



(12) 发明专利



(10) 授权公告号 CN 118653109 B

(45) 授权公告日 2024. 12. 03

(21) 申请号 202411118541.4

(22) 申请日 2024.08.15

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 118653109 A

(43) 申请公布日 2024.09.17

(73) 专利权人 鞍钢股份有限公司

地址 114000 辽宁省鞍山市铁西区鞍钢厂
区

(72) 发明人 徐海健 韩楚菲 纪汶伯 王小强
杨雨泽 田洪鑫

(74) 专利代理机构 鞍山嘉讯科技专利事务所
(普通合伙) 21224

专利代理师 陶新亚

(51) Int. Cl.

C22C 38/54 (2006.01)

C22C 38/50 (2006.01)

C22C 38/48 (2006.01)

C22C 38/44 (2006.01)

C22C 38/06 (2006.01)

C22C 38/04 (2006.01)

C22C 38/02 (2006.01)

C22C 33/06 (2006.01)

C21D 8/02 (2006.01)

C21D 1/18 (2006.01)

C21C 7/06 (2006.01)

C21C 7/064 (2006.01)

C21C 7/00 (2006.01)

B22D 11/115 (2006.01)

B22D 11/22 (2006.01)

B22D 11/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 102747303 A, 2012.10.24

审查员 陈帅

权利要求书2页 说明书9页

(54) 发明名称

一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟
裂纹的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法, 钢板化学成分为: C 0.14%~0.19%, Si 0.15%~0.35%, Mn 1.05%~1.45%, $P \leq 0.02\%$, $S \leq 0.005\%$, Nb 0.010%~0.040%, Ti 0.010%~0.025%, Mo 0.5%~0.8%, Als 0.02%~0.05%, Ca 0.005%~0.010%, B 0.0008%~0.0018%, Cr 0.3%~0.5%, Ni 0.3%~0.5%, 余量为Fe和杂质。钢板的生产工艺过程包括: 钢水冶炼、炉外精炼+RH真空脱气、微Ti处理、B合金化、连铸、铸坯进坑加热缓冷、铸坯再加热、控制控冷、热矫直、钢板堆垛缓冷、淬火、回火及切割。本发明有效解决了钢切割后产生延迟裂纹的问题。

1. 一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,其特征在于,包括控制钢板化学成分及控制钢板生产工艺过程;钢板的化学成分按重量百分比计包括:C 0.14%~0.19%,Si 0.15%~0.35%,Mn 1.05%~1.45%, $P \leq 0.02\%$, $S \leq 0.005\%$,Nb 0.010%~0.040%,Ti 0.010%~0.025%,Mo 0.5%~0.8%,Als 0.02%~0.05%,Ca 0.005%~0.010%,B 0.0008%~0.0018%,Cr 0.3%~0.5%,Ni 0.3%~0.5%,余量为Fe和不可避免的杂质,且杂质元素总量低于0.05%;钢板的生产工艺过程包括:钢水冶炼、炉外精炼+RH真空脱气、微Ti处理、B合金化、连铸、铸坯进坑加热缓冷、铸坯再加热、控轧控冷、热矫直、钢板堆垛缓冷、淬火、回火及切割;

所述钢板的生产工艺过程具体如下:

1) 钢水冶炼至铸坯进坑加热缓冷:

铁水预处理时控制S含量低于0.015%,转炉冶炼时控制P含量 $\leq 0.02\%$,转炉冶炼终点C含量控制在0.14%~0.19%;转炉出钢时吹氩气25~35min;LF精炼过程中,喂Si-Ca线进行炉外精炼处理;RH真空脱气保持25min以上,脱气处理结束后按照Als含量要求加入Al,并加入Ti-Fe进行微Ti处理,加入B-Fe合金进行B合金化;连铸时控制过热度为15~25℃,连铸拉坯速率为0.8~1.3m/min;连铸阶段二冷区电磁搅拌电流强度为100~150A,二次冷却比水量为1.3~2.0L/kg;在水平扇形段即凝固末端投入重压下,铸坯压下量为30~45mm;铸坯下线后进坑缓冷,进坑温度不低于600℃,缓冷温度为600~650℃,缓冷时间为48~72h,在坑内降温到150℃以下后出坑;

2) 铸坯再加热:预热段温度为900~1050℃,均热段和加热段温度均为1225~1250℃,均热段和加热段的总加热时间为4~5.5h,总在炉时间为6~8h;

3) 控制轧制及冷却:分两阶段进行轧制:粗轧开轧温度 $\geq 1120^\circ\text{C}$,粗轧终轧温度为980~1025℃;粗轧不多于6道次,至少前2个道次的压下率在15%以上;中间坯待温过程中至少喷2道次除鳞水,每道次除鳞时间1~2min,除鳞水压力15~20MPa;精轧开轧温度为860~920℃,精轧终轧温度为820~850℃;精轧不多于6道次,至少前2个道次的压下率在20%以上;精轧阶段采用慢速轧制,轧制速度为1~2m/s;热矫直的矫直温度为750~800℃,矫直力为3000~4500kN,弯辊量为1.2~1.8mm,倾动值为3.5~5.5mm;

4) 钢板堆垛缓冷:热矫直结束后立即堆垛缓冷,堆垛温度不低于400℃,缓冷时间不少于48h;

5) 淬火:淬火加热包括低温段、高温段和降温段;低温段温度为620~680℃,低温段在炉时间2.0~3.5min/mm;高温段温度为880~920℃,高温段在炉时间1.5~1.8min/mm;降温段温度为760~810℃,降温段在炉时间0.5~0.9min/mm;淬火平均冷却速度为20~45℃/s;淬火终了温度为180~250℃;

6) 回火:回火加热温度为150~180℃,回火保温时间为2.0~3.5min/mm;

7) 切割:钢板预热温度为100℃~200℃,切割在常温下进行,切割时焊接线能量控制在20kJ/cm以下,切割后用石棉布隔热毯将切割边及热影响区覆盖,缓冷到室温。

2. 根据权利要求1所述的一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,其特征在于,成品钢板为1000MPa级以上钢板。

3. 根据权利要求1所述的一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,其特征在于,成品钢板的厚度为40~80mm;铸坯厚度为250~300mm;中间坯厚度为成品钢板厚度

的2.5~3.5倍。

4.根据权利要求1所述的一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,其特征在于,所述步骤7)中,钢板预热采用火焰烧枪、电子加热垫或加热炉进行加热。

一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及钢板表面质量控制技术领域,尤其涉及一种厚度规格40~80mm的1000MPa级工程机械用低合金高强钢板防止切割后产生延迟裂纹的方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着水电、工程机械、风电建设等行业的迅猛发展,对于大厚度钢板的需求量日益增加。低合金高强度工程机械用钢因较低的合金元素含量(成本低)、高强度及高韧性(综合性能好)被广泛使用;钢板后期加工过程可采用激光切割、等离子切割、火焰切割等方法进行切割,其中激光切割、等离子切割对应的钢板厚度通常在40mm以下,因而存在一定的使用局限性;而火焰切割因成本低、易操作、切割效率高,并且可切割的钢板厚度范围大而被广泛应用。大厚度高强度工程机械用钢板经常采用火焰切割,但火焰切割后火切面易形成延迟裂纹,延迟裂纹产生前无明显征兆,扩展后会引发突发性脆性断裂,给用户造成损失的同时也可能会导致灾难性后果。火切面延迟裂纹是由于钢板切割面受切割热循环影响发生组织相变(如组织中存在偏析带及大尺寸带尖角的夹杂物),易捕获氢原子,从而引发氢脆并形成延迟裂纹。上述问题的存在严重制约了工程机械等领域的发展,而如何加以解决就成为钢铁制造企业急需考虑的事情。

[0003] 申请号为CN201510453518.5的中国发明专利公开了一种“冬季避免大厚度中高碳钢切割延迟裂纹的控制方法”,采用高C、Mn成分设计的高碳钢板经正火处理、火焰切割后进行缓冷,火焰切割后入缓冷坑消应力处理,从而减少生成马氏体组织,降低组织应力集中,避免火焰切割后出现应力延迟裂纹;但火切后的高碳钢板放入温度为300℃~350℃的缓冷坑或单体炉内,保温1.5h~2.5h后随炉冷却到100℃以下,势必会造成用户生产成本的增加。

[0004] 申请号为CN202210040898.X的中国专利申请公开了“一种防止大厚度低合金马氏体钢切割延迟裂纹的方法”,采用合理的Ti、Nb、Mo、Al和B元素的含量配比,控制大厚度钢板的淬透性及夹杂物尺寸;另外,采用二次淬火及低温回火热处理工艺,避免了延迟裂纹的形成及扩展;钢板采用火焰切割,火焰切割前对钢板进行预热,避风切割后遮盖耐火保温棉或移入保温坑内缓冷,有效避免切割后产生应力引发延迟裂纹,但其限定钢板的厚度最大为70mm,且对Ti/N比要求比较严格,另外其采用二次淬火工艺,增加了热处理生产成本。

发明内容

[0005] 本发明提供了一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,针对厚度规格为40~80mm的1000MPa级以上工程机械用高强钢板,采用优化连铸、加热、轧制,热处理及切割工艺的方法,有效解决了钢切割后产生延迟裂纹的问题,切割后的钢板放置60天以上没有产生延迟裂纹。

[0006] 为了达到上述目的,本发明采用以下技术方案实现:

[0007] 一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,包括控制钢板化学成分及

控制钢板生产工艺过程;钢板的化学成分按重量百分比计包括:C 0.14%~0.19%,Si 0.15%~0.35%,Mn 1.05%~1.45%, $P \leq 0.02\%$, $S \leq 0.005\%$,Nb 0.010%~0.040%,Ti 0.010%~0.025%,Mo 0.5%~0.8%,Als 0.02%~0.05%,Ca 0.005%~0.010%,B 0.0008%~0.0018%,Cr 0.3%~0.5%,Ni 0.3%~0.5%,余量为Fe和不可避免的杂质,且杂质元素总量低于0.05%;钢板的生产工艺过程包括:钢水冶炼、炉外精炼+RH真空脱气、微Ti处理、B合金化、连铸、铸坯进坑加热缓冷、铸坯再加热、控制控冷、热矫直、钢板堆垛缓冷、淬火、回火及切割。

[0008] 进一步的,所述钢板的生产工艺过程具体如下:

[0009] 1) 钢水冶炼至铸坯进坑加热缓冷:

[0010] 铁水预处理时控制S含量低于0.015%,转炉冶炼时控制P含量 $\leq 0.02\%$,转炉冶炼终点C含量控制在0.14%~0.19%;转炉出钢时吹氩气25~35min;LF精炼过程中,喂Si-Ca线进行炉外精炼处理;RH真空脱气保持25min以上,脱气处理结束后按照Als含量要求加入Al,并加入Ti-Fe进行微Ti处理,加入B-Fe合金进行B合金化;连铸时控制过热度为15~25℃,连铸拉坯速率为0.8~1.3m/min;连铸阶段二冷区电磁搅拌电流强度为100~150A,二次冷却比水量为1.3~2.0L/kg;在水平扇形段即凝固末端投入重压下,铸坯压下量为30~45mm;铸坯下线后进坑缓冷,进坑温度不低于600℃,缓冷温度为600~650℃,缓冷时间为48~72h,在坑内降温到150℃以下后出坑;

[0011] 2) 铸坯再加热:预热段温度为900~1050℃,均热段和加热段温度均为1225~1250℃,均热段和加热段的总加热时间为4~5.5h,总在炉时间为6~8h;

[0012] 3) 控轧控冷及热矫直:分两阶段进行轧制:粗轧开轧温度 $\geq 1120^\circ\text{C}$,粗轧终轧温度为980~1025℃;粗轧不多于6道次,至少前2个道次的压下率在15%以上;中间坯待温过程中至少喷2道次除鳞水,每道次除鳞时间1~2min,除鳞水压力15~20MPa;精轧开轧温度为860~920℃,精轧终轧温度为820~850℃;精轧不多于6道次,至少前2个道次的压下率在20%以上;精轧阶段采用慢速轧制,轧制速度为1~2m/s;热矫直的矫直温度为750~800℃,矫直力为3000~4500kN,弯辊量为1.2~1.8mm,倾动值为3.5~5.5mm;

[0013] 4) 钢板堆垛缓冷:热矫直结束后立即堆垛缓冷,堆垛温度不低于400℃,缓冷时间不少于48h;

[0014] 5) 淬火:淬火加热包括低温段、高温段和降温段;低温段温度为620~680℃,低温段在炉时间2.0~3.5min/mm;高温段温度为880~920℃,高温段在炉时间1.5~1.8min/mm;降温段温度为760~810℃,降温段在炉时间0.5~0.9min/mm;淬火平均冷却速度为20~45℃/s;淬火终了温度为180~250℃;

[0015] 6) 回火:回火加热温度为150~180℃,回火保温时间为2.0~3.5min/mm;

[0016] 7) 切割:钢板预热温度为100℃~200℃,切割在常温下进行,切割时焊接线能量控制在20kJ/cm以下,切割后用石棉布隔热毯将切割边及热影响区覆盖,缓冷到室温。

[0017] 进一步的,成品钢板为1000MPa级以上钢板。

[0018] 进一步的,成品钢板的厚度为40~80mm;铸坯厚度为250~300mm;中间坯厚度为成品钢板厚度的2.5~3.5倍。

[0019] 进一步的,所述步骤7)中,钢板预热采用火焰烧枪、电子加热垫或加热炉进行加热。

[0020] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0021] 1) 连铸前、转炉出钢时采用吹氩镇静,促进钢水中的夹杂物去除,提高钢水成分均匀性;炉外精炼过程中,喂Si-Ca线进行炉外精炼处理,能够有效降低钢液中的氧、硫含量,使硫化物及氧化物夹杂变为含钙的球状夹杂,同时减少夹杂物数量,从而达到净化钢液、提高钢材质量的目的,减少轧制时钢板的局部内应力。通过控制连铸过热度及拉坯速率,可以有效减少铸坯心部和角部的质量缺陷;通过优化二冷区电磁搅拌的电流强度以及二次冷却比水量,可降低碳偏析平均指数,从而抑制偏析;通过对二次冷却强度进行限定,抑制铸坯中心裂纹恶化的趋势。投入重压下可以有助于减小钢坯偏析,细化奥氏体晶粒,减少内部组织缺陷;铸坯进坑缓冷有助于减少铸坯中心偏析,并有效降低铸坯内部H含量。

[0022] 2) 铸坯加热时,通过控制预热段温度,保证Ti、Nb的碳化物快速充分固溶于基体中,并进行充分扩散;采用高的加热温度,同时保证均热段和加热段的在炉时间及总在炉时间,有效促进C、Mn、Mo、H等元素充分扩散,保证轧态钢板的组织均匀性。

[0023] 3) 采用两阶段控制轧制工艺,通过控制粗轧阶段终轧温度,保证中间坯待温过程处于奥氏体再结晶温度区间,保证组织均匀性,同时对两阶段轧制的压下率、中间坯厚度进行限制,保证轧后钢板厚度方向的组织均匀性;中间坯待温过程中喷除鳞水,可抑制奥氏体晶粒长大,同时在钢坯内外表面产生温度梯度,促进轧制变形向厚度中心的渗透,细化1/2厚度处的晶粒,有利于改善厚规格钢板的心部组织,降低组织不均匀产生的组织应力;采用慢速轧制提高钢板心部变形渗透量,进一步提高组织均匀性;同时优化矫直工艺参数,促进内应力充分释放。

[0024] 4) 热矫直后的钢板采用堆垛缓冷,同时对缓冷时间及温度进行限定,以加快钢板心部C、Mn、H元素扩散,抑制其偏析,减缓钢板心部组织应力差和钢板氢致裂纹的出现。

[0025] 5) 钢板淬火加热包括低温段、高温段和降温段。控制低温段温度及在炉时间,其目的是一方面继续促进钢板内H元素向外扩散,降低钢板H含量,另一方面通过长时间保温促进Nb、Ti复合碳化物大量析出,这些碳化物将为钢板内部提供大量氢陷阱。对高温段温度及在炉时间进行限定,其目的是将钢板快速加热至奥氏体化温度,为后续钢板淬火获得马氏体提供组织保障,同时预防因温度过高造成晶粒粗化以及Nb、Ti复合碳化物粗化,使钢板内部氢陷阱数量大幅下降而增加裂纹风险。对降温段温度及在炉时间进行限定,其目的是使奥氏体在降温段降低至Ar3温度以上,即保证钢板全奥氏体化状态,使淬火钢板得到充分硬化,同时钢板开始淬火的温度越低,淬火过程中钢板的应力水平越低,可以避免钢板因淬火过程出现开裂情况。同时,为了避免淬火过程中冷速过大造成钢板应力过大而出现淬火裂纹,设计淬火平均冷却速度为20~45℃/s,并限定淬火终了温度,目的是降低钢板淬火过程应力,避免出现淬火裂纹,同时保证钢板中的奥氏体充分完成马氏体转变。

[0026] 6) 对钢板进行预热切割并对焊接线能量进行限定,防止输入能量过大造成热影响区组织粗化,导致钢板冷却后因内应力过大而产生裂纹;切割后用石棉布隔热毯将切割边及热影响区覆盖,缓冷到室温,缓冷过程避免潮湿环境,严禁接触水等液体,目的是防止切割后钢板快速冷却造成组织应力而产生裂纹。

[0027] 7) 采用本发明所述工艺后,经切割后的钢板放置60天以上没有发生延迟裂纹缺陷。

具体实施方式

[0028] 本发明是一种避免低合金高强钢板切割后产生延迟裂纹的方法,所述钢板的化学成分按重量百分比计包括:C 0.14%~0.19%,Si 0.15%~0.35%,Mn 1.05%~1.45%, $P \leq 0.02\%$, $S \leq 0.005\%$,Nb 0.010%~0.040%,Ti 0.010%~0.025%,Mo 0.5%~0.8%,Als 0.02%~0.05%,Ca 0.005%~0.010%,B 0.0008%~0.0018%,Cr 0.3%~0.5%,Ni 0.3%~0.5%,余量为Fe和不可避免的杂质,杂质元素总量低于0.05%。

[0029] 钢板中各主要元素的作用如下:

[0030] C:碳是保证钢板淬透性的重要元素,也是决定碳当量的重要因素,对钢的强度、韧性、塑性及焊接性均有较大影响。碳含量过高,影响钢板焊接性能。碳含量过低,影响钢板整体强度。本发明在保证钢板所需强度的前提下,控制碳含量的范围为0.14%~0.19%。

[0031] Si:脱氧的必要元素,具有一定的固溶强化作用,含量过高会影响钢的韧性、特厚板性能均匀性及可焊接性,本发明中控制硅含量的范围为0.15%~0.35%。

[0032] Mn:钢中重要的固溶强化元素,可降低相变温度、细化组织亚结构,在强化钢板的同时改善韧性,并可提高淬透性。锰含量过高会造成偏析,对焊接及韧性不利。本发明控制锰含量范围为1.05%~1.45%。

[0033] Ni:能提高钢的低温韧性,改善塑性。对于特厚板,能够改善厚度方向1/4、1/2处的低温冲击性能,是不可缺少的合金元素;Ni还可以延迟珠光体转变,促进中温转变组织形成,降低厚规格钢板冷速限制。但镍的价格较高,综合考虑生产成本,本发明将Ni含量控制在0.3%~0.5%。

[0034] Cr:能增加钢的淬透性、细化组织,并降低韧脆转变温度;铬与锰配合使用,可提高钢的淬硬性,改善钢的力学性能;铬比锰的偏析倾向小,以铬代替部分锰,可减少钢板心部偏析,改善钢板内部质量,提高力学性能的均匀性;本发明将铬含量控制在0.3%~0.5%。

[0035] Mo:可以显著增加钢的淬透性及淬硬性,细化淬火后钢的显微组织,并提高韧性。但钼是一种贵重合金,为降低生产成本,在保证性能的前提下,可根据钢板的厚度,选择少加钼或不加钼,因此本发明控制钼含量的范围为0.50%~0.80%。

[0036] Nb:是现代微合金化钢中常用元素之一,具有良好的细晶强化与沉淀强化效果,能够延迟奥氏体再结晶,但过量的Nb会增加生产成本及连铸工艺控制难度。本发明选取Nb含量范围为0.01%~0.04%,同时配合合理的TMCP工艺,可以获得均匀的以针状铁素体组织为主的复合相,使成品钢板具有良好的韧性。

[0037] Ti:是强的固N元素,在连铸坯中以TiN形式存在。细小的TiN粒子可有效抑制连铸坯再加热时的奥氏体晶粒长大,且有助于提高Nb在奥氏体中的固溶度,改善焊接热影响区的冲击韧性。但当Ti添加量超过某一定值时,TiN颗粒就会粗化,进而提升颗粒界面与基体的应力集中水平。因此,本发明控制Ti含量范围为0.01%~0.025%。

[0038] B:是提高钢淬透性的较为有效的元素,极易在晶界偏析,可阻止碳的析出,微量的硼即可起到明显的作用。而硼含量过高时,易形成硼的碳氮化物,降低韧性并引起热脆,本发明控制其含量范围为0.0008%~0.0018%。

[0039] Ca:微量钙在钢中可以作为脱氧、去硫的净化剂,改善非金属夹杂物的形态,被广泛用于钙处理洁净钢。通过向钢中添加微量钙元素,可以在钢中形成弥散的热稳定的第二相含钙的氧化物粒子。有关研究表明,弥散分布的含钙的氧化物粒子,钉扎了焊接热循

环过程中CGHAZ的奥氏体晶界迁移,限制了奥氏体晶粒的长大,可获得较细的焊接CGHAZ晶粒度,进而改善微钙钢焊接CGHAZ的强韧度。但过高的Ca会在晶界偏聚,对钢的淬透性、冲击韧性产生不利影响,本发明控制其含量范围为0.005%~0.0010%。

[0040] Al_s:通常作为钢中脱氧剂,如果形成AlN还有细化组织的作用。当Al含量超过0.05%时,过量的氧化铝夹杂会降低钢的洁净度。Al含量过低则脱氧不充分,Ti等易氧化元素就会形成氧化物,本发明将Al含量下限设定为0.02%。

[0041] P、S:是钢中不可避免的杂质元素,过高的P、S会影响钢板的韧性和焊接性能,因此应越低越好。但出于冶炼工艺的考虑,不能无限制的低。因此,本发明将P、S含量的上限分别设定为0.02%及0.005%。

[0042] 本发明所述方法适用于厚度规格为40~80mm、强度级别在1000MPa级以上的工程机械用低合金高强钢板,钢板从钢水冶炼到切割的整个工艺流程包括钢水冶炼→炉外精炼+RH真空脱气→微Ti处理→B合金化→连铸→铸坯进坑加热缓冷→铸坯再加热→控轧控冷→热矫直→钢板堆垛缓冷→淬火→回火→钢板切割。

[0043] 本发明主要控制以下工艺过程:

[0044] 1) 钢水冶炼至铸坯进坑加热缓冷:

[0045] 原料经KR铁水预处理,控制S的含量低于0.015%,扒渣后进入转炉;转炉冶炼采用双渣法脱P,控制P含量≤0.02%,转炉冶炼终点控制C含量在0.14%~0.19%,转炉出钢时吹氩气25~35min;通过连铸前吹氩镇静能够促进钢水中的夹杂物去除,提高钢水成分均匀性。

[0046] 炉外精炼(LF精炼)过程中,通过喂Si-Ca线进行炉外精炼处理钢液,能有效降低钢液中的氧、硫含量,使硫化物、氧化物夹杂变为含钙的球状夹杂,同时减少夹杂物数量,进而达到净化钢液、提高钢材质量的目的,并减少轧制时钢板的局部内应力。RH真空脱气保持25min以上;脱气处理结束后,按照Al_s含量要求加入Al;然后加入Ti-Fe进行微钛处理,并加入B-Fe合金;合金加入时要保证加入钢水中,避免浮在渣层上。

[0047] 板坯连铸时,控制连铸过热度为15~25℃,连铸拉坯速率为0.8~1.3m/min,通过连铸过热度及连铸坯拉速的控制,可以有效减少铸坯心部和角部的质量缺陷。控制连铸阶段二冷区电磁搅拌电流强度为100~150A,二次冷却比水量为1.3~2.0L/kg,以降低碳偏析平均指数,抑制偏析,同时通过控制二次冷却强度,抑制铸坯中心裂纹恶化的趋势。在水平扇形段即凝固末端投入重压下,连铸坯压下量为30~45mm;投入重压下可以有助于减小钢坯偏析,细化奥氏体晶粒,减少内部组织缺陷。

[0048] 铸坯下线后进坑缓冷,进坑温度不低于600℃,缓冷温度600~650℃,缓冷时间48~72h,在坑内降温到150℃后出坑;铸坯进坑缓冷有助于减少铸坯中心偏析,并有效降低铸坯内部H含量。

[0049] 2) 铸坯再加热:将铸坯(厚度为250~300mm)送入步进式加热炉内进行加热,预热段温度区间为900~1050℃,目的是促使Ti、Nb的碳化物快速充分固溶于基体中,并进行充分扩散;均热段和加热段的温度均为1225~1250℃,均热段和加热段的总加热时间为4~5.5小时,总在炉时间为6~8小时;采用高的加热温度,同时保证均热段和加热段的在炉时间,提高总在炉时间,目的是有效促进C、Mn、Mo、H等元素充分扩散,保证轧态钢板组织的均匀性。

[0050] 3) 控轧控冷及热矫直:

[0051] 分两阶段轧制;第一阶段为再结晶轧制(粗轧),粗轧开轧温度 $\geq 1120^{\circ}\text{C}$,粗轧终轧温度区间为 $980 \sim 1025^{\circ}\text{C}$,粗轧不多于6道次,道次压下制度优选前2个道次的压下率在15%以上。中间坯的厚度为成品钢板厚度的2.5~3.5倍。中间坯待温过程中,喷2道次除鳞水,除鳞时间1~2min,除鳞机压力15~20MPa;目的是抑制奥氏体晶粒长大,同时在钢坯内外表面产生温度梯度,促进轧制变形向厚度中心的渗透,细化1/2厚度处的晶粒,改善厚规格钢板的心部组织,降低组织不均匀产生的组织应力。

[0052] 第二阶段为非再结晶轧制(精轧),精轧开轧温度区间 $860 \sim 920^{\circ}\text{C}$,精轧终轧温度区间为 $820 \sim 850^{\circ}\text{C}$,精轧不多于6道次,道次压下制度优选前2个道次的压下率在20%以上。精轧阶段采取慢速轧制,轧制速度1~2m/s。

[0053] 通过控制粗轧阶段终轧温度,保证中间坯待温过程中始终处于奥氏体再结晶温度区间,保证组织均匀性;通过对两阶段轧制的压下率进行限制,保证轧后钢板厚度方向的组织均匀性。

[0054] 热矫直时的矫直温度为 $750 \sim 800^{\circ}\text{C}$,矫直力在3000~4500kN之间,弯辊量设置为1.2~1.8mm,倾动值设定为3.5~5.5mm;通过优化矫直工艺参数,促进内应力充分释放。

[0055] 4) 钢板堆垛缓冷:热矫直后立即堆垛缓冷,堆垛温度不低于 400°C ,缓冷时间不少于48h;通过堆垛缓冷加快钢板心部C、Mn、H元素扩散,抑制其偏析,减缓钢板心部组织应力差和钢板氢致裂纹的出现。

[0056] 5) 淬火;

[0057] 本发明中,钢板淬火加热包括低温段、高温段和降温段。

[0058] 淬火热处理炉低温段温度为 $620 \sim 680^{\circ}\text{C}$,低温段在炉时间为2.0~3.5min/mm,其目的一方面是继续促进钢板中的H向外扩散,降低钢板H含量,另一方面是通过长时间保温促进Nb、Ti复合碳化物大量析出,这些碳化物将为钢板内部提供大量氢陷阱。考虑到温度过高会造成Nb、Ti复合碳化物粗化,造成钢板后续成型过程中因应力聚集出现裂纹,低温段保温温度不宜超过 680°C 。

[0059] 高温段温度为 $880 \sim 920^{\circ}\text{C}$,高温段在炉时间1.5~1.8min/mm,其目的是快速将钢板加热至奥氏体化温度,为后续钢板淬火获得马氏体提供组织保障;但温度过高会导致晶粒粗化,并进一步造成Nb、Ti复合碳化物粗化,使钢板内部氢陷阱数量大幅下降,从而增加裂纹风险;因此高温段的保温时间也不宜超过1.8min/mm。

[0060] 降温段温度为 $760 \sim 810^{\circ}\text{C}$,降温段在炉时间0.5~0.9min/mm,其目的是使奥氏体在降温段降低至 Ar_3 温度以上,即保证钢板全奥氏体化状态,使淬火钢板得到充分硬化;同时钢板开始淬火温度越低,淬火过程钢板应力水平越低,可避免钢板因淬火过程而出现开裂情况。

[0061] 钢板出淬火热处理炉后进入辊压式淬火机淬火,为获得充分马氏体转变,同时避免冷速过大造成钢板应力过大,出现淬火裂纹,淬火平均冷却速度为 $20 \sim 45^{\circ}\text{C/s}$;淬火终了温度为 $180 \sim 250^{\circ}\text{C}$,目的是降低钢板淬火过程应力,避免出现淬火裂纹,同时保证钢板奥氏体能充分完成马氏体转变。

[0062] 6) 回火;回火是降低淬火残余应力的主要技术手段,在保证钢板硬度前提下充分释放钢板残余应力,本发明控制回火加热温度为 $150 \sim 180^{\circ}\text{C}$,回火保温时间为2.0~3.5min/mm。

[0063] 7) 切割;钢板预热温度 $100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$,可采用火焰烧枪、电子加热垫进行,也可以使用加热炉加热;焊接在常温下进行,注意控制焊接区过热,焊接线能量在 $20\text{kJ}/\text{cm}$ 以下(控制输入能量过大,造成热影响区组织粗化,造成钢板冷却后内应力过大,产生裂纹),切割后用石棉布隔热毯将切割边及热影响区其覆盖,缓冷却到室温,缓冷过程避免潮湿环境,严禁接触水等液体(避免切割后钢板快速冷却,造成组织应力产生裂纹)。

[0064] 本发明通过优化冶炼、加热、轧制、热处理及切割工艺,最终解决了厚度规格为 $40 \sim 80\text{mm}$ 、强度级别为 1000MPa 级以上工程机械用低合金高强钢在切割后产生延迟裂纹的问题,切割后的钢板放置60天以上没有产生延迟裂纹。

[0065] 为了更加直观的体现本发明,结合实施例对本发明的实施方式进一步的说明。以下实施例仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围不限于此,任何熟悉本领域的技术人员在本发明披露的技术范围内,可显而易见地得到的技术方案,包括简单变化或等效替换,均在本发明的保护范围之内。

实施例

[0066] 表1为各实施例钢中化学成分,表2为各实施例钢的冶炼、连铸及铸坯进坑缓冷工艺参数,表3为各实施例铸坯的加热工艺参数,表4为各实施例钢板的轧制工艺参数,表5各实施例钢板热矫直及堆垛缓冷工艺参数,表6为各实施例钢板热处理工艺参数,表7为各实施例钢板切割工艺参数及表面状态。

[0067] 表1 钢中化学成分 (wt,%)

[0068]

实施例	C	Si	Mn	Mo	Als	B	Ti	Nb	Ni	Cr	Ca
1	0.17	0.16	1.21	0.56	0.033	0.0013	0.018	0.025	0.42	0.39	0.007
2	0.14	0.32	1.19	0.65	0.045	0.0008	0.021	0.034	0.39	0.44	0.008
3	0.16	0.27	1.33	0.79	0.025	0.0017	0.023	0.015	0.36	0.43	0.006
4	0.18	0.33	1.09	0.74	0.037	0.0010	0.014	0.036	0.49	0.38	0.008
5	0.17	0.23	1.43	0.62	0.047	0.0013	0.019	0.032	0.38	0.47	0.010
6	0.19	0.29	1.26	0.55	0.036	0.0009	0.017	0.026	0.32	0.37	0.005

[0069] 注:钢中杂质元素 $\text{P} \leq 0.02\%$, $\text{S} \leq 0.005\%$ 。

[0070] 表2 钢的冶炼、连铸及铸坯进坑缓冷工艺参数

[0071]

实施例	吹氩时间/min	RH真空脱气时间/min	过热温度/ $^{\circ}\text{C}$	拉速/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	电磁搅拌电流强度/A	连铸坯压下量/mm	二次冷却比水量/(L/kg)	进坑温度/ $^{\circ}\text{C}$	缓冷温度/ $^{\circ}\text{C}$	缓冷时间/h	出坑温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	28	28	17	0.9	120	36	1.6	620	630	50	130
2	25	25	23	1.3	140	33	2.0	615	640	70	150
3	26	27	25	1.2	135	39	1.4	620	635	48	145
4	32	30	21	1.0	150	45	1.8	605	645	65	110
5	30	32	24	1.1	140	35	1.9	640	650	72	120
6	33	28	20	0.8	125	38	1.7	630	640	50	130

[0072] 表3 铸坯的加热工艺参数

[0073]

实施例	铸坯厚度/mm	加热制度			
		预热温度 /℃	均热段和加热段 温度/℃	均热段+加热段 在炉时间/h	总在炉时间 /h
1	300	980	1225	4.3	7.5
2	250	1030	1235	5.0	6.3
3	300	1045	1240	5.2	6.5
4	300	920	1250	5.2	7.5
5	250	970	1225	4.6	7.3
6	300	1025	1245	4.7	7.8

[0074]

表4 钢板的轧制工艺参数

[0075]

实施 例	粗轧 开轧 温度/ ℃	粗轧 终轧 温度/ ℃	粗轧 轧制 道次	粗轧 阶段 第一 道次 压下 率/%	粗轧 阶段 第二 道次 压下 率/%	精轧 开轧 温度/ ℃	精轧 终轧 温度/ ℃	精轧 轧制 道次	精轧 阶段 第一 道次 压下 率/%	精轧 阶段 第二 道次 压下 率/%	2道次 除鳞 时间/ min	除鳞 水压 力/ MPa	中间 坯厚 度/mm	轧制 速度/ m/s
1	1130	1012	4	18	20	910	840	5	22	24	1.0、 1.6	18、20	200	1.5
2	1125	1015	5	16	18	900	820	6	22	25	1.2、 1.8	15、19	140	1.3
3	1120	1025	6	16	20	885	825	5	22	23	1.3、 2.0	16、18	180	1.6
4	1120	1005	5	16	18	880	830	5	22	23	1.2、 1.8	15、18	200	1.7
5	1135	996	4	17	19	900	840	6	22	25	1.7、 1.9	16、20	150	1.2
6	1135	985	5	18	16	890	845	5	22	25	1.2、 1.6	18、20	150	1.8

[0076]

表5 钢板热矫直及堆垛缓冷工艺参数

[0077]

实施例	热矫温度/℃	矫直力/kN	弯辊量/mm	倾动值/mm	堆垛温度/℃	堆垛时间/h
1	750	3200	1.2	3.6	500	50
2	785	4200	1.6	5.5	520	52
3	770	4500	1.7	4.8	560	50
4	780	3500	1.5	4.5	530	49
5	775	3600	1.8	3.8	525	60
6	760	4300	1.3	5.3	570	48

[0078]

表6钢板热处理工艺参数

[0079]

实施例	低温段 温度/℃	低温段 在炉时 间/min/ mm	高温段 温度/℃	高温段 在炉时 间/min/ mm	降温段 温度/℃	降温段 在炉时 间/min/ mm	平均冷 却速度/ ℃/s	淬火终 了温度/ ℃	回火温 度/℃	回火时 间/min/ mm
-----	-------------	----------------------------	-------------	----------------------------	-------------	----------------------------	--------------------	------------------	------------	---------------------

1	660	2.8	880	1.7	780	0.6	25	200	160	2.5
2	680	3.2	905	1.5	800	0.8	30	230	180	3.0
3	630	3.3	910	1.5	770	0.9	35	185	170	3.3
4	650	2.1	920	1.8	790	0.7	28	190	160	3.1
5	670	2.6	885	1.6	810	0.8	40	220	150	2.2
6	665	2.8	890	1.7	805	0.7	36	230	165	2.6

[0080] 表7 钢板切割工艺参数及切割后表面状态

[0081]

实施例	板厚/mm	预热温度/℃	焊接线能量/kJ/cm	放置天数	有无裂纹
1	60	150	18	65	无
2	40	180	15	80	无
3	70	200	19	60	无
4	80	180	16	70	无
5	45	178	18	100	无
6	50	190	17	120	无

[0082] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变,都应涵盖在本发明的保护范围之内。