



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108165890 B

(45)授权公告日 2020.08.11

(21)申请号 201810018403.7

G22C 38/06(2006.01)

(22)申请日 2018.01.09

G22C 38/28(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

G21D 9/36(2006.01)

申请公布号 CN 108165890 A

审查员 王冬妮

(43)申请公布日 2018.06.15

(73)专利权人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路30号

(72)发明人 于浩 余子权 宋成浩

(74)专利代理机构 北京市广友专利事务所有限

责任公司 11237

代理人 张仲波

(51)Int.Cl.

G22C 38/34(2006.01)

G22C 38/04(2006.01)

G22C 38/38(2006.01)

权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种低成本高强度纳米贝氏体耐磨钢球的制备方法

(57)摘要

一种低成本高强度纳米贝氏体耐磨钢球的制备方法,属于金属材料加工技术领域。钢球重量百分比为C:0.45~0.7wt.%、Si:1.5~3.0wt.%、Mn:0.5~2.0wt.%、Cr:0.1~1.5wt.%、Al:0.1~2.0wt.%、Ti:0.01~0.1wt.%,余量为Fe和不可避免的杂质。钢种冶炼浇铸后,热轧或热锻成直径 $\Phi$ 20~160mm钢球,快速冷却至200~400℃后保温3~8h,即可获得复相组织。本发明合金成分中不含Mo、Ni、Nb、V等元素,成本低、热处理工艺简单,免除淬火和回火等热处理工序,生产过程稳定,细化晶粒的同时也显著增加了钢球的耐磨性。

1. 一种低成本高强度纳米贝氏体耐磨钢球的制备方法,其特征在于,合金成分重量百分比为C:0.45~0.7wt.%、Si:2.48~3.0wt.%、Mn:0.5~2.0wt.%、Cr:0.1~1.5wt.%、Al:0.1~2.0wt.%、Ti:0.05~0.1wt.%,余量为Fe和不可避免的杂质;

制备过程包括以下步骤:

步骤一,按照上述合金成分进行冶炼、浇铸,热轧或者热锻成直径 $\Phi$ 20~160mm钢球,总压下率为75~90%;开轧温度或开锻温度为1050~1150℃,终轧温度或终锻温度为950~1000℃;

步骤二,将上述钢球空冷至800~900℃,然后快速冷却至200~400℃,在此温度下保温3~8h,即可获得纳米贝氏体、少量残余奥氏体和TiC析出相组成的复相组织;

钢球快速冷却的速度大于5℃/s,以避开珠光体转变区,使过冷奥氏体直接进入贝氏体转变区;

轧制或锻造钢球空冷至800~900℃,该温度高于珠光体转变区的上限温度,同时也处于TiC的析出温度区间,目的在于促进TiC粒子的大量析出;

所述贝氏体耐磨钢的力学性能为:屈服强度 $R_p \geq 1600\text{MPa}$ ,抗拉强度 $R_m \geq 1900\text{MPa}$ ,断后伸长率 $A \geq 10\%$ ,洛氏硬度 $HRC \geq 55$ ,室温冲击韧性 $a_k \geq 20\text{J/cm}^2$ 。

2. 根据权利要求1所述的贝氏体耐磨钢球的制备方法,其特征在于,钢的合金成分中加入Ti,形成纳米级尺寸、分布均匀的TiC析出相,抑制了形变奥氏体的晶粒粗大,细化晶粒,同时增强基体强度,提高耐磨性能。

3. 根据权利要求1所述的贝氏体耐磨钢球的制备方法,其特征在于,钢球残余奥氏体组织的体积分数为5~20%。

4. 根据权利要求1或3所述的贝氏体耐磨钢球的制备方法,其特征在于,钢球的保温温度不同,其保温时间及相应的组织与性能也不同,随着保温温度的降低,纳米贝氏体片层间距减小,强度和硬度增加,保温时间也相应延长。

## 一种低成本高强度纳米贝氏体耐磨钢球的制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于金属材料加工技术领域,涉及一种室温组织为纳米贝氏体、少量残余奥氏体和弥散分布的TiC析出相组成的复相组织及其生产工艺。本发明所涉及钢种具有优异的耐磨性,主要应用于矿山、冶金、电力、建材和化工等领域。

### 背景技术

[0002] 国家重大基础工程中进一步强调节能减排和交通装备的轻量化,加快制造业绿色改造升级,促进钢铁、石化、工程机械、轻工、纺织等产业向价值链高端发展。为此,需进一步提高钢铁材料的研究力度,致力于开发新型、高强韧性、轻量化的钢铁材料,减少对能源资源的消耗,促进经济社会可持续发展。而且随着重点产业的结构调整与产业升级,亟需高性能和高附加值的产品和绿色高效低碳的生产模式。我国钢铁产能已处于严重过剩阶段,但是高附加值产品仍不能完全满足市场需求,仍需要依赖进口弥补。据估计,我国高级别耐磨钢的市场需求量每年在50万吨-80万吨,进口量约10万吨。另外,世界各国因磨损而造成的经济损失,美国约500亿美元/年,德国153亿欧元/年,我国约1000亿元/年,因此开发先进的耐磨材料具有重大的经济意义。

[0003] 目前,国外顶尖的耐磨钢生产企业主要有瑞典SSAB公司的HARDOX系列、德国蒂森克虏伯的XAR系列、德国迪林根V系列、芬兰罗奇的RAEX系列、日本JFE系列等。国内高端耐磨钢市场均被这些国外企业占领着,而且售价基本为国内同级别耐磨钢的一倍以上,例如,芬兰RAXE400(8mm)售价为17500元/吨,日本JFE-EH400(6-10mm)售价为14500元/吨,宝钢B-MARD400(8mm)售价为7500元/吨,新余耐磨钢NM500(6mm)售价为8000元/吨。国内能生产高强度耐磨钢的厂家主要有舞钢、武钢、宝钢、南钢等,主要品种为NM360、NM400,通常使用厚度为6-80mm。一些厂家产品已达到或超过国际水平,并出口到东南亚、日本、南非、美国、澳大利亚等地。舞钢生产的硬度 $HB \geq 360$ 级的可焊接高强度结构用耐磨钢板,所制造的设备适用于在高磨损、高冲击的场合使用,也可作为屈服强度 $\geq 700\text{MPa}$ 的高强度结构钢使用。宝钢先后开发了NM360, NM400级别耐磨钢,可供钢板的尺寸范围为厚度12-60mm,宽度900-4500mm,长度8000-13000mm。鞍山钢铁集团公司与北京科技大学合作,成功进行了贝氏体-马氏体耐磨钢板的研究开发,并且对其组织及力学性能进行了深入研究,已经能够生产NM360、NM400级耐磨钢。总体来说,如今耐磨钢技术的发展呈现不平衡的现状:一是国内外技术发展不平衡,国内的耐磨钢生产企业在技术水平、产品性能等方面落后于国际最先进的水平;二是产品种类生产不平衡,耐磨钢板产品规格尺寸齐全,生产企业众多,而生产耐磨钢棒材以及磨球的企业相对很少。

[0004] 中国申请专利CN1189542公开了一种多元微合金化空冷贝氏体钢,该材料不需要复杂的热处理工艺,锻后或者轧后空冷即可获得以贝氏体/马氏体为主要组织的磨球,但是为了提高材料的淬透性及硬度,须加入大量的微合金元素,如 Nb、V、Ti、RE等,大大增加了生产成本。中国申请专利CN104651722公开了一种具有马氏体组织表层和柔软的贝氏体组织内芯的锻造钢球的制备方法,其合金成分为C:0.42~0.48wt.%、Si:0.15~0.35wt.%、

Mn:0.53~0.90wt.%、Ni: 0.06~0.20wt.%。其表面马氏体组织硬度HRC62以下,心部贝氏体组织硬度 HRC40以上。由于表面和心部硬度差异较大,这种钢球在使用过程中,当表面马氏体层被磨掉之后钢球很容易失效,降低了材料的使用寿命。中国申请专利 CN103225036公开了一种硼碳化物强化耐磨贝氏体球铁磨球及其制造方法,该方法采用控制冷却获得强韧性好的贝氏体基体,通过加入硼、铬元素获得一定数量的高硬度 $(Fe,Cr)_2(B,C)$ 硼碳化物来改善磨球的耐磨性。但是该方法采用铸造工艺来生产耐磨钢球,钢球内部很容易产生有气泡或者疏松现象,从而使钢球内部组织粗大,特别是浇注口的地方,容易引起硬度不均,导致钢球失圆破碎。

[0005] 综上所述,本发明以科学、合理的合金成分设计为基础,通过冶炼、浇铸、热轧或者热锻成直径 $\Phi 20\sim 160\text{mm}$ 钢球,利用热加工余热快速冷却至一定温度后保温一段时间,即可获得以纳米贝氏体为基体、残余奥氏体和TiC析出相组成的复相组织。本发明的创新性体现如下:1)节约资源、降低成本,所开发钢种为中高碳低合金钢,合金含量很少,且不含Mo、Ni等国家战略资源、不含Nb、V等贵金属元素;2)环境友好、节能减排,该贝氏体耐磨钢利用热加工余热,无需再加热淬火、回火等热处理工艺,通过一定的冷却、保温工艺处理即可得到综合性能优异的纳米贝氏体组织,降低了能耗且节约时间及生产成本,大大提高了产品的性价比。

## 发明内容

[0006] 针对耐磨钢球用钢对材料硬度、韧性以及生产成本的要求,本发明提供一种资源节约环境友好型纳米贝氏体耐磨钢球及其制备方法,该材料具有优异的耐磨性能,生产成本低、工艺简单、且节能减排,在矿山、冶金、电力、建材和化工等领域有着巨大的商业前景。

[0007] 本发明提供一种低成本高强度纳米贝氏体耐磨钢球的制备方法,其特征在于,合金成分重量百分比为C:0.45~0.7wt.%、Si:1.5~3.0wt.%、Mn:0.5~2.0wt.%、Cr:0.1~1.5wt.%、Al:0.1~2.0wt.%、Ti:0.01~0.1wt.%,余量为Fe和不可避免的杂质;

[0008] 制备过程包括以下步骤:

[0009] 步骤一,按照上述合金成分进行冶炼、浇铸,热轧或者热锻成直径 $\Phi 20\sim 160\text{mm}$ 钢球,总压下率为75~90%;开轧温度或开锻温度为1050~1150℃,终轧温度或终锻温度为950~1000℃;

[0010] 步骤二,将上述钢球空冷至800~900℃,然后快速冷却至200~400℃,在此温度下保温3~8h,即可获得纳米贝氏体基体、少量残余奥氏体和TiC析出相组成的复相组织。

[0011] 进一步地,合金成分中加入Ti,形成纳米级尺寸、分布均匀的TiC析出相,抑制了形变奥氏体的晶粒粗大,细化晶粒,同时增强基体强度,提高耐磨性能。

[0012] 进一步地,轧制或锻造钢球空冷至800~900℃,该温度高于珠光体转变区的上限温度,同时也处于TiC的析出温度区间,目的在于促进TiC粒子的大量析出。

[0013] 进一步地,钢球快速冷却的速度大于5℃/s,以避开珠光体转变区,使过冷奥氏体直接进入贝氏体转变区。

[0014] 进一步地,钢球残余奥氏体组织的体积分数为5~20%。

[0015] 进一步地,钢球的保温温度不同,其保温时间及相应的组织与性能也不同,随着保温温度的降低,纳米贝氏体片层间距减小,强度和硬度增加,保温时间也相应延长。

[0016] 进一步地,所述贝氏体耐磨钢球的力学性能为:屈服强度 $R_p \geq 1600\text{MPa}$ ,抗拉强度 $R_m \geq 1900\text{MPa}$ ,断后伸长率 $A \geq 10\%$ ,洛氏硬度 $HRC \geq 55$ ,室温冲击韧性  $ak \geq 20\text{J}/\text{cm}^2$ 。

[0017] 本发明材料中主要元素的作用如下:

[0018] C:当钢中含碳量在0.8wt.%以下时,增加碳含量可以提高钢的强度和硬度,并有效的降低 $M_s$ 点和 $B_s$ 点,使 $M_s$ 和 $B_s$ 之间的温度差扩大,保证低温纳米贝氏体的形成。通过Thermo-calc和MUCG83进行计算发现,含碳量大于0.45wt.%时,贝氏体转变的温度区间扩大到能适于工业生产的合理范围。另一方面,过高的碳含量会降低贝氏体转变的相变驱动力和转变速率,导致贝氏体转变程度低,等温处理时间变长,降低生产效率,提高生产成本。当含碳量为0.8wt.%时,转变时间约为28h;当含碳量为1.0wt.%时,转变时间超过3000h。综合考虑产品性能及生产成本等因素,选择将耐磨钢球的碳含量提高至0.45~0.7wt.%。

[0019] Si:硅作为一种非碳化物形成元素,加入硅可以阻碍渗碳体的析出,避免产生对韧性和塑性有害的脆性相,同时能够保证奥氏体中的碳含量,使残余奥氏体在室温下能稳定存在,能有效阻碍渗碳体析出的硅的含量最低为1.5wt.%,通常在钢中加入1.5~2.0wt.%的硅。此外硅作为一种固溶强化元素,可增加奥氏体的强度,从而细化贝氏体组织。硅元素可使珠光体相变区上移、贝氏体相变区下移,使转变曲线上下拉开,更容易控制贝氏体的转变。但是硅对贝氏体转变的推迟作用较显著,所以综合考虑,选择硅的添加量为1.5~3.0wt.%。

[0020] Mn:锰既可以通过固溶强化来提高金属的强度,也可以分离上下C曲线,提高淬透性,显著降低贝氏体的相变驱动力,降低贝氏体转变温度,也会降低马氏体转变温度,并能够细化板条,有利于获得尺寸细小的贝氏体组织。但是过高的锰含量会降低贝氏体的转变速率,而且会造成严重的碳偏析。综合考虑,选择锰的添加量为0.5~2.0wt.%。

[0021] Cr:铬能提高过冷奥氏体的稳定性,使贝氏体的转变孕育期增长。此外,Cr可以提高钢的淬透性以及降低马氏体开始转变温度。综合考虑,选择铬的添加量为0.1~1.5wt.%。

[0022] Al:铝可以增大贝氏体铁素体与奥氏体之间的自由能差,加快贝氏体转变速率,同时可以细化组织。铝加入量过多时,钢液流动性明显下降,浇铸难度大大提高,同时钢中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等夹渣物也会显著增加。另外,Al与Co配合使用对加速贝氏体转变效果更好,但是Co价格较贵,添加Co会增加生产成本,故本发明所设计的合金成分中不添加Co。综合考虑贝氏体转变时间、实际生产及成本等因素,选择铝的添加量为0.1~2.0wt.%。

[0023] Ti:钛是高品质钢中常见的微合金化元素,能和C、N形成细小碳氮化物,在钢的奥氏体化过程中能抑制晶粒的粗大化,提高未再结晶区温度,同时析出的TiC可起到强化基体的作用,增加钢的强度及耐磨性。研究发现,本发明中钛的含量为0.01~0.1wt.%时,析出的TiC粒子的尺寸、分布及体积分数达到最合理的配比,钢的强度及耐磨性最好。故选择钛的添加量为0.01~0.1wt.%。

[0024] 本发明通过合理的元素配比,经热轧或者锻造及余热热处理工艺,高效制备得到一种纳米级板条贝氏体耐磨钢球。材料的屈服强度 $R_p \geq 1600\text{MPa}$ ,抗拉强度  $R_m \geq 1900\text{MPa}$ ,断后伸长率 $A \geq 10\%$ ,心部硬度为55~56HRC,表面硬度为58~60HRC,室温冲击韧性 $ak \geq 20\text{J}/\text{cm}^2$ 。本发明所述的制备工艺简单,无需再加热淬火、回火等热处理步骤,降低了成本,节能降耗保护了环境。同时,添加的合金元素相对较少,不含Mo、Ni等国家战略资源、不含Nb、V等

贵金属元素,开发出了一种资源节约环境友好型产品。本发明所述的纳米贝氏体耐磨钢球在性能、成本方面具有明显的优势,在矿山、冶金、电力、建材和化工等行业的应用前景十分广阔。

### 附图说明

- [0025] 图1为本发明实施例1中的贝氏体的金相组织图像  
 [0026] 图2为本发明实施例2中的贝氏体的金相组织图像  
 [0027] 图3为本发明实施例3中的贝氏体的金相组织图像  
 [0028] 图4为本发明实施例1中的贝氏体的SEM图像  
 [0029] 图5为本发明实施例2中的贝氏体的SEM图像  
 [0030] 图6为本发明实施例3中的贝氏体的SEM图像

### 具体实施方式

- [0031] 下面结合具体实施例对本发明的技术方案作进一步说明。  
 [0032] 实施例1:  
 [0033] 首先按照上述成分范围进行冶炼、浇铸,然后检测铸坯的成分,见表1。  
 [0034] 表1铸坯的成分 (wt.%)

元素	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti
成分	0.68	2.60	0.90	0.90	0.88	0.06

[0036] 将直径为 $\Phi 300\text{mm}$ 的铸坯加热到 $1150^{\circ}\text{C}$ 均质化2h,在 $1100^{\circ}\text{C}$ 轧制成 $\Phi 80\text{mm}$ 的棒材,总压下率为73%,其组织以索氏体为主,力学性能如表2所示。

[0037] 表2力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	硬度/HV(100g)
629	1124	11.7	356

[0039] 将上述棒材加热到 $1050^{\circ}\text{C}$ ,在此温度下锻造成球,终锻温度为 $950^{\circ}\text{C}$ 。然后将钢球空冷至 $820\sim 830^{\circ}\text{C}$ ,接着以大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷速冷却至 $300^{\circ}\text{C}$ 保温5h,即可形成纳米贝氏体组织,热处理工艺参数见表3。贝氏体耐磨钢球的力学性能见表4,金相照片见图1,扫描照片见图4。

[0040] 表3热处理工艺参数

终锻温度/ $^{\circ}\text{C}$	空冷速率/ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$	空冷温度/ $^{\circ}\text{C}$	快冷速率/ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$	贝氏体区保温温度/ $^{\circ}\text{C}$	贝氏体区保温时间/h
950	$\leq 1$	820~830	$\geq 5$	300	5

[0042] 表4力学性能

[0043]	硬度/HRC		屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	冲击韧性/
	边部	心部	/MPa	/MPa	/%	J/cm <sup>2</sup>
	59	55	1634	1922	10.7	20.2

[0044] 实施例2:

[0045] 首先按照上述成分范围进行冶炼、浇铸,然后检测铸坯的成分,见表5。

[0046] 表5铸坯的成分 (wt.%)

[0047]	元素	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti
	成分	0.58	2.50	0.89	1.50	0.90	0.05

[0048] 将直径为 $\Phi$ 300mm的铸坯加热到1150℃均质化2h,在1100℃轧制成 $\Phi$ 80mm的棒材,总压下率为73%,其组织以索氏体为主,力学性能如表6所示。

[0049] 表6力学性能

[0050]	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	硬度/HV(100g)
	633	1137	9.7	384

[0051] 将上述棒材加热到1050℃,在此温度下锻造成球,终锻温度为950℃。然后将钢球空冷至820~830℃,接着以大于5℃/s的冷速冷却至300℃保温5h,即可形成贝氏体组织,热处理工艺参数见表7。贝氏体耐磨钢球的力学性能见表8,金相照片见图2,扫描照片见图5。

[0052] 表7热处理工艺参数

[0053]	终锻温 度/℃	空冷速率 ℃/s	空冷温度 /℃	快冷速率 ℃/s	贝氏体区保 温温度/℃	贝氏体区 保温时间/h
	950	≤1	820~830	≥5	300	5

[0054] 表8力学性能

[0055]	硬度/HRC		屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	冲击韧性/
	边部	心部	/MPa	/MPa	/%	J/cm <sup>2</sup>
	58	56	1337	1748	16.1	28.3

[0056] 实施例3:

[0057] 首先按照上述成分范围进行冶炼、浇铸,然后检测铸坯的成分,见表9。

[0058] 表9铸坯的成分 (wt.%)

[0059]	元素	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti
	成分	0.49	2.48	0.90	0.50	0.91	0.05

[0060] 将直径为 $\Phi 300\text{mm}$ 的铸坯加热到 $1150^\circ\text{C}$ 均质化2h,在 $1100^\circ\text{C}$ 轧制成 $\Phi 80\text{mm}$ 的棒材,总压下率为73%,其组织以索氏体为主,力学性能如表10所示。

[0061] 表10力学性能

	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	硬度/HV(100g)
[0062]	654	1148	8.5	390

[0063] 将上述棒材加热到 $1050^\circ\text{C}$ ,在此温度下锻造成球,终锻温度为 $950^\circ\text{C}$ 。然后将钢球空冷至 $820\sim 830^\circ\text{C}$ ,接着以大于 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 的冷速冷却至 $300^\circ\text{C}$ 保温5h,即可形成贝氏体组织,热处理工艺参数见表11。贝氏体耐磨钢球的力学性能见表12,金相照片见图3,扫描照片见图6。

[0064] 表11热处理工艺参数

	终锻温度/ $^\circ\text{C}$	空冷速率/ $^\circ\text{C}/\text{s}$	空冷温度/ $^\circ\text{C}$	快冷速率/ $^\circ\text{C}/\text{s}$	贝氏体区保温温度/ $^\circ\text{C}$	贝氏体区保温时间/h
[0065]	950	$\leq 1$	820~830	$\geq 5$	300	5

[0066] 表12力学性能

	硬度/HRC		屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	冲击韧性/
[0067]	边部	心部	/MPa	/MPa	%	$\text{J}/\text{cm}^2$
	60	56	1666	1973	11.3	23.0

[0068] 最后所应说明的是,以上实施例仅用以本发明是技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应该理解,对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,都不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

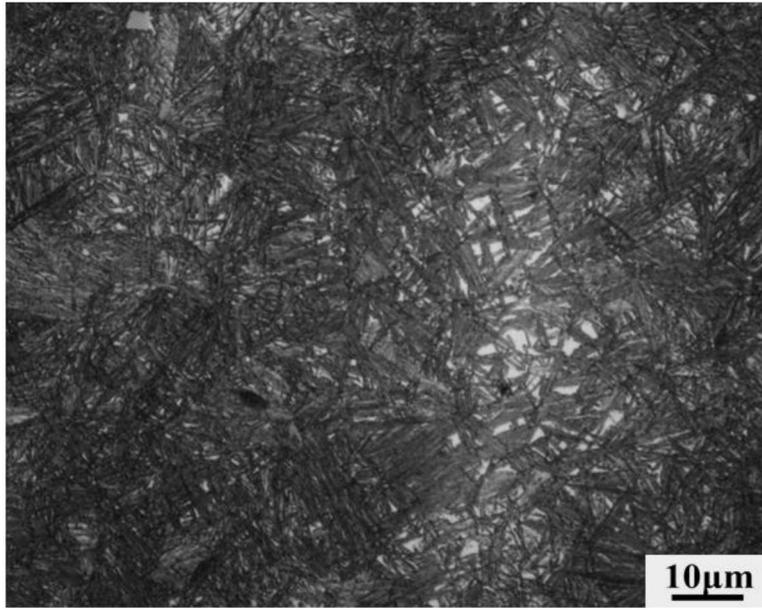


图1

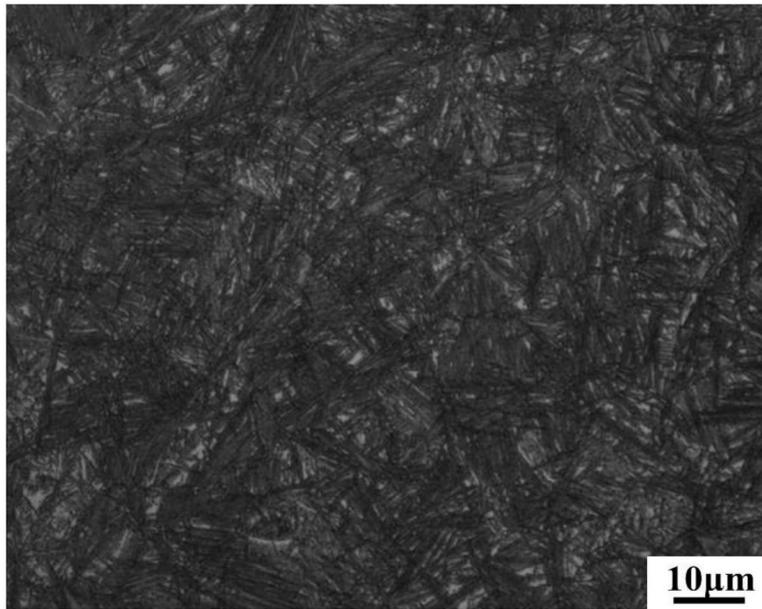


图2

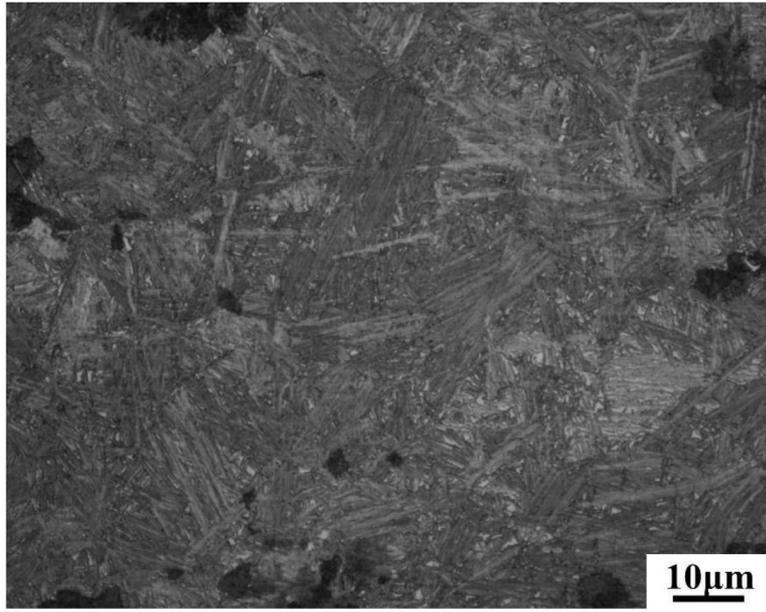


图3

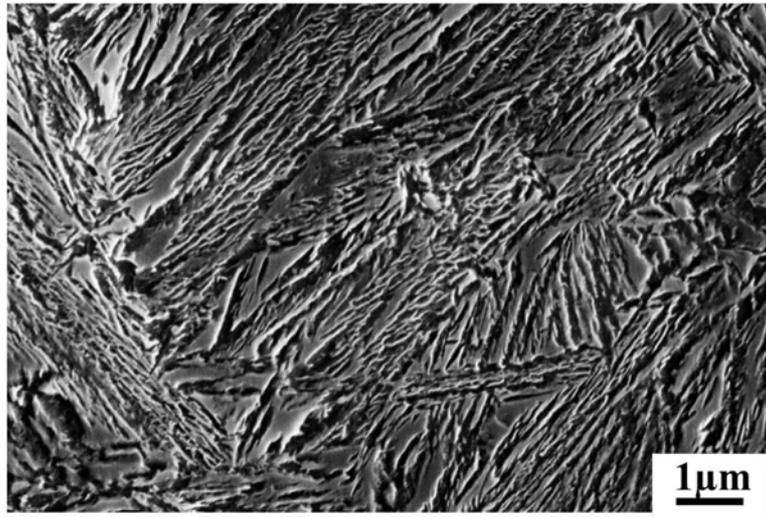


图4

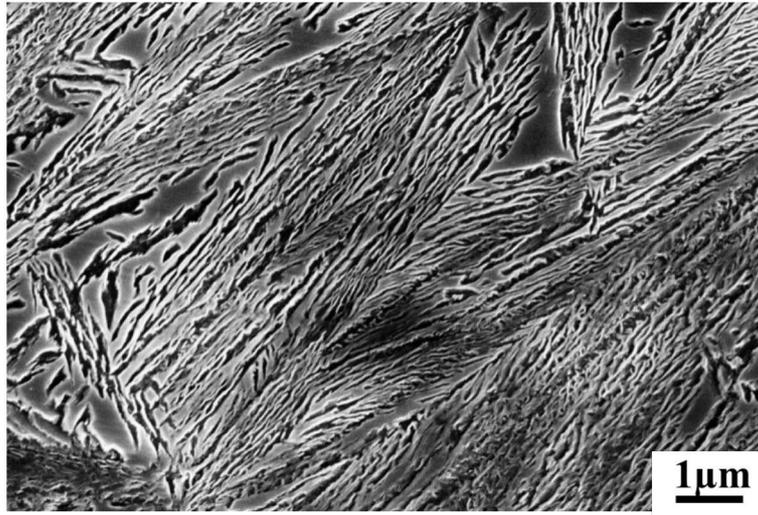


图5

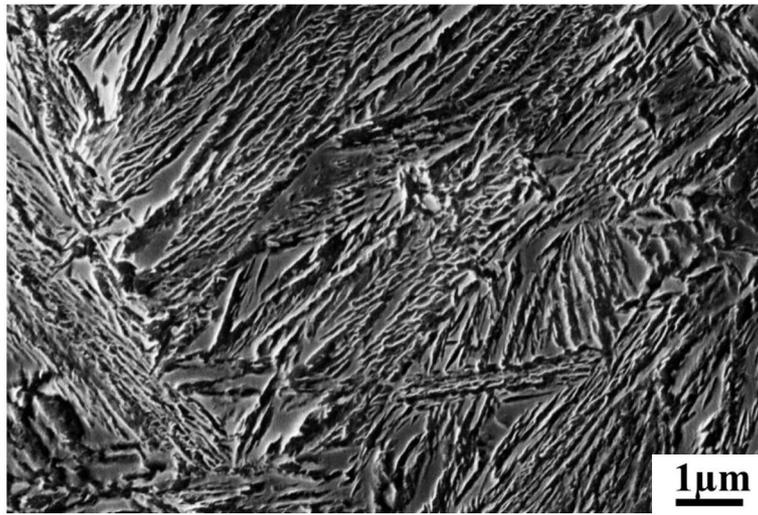


图6