



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109825661 A

(43)申请公布日 2019.05.31

---

(21)申请号 201910045561.6	<i>G22C 38/60</i> (2006.01)
(22)申请日 2019.01.17	<i>G22C 38/58</i> (2006.01)
(71)申请人 河北敬业中厚板有限公司	<i>G22C 38/54</i> (2006.01)
地址 050409 河北省石家庄市平山县南甸镇88号河北敬业中厚板有限公司	<i>G22C 38/50</i> (2006.01)
(72)发明人 杨海西 张少凯 曹晓运 樊利智	<i>G22C 38/48</i> (2006.01)
(51)Int.Cl.	<i>G22C 38/44</i> (2006.01)
<i>G21C 1/02</i> (2006.01)	<i>G22C 38/42</i> (2006.01)
<i>G21C 5/35</i> (2006.01)	<i>G22C 38/06</i> (2006.01)
<i>G21C 7/068</i> (2006.01)	<i>G22C 38/02</i> (2006.01)
<i>G21C 7/06</i> (2006.01)	<i>B21B 1/26</i> (2006.01)
<i>G21C 7/10</i> (2006.01)	<i>B21B 37/74</i> (2006.01)
<i>B22D 11/18</i> (2006.01)	<i>B21B 37/56</i> (2006.01)
<i>G21D 8/02</i> (2006.01)	<i>B21B 45/02</i> (2006.01)
<i>G21D 1/28</i> (2006.01)	
<i>G21D 1/18</i> (2006.01)	

---

权利要求书2页 说明书10页

(54)发明名称

一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺

(57)摘要

一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,经冶炼、精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理后,钢板厚度25-40mm,压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, -40℃横向V型冲击吸收能量>150J。

1. 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征为:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;钢板厚度25-40mm,其中大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率 $>18\%$ ,末道次压下率 $\geq 25\%$ ,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错。

2. 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征为:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;钢板厚度25-40mm,其中大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率 $>18\%$ ,末道次压下率 $\geq 25\%$ ,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错;

最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>150\text{J}$ 。

3. 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征为:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;具体步骤如下:

(1) KR铁水预处理脱S,并控制铁水中 $\text{S}\leq 0.005\%$ ,之后进行顶底复吹转炉冶炼,铁水与废钢的质量比是8:1,先加废钢,后加铁水,转炉终点碱度为4.0-4.2;出钢温度为1600-1620℃;采用挡渣塞、挡渣棒双挡渣出钢;

(2) 进行RH精炼:在不吹氧的条件下抽真空进行自然脱碳,提升Ar流量800-850NL/min,进行钢水脱氢,保证深真空处理时间 $\geq 12\text{min}$ ,加入0.01-0.03kg/t的铝镁锰复合脱氧剂去除钢水中多余的氧,然后对钢水进行合金化,吊包前对钢水进行软吹,软吹氩气流量控制在50-60L/min,渣面不吹开,保证钢水软吹时间10-12min;软吹后静置5-8min;

(3) 连铸工艺:全程吹氩保护,避免钢水氧化,控制连铸过程增氮;采用中包覆盖剂避免钢水裸露,二冷水按照低碳合金钢配水模式,选用低碳合金保护渣;连铸二冷区采用电磁搅拌+重压下功能,电磁搅拌电流300-320A,频率8-15Hz,重压下压下量30-35mm;中间包过热度15-25℃,出结晶器的铸坯厚度为100-200mm;

(4) 加热和大压下量轧制;钢坯装进加热炉,加热温度1180-1185℃,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率 $>18\%$ ,末道次压下率 $\geq 25\%$ ,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错;

(5) 冷却;开始冷却温度控制在730-780℃,钢板进入层流冷却区域,以25-30℃/s的冷却速度冷却至330-350℃;

(6) 进行正火,控制正火温度在880℃~920℃,正火保温时间在50~60min;

(7) 进行回火,控制回火温度在660~680℃,回火保温时间在50~60min;

最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.12-0.13%、Si:0.3-0.4%、Mn:1.50-1.60%、P: $\leq 0.010\%$ 、S: $\leq 0.002\%$ 、Nb:0.03-0.04%、Ti:0.02-0.03%、Al:0.5-0.8%、Cr:0.4-0.6%、Cu:0.25-0.35%、Ni:1.1-1.2%、Mo:0.25-0.35%、Sb:0.05-0.1%、N:0.002-0.0035%、Mg:0.001-0.003%、Ca:0.001-0.005%、B:0.001-0.003%、稀土La0.001-

0.005%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质;钢板厚度25-40mm,

最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>150\text{J}$ 。

4.如权利要求1-3所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.12%、Si:0.3%、Mn:1.50%、P: $\leq 0.010\%$ 、S: $\leq 0.002\%$ 、Nb:0.03%、Ti:0.022%、Al:0.5%、Cr:0.6%、Cu:0.35%、Ni 1.2%、Mo:0.35%、Sb:0.1%、N:0.0025%、Mg:0.001%、Ca:0.003%、B:0.001%、稀土La 0.003%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质。

5.如权利要求1-3所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.13%、Si:0.4%、Mn:1.60%、P: $\leq 0.010\%$ 、S: $\leq 0.002\%$ 、Nb:0.04%、Ti:0.03%、Al:0.6%、Cr:0.55%、Cu:0.3%、Ni:1.15%、Mo:0.3%、Sb:0.05%、N:0.003%、Mg:0.003%、Ca:0.005%、B:0.003%、稀土La 0.005%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质。

6.如权利要求1-5任一项所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:钢坯装进加热炉,加热温度 $1180-1185^{\circ}\text{C}$ ,加热时间 $100-110\text{min}$ ,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为 $20-25\text{Mpa}$ ,大压下量粗轧开轧温度为 $1080^{\circ}\text{C}$ ,单道次压下率20%,末道次压下率 $\geq 25\%$ ,粗轧进行4个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度 $950^{\circ}\text{C}$ ;精轧开轧温度 $880^{\circ}\text{C}$ ,终轧温度为 $750^{\circ}\text{C}$ ,累计压下率70-80%,精轧进行8个道次,在轧制过程中形成高密度位错。

7.如权利要求1-5任一项所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:钢坯装进加热炉,加热温度 $1180-1185^{\circ}\text{C}$ ,加热时间 $100-110\text{min}$ ,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为 $20-25\text{Mpa}$ ,大压下量粗轧开轧温度为 $1110^{\circ}\text{C}$ ,单道次压下率19%,末道次压下率 $\geq 28\%$ ,粗轧进行4个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度 $980^{\circ}\text{C}$ ;精轧开轧温度 $900^{\circ}\text{C}$ ,终轧温度为 $780^{\circ}\text{C}$ ,累计压下率70-80%,精轧进行7个道次,在轧制过程中形成高密度位错。

## 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺

### 技术领域

[0001] 本发明属于钢铁材料技术领域,特别涉及一种大压下量轧制压力容器钢板及其生产工艺。

### 背景技术

[0002] 随着工业化的不断发展,压力容器的应用越来越普遍。比如压力容器设备是石油化工生产中、危化品储存的重要设备,压力容器材料对设备的运行平稳性和经济性有决定性作用。不适宜的材料选择,既会给化工企业带来不必要的支出,也极易给设备运行带来安全隐患,从而引发安全事故。另外不同的具体应用环境,对容器钢板的性能要求也有较大区别。因此,设备选材是否得当对压力容器设计非常重要。

[0003] 控轧控冷包括两阶段控制轧制和加速冷却。第一阶段在再结晶区轧制变形,变形奥氏体中累计的位错成为再结晶驱动力,奥氏体晶粒发生再结晶,细化了晶粒。第二阶段在未再结晶区轧制变形,奥氏体中累计了大量的位错密度,为连续冷却过程中的相变提供了形核驱动力和形核位置。轧制后通过加速冷却装置,过冷奥氏体发生相变,可形成铁素体、珠光体、针状铁素体、贝氏体和马氏体等一种或多种复相组织,从而获得具有不同力学性能的钢板。获得成分体系和工艺参数的最优匹配是TMCP生产高强韧厚板的核心技术。不同合金元素对钢的奥氏体再结晶、不同类型相变的影响有很大差异,造成最终组织和力学性能有明显不同。在提高钢材强度的同时获得超低温下断裂韧性优异的钢材,需要合理的利用微合金化TMCP技术,重点通过微合金化设计和轧制工艺调整细化晶粒,使钢材获得理想的组织形态,进而获得高强高韧性能。

### 发明内容

[0004] 本发明所解决的技术问题是提供一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,能够生产具有高强度、高韧性、低温冲击韧性、优良的焊接性、耐腐蚀性。为实现上述目的,本发明一方面需要控制压力容器钢板的成分,另一方面需要控制压力容器钢板的生產方法。

[0005] 技术方案如下:

[0006] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;钢板厚度25-40mm,其中大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率>18%,末道次压下率 $\geq$ 25%,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错。

[0007] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;钢板厚度25-40mm,其中大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率>18%,末道次压下率 $\geq$ 25%,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错;

[0008] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>150\text{J}$ 。

[0009] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;具体步骤如下:

[0010] (1) KR铁水预处理脱S,并控制铁水中 $S\leq 0.005\%$ ,之后进行顶底复吹转炉冶炼,铁水与废钢的质量比是8:1,先加废钢,后加铁水,转炉终点碱度为4.0-4.2;出钢温度为1600-1620 $^{\circ}\text{C}$ ;采用挡渣塞、挡渣棒双挡渣出钢;

[0011] (2) 进行RH精炼:在不吹氧的条件下抽真空进行自然脱碳,提升Ar流量800-850NL/min,进行钢水脱氢,保证深真空处理时间 $\geq 12\text{min}$ ,加入0.01-0.03kg/t的铝镁锰复合脱氧剂脱除钢水中多余的氧,然后对钢水进行合金化,吊包前对钢水进行软吹,软吹氩气流量控制在50-60L/min,渣面不吹开,保证钢水软吹时间10-12min;软吹后静置5-8min;

[0012] (3) 连铸工艺:全程吹氩保护,避免钢水氧化,控制连铸过程增氮;采用中包覆盖剂避免钢水裸露,二冷水按照低碳合金钢配水模式,选用低碳合金保护渣;连铸二冷区采用电磁搅拌+重压下功能,电磁搅拌电流300-320A,频率8-15Hz,重压下压下量30-35mm;中间包过热度15-25 $^{\circ}\text{C}$ ,出结晶器的铸坯厚度为100-200mm;

[0013] (4) 加热和大压下量轧制;钢坯装进加热炉,加热温度1180-1185 $^{\circ}\text{C}$ ,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为1080-1110 $^{\circ}\text{C}$ ,单道次压下率 $>18\%$ ,末道次压下率 $\geq 25\%$ ,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980 $^{\circ}\text{C}$ ;精轧开轧温度880-900 $^{\circ}\text{C}$ ,终轧温度为750-780 $^{\circ}\text{C}$ ,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错;

[0014] (5) 冷却;开始冷却温度控制在730-780 $^{\circ}\text{C}$ ,钢板进入层流冷却区域,以25-30 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的冷却速度冷却至330-350 $^{\circ}\text{C}$ ;

[0015] (6) 进行正火,控制正火温度在880 $^{\circ}\text{C}$ ~920 $^{\circ}\text{C}$ ,正火保温时间在50~60min;

[0016] (7) 进行回火,控制回火温度在660~680 $^{\circ}\text{C}$ ,回火保温时间在50~60min;

[0017] 最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.12-0.13%、Si:0.3-0.4%、Mn:1.50-1.60%、P: $\leq 0.010\%$ 、S: $\leq 0.002\%$ 、Nb:0.03-0.04%、Ti:0.02-0.03%、Al:0.5-0.8%、Cr:0.4-0.6%、Cu:0.25-0.35%、Ni:1.1-1.2%、Mo:0.25-0.35%、Sb:0.05-0.1%、N:0.002-0.0035%、Mg:0.001-0.003%、Ca:0.001-0.005%、B:0.001-0.003%、稀土La0.001-0.005%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质;钢板厚度25-40mm,

[0018] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>150\text{J}$ 。

[0019] 以上所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.12%、Si:0.3%、Mn:1.50%、P: $\leq 0.010\%$ 、S: $\leq 0.002\%$ 、Nb:0.03%、Ti:0.022%、Al:0.5%、Cr:0.6%、Cu:0.35%、Ni 1.2%、Mo:0.35%、Sb:0.1%、N:

0.0025%、Mg:0.001%、Ca:0.003%、B:0.001%、稀土La 0.003%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质。

[0020] 以上所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.13%、Si:0.4%、Mn:1.60%、P: $\leq$ 0.010%、S: $\leq$ 0.002%、Nb:0.04%、Ti:0.03%、Al:0.6%、Cr:0.55%、Cu:0.3%、Ni:1.15%、Mo:0.3%、Sb:0.05%、N:0.003%、Mg:0.003%、Ca:0.005%、B:0.003%、稀土La 0.005%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质。

[0021] 以上所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:钢坯装进加热炉,加热温度1180-1185℃,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为1080℃,单道次压下率20%,末道次压下率 $\geq$ 25%,粗轧进行4个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950℃;精轧开轧温度880℃,终轧温度为750℃,累计压下率70-80%,精轧进行8个道次,在轧制过程中形成高密度位错。

[0022] 以上所述大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:钢坯装进加热炉,加热温度1180-1185℃,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为1110℃,单道次压下率19%,末道次压下率 $\geq$ 28%,粗轧进行4个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度980℃;精轧开轧温度900℃,终轧温度为780℃,累计压下率70-80%,精轧进行7个道次,在轧制过程中形成高密度位错。

[0023] 大压下轧制工艺中轧制速度对钢板心部的组织和性能具有重要的影响,粗轧过程中轧制速率越低,回复和再结晶越完全,钢板心部的晶粒越细小。轧制速度高(2.0m/s)的试验钢板厚度方向上组织均匀性较差,而轧制速度低(1.7m/s)的钢板由于变形过程中轧制力渗透到心部,因而组织均匀性好,如果速度太低了,就无法确保连续轧制的生产工艺,此时相应的技术效果也实现了饱和。所以本发明采取的是轧制速度逐渐降低的工艺。

[0024] 本发明的铸造工艺推荐采用连铸工艺,连铸工艺重点控制浇铸温度,以细化原始铸态组织。为控制连铸坯中心Mn偏析,采用电磁搅拌工艺,具体是连铸二冷区采用电磁搅拌+重压下功能,电磁搅拌电流300-320A,频率8-15Hz,重压下压下量30-35mm;中间包过热度15-25℃,出结晶器的铸坯厚度为100-200mm。产品钢板厚度25-40mm,

[0025] 接着,说明本发明的化学成分的限制理由。此处,关于成分的%意味着质量%。

[0026] C是最基本的强化元素。C溶解于钢中可以形成间隙固溶体,以起到固溶强化的作用。C还可以与强碳化物的形成元素结合而生成碳化物析出,起到了沉淀强化的作用。与此同时,C还能够提高钢的淬透性。不过,对于本发明来说,含量太高的C对于钢板的延性、韧性、止裂性能和焊接性能均会产生不利影响。即C对钢的强度、低温韧性及焊接性影响很大,从改善钢的低温韧性及焊接性角度出发,希望钢中C含量控制得较低;但是从钢的强度和生产制造过程中显微组织控制角度,C含量不宜过低,过低的C含量( $<$ 0.030%)会造成奥氏体晶界迁移率过高,给晶粒细化带来很大的困难,容易形成混晶组织,造成钢低温韧性低下和超大线能量焊接热影响区低温韧性严重劣化,因此钢中C含量控制下限不宜低于0.12%。当C含量提高时,虽然有利于压力容器钢板微观组织细化,但是损害钢板的焊接性,尤其在超大线能量焊接条件下;由于热影响区(HAZ)晶粒严重粗化且焊接热循环冷却过程中的冷却速度很。因此,本发明所述的超低温钢板中的C元素的含量须控制在0.12-0.13%之间。

[0027] Si在炼钢过程中添加Si作为还原剂和脱氧剂,可以消除FeO夹杂对钢的不良影响。

Si以固溶态存在于铁素体或奥氏体中,可以提高铁素体或奥氏体的硬度和强度。可以提高这些合金的耐蚀性,使它们具有耐海水腐蚀等性能。缩小奥氏体相区。但随着硅含量的增加,会降低钢的焊接性能。Si促进钢水脱氧并能够提高钢板强度,但是采用Al脱氧的钢水, Si的脱氧作用不大, Si虽然能够提高钢板的强度,但是Si严重损害钢板的低温韧性和焊接性,尤其在超大线能量焊接条件下,因此本发明钢的Si含量设计为Si:0.3-0.4%。

[0028] Mn是重要的强韧化元素,随着Mn含量的增加,钢的强度明显增加,含1%的Mn大约可提高抗拉强度100MPa,同时,Mn稍有提高钢的耐大气腐蚀性能的效果,但Mn元素容易在钢中偏析。还具有扩大奥氏体相区、降低Ar3点温度、细化铁素体晶粒而改善钢板低温韧性的作用、促进贝氏体形成而提高钢板强度的作用;Mn在钢水凝固过程中容易发生偏析,尤其过高的Mn含量(当Mn含量)1.60%时),不仅会造成连铸操作困难,而且容易与C、P、S等元素发生偏析现象,加重连铸坯中心的偏析与疏松,严重的连铸坯中心偏析在后续的控制轧和焊接过程中易形成异常组织;同时,Mn含量过高还会形成粗大的MnS粒子,这种粗大的MnS粒子在热轧过程中沿轧向延伸,严重恶化母材钢板、焊接热影响区的冲击韧性,造成Z向性能低下、抗层状撕裂性能差;此外,过高Mn含量还会提高钢的淬硬性、提高钢中焊接冷裂纹敏感性系数(Pcm)、影响钢的焊接工艺性。因此,钢中Mn含量设定为Mn:1.50-1.60%。

[0029] P作为钢中有害夹杂对钢的机械性能,尤其低温冲击韧性和焊接性具有巨大的损害作用,理论上要求越低越好,但考虑到炼钢可操作性和炼钢成本,对于要求可大线能量焊接、-60℃韧性的厚钢板,P含量需要控制在 $\leq 0.010\%$ 。

[0030] S作为钢中有害夹杂对钢的低温韧性具有很大的损害作用,更重要的是S在钢中与Mn结合,形成MnS夹杂物,在热轧过程中,MnS的可塑性使MnS沿轧向延伸,形成沿轧向MnS夹杂物带,严重损害钢板的横向冲击韧性、Z向性能和焊接性,同时S还是热轧过程中产生热脆性的主要元素。理论上要求越低越好,但考虑到炼钢可操作性、炼钢成本和物流顺畅原则,对于要求-60℃韧性、可超大线能量焊接的厚钢板,S含量需要控制在 $\leq 0.002\%$ 。

[0031] Nb:钢中添加微量的Nb元素目的是进行未再结晶去控轧,当Nb添加量低于0.03%时,不能发挥有效的控轧效果;当Nb添加量超过0.04%时,超大线能量焊接条件下诱发上贝氏体形成,严重损害超大线能量焊接热影响区的低温韧性,同时,Nb还是一种昂贵的金属元素,添加较多的Nb也会相应地增加生产制造成本。因此Nb含量控制在0.03-0.04%之间,获得最佳的控轧效果的同时,又不损害超大线能量焊接HAZ的韧性。

[0032] 钢中加入微量的Ti目的是与钢中N结合,生成稳定性很高的TiN粒子,抑制焊接HAZ区奥氏体晶粒长大和改变二次相变产物,改善钢的焊接性和HAZ的低温韧性。钢中添加的Ti含量要与钢中的N含量匹配,匹配的原则是TiN不能在液态钢水中析出而必须在固相中析出;因此TiN的析出温度必须确保低于1400℃,当加入Ti含量过少,形成TiN粒子数量不足,不足以抑制HAZ的奥氏体晶粒长大和改变二次相变产物而改善HAZ的低温韧性;加入Ti含量过多时,TiN析出温度超过1400℃,在钢液在结晶器凝固阶段就会析出大尺寸TiN粒子,这种大尺寸TiN粒子不能抑制HAZ的奥氏体晶粒长大,反而成为裂纹萌生的起始点;因此Ti含量的最佳控制范围为Ti:0.02-0.03%。

[0033] Al是为了脱氧而加入钢中的元素。在脱氧完全后,Al降低了钢板中的O的含量,以改善钢板的时效性能。此外,添加适量的Al还有利于细化晶粒,从而改善钢材的强韧性能。本发明将Al含量进行了调整,远远高于一般钢板的Al含量(通常是 $\leq 0.1\%$ ),主要是考虑到

压力容器钢板的特定用途,比如承受高温环境的区域时,A1作为通过固溶强化使钢的高温强度增加、提高高温疲劳特性。因此Al:0.5-0.8%。

[0034] Cr是提高钢板的淬透性的重要元素之一。Cr元素可以提高腐蚀的均匀性,抑制局部腐蚀。对于厚规格的钢板来说,需要通过添加较多的Cr元素来提高钢板的淬透性以弥补厚度带来的强度损失,在提高钢板强度的同时,并改善钢板在厚度方向上的性能的均匀性。Cr还可以抑制先共析铁素体及珠光体的转变,有利于获得针状铁素体组织。一旦含量过高的Cr和Mn同时加入钢板中,就会导致低熔点的Cr-Mn复合氧化物的形成,这样会使得钢板在热加工过程中形成表面裂纹,并且还会严重恶化钢板的焊接性能。为此,本发明的技术方案中的Cr的含量应该限定在Cr:0.4-0.6%。

[0035] Cu能够适当地提高钢板的淬透性,并且Cu还可以提高钢板的抗大气腐蚀能力。然而,向钢中添加含量过高的Cu元素会恶化钢板的焊接性能;具体的,Cu在钢中以CuO形式在内锈层中富集,能很好的隔离腐蚀性介质,减轻氯离子对腐蚀的促进作用,并增大钢的极化电阻,导致锈层的保护性增强,从而提高了钢的海洋大气腐蚀性能。而且,随着Cu含量的增加,钢的耐蚀逐渐增强,但当Cu在Fe中的溶解度的限制,连铸和轧制过程中会产生铸坯裂纹、液析等缺陷,所以将本发明所述钢板中的Cu元素的含量控制为0.25-0.35%。

[0036] Ni是提高材料的低温韧性的元素。加入适量的Ni能够降低晶体的层错能,有利于位错的滑移运动,改善材料的冲击韧性,尤其能够改善特厚板中心部位的冲击韧性。Ni还可以提升Mo的淬透性效果。不过,如果Ni含量太高的话,板坯表面容易生成黏性较高的氧化铁皮,在后序的加工制造过程中难以去除,从而影响钢板的表面质量和疲劳性能。另外,当Ni含量太高时,不利于特厚钢板的焊接性能。因此,本发明所述的钢板中的Ni含量需要控制为Ni:1.1-1.2%。

[0037] Mo是提高钢板的淬透性的元素,其作用仅次于Mn元素。Mo元素可以提高腐蚀的均匀性,抑制局部腐蚀。Mo不仅能够有效地提高钢板的强度,还能够抑制先共析铁素体及珠光体的转变,以有助于钢板获得针状铁素体组织。但是,随着Mo含量的增加,钢板的屈服强度逐渐提高,而钢板的塑性却会逐渐降低。对于本发明的具有高止裂性能的钢板来说,因此Mo:0.25-0.35%。

[0038] Sb元素可以提高干湿反复环境下的耐全面腐蚀性能,并提高耐酸腐蚀性。本发明将其含量分别选择为Sb:0.05-0.1%。

[0039] N的控制范围与Ti的控制范围相对应,对于压力容器钢板,需要考虑到超大线能量焊接时候的性能,Ti/N在7-10之间最佳。N含量过低,生成TiN粒子数量少、尺寸大,不能起到改善钢的焊接性的作用,反而对焊接性有害;但是N含量过高时,钢中自由[N]增加,尤其超大线能量焊接条件下热影响区(HAZ)自由[N]含量急剧增加,严重损害HAZ低温韧性,恶化钢的焊接性。因此N:0.002-0.0035%。

[0040] 添加Mg可以生成微细弥散分布的MgO夹杂,更多的情况是与Ti共同作用,形成MgO+Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化物,在该氧化物表面容易析出MnS,从而促进晶内针状铁素体的生成,提高焊接热影响区的韧性。钢中的Mg含量为0.001-0.003%。

[0041] 对钢进行Ca处理,一方面可以进一步纯洁钢液,另一方面对钢中硫化物进行变性处理,使之变成不可变形的、稳定细小的球状硫化物、抑制S的热脆性、提高钢的低温韧性和Z向性能、改善钢板韧性的各向异性。Ca加入量过低,硫化物改性处理效果不大;Ca加入量过



高,形成Ca (O,S)尺寸过大,脆性也增大,可成为断裂裂纹起始点,降低钢的低温韧性,同时还降低钢质纯净度、污染钢液。因此Ca:0.001-0.005%。

[0042] B强烈抑制先共析铁素体形成,促进贝氏体等低温相变组织的形成,因此固溶B对于获得贝氏体等低温相变组织而提高钢板的强度至关重要。B还可以改善大线能量焊接的热影响区HAZ的低温韧性,因此B:0.001-0.003%。

[0043] RE是常见是对非金属夹杂物改性的元素,同时还能细化晶粒,提高氧化物的钉扎效果或耐层状撕裂性,提高强度和韧性。但是,即使添加小于0.001%,也没有该效果;添加超过0.005%时,成本会增加。本技术选用的稀土是La 0.001-0.005%。

[0044] 与现有技术相比,本发明技术效果包括:

[0045] 1、本发明通过精确控制产品成分、生产工艺,保证组织板坯在力学性能的均匀性,且列出了轧制道次压下制度。在具有高强度、高韧性、高焊接性能的同时具有良好的焊接性。

[0046] 2、本发明中,通过对合金元素的精确控制,避免了以增加合金数量来换取性能的提高,节约了工艺成本,提高了生产效率。

[0047] 3、本发明通过合理的化学成分设计,并采取控轧控冷工艺,最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>150\text{J}$ 。这比一些常见的压力容器钢性能优异,精确控制组织,性能稳定。

[0048] 4、本发明的冷却速度比现有同类型钢种有所提高,目的仍然是为了获得这一特定类型的微观结构组织以及其背后隐含的综合性能。比如CN102002635A中的厚规格压力容器用钢及其制备方法,粗轧总压缩比 $>50\%$ ,成品规格60-70mm,中间坯厚度为130mm,成品规格70-80mm,中间坯厚度为140mm,精轧开轧温度 $840-900^{\circ}\text{C}$ ,终冷温度为 $650-700^{\circ}\text{C}$ ,冷却速度为 $5-12^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,但是抗拉强度约600MPa;又如CN101358319A中的610MPa级高强压力容器用钢板的生产方法,轧后冷却工艺:冷却速度 $15-25^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,终冷 $600-650^{\circ}\text{C}$ ;轧后进行 $600-700^{\circ}\text{C}$ 回火,获得回火贝氏体和回火索氏体的混合组织;组织与本发明明显不一样,最终性能与本发明也存在很大差距。还比如CN101497961A中的冷却,终止冷却温度 $\leq 300^{\circ}\text{C}$ ;热处理,淬火温度 $850^{\circ}\text{C}-950^{\circ}\text{C}$ ,回火温度 $550^{\circ}\text{C}-660^{\circ}\text{C}$ ,金相组织目标:贝氏体型针状铁素体组织,最终性能与本发明也存在很大差距。

## 具体实施方式

[0049] 下面参考示例实施方式对本发明技术方案作详细说明。然而,示例实施方式能够以多种形式实施,且不应被理解为限于在此阐述的实施方式;相反,提供这些实施方式使得本发明更全面和完整,并将示例实施方式的构思全面地传达给本领域的技术人员。

[0050] 实施例1

[0051] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;具体步骤如下:

[0052] (1) KR铁水预处理脱S,并控制铁水中 $\text{S}\leq 0.005\%$ ,之后进行顶底复吹转炉冶炼,铁水与废钢的质量比是8:1,先加废钢,后加铁水,转炉终点碱度为4.0-4.2;出钢温度为 $1600-$

1620℃;采用挡渣塞、挡渣棒双挡渣出钢;

[0053] (2) 进行RH精炼:在不吹氧的条件下抽真空进行自然脱碳,提升Ar流量800-850NL/min,进行钢水脱氢,保证深真空处理时间 $\geq 12$ min,加入0.01-0.03kg/t的铝镁锰复合脱氧剂脱除钢水中多余的氧,然后对钢水进行合金化,吊包前对钢水进行软吹,软吹氩气流量控制在50-60L/min,渣面不吹开,保证钢水软吹时间10-12min;软吹后静置5-8min;

[0054] (3) 连铸工艺:全程吹氩保护,避免钢水氧化,控制连铸过程增氮;采用中包覆盖剂避免钢水裸露,二冷水按照低碳合金钢配水模式,选用低碳合金保护渣;连铸二冷区采用电磁搅拌+重压下功能,电磁搅拌电流300-320A,频率8-15Hz,重压下压下量30-35mm;中间包过热度15-25℃,出结晶器的铸坯厚度为100-200mm;

[0055] (4) 加热和大压下量轧制;钢坯装进加热炉,加热温度1180-1185℃,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率 $> 18\%$ ,末道次压下率 $\geq 25\%$ ,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错;

[0056] (5) 冷却;开始冷却温度控制在730-780℃,钢板进入层流冷却区域,以25-30℃/s的冷却速度冷却至330-350℃;

[0057] (6) 进行正火,控制正火温度在880℃~920℃,正火保温时间在50~60min;

[0058] (7) 进行回火,控制回火温度在660~680℃,回火保温时间在50~60min;

[0059] 最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.12%、Si:0.3%、Mn:1.50%、P: $\leq 0.010\%$ 、S: $\leq 0.002\%$ 、Nb:0.03%、Ti:0.022%、Al:0.5%、Cr:0.6%、Cu:0.35%、Ni 1.2%、Mo:0.35%、Sb:0.1%、N:0.0025%、Mg:0.001%、Ca:0.003%、B:0.001%、稀土La 0.003%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质;钢板厚度25-40mm,

[0060] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $> 150\text{J}$ 。

[0061] 实施例2

[0062] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,其特征在于:工艺路线包括:经冶炼、RH精炼、连铸、大压下量轧制、冷却、热处理;具体步骤如下:

[0063] (1) KR铁水预处理脱S,并控制铁水中S $\leq 0.005\%$ ,之后进行顶底复吹转炉冶炼,铁水与废钢的质量比是8:1,先加废钢,后加铁水,转炉终点碱度为4.0-4.2;出钢温度为1600-1620℃;采用挡渣塞、挡渣棒双挡渣出钢;

[0064] (2) 进行RH精炼:在不吹氧的条件下抽真空进行自然脱碳,提升Ar流量800-850NL/min,进行钢水脱氢,保证深真空处理时间 $\geq 12$ min,加入0.01-0.03kg/t的铝镁锰复合脱氧剂脱除钢水中多余的氧,然后对钢水进行合金化,吊包前对钢水进行软吹,软吹氩气流量控制在50-60L/min,渣面不吹开,保证钢水软吹时间10-12min;软吹后静置5-8min;

[0065] (3) 连铸工艺:全程吹氩保护,避免钢水氧化,控制连铸过程增氮;采用中包覆盖剂避免钢水裸露,二冷水按照低碳合金钢配水模式,选用低碳合金保护渣;连铸二冷区采用电

磁搅拌+重压下功能,电磁搅拌电流300-320A,频率8-15Hz,重压下压下量30-35mm;中间包过热度15-25℃,出结晶器的铸坯厚度为100-200mm;

[0066] (4) 加热和大压下量轧制;钢坯装进加热炉,加热温度1180-1185℃,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为1080-1110℃,单道次压下率>18%,末道次压下率 $\geq$ 25%,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度950-980℃;精轧开轧温度880-900℃,终轧温度为750-780℃,累计压下率70-80%,精轧进行6-8个道次,在轧制过程中形成高密度位错;

[0067] (5) 冷却;开始冷却温度控制在730-780℃,钢板进入层流冷却区域,以25-30℃/s的冷却速度冷却至330-350℃;

[0068] (6) 进行正火,控制正火温度在880℃~920℃,正火保温时间在50~60min;

[0069] (7) 进行回火,控制回火温度在660~680℃,回火保温时间在50~60min;

[0070] 最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.13%、Si:0.4%、Mn:1.60%、P: $\leq$ 0.010%、S: $\leq$ 0.002%、Nb:0.04%、Ti:0.03%、Al:0.6%、Cr:0.55%、Cu:0.3%、Ni:1.15%、Mo:0.3%、Sb:0.05%、N:0.003%、Mg:0.003%、Ca:0.005%、B:0.003%、稀土La 0.005%、Ti/N在7-10之间、Nb/Ti在1.2-1.6之间,其余为Fe和不可避免的杂质;钢板厚度25-40mm,

[0071] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为77-85%的铁素体、10-15%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-700MPa,抗拉强度为780-850MPa,钢板屈强比在0.78~0.82,伸长率为20-30%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量>150J。

[0072] 对比例1

[0073] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,制备方法与实施例1一致;但是最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.10%、Si:0.2%、Mn:1.0%、P: $\leq$ 0.010%、S: $\leq$ 0.002%、Nb:0.01%、Ti:0.01%、Al:0.05%、Cr:0.16%、Cu:0.15%、Ni 1.2%、Mo:0.35%、Sb:0.1%、N:0.0025%、Mg:0.001%、Ca:0.003%、B:0.001%、稀土La 0.003%、其余为Fe和不可避免的杂质;

[0074] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为70-75%的铁素体、20-25%的珠光体、1-6%的回火贝氏体、1-6%的马氏体,屈服强度为500-600MPa,抗拉强度为580-720MPa,钢板屈强比在0.83~0.86,伸长率为15-22%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量>120J。

[0075] 对比例2

[0076] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,制备方法与实施例1一致;但是最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.14%、Si:0.3%、Mn:1.20%、P: $\leq$ 0.010%、S: $\leq$ 0.002%、Nb:0.05%、Ti:0.04%、Al:0.5%、Cr:0.6%、Cu:0.35%、Ni 1.2%、Mo:0.35%、Sb:0.1%、N:0.0025%、Mg:0.001%、Ca:0.003%、B:0.001%、稀土La 0.003%,其余为Fe和不可避免的杂质;

[0077] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为72-76%的铁素体、16-22%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-680MPa,抗拉强度为720-750MPa,钢板屈强比在0.80~0.90,伸长率为10-20%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量>

130J。

[0078] 对比例3

[0079] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,制备方法与实施例1一致;但是最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.12%、Si:0.3%、Mn:1.50%、P: $\leq$ 0.010%、S: $\leq$ 0.002%、Nb:0.03%、Ti:0.03%、Al:0.5%、Cr:0.6%、Cu:0.35%、Ni 1.2%、Mo:0.35%、Sb:0.1%、N:0.0025%、Mg:0.001%、Ca:0.003%、B:0.001%、稀土La 0.003%,其余为Fe和不可避免的杂质;

[0080] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为86-90%的铁素体、7-10%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为600-680MPa,抗拉强度为720-750MPa,钢板屈强比在0.80~0.90,伸长率为10-18%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>$ 130J。

[0081] 对比例4

[0082] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,制备方法与实施例1一致;但是最终压力容器钢板成分以质量百分比计是C:0.13%、Si:0.4%、Mn:1.60%、P: $\leq$ 0.010%、S: $\leq$ 0.002%、Nb:0.03%、Ti:0.027%、Al:0.6%、Cr:0.55%、Cu:0.3%、Ni:1.15%、Mo:0.3%、Sb:0.05%、N:0.0035%、Mg:0.003%、Ca:0.005%、B:0.003%、稀土La 0.005%,其余为Fe和不可避免的杂质;

[0083] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为80-85%的铁素体、7-10%的珠光体、4-8%的回火贝氏体、3-6%的马氏体,屈服强度为630-680MPa,抗拉强度为720-770MPa,钢板屈强比在0.85~0.92,伸长率为13-19%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>$ 130J。

[0084] 对比例5

[0085] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,产品成分与实施例1一致,除制备方法中的步骤(4)不一样外,其他步骤与实施例1一致。

[0086] 步骤(4)加热和轧制;钢坯装进加热炉,加热温度 $1175^{\circ}\text{C}$ ,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为 $1060^{\circ}\text{C}$ ,单道次压下率15%,末道次压下率20%,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束温度 $930^{\circ}\text{C}$ ;精轧开轧温度 $860^{\circ}\text{C}$ ,终轧温度为 $740^{\circ}\text{C}$ ,累计压下率60-70%,精轧进行6-8个道次;

[0087] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为60-70%的铁素体、25-28%的珠光体、5-8%的回火贝氏体、5-8%的马氏体,屈服强度为550-650MPa,抗拉强度为620-720MPa,钢板屈强比在0.84~0.90,伸长率为12-20%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>$ 135J。

[0088] 对比例6

[0089] 一种大压下量轧制生产压力容器钢板的工艺,产品成分与实施例2一致,除制备方法中的步骤(4)不一样外,其他步骤与实施例2一致。

[0090] 步骤(4)加热和轧制;钢坯装进加热炉,加热温度 $1190^{\circ}\text{C}$ ,加热时间100-110min,出加热炉后进行高压水除鳞,压力为20-25Mpa,大压下量粗轧开轧温度为 $1120^{\circ}\text{C}$ ,单道次压下率15%,末道次压下率20%,粗轧进行3-5个道次,进行再结晶,细化奥氏体晶粒,粗轧结束

温度990℃;精轧开轧温度910℃,终轧温度为790℃,累计压下率60-70%,精轧进行6-8个道次;

[0091] 最终压力容器钢板的微观组织结构以体积比计为65-75%的铁素体、25-28%的珠光体、4-6%的回火贝氏体、4-6%的马氏体、残余奥氏体,屈服强度为570-660MPa,抗拉强度为640-750MPa,钢板屈强比在0.84~0.88,伸长率为15-25%, $-40^{\circ}\text{C}$ 横向V型冲击吸收能量 $>140\text{J}$ 。

[0092] 本发明所用的术语是说明和示例性、而非限制性的术语。由于本发明能够以多种形式具体实施而不脱离发明的精神或实质,所以应当理解,上述实施例不限于任何前述的细节,基于篇幅限制无法做到各个元素、各个工艺参数的单一变量试验,而应在权利要求所限定的精神和范围内广泛地解释,因此落入权利要求或其等效范围内的全部变化和改型都应为所附权利要求所涵盖。