microstructure and mechanical properties of the test steel was studied by OM, SEM, XRD and tensile and impact tests. The results show that the phase transformation between ferrite and pearlite is inhibited by manganese. Manganese addition decreases the nucleation driving force of bainite, causing the declining maximum transformation amount of bainite, and increases the size and content of the remaining supercooled austenite after bainite transformation stagnation. Most of the remaining austenite decomposes into coarse carbide and ferrite mixed structure in the subsequent isothermal process, and forms local coarse structure around the bainite lath. A small amount of the austenite stabilize to room temperature and then form retained austenite. With the increase of manganese content, the yield strength and impact toughness of the test steel

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(编号: ZR2022ME210); 山东省精密制造与特种加工重点实验室基金项目(编号: 9001/5322009)。

作者简介: 于金瑞, 1998 年出生, 男, 山东东营人, 硕士研究生, 研究方向: 贝氏体钢, E-mail: 15154629906@163.com; *通讯作者: 赵而团, 1976 年出生, 男, 山东临沂人, 副教授, 研究方向: 高性能贝氏体钢的研发及产业化, E-mail: etzhao@sdut.edu.cn。

gradually decrease, and the tensile strength firstly increase and then decrease due to the competition between alloying and microstructure coarsening. Considering the complexity of heat treatment and balanced mechanical properties of bainitic steel, 1.29% manganese content is proposed for spring steel.

Key words: low silicon bainite steel, manganese content, carbide, retained austenite

0 引言

随着汽车工业的蓬勃发展, 弹簧用量也随之增大, 提高弹簧用钢性能对于提高汽车安全服役年限和实现轻量化都具有重要的意义^[1-3]。当前, 弹簧钢的显微组织通常为经淬火+中/高温回火得到的回火屈氏体/回火索氏体, 其拉伸与疲劳性能均难以满足商用车日益增长的性能需求, 同时环保对现有淬火工艺的要求越来越苛刻。因此迫切需要研究具有高强韧性的新型弹簧用钢及其绿色环保制备工艺。近年来, 贝氏体钢因其高强度和良好的强韧性匹配得到广泛关注^[4]。已有一些研究将贝氏体钢应用于弹簧, 研究表明, 贝氏体钢弹簧钢可直接空冷即可达到所需的组织和力学性能, 不需要淬火处理, 简化了生产工序, 且拥有良好的强韧性匹配, 能够满足弹簧应用要求^[5-7]。

锰作为贝氏体的重要形成元素^[8], 其含量直接影响钢中贝氏体组织的形成, 且价格相对便宜。诸多学者对贝氏体相变过程中锰的作用进行了研究, 研究表明, 锰元素可延缓奥氏体的高温相变, 推迟高温铁素体的形成, 同时还能起到固溶强化、细化贝氏体组织、稳定残余奥氏体等作用^[9-12]。锰同样也会产生一些不利影响, 锰元素在奥氏体晶界的偏聚将会抑制晶界形核, 使贝氏体形核和长大受到抑制, 相变迟缓^[13]。

目前对锰元素影响的研究多集中在高硅无碳化物贝氏体钢。尽管硅能够抑制碳化物的析出, 然而随着硅含量的增加, 表面脱碳会越发严重, 从而导致弹簧的表面强度降低, 影响弹簧的疲劳性能^[14-15]。因此高硅贝氏体钢并不适合作为弹簧用钢使用。当硅元素添加量受到限制时, 价格相对便宜的锰元素对于贝氏体的调控作用更加不可替代。然而, 截至目前锰元素的添加对低硅贝氏体钢组织及性能, 以及碳化物析出的影响还未有系统的研究, 需要深入探讨, 低硅贝氏体钢中碳化物的析出不可避免^[16-17], 因此需要对碳化物的析出规律进行深入研究, 尽量避免或减少粗大碳化物的产生, 粗大碳化物将会严重影响材料冲击与疲劳性能, 降低弹簧的使用寿命。

为此作者设计了中碳低硅的新型锰系贝氏体钢, 研究合金元素锰对低硅钢显微组织、力学性能及碳化物析出的影响。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

采用中频感应炉自行熔炼不同锰含量的试验钢, 熔炼原料为 51CrV4, 通过添加不同铁合金弥补熔化过程中的烧损并调节成分, 采用硅锰混合脱氧。其化学成分使用直读光谱检测仪测得, 结果如表 1 所示。坯料尺寸为 $\text{Ø}90 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 均匀化处理 2 h 后, 锻造成截面尺寸为 $25 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 的厚钢板, 锻造比约为 3.5。锻造后将钢板切为 $25 \text{ mm} \times 32.5 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 大小的试块, 重新用 KF1200 型箱式热处理炉加热至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 30 min 后空冷至 $280 \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$, 放入 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 热处理炉等温 5 h。

表 1 试验钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of experimental steels %

No.	C	Mn	Cr+Mo+V	Si	P	S	Fe
M1	0.54	0.76	1.45	0.31	0.013	0.003	Bal.
M2	0.55	1.29	1.44	0.24	0.013	0.005	Bal.
M3	0.54	1.53	1.46	0.42	0.013	0.003	Bal.
M4	0.56	1.85	1.53	0.37	0.017	0.004	Bal.

1.2 试验方法

利用 MTS E45.105 型电子万能试验机对试验钢进行室温拉伸性能测试, 试样按照 GB/T 228《金属材料室温拉伸试验方法》加工, 标距为 $\text{Ø}5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 依照 GB/T 229《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》制备夏比 U 型缺口冲击试样。试样尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$, 中间 U 型缺口深与宽均为 2 mm。拉伸与冲击试验所需试样在锻后钢板上沿轧制方向截取, 取样位置为钢板 1/4 中心处。金相观察试样截取 $\text{Ø}10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 试样磨抛后采用日本 Rigaku Miniflex 600 X 射线衍射仪分析材料相组成, 扫描速度 $2 \text{ }^\circ/\text{min}$, 扫描角度 $40^\circ \sim 100^\circ$; 试样使用 3% 硝酸酒精溶液腐蚀后采用 SDPTOP

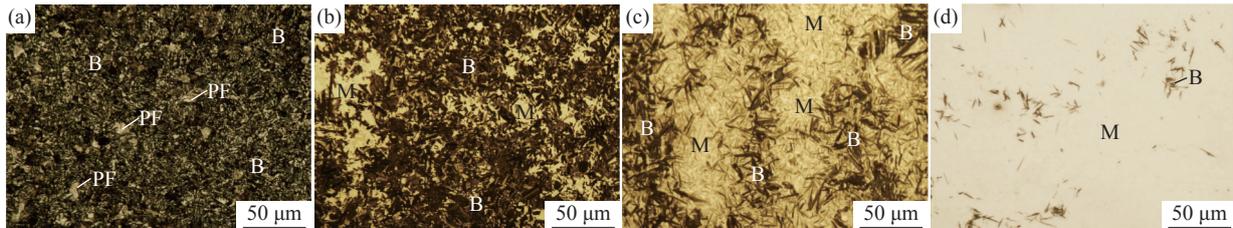
XD30 M 型光学显微镜 (OM) 和 quanta 250 场发射环境扫描电镜 (SEM) 进行微观组织观察。

2 试验结果与讨论

2.1 锰含量对显微组织的影响

由图 1 可见, 不同锰含量的四种试验钢奥氏体化+空冷后的显微组织有较大的差别。其中, M1 试

验钢主要由先共析铁素体和贝氏体组成, 而 M2、M3、M4 三种试验钢组织均为马氏体、贝氏体和残余奥氏体的混合组织。即随着钢中锰含量增加, 贝氏体组织逐渐减少, M/A 组织逐渐增多。使用 Image-Pro Plus 软件对 M2、M3 和 M4 三种试验钢中贝氏体组织占比进行定量测量, 测得贝氏体组织体积分率分别为 67.8%、34.6%、5.9%。



(a) 0.76%Mn; (b) 1.29%Mn; (c) 1.53%Mn; (d) 1.85%Mn

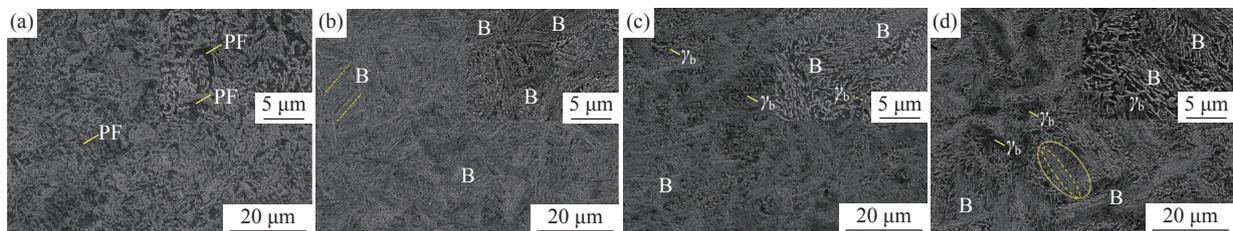
图 1 锰含量对正火状态试验钢显微组织的影响

Fig. 1 Effect of manganese content on microstructure of normalizing test steel

金相组织中发现贝氏体组织分布并不均匀, 呈条带状, 这是由于锻造比偏小且存在合金元素的偏析, 即使已经过 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 均匀化处理, 合金元素的偏析仍对贝氏体组织的转变有巨大影响^[18-19]。锰作为有强烈偏析倾向的合金元素, 其添加势必会使得贝氏体转变不均匀, 形成带状组织。

由图 2 可见, 试验钢经空冷后长时间等温, 组织发生了进一步转变, 贝氏体组织转变完全。还发现随着锰含量的提高贝氏体组织反而逐渐变得粗大, 这与较多研究不同^[21]。随着锰含量增加贝氏体板条数量减少, 但贝氏体板条的尺寸并未有明显变化, M3、M4 试验钢中, 贝氏体板条被粗大碳化物与铁素体混合组织包围, 该组织与贝氏体组织没有明显

界限, 粗大碳化物与铁素体混合组织与贝氏体组织可通过碳化物排列方式进行区分, 下贝氏体组织内部碳化物易于采用单一晶体学变体, 碳化物最长轴与铁素体板条的“长大方向”呈 $55^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 夹角。粗大碳化物与铁素体含量随锰含量增加而增加, 造成了组织粗化。块状 M/A 组织尺寸也随锰含量增加而增大, 其中在 M1 和 M2 钢中未观察到 M/A 组织的存在, 在 M3 和 M4 钢中观察到仍存在部分残余奥氏体, 少量以片状存在, 更多的残余奥氏体呈现为块状。M2 试验钢碳化物尺寸均匀、细小, M3 钢和 M4 钢存在两种不同尺寸的碳化物, 尤其在 M4 试验钢中粗大碳化物占据了较大的比例。



(a) 0.76%Mn; (b) 1.29%Mn; (c) 1.53%Mn; (d) 1.85%Mn

图 2 锰含量对试验钢空冷+等温后显微组织的影响

Fig. 2 Effect of Mn content on microstructure of test steel after isotherm

由图 3 可知, 试验钢中含有铁素体相, 奥氏体相和碳化物相。并对 $(200)\gamma$ 峰局部放大, 随着锰含量的增加 $(200)\gamma$ 峰越来越明显, 残余奥氏体含量逐渐

增加, 表明锰元素提高了奥氏体的稳定性。但即使在锰含量最高的试验钢中残余奥氏体峰依旧不明显, 因此并未进行具体含量计算。造成残余奥氏体含量

较低的原因是:低硅钢中碳化物容易析出,降低了过冷奥氏体中的碳含量,使得贝氏体转变量增多,残余奥氏体含量减少。

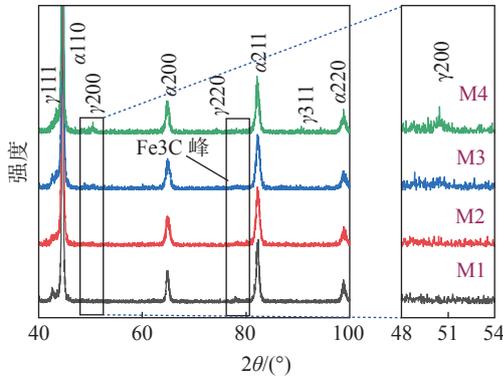
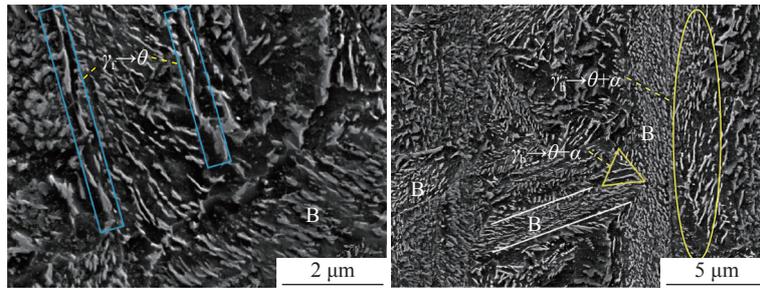


图3 试验钢的XRD谱

Fig. 3 XRD curve of the experimental steels

2.2 试验钢中的碳化物析出行为

由图4可知,试验钢中存在较多的粗大碳化物,围绕在贝氏体板条周围,图4(a)中观察到,部分粗大碳化物分布在贝氏体板条间隙处呈线形排列,它的形成是由于薄膜状残余奥氏体的分解。薄膜状残余奥氏体由于尺寸效应和较高的碳含量,更易发生分解,这些薄膜状奥氏体太薄,因此分解为线形排列的碳化物颗粒。块状残余奥氏体的分解产物如图4(b)所示,贝氏体/奥氏体界面退化成一系列不规则的扰动界面,这是由于在长时间等温过程中原始贝氏体/奥氏体界面迁移使得碳化物逐渐析出,贝氏体与奥氏体界面处碳含量最高且有利于碳化物的形核,因此,在长时间等温过程中粗大碳化物总是在原始贝氏体与奥氏体界面处率先析出,然后逐步向过冷奥氏体内部延伸。



(a) 线型分布碳化物; (b) 粗大碳化物与铁素体混合组织

图4 粗大碳化物的SEM形貌及分布

Fig. 4 SEM morphology and distribution of coarse carbides (a) Linear distribution of carbides (b) Coarse carbide and ferrite mixed structure

此外,贝氏体粗化形成的碳化物与贝氏体板条内部的碳化物相比尺寸明显增大,这是由于贝氏体铁素体板条内部的细小碳化物形核于过冷奥氏体与贝氏体片条界面处,向奥氏体方向生长,整个相变过程中,贝氏体铁素体中的碳含量始终处于热力学准平衡状态,贝氏体铁素体与碳化物的长大呈相互竞争机制,贝氏体铁素体的长大速度远高于碳化物,二者长大的结果是贝氏体铁素体将碳化物包围^[16,20],因此分布均匀,尺寸细小^[21]。而贝氏体转变结束后,过冷奥氏体中碳含量较高,碳化物长大速度较快而铁素体生长缓慢,因此析出的碳化物尺寸增大。

根据上述研究,绘制过冷奥氏体等温热处理过程中组织转变如图5所示。在等温过程中,过冷奥氏体首先以生成含碳化物的下贝氏体的方式进行转变。随贝氏体转变量的增加,碳元素逐渐向残余奥氏体中富集,贝氏体转变受到抑制直至停止。继续

等温,由于薄膜状过冷奥氏体和块状过冷奥氏体边缘处碳含量较高,最先生成了粗大的碳化物颗粒,在后续等温过程中,过冷奥氏体含量逐渐降低,粗大碳化物占比逐渐增加。当等温时间足够长时,过冷奥氏体将完全分解为粗大碳化物与粗大铁素体组织。

2.3 锰含量对粗大碳化物含量及分布的影响

粗大碳化物均是由过冷奥氏体在长时间等温过程中分解得到的,因此过冷奥氏体分布及过冷奥氏体中碳质量分数决定了粗大碳化物析出形貌及数量。因此通过 MUCG83 软件模拟计算来研究在无碳化物析出条件下残余奥氏体的含量与分布,这对了解粗大碳化物的析出具有指导作用。

在 T_0 温度之下,贝氏体的形成条件为^[22]:

$$\Delta G_m < G_N \tag{1}$$

$$\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha} < G_{SB} \tag{2}$$

式中, ΔG_m 为形核驱动力; G_N 被称为通用形核函数

($G_N=3.637 \times T - 2540$); $\Delta G^{\gamma \rightarrow \alpha}$ 为奥氏体转变为贝氏体的自由能变化; G_{SB} 为贝氏体的储存能, 通常取定值 $400 \text{ J/mol}^{[22]}$ 。

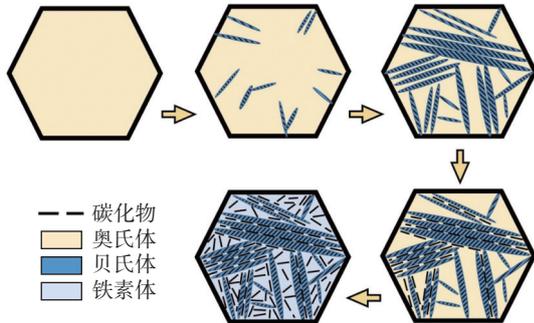


图 5 等温热处理过程中低硅贝氏体钢中碳化物析出示意
Fig. 5 Schematic diagram of carbide precipitation in low silicon bainite steel during isothermal heat treatment

式(1)确保形核的发生, 式(2)确保化学自由能变化超过贝氏体的储存能, 利用模拟软件计算了四种锰含量不同温度下的贝氏体形核与生长驱动力, 计算结果如图 6 所示。随锰含量的增加由形核控制的贝氏体相变点温度大幅下降, 在相同的等温温度下, 锰元素含量越高, 贝氏体的形核驱动力越小, 形核数量减少, 残余奥氏体平均尺寸增大。

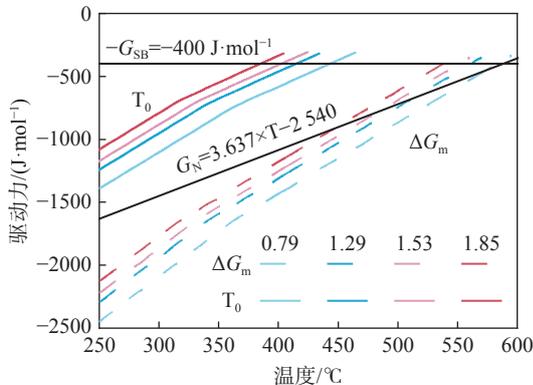


图 6 不同锰含量试验钢贝氏体形核及长大驱动力与温度的关系
Fig. 6 The relationship between temperature and driving force of Bainite core and growth of steel with different Mn content

由图 7 可知, 在等温过程中, 奥氏体中的碳含量随贝氏体转变而逐渐增加, 直到其中的碳含量达到 T_0 曲线位置, 贝氏体转变停止, 锰元素降低了贝氏体停止转变时残余奥氏体内的碳含量。使得残余奥氏体含量增加, 贝氏体转变总量减小^[23-24]。随着锰含量的增加, 残余奥氏体含量增加, 平均尺寸增大, 因此当等温足够长时间后得到的粗大碳化物的体积分数增多, 分布也更加集中。

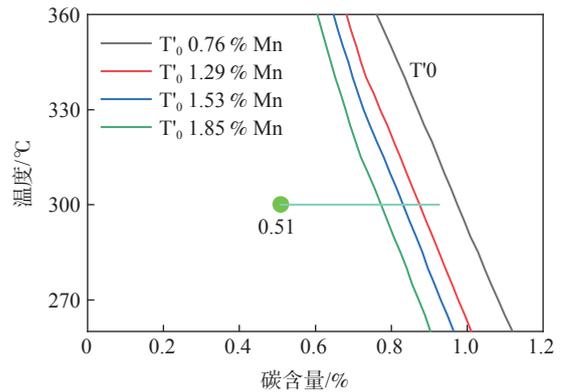


图 7 不同锰含量试验钢等温过程中残余奥氏体中碳质量分数变化与 T_0' 曲线拟合
Fig. 7 The variation of C mass fraction in residual austenite during isothermal process is fitted with T_0' lines

由图 8 可知, 在贝氏体相变停滞期间, 未转变过冷奥氏体中的碳含量只达到了 T_0 曲线所示的碳含量, 没能达到配分-局部平衡机制 A_{e3} 曲线所示的碳含量, 所以这些过冷奥氏体是亚稳态的。随着等温时间的进一步延长, 过冷奥氏体将会发生分解, 分解为更为稳定的相, 即碳化物和铁素体。

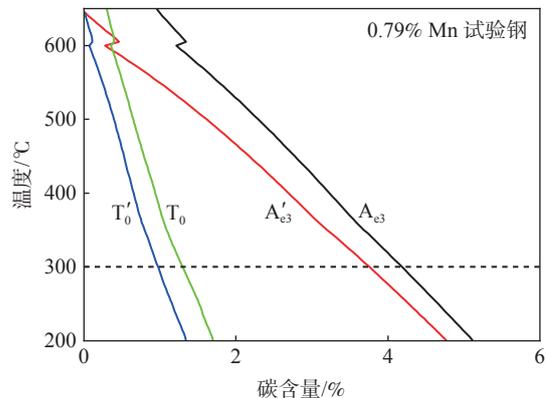


图 8 0.79% Mn 试验钢的相变热力学曲线 T_0 、 T_0' 、 A'_{e3} 、 A_{e3}
Fig. 8 Thermodynamic curve of phase transformation of 0.79% Mn test steel T_0 、 T_0' 、 A'_{e3} 、 A_{e3}

2.4 锰含量对力学性能的影响

由表 2 可以看出, 试验钢的拉伸性能随锰含量的增加并不是单调增加或减小的, M1 试验钢强度最低, 塑性最好, 这是由于其组织构成主要为珠光体和铁素体。其他三组试验钢组织类型一致, 均以贝氏体组织为主, 这三组试验钢冲击功与屈服强度均随锰含量增加而降低, 抗拉强度则先升高后降低, M2 试验钢抗拉强度与 M1 相比有极大的提高, 达到 1592 MPa , M3 试验钢抗拉强度最高, 为 1629 MPa ; M4 试验钢则出现了抗拉强度降低现象, 其强度甚至低于 M2 试验钢。这是由于随着锰含量的提高,

由奥氏体分解得到的粗大的碳化物/铁素体混合组织含量增多,块状残余奥氏体尺寸增大。使用强塑积表征材料的强韧性能,强塑积是抗拉强度与伸长率的乘积,M1试验钢伸长率最高,其余三种试验钢伸长率相近,因此强塑积主要受到抗拉强度的影响。对于抗拉强度而言,锰元素的添加起到了固溶强化的作用,但块状残余奥氏体和粗大的碳化物/铁素体混合组织等软相含量的增加,将会降低抗拉强度,两方面因素相互竞争使得强度先升高后降低。随着Mn元素的增加先增大后减小,M3试验钢强塑积最

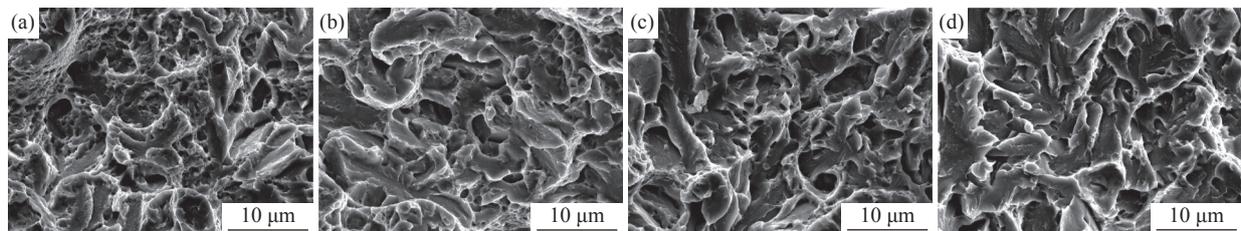
大。屈服强度主要受到材料中软相(粗大的碳化物/铁素体、块状残余奥氏体)的控制,因此屈服强度单调下降。冲击韧性则受到块状残余奥氏体尺寸和粗大碳化物含量的影响,韧性也不断降低。对比四种锰含量试验钢的力学性能,M1试验钢强度太低,M4试验钢冲击功较低,M2、M3试验钢综合性能较好且性能相近,但M2试验钢获得贝氏体组织所需时间较短,大大降低了热处理成本。因此锰含量为1.29%时最适合作为弹簧用钢。

表2 不同锰含量试验钢的力学性能
Table 2 Mechanical properties of steel tested with different manganese content

No.	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	强塑积/(GPa·%)	冲击功/J
M1	1 203±3	903±6	11.5±0.4	13.56	27.9±2
M2	1 592±2	1 290±23	8.8±0.3	13.99	26.7±5
M3	1 629±7	1 239±17	9.5±0.2	15.54	24.1±6
M4	1 565±18	1 136±31	9.4±0.4	14.54	21.7±3

由图9可知,四种锰含量试验钢的断裂方式均为准解理断裂,是介于解理断裂和韧窝断裂之间的一种过渡断裂形式,存在解理面并伴有大小不一的韧窝及撕裂棱。随着锰含量的增加,冲击断口中韧窝数量逐渐减少,M1断口解理平面较小,韧窝数量

较多。M2、M3断口以解理平面为主,韧窝主要分布在撕裂棱处。M4断口几乎全由解理面组成,同时撕裂棱较窄,韧窝极少。与冲击功表现一致,随着锰含量增加,韧窝含量减少,冲击韧性降低。



(a) 0.76%Mn; (b) 1.29%Mn; (c) 1.53%Mn; (d) 1.85%Mn

图9 不同锰含量试验钢的冲击断口形貌

Fig. 9 Impact fracture morphology of steel tested with different manganese content

3 结论

1)空冷后金相组织观察表明,锰含量1.29%以上即可在空冷过程中避免高温相变的发生。

2)中碳低硅钢在等温过程中碳化物的析出分为两个过程,首先是贝氏体形成过程中的碳化物伴随析出,尺寸细小,其次是长时间等温过程中的残余奥氏体分解成铁素体和粗大的碳化物,尺寸较大。

3)随着锰含量的提高,贝氏体的形核驱动力降

低,贝氏体总转变量减少,残余奥氏体含量增加,等温过程中由奥氏体分解而产生的粗大碳化物/铁素体混合组织的占比增加,使得组织粗化,强度降低。

4)试验钢抗拉强度受到合金元素含量和组织形态的影响,锰含量的增加,组织发生粗化,两方面因素造成了抗拉强度先增加后降低,M3试验钢抗拉强度最高。冲击强度由于粗大碳化物含量增加而降低。综合考虑试验钢的强塑积与冲击功,M3试验钢综合性能最优。

参考文献

- [1] Liu C, Chen Y, Zhang C, *et al.* Enhanced strength and plasticity in a novel 55Si2MnMoV spring steel via austempering[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 825: 141887.
- [2] Yang Lin, Yu Chibin, Bao Siqian, *et al.* Analysis on decarburization of 50CrV4 steel and its effect on hardenability[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2013, 34(2): 88–92.
(杨林, 余驰斌, 鲍思前, 等. 50CrV4脱碳分析及其对淬硬性的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2013, 34(2): 88–92.)
- [3] Meng Jian. Study on microalloying and heat treatment process of spring steel 55SiCrV[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(3): 187–192.
(蒙坚. 弹簧钢55SiCrV的微合金化及热处理工艺研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(3): 187–192.)
- [4] Bajželj A, Burja J. Influence of austenitisation temperature and time on martensitic and isothermal bainite phase transformation of spring steel[J]. *Metals*, 2022, 12(8): 1373.
- [5] Huang Jingxin, Bai Bingzhe, Yu Guichun, *et al.* Properties of a new type bainitic steel for automobile leaf spring[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, (11): 1–5.
(黄敬新, 白秉哲, 余贵春, 等. 新型贝氏体钢汽车板簧材料的性能研究[J]. *金属热处理*, 2004, (11): 1–5.)
- [6] Yang Zhongrun, Wang Xinyi, Chen Daming, *et al.* Heat treatment of medium carbon bainitic spring steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1992, (3): 55–57.
(杨忠润, 王新祚, 陈大明, 等. 中碳贝氏体弹簧钢的热处理[J]. *机械工程材料*, 1992, (3): 55–57.)
- [7] Xu Guang, Yang Jing, Zou Hang, *et al.* Research on microstructure and property of V-alloyed superbainite steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2011, 32(4): 26–30.
(徐光, 杨静, 邹航, 等. 含钒超级贝氏体钢组织和性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2011, 32(4): 26–30.)
- [8] An Baifeng, Gao Guhui, Bai Bingzhe, *et al.* Latest developments of Mn series bainitic steels[C]//Proceedings of the 11th National Heat Treatment Conference. Taiyuan: Heat Treatment Branch of China Society of Mechanical Engineering, 2015.
(安佰锋, 高古辉, 白秉哲, 等. Mn系贝氏体钢的研究与新进展[C]//第十一届全国热处理大会论文集. 太原: 中国机械工程学会热处理分会, 2015.)
- [9] Ji Fangfang, Hui Weijun, Wu Yongsheng, *et al.* Microstructure and mechanical properties of cold hardening microalloyed steel with different manganese contents[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2010, 35(10): 33–36.
(计芳芳, 惠卫军, 吴勇生, 等. 不同锰含量冷作强化非调质钢的微观组织和力学性能[J]. *金属热处理*, 2010, 35(10): 33–36.)
- [10] Zhang Shaolong, Zhou Wen, Hu Feng, *et al.* Effect of Mn on tempering stability of retained austenite in bainite steel[J]. *Iron and Steel*, 2023(2): 113–125.
(张绍龙, 周雯, 胡锋, 等. 锰对贝氏体钢中残余奥氏体回火稳定性的影响[J]. *钢铁*, 2023(2): 113–125.)
- [11] Zhu Jiaqi, Tan Zhunli, Gao Bo, *et al.* Effect of Mn content on microstructure and mechanical properties of bainite wheel steel[J]. *China Railway Science*, 2020, 41(4): 91–98.
(祝家祺, 谭淳礼, 高博, 等. 锰对贝氏体车轮钢组织和力学性能的影响[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(4): 91–98.)
- [12] Long X Y, Zhang F C, Zhang C Y. Effect of Mn content on low-cycle fatigue behaviors of low-carbon bainitic steel[J]. *Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 2017, 697: 111–118.
- [13] Liu Shikai, Yang Liu, Zhang Jun, *et al.* Influence of Si and Mn on morphology of bainitic ferrite and kinetics of bainite transformation in Fe-C alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1992, (12): 1–8.
(刘世楷, 杨柳, 张筠, 等. Si和Mn对钢中贝氏体形态和转变动力学的影响[J]. *金属学报*, 1992, (12): 1–8.)
- [14] Zheng Hua, Hu Feng, Ke Rui, *et al.* Effect of Si on microstructure and mechanical properties of low temperature bainitic steel with medium carbon[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(9): 203–209.
(郑花, 胡锋, 柯睿, 等. 硅对中碳低温贝氏体钢组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(9): 203–209.)
- [15] Qin Xiaofeng, Li Hui, Chen Rushu, *et al.* Effect of surface condition on fatigue performance of 60S2CrVAT spring steel[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2008, (2): 74–78.
(秦晓峰, 李辉, 陈淑淑, 等. 表面状态对60Si2CrVAT弹簧钢疲劳性能的影响[J]. *大连交通大学学报*, 2008, (2): 74–78.)
- [16] Fang Hongsheng, Feng Chun, Zheng Yankang, *et al.* Precipitation of the carbides in lower bainite[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, (6): 583–588.
(方鸿生, 冯春, 郑燕康, 等. 下贝氏体中碳化物的析出[J]. *金属学报*, 2007, (6): 583–588.)
- [17] Huang Weigang, Fang Hongsheng, Zheng Yankang. Effect of silicon content on the microstructure and properties in Mn-B air-cooled bainitic steel[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1997, (1): 10–15.

- (黄维刚, 方鸿生, 郑燕康. 硅对MN-B系空冷贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理学报, 1997, (1): 10-15.)
- [18] Ruijie Z, Zheng C, Bo L, *et al.* In-situ investigation of composition segregation and deformation streamline in bainitic steel on mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2022, 855: 143949.
- [19] Goulas C, Mecozzi M G, Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 2016, 47(6) : 3077-3087.
- [20] Liu Zongchang, Wang Haiyan, Wang Yufeng, *et al.* Morphology and formation mechanism of bainitic carbide[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2008, (1): 32-37.
(刘宗昌, 王海燕, 王玉峰, 等. 贝氏体碳化物的形貌及形成机制[J]. 材料热处理学报, 2008, (1): 32-37.)
- [21] Tan X, Xu Y, Yang X, *et al.* Austenite stabilization and high strength-elongation product of a low silicon aluminum-free hot-rolled directly quenched and dynamically partitioned steel[J]. *Materials Characterization*, 2015, 104: 23-30.
- [22] Bhadeshia H K D H. Bainite in steels[M]. Qinhuangdao: Yanshan University Press, 2020.
(Bhadeshia H K D H. 钢中贝氏体[M]. 秦皇岛: 燕山大学出版社, 2020.)
- [23] Królícka A, Janik A, Ak A, *et al.* The qualitative-quantitative approach to microstructural characterization of nanostructured bainitic steels using electron microscopy methods[J]. *Materials Science-Poland*, 2021, 39(2): 188-199.
- [24] Cornide J, Garcia-Mateo C, Capdevila C, *et al.* An assessment of the contributing factors to the nanoscale structural refinement of advanced bainitic steels[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 577: S43-S47.

编辑 邓淑惠

(上接第 130 页)

- [4] Shi Lin, Cheng Susen, Zuo Haibin. Numerical simulation of erosion boundary identification of blast furnace lining[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18(4): 1-5.
(石琳, 程素森, 左海滨. 高炉炉衬侵蚀边界识别的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(4): 1-5.)
- [5] Li Junfeng, He Chuanyun, Ding Yuehua. Study on heat transfer and slag skull thickness in bosh and belly of blast furnace[J]. *Research on Iron and Steel*, 2014, 42(6): 12-15.
(李骏峰, 何川云, 丁跃华. 高炉炉腹炉腰传热及渣皮厚度的研究[J]. 钢铁研究, 2014, 42(6): 12-15.)
- [6] Chen Zeshao, Qian Jun, Ye Yihuo. Predicting theory of effective thermal conductivity of complex material[J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1992, 22(4): 416-424.
(陈则韶, 钱军, 叶一火. 复合材料等效导热系数的理论推算[J]. 中国科学技术大学学报, 1992, 22(4): 416-424.)
- [7] Zhang Feng, Xiao Jianzhuang, Song Zhiwen. The prediction models of thermal conductivity of concrete and their application[J]. *Ready-Mixed Concrete*, 2009, (2): 23-25,51.
(张枫, 肖建庄, 宋志文. 混凝土导热系数的理论模型及其应用[J]. 商品混凝土, 2009, (2): 23-25,51.)
- [8] Ji Xiulan, Liu Zengxun, Lü Qing. Analysis on slag skull on bf copper cooling stove for vanadium-bearing titaniferous magnetite smelting[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2012, 33(1): 65-69.
(计秀兰, 刘增勋, 吕庆. 冶炼钒钛磁铁矿高炉的铜冷却壁挂渣分析[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(1): 65-69.)
- [9] Liu Zengxun, Lü Qing. Heat transfer analysis for slag skull thickness of blast furnace[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2008, 29(3): 55-58.
(刘增勋, 吕庆. 高炉渣皮厚度的传热分析[J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(3): 55-58.)
- [10] Cao Yingjie, Zhang Jianliang, Guo Hongwei. Calculation of blast furnace inner wall thickness[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2015, (1): 7-11.
(曹英杰, 张建良, 国宏伟. 高炉炉墙内型厚度的计算[J]. 钢铁研究学报, 2015, (1): 7-11.)
- [11] Liu Zengxun. Coupled thermos-mechanical analysis about blast furnace staves[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
(刘增勋. 高炉冷却壁热力耦合分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.)
- [12] Cheng Susen, Qian Liang, Zhao Hongbo. Monitoring method for blast furnace wall with copper staves[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, 14(4): 1-5.

编辑 杨冬梅