

2011 钢铁共性技术协同创新中心  
工艺与装备研发平台顶层设计(三)

2011 钢铁共性技术协同创新中心由北京科技大学与东北大学两所核心协同单位,以及国内主要钢铁行业科研院所、企业等共同组建。目前,该中心已正式通过国家认定。该中心由关键共性工艺与装备研发平台和重大工程高端产品开发平台组成。其中,关键共性工艺与装备研发平台由东北大学 RAL 为主体,协同东北大学材料与冶金学院、北京科技大学、中国钢研科技集团、上海大学、武汉科技大学、宝钢、鞍钢、首钢、武钢等单位组建而成。该平台的任务是研发冶、铸、轧等工序的新工艺、新技术、新装备,实现“钢铁绿色制造”。针对工艺与装备研发平台的顶层设计内容,本报特组织相关报道,以飨读者。

## 高品质连铸坯生产工艺与装备技术

## 1 研究背景

近十年来,随着我国交通运输、能源石化、海洋工程、重型机械、核电、军工等国家重点行业与产业的快速发展,对高品质品种钢的需求量大幅增加。与此同时,受用途和使用环境特殊性的影响,对钢产品的质量、性能、尺寸规格等也提出了更高的要求。为此,对生产这些高性能品种钢的铸坯母材质量及尺寸的要求也日益提高,集中体现为铸坯表面的微缺陷化、铸坯内部的高致密度与均质化以及断面的大型化等特点。

我国钢铁工业经过数十年的快速发展,整体技术与装备水平均逐渐迈入世界先进行列。值得一提的是,经过近 20 年的引进、消化吸收与再创新,我国的连铸技术与装备水平更是获得了长足的进步,实现了超过 98% 的连铸比,是当前生产高品质品种钢铸坯母材最主要的工艺。受国家需求驱动,我国的品种钢微合金化技术和大断面连铸坯生产技术与装备更是得到了快速发展,合金体系涉及 Nb、V、Ti、B、Ni 等,已建成并投产的宽(特)厚板坯连铸机生产线超过 30 条、大方坯连铸机生产线 20 余条、 $\Phi 600\text{mm}$  以上大圆坯连铸生产线 20 多条,产能超过 1.2 亿吨,具备了生产高品质大规模品种钢的能力。正是由于品种钢微合金化技术进步以及上述宽/大断面连铸机的大规模投产及其技术进步,一定程度上缓解了我国长期以来依靠进口或使用铸锭来满足高品质品种钢轧制需求的局面。

但与此同时,品种钢连铸生产过程面临铸坯裂纹频发、内部质量不理想的困境,特别是随着连铸坯断面的大型化,铸坯缺陷所带来的负面效应尤显突出,已成为限制高品质品种钢连铸高效化生产的共性技术难题。

微合金品种钢连铸坯产生角部横裂纹具有普遍性,开发有效且稳定的裂纹控制技术一直是国内外冶金工作者研究的热点。目前,除了钢水成分控制外,主要是围绕连铸工艺与装备技术而展开,体现在以下几个方面:

1) 优化连铸坯二冷配水

工艺,使连铸坯通过铸流矫直区时避开相应钢种的第三脆性温度区。该技术是目前控制微合金品种钢连铸板坯角部横裂纹缺陷最常用的措施。其包括“热行”和“冷行”两条途径,并以“热行”路线最为普遍采用。然而,这两条途径均以降低连铸机扇形段设备使用寿命为代价(“热行”路线须大幅减少连铸机矫直段前多个冷却区的冷却水量,常引发扇形段铸辊表面保护渣与氧化铁皮烧结物的黏结而降低铸辊的使用寿命;“冷行”路线则将大幅增加铸坯矫直应力,降低扇形段铸辊轴承及轴承套的使用寿命),且无法从根本上消除连铸坯角部横裂纹产生。

2) 使用大倒角结晶器技术。使用该技术可大幅提高铸坯角部过矫直的温度,实现铸坯高塑性过矫直,从而有效控制微合金品种钢连铸坯角部裂纹产生。但该技术使用过程对连铸生产工艺稳定性要求较高,同时也面临倒角面附近区域易产生表面纵裂纹、结晶器铜板使用寿命低等问题。

3) 实施铸坯二冷足辊段与立弯段垂直区强冷却控制技术,使连铸坯表层生成一层具有较强抗裂纹能力的组织。但该技术需要在很小的控制窗口(足辊段与立弯段垂直区)内对铸坯实施较大幅度的快速降温与升温控制。一方面,该控冷工艺实施复杂,且稳定性难以把握;另一方面,目前多数连铸机的高温区冷却能力无法满足铸坯角部的降温与升温幅度。目前仅日本新日铁住金与韩国浦项等国际先进钢铁企业成功应用该技术。

因此,结合微合金品种钢凝固特点与连铸坯铸流温度演变规律,深入研究微合金品种钢连铸坯裂纹产生的本质原因,开发可实现铸坯表层组织强化、从根本上消除裂纹产生的微合金品种钢连铸坯角部横裂纹控制技术成为关键。

连铸坯中心偏析与疏松是由于铸坯凝固过程中钢液选分结晶特性和凝固收缩特性所导致的固有缺陷,严重影响最终钢产品的质量和使用寿命,制约着高端品种钢的生产。在现有技术条件下,主要依靠优化连铸坯二冷工艺并对连铸坯施

加外场作用(凝固末端压下、末端电磁搅拌),以解决铸坯内部偏析与疏松问题。这些技术对于较小断面或常规断面连铸坯生产较为有效,而对于宽(特)厚板坯、大方(圆)坯等宽/大断面连铸坯而言,其浇铸速度较低、冷却强度较弱,铸坯凝固速率大大降低,同时随着断面的增宽加厚,其内部冷却条件明显恶化,凝固组织中柱状晶发达,枝晶间富含溶质偏析元素的残余钢液流动趋于平衡,导致铸坯偏析、疏松和缩孔缺陷愈加严重。使用常规技术手段,尚无法有效实现宽/大断面连铸坯的高致密、均质化生产,具体原因主要体现在以下几个方面。

1) 由于铸坯加厚引起的变形抗力与变形量增大,铸坯增宽引起的溶质非均匀扩散与分布趋势加剧,传统的轻压下工艺已无法有效、稳定控制液芯变形,从而实现凝固末端挤压排除富集溶质的钢液和有效补偿凝固收缩的目的。

2) 近年来研究者提出了以日本住友金属 CPSS 等为代表的大压下技术,即通过增大凝固终点的压下量达到消除中心偏析与疏松、提高铸坯致密度的目的。然而,在大压下量实施过程中,两相区坯壳变形、凝固传热、溶质微观偏析、溶质宏观扩散、裂纹扩展等行为更加复杂多变,各行为之间的相互影响作用愈加突显,目前现有研究方法与传统轻压下工艺理论已难以指导压下参数设计,只能依靠反复的工业试验进行不断的优化和调试,从而严重制约压下工艺的实施效果和稳定性。

3) 连铸坯凝固末端电磁搅拌技术。该技术实施需依靠准确的搅拌工艺为基础。目前由于对大断面连铸坯凝固行为认识不充分,无法准确描述非稳定凝固条件下的铸坯两相区凝固、流动和溶质传输行为。与此同时,随着坯壳厚度的增加,目前电磁搅拌能力与搅拌模式不足以驱动钢液的流动,从而严重影响连铸坯偏析和疏松的控制效果与稳定性。

为此,针对当前钢产品结构不断升级、产品质量要求不断提高的形势,开发高致密度、均质化的宽(特)厚板坯、大断

面方(圆)坯连铸生产新工艺与装备技术显得十分重要而迫切。

东北大学朱苗勇教授及其研究团队长期围绕高品质连铸坯生产工艺与装备技术开展研究,先后承担和完成了国家杰出青年科学基金、国家科技支撑计划、国家技术创新计划以及企业重大合作开发等数十项课题,授权国家发明专利 30 余项,获省部级科技奖励 7 项。在连铸坯裂纹控制方面,研究团队通过近年的研究,揭示了产生微合金品种钢连铸坯表面裂纹的本质机理,开发形成了有效消除微合金品种钢连铸坯角部裂纹的全曲面锥度结晶器与铸坯二冷高温区表层组织控冷相结合的裂纹控制装备与工艺技术。在连铸坯偏析与疏松控制方面,研究团队自 2003 年起就从事铸坯凝固末端压下工艺与装备技术研发工作,提出了确定压下工艺关键参数的理论模型,开发了核心工艺控制模型与系统,并率先实现了板坯、大方坯凝固末端工艺控制技术的国产化研发与应用,并在宝钢梅山、攀钢、天钢、湘钢、涟钢、首钢、邢钢等十余家企业推广应用。目前,针对高品质大断面连铸坯生产,研究团队进行了铸坯凝固末端重压下技术研究与开发,并率先在大方坯连铸机实施了应用,取得了良好的应用效果。

## 2 关键共性技术内容

2.1 微合金钢连铸坯表面  
质量控制工艺与装备技术

微合金品种钢连铸坯凝固过程中,钢中的 Nb、V、Ti 以及 B 等微合金元素极易与钢中的 C、N 等元素结合,生成碳化物、氮化物以及碳氮化物。受传统连铸生产过程铸坯初凝行为及控冷工艺的限制,这些微合金碳氮化物主要以链状形式于铸坯角部表层组织晶界大量析出,从而极大弱化了其晶界的强度;与此同时,铸坯在后续凝固过程中,同样受不合理冷却模式的影响,膜状或网状先共析铁素体优先在铸坯角部奥氏体晶界生成。受奥氏体与铁素体软硬相间应力分配作用(铁素体强度仅约为奥氏体强度 1/4),铸坯在弯曲和矫直过程的应力极易在晶界铁素体组织内集中。受这些因素共同

作用,微合金品种钢的连铸坯角部频繁发生微横裂纹缺陷。基于该本质机理,要控制裂纹的产生,关键是要消除微合金碳氮化物以及先共析铁素体膜在奥氏体晶界的形成。为此,需进行如下关键技术研究。

1) 不同微合金种类及成分下碳氮化物析出行为研究。不同种类微合金元素与钢中 C、N 元素的结合能力不同,且析出物的晶界与晶内析出温度、析出种类均不尽相同。需根据钢中微合金元素的种类、钢的成分,建立不同成分体系及含量下微合金碳氮化物在不同钢组织相(奥氏体与铁素体)及位置(晶内、晶界)的析出热力学与动力学模型,明确与成分体系相对应的微合金元素碳氮化物在不同钢组织相及其不同位置的析出温度区及析出控制动力学条件。

2) 初凝坯壳角部快冷却细晶化控制技术开发。研究结晶器内初凝坯壳凝固热/力学行为,设计最佳的全曲面锥度结晶器铜板补偿量与冷却结构,并揭示不同锥度补偿量和冷却结构下坯壳角部热历程与晶粒生长规律,为开发有效实施结晶器内铸坯角部超快冷却、细化晶粒的全曲面锥度结晶器技术与工艺提供设计参数指导,确保铸坯角部一次凝固形成细小的奥氏体晶粒,并大幅降低铸坯角部温度,也减轻了铸坯二冷高温区为强化铸坯表层的组织而进行控冷的负担。同时,通过铸坯角部在初凝期的快速冷却,抑制微合金碳氮化物在其奥氏体晶界生成。

3) 铸坯二冷高温区表层组织强化控冷装备与工艺技术开发。基于全曲面锥度结晶器技术,揭示铸坯二冷足辊段与立弯段温度演变规律,开发确保铸坯角部局部快速冷却、大回温强化铸坯二冷高温区表层组织的智能控冷喷淋装置与配水工艺,实现铸坯表层组织的进一步细化。与此同时,通过铸坯高温区角部局部快速冷却,进一步抑制铸坯晶界碳氮化物与先共析铁素体膜生成,有效实现铸坯角部表层组织自身强化。



## 上接 B04 版

4) 微合金品种钢铸坯表面裂纹控制技术的工业实施。结合企业微合金品种钢成分体系、连铸机装备特点、铸坯在铸流内的温度演变规律,开发长寿命、可在线调宽、稳定化的全曲面锥度结晶器及其角部快速冷却工艺、铸坯铸流高温区角部表层组织强化的智能控冷装备与工艺,实现高品质微合金品种钢的高效化、稳定化生产。

### 2.2 高致密度、均质化宽 / 大断面连铸坯生产工艺与装备

针对宽 / 大断面连铸坯生产,采用传统动态二冷配水优化工艺、铸坯凝固末端动态轻压下技术,较难实现其高致密度、均质化生产。而解决该技术难题最为行之有效的方法是协同采用铸坯凝固末端重压下技术与铸坯凝固末端电磁搅拌技术。然而,由于难以准确描述大压下量实施过程中辊压力、热应力、矫直力、拉坯阻力等内外力共同作用下的凝固坯壳与两相区的动态变形行为,及其与溶质宏微观偏析、溶质宏观扩散、裂纹扩展之间的相互作用关系,严重制约了凝固末端重压下工艺的实施可靠性与稳定性。同时,由于暂无法准确描述非稳定凝固条件下的铸坯两相区凝固、流动和溶质传输行为,无法实现大断面连铸坯凝固末端电磁搅拌工艺的稳定投用。因此,需要从理论研究、工艺开发、装备控制技术开发等几方面开展研究工作,真正解决凝固末端重压下工艺的关键技术难点,实现该工艺的稳定、有效投用。

1) 工艺理论研究方面:建立两相区变形与溶质偏析宏观多尺度多场耦合计算模拟,实现坯壳变形、凝固传热、溶质宏观传输、溶质微观偏析与相变的顺序耦合计算。全面考虑宽 / 大断面连铸坯生产过程传热、流动和凝固现象,进而研究连铸工艺参数和外场(重压下、电磁搅拌、鼓肚力等)作用下宽 / 大断面连铸坯坯壳与两相区变形行为。与此同时,建立考虑固相演变移动、夹杂物析出与多元合金交互作用的微观组织模型,揭示宽 / 大断面连铸坯凝固组织演变机理,全面解释重压下工艺与电磁搅拌工艺对宽 / 大断面连铸坯中心偏析与疏松的改善效果,以及凝固组织的均质化控制效果。

2) 工艺控制技术开发方面:合理、有效的工艺控制技术是实施重压下工艺的关键。在理论研究的基础上,针对宽(特)厚板坯、大断面方(圆)坯连铸机的具体特点,系统研究并开发形成一系列适用于宽 / 大断面连铸坯的凝固末端重压下工艺控制技术模型,如基于扇形段 / 拉矫机压力实时反馈

的凝固末端检测技术;消除宽 / 特厚板连铸坯非均匀凝固导致横截面距窄面 1/8~1/4 区域中心偏析与疏松的宽 / 特厚板压下区间控制技术;基于凝固补缩原理与坯壳变形量在线检测的压下率 / 压下量参数在线控制技术;确保铸坯在拉坯方向与宽向上温度的平滑、合理过渡的多维动态冷却控制技术;用于有效混匀两相区溶质偏析钢液、提高等轴晶率的凝固末端电磁搅拌技术;为避免压下工艺调整过程中铸坯宽展不均而导致“楔型坯”的铸坯宽度的均匀调控工艺等。

3) 装备控制技术开发方面:稳定、准确的装备控制技术是实现凝固末端重压下工艺的保障。针对宽(特)厚板、大断面方(圆)坯连铸机的具体特点,开发以热坯作为量尺的辊缝在线标定技术,消除高温与扇形段 / 拉矫机结构变形所引起的辊缝误差,同时实现生产过程中辊缝的在线标定;开发有效控制铸坯延展变形,提高表面压下量向固液界面传递效率的“堆钢”压下控制技术,显著提高工艺实施效果;开发渐变曲率凸型辊压下技术,实现对铸坯液芯的有效挤压,在提高压下效率的同时降低铸坯表面裂纹发生率;基于全曲面锥度结晶器 / 全曲面斜倒角结晶器,降低压下过程已凝固坯壳的变形抗力,保证液芯的有效压下。

### 3 研究技术路线与实施方案

#### 3.1 微合金钢连铸坯表面裂纹控制研究

1) 利用数值模拟计算与在线测温相结合技术,研究铸坯在结晶器内与二冷铸流内的凝固热 / 力学行为,为全曲面锥度结晶器技术开发与铸坯二冷高温区表层组织强化控冷装备与工艺开发提供理论基础。

2) 建立不同类型析出物在不同钢组织相及其位置的析出热力学与动力学理论模型,并结合重熔凝固技术、透射电镜等检测手段,揭示铸坯不同冷却历程下、不同钢组织相及位置微合金碳氮化物析出行为规律,确定具体成分微合金品种钢连铸坯晶界析出控制的关键参数;基于铸坯二冷温度场演变规律,揭示连铸坯角部不同热历程与微合金碳氮化物析出行为下组织晶内与晶界的相变行为及演变规律,综合开发有效抑制晶界膜状或网状先共析铁素体生成的连铸二冷配水工艺提供依据。

3) 基于上述研究,结合现场实际工况,研究开发连铸坯表层组织控制的微合金品种钢角部横裂纹控制的全曲面锥度结晶器工艺与装备技术、铸坯二冷高温区表层组织强化控冷工艺与装备技术,集成开发从

根本上强化铸坯表层组织的微合金品种钢连铸坯角部横裂纹控制技术。

#### 3.2 宽 / 大断面连铸坯偏析疏松控制研究

受连铸坯生产过程高温特点以及凝固复杂性限制,目前尚无法定量描述铸坯凝固末端压下过程中坯壳变形对溶质偏析元素再分配行为的影响规律,限制了工艺的应用效果。对于宽(特)厚板连铸坯、大断面方(圆)坯而言,受其断面增加影响,铸坯凝固末端施加较大压下量(率)所引起的两相区的坯壳变形、钢液流动、溶质偏析和裂纹扩展等现象更为复杂,涉及现代冶金学、冶金反应工程学、材料力学、控制工程等多学科理论与研究方法,需要理论与模拟计算、高温物理模拟研究与现场试验研究紧密结合。

凝固末端重压下工艺开发方面,以数值仿真为主要研究手段,并采用试验研究和物理模拟方法对仿真结果进行校验,准确描述超大规格连铸坯凝固末端压下过程铸坯变形行为、溶质偏析行为以及内裂纹产生与扩展规律,最终开发形成宽 / 大断面连铸坯凝固末端压下工艺。物理模拟研究主要涉及铸坯高温物性参数测定,同时模拟具体条件下铸坯凝固前沿冷速、温度和受力条件,为数值仿真计算提供必要的建模数据和校验数据。最终,结合现场试验,全面验证凝固末端重压下工艺的合理性。

#### 4 阶段研究进展

在微合金品种钢连铸坯表面裂纹控制方面,现已成功开发出全曲面锥度结晶器技术、铸坯二冷高温区表层组织强化控冷装备与工艺技术。部分技术先后在天钢、宝钢梅钢、建龙钢铁等企业投入应用,稳定实现了含 Nb 与含 B 微合金品

种钢板坯表面无缺陷率达 99% 以上,效果显著。

在高致密度、均质化宽 / 大断面连铸坯生产技术方面,已开发形成宽厚板坯凝固末端非均匀压下技术,并在铸坯凝固末端重压下工艺的核心工艺与装备控制技术方面取得重要突破,顺利开发出扇形段辊缝在线标定技术、基于拉矫机压力实时反馈的凝固末端检测技术、辊缝在线标定技术、“堆钢”压下控制技术、压下率 / 压下量参数在线控制技术、非均匀凝固末端压下控制技术等重点关键技术。目前上述技术已经天钢宽厚板连铸机、大连特钢大方坯连铸机投用。所开发的宽厚板坯非均匀凝固末端压下技术在天钢投用后,有效解决了宽厚板连铸坯横向 1/4 区域偏析严重的技术难题,生产高强船板钢、合金结构钢宽厚板连铸坯中心偏析 $\leq$ C 级 1.0 比例达到 96% 以上,中心疏松 $\leq$ 1.0 级比例达到 100%。所开发的重压下技术确保了大连特钢轴承钢 GCr15、矿山钢 572C、矿山钢 LTB-6 等高碳合金钢连铸坯及轧材质量改善明显,其中轧制棒材中心疏松从 2.0~2.5 级降至 1.5 级以内。使用重压下技术前后轧材低倍质量对比照片如图 1 所示。

#### 5 研究计划

在上述原有相关技术研究与开发基础上,计划使用 4 年时间完成高品质连铸坯生产工艺与装备技术开发。

◆ 2014 年,完成全曲面锥度结晶器现场检验并开发出铸坯二冷高温区表层组织强化控冷装备与工艺技术,初步集成开发出有效控制微合金品种钢板坯角部裂纹新技术;获得重压下工艺、设备参数对铸坯变形行为的影响,开发大断面连铸方坯凝固末端重压下工艺方

案并进行初步现场试验研究。

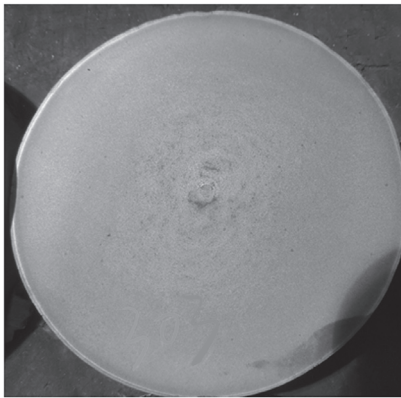
◆ 2015 年,微合金品种钢铸坯表面裂纹控制装备与工艺集成技术在 2 家以上企业得到应用,解决全曲面锥度结晶器技术实际应用所面临的多钢种和在线调宽等问题,实现企业含 Nb、B 等宽厚板坯微合金钢的角部横裂纹率 $\leq$ 1.0%,表面无清理率 $\geq$ 99.5%;进一步完善大断面方坯连铸坯末端重压下关键工艺与装备控制技术,研究形成避免宽(特)厚板、大断面方(圆)坯凝固末端压下实施过程中内裂纹形成及扩展的重压下限定准则,并在 2 家企业得到应用。

◆ 2016 年,全面推广微合金品种钢表面质量控制技术;在宽 / 特厚板生产企业应用实施宽 / 特厚板连铸坯凝固末端重压下工艺方案,实现典型品种钢连铸坯偏析和疏松的有效控制。

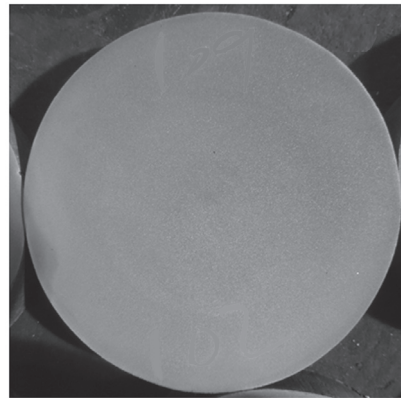
◆ 2017 年,进一步完善理论、工艺与控制技术研究体系,在国内 3 家以上企业推广大断面方坯、宽 / 特厚板坯凝固末端重压下工艺与控制技术,全面提高铸坯致密度与均质化。

#### 6 预期效果

通过上述高品质连铸坯生产工艺与装备技术开发,有望实现从根本上消除微合金品种钢连铸坯角部表面横裂纹频发现状,实现我国微合金品种钢连铸坯的表面无缺陷化生产的目标。通过铸坯凝固末端重压下技术开发,有望最终开发形成具有自主知识产权的宽 / 大断面连铸坯凝固末端重压下技术,全面实现高强工程机械用钢、高强桥梁钢、高强船板钢、高级别管线钢、新一代重轨钢与火车车轴钢等高附加值钢种的高致密度、均质化连铸坯生产,全面解决宽 / 大断面连铸坯中心偏析与疏松及内裂纹缺陷严重的共性技术难题。



(a) 传统压下



(b) 重压下

图 1 轴承钢 GCr15  $\Phi$ 110mm 轧材质量对比



東北大學  
Northeastern University



RAL