

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
(十三)

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。

钢铁材料高温粘塑性变形工艺理论及技术

1 研究背景

近年来,随着我国国民经济的快速发展,各行业对高品质钢材的需求越来越大,同时对钢铁材料的内在质量要求也越来越高。海洋、交通运输、能源和重大装备、基础零部件等领域作为钢铁材料开发与应用的发展重点,为钢铁行业发展提供新机遇的同时,也对钢材的性能提出了更高的要求。铸坯作为钢铁材料热轧的原材料,其质量控制对最终钢铁产品的质量起决定性作用,特别是综合力学性能要求严格的高品质钢铁产品的生产,对铸坯的质量要求更为苛刻。

铸态组织的中心偏析、疏松和缩孔作为板坯内部主要质量缺陷严重影响着坯料质量的提高。很多铸坯或产品中心裂纹也是源自于铸坯的中心偏析、疏松和缩孔。中心偏析、疏松和缩孔等内部质量缺陷恶化了钢材加工制造后的力学性能及工艺性能,降低了钢铁产品的耐腐蚀性和抗疲劳性,以及产品的成材率及合格率,甚至涉及产品后续使用的安全性问题。例如对于天然气输送管道,输送气体中的氢会扩散到管壁的偏析、疏松处,产生裂纹并扩展,最终导致钢管破裂。而对于海洋钻探、平台用的结构用钢铁材料,中心疏松、偏析会降低其焊接性能,导致钢铁材料不易焊接,甚至开裂,从而使材料使用寿命大大降低。对高强度船舶结构用钢,中心偏析、疏松及缩孔则降低了钢铁材料的

低温韧性和焊接性能,威胁着船舶的安全性能。

另外,广泛应用于军用和民用工程装备的大尺寸规格的钢材产品,常因铸态组织的质量问题而面临产品合格率低、成材率低及成本高等问题。因为大规格尺寸的钢材产品生产过程,一方面受到坯料尺寸、变形均匀性、变形压缩比等条件限制,另一方面还受到国内产线条件如装备、工艺方法以及矫正等后续精整设备条件限制,生产技术难度很大,生产能力受到极大限制。目前生产高级别、特别是厚度方向尺寸规格100mm以上的大型板材,普遍采用大单重钢锭、锻压坯或初轧坯料,为了控制材料内部组织疏松、偏析等缺陷,一般要求大的变形压缩比(不小于3.0)。虽然最终钢材产品内部组织致密、质量优良,但存在着整个流程能耗高、金属综合成材率低等缺点。

对于高端的基础零部件用钢材产品,通常采用大尺寸的坯料,同样存在类似的铸态坯料质量问题,如铸坯的中心偏析、疏松及缩孔等固有缺陷,严重影响最终钢铁产品的质量和使用寿命。为提高最终产品质量,在生产过程中,不得不依靠大尺寸铸坯材料,通过大的压缩变形进行开发生产,但有时仍难以稳定获得高品质的钢材产品,制约着高端品种钢的开发生产。

近年来实现工业化生产的热轧带钢ESP技术(2009年意

大利钢铁企业阿维迪与西门子公司实现世界第一套ESP无头铸轧带钢生产线工业化),将薄板坯连铸工序与热轧工序结合起来,直接生产薄规格热轧钢带(图1)。该产线充分利用铸坯的热能“趁热打铁”,板坯出连铸机后直接进入具有大压縮变形能力的粗轧机,在高温工况下实现钢铁材料的变形过程,对于板坯厚度方向组织性能将有一定的影响作用。

钢铁材料在高温状态下,钢铁材料表面与芯部温度与状态差异很大,芯部温度处于粘塑性或高温塑性状态。研究和开发钢铁材料高温/超高温粘塑性变形工艺理论及其相关技术,对改善大型铸件芯部偏析、疏松及缩孔具有显著的效果,且还可以对铸坯的组织形态进行调控,甚至实现小压缩比变形条件下的高品质热轧钢铁材料生产,这对生产高品质钢铁材料而言具有重要意义。因此,有必要对钢铁材料在高温/超高温条件下的粘塑性变形特性、组织演变机理、装备技术及自动化控制技术进行研究,这对于高品质钢铁产品生产工艺技术具有重要的理论指导及实用价值。

2 关键共性技术内容

2.1 高温/超高温粘塑性变形过程的金属流动规律及组织调控技术

钢液凝固过程中,钢液过分结晶及凝固收缩特性容易导致铸件/坯形成中心偏析及疏松、缩孔等缺陷。特别是在特

厚特大铸造件中,显著的铸造组织内部粗大柱状晶或枝晶将会影响后续的工艺性能及使用性能。因此,减轻铸坯的芯部偏析、疏松及缩孔,细化铸坯内部粗大柱状晶或枝晶,对于生产高品质钢铁材料而言至关重要。

在传统的钢铁材料热变形工艺过程中,钢铁材料的塑性成形一般都发生在1200℃以下,其变形特征主要表现为弹性和塑性。而当温度高于1200℃,钢铁材料塑性成形时,除了具有弹塑性变形特征外,粘性特征显著增加。目前,对于钢铁材料变形行为的研究,主要集中在加工温度1200℃以下,在小变形的情况下将钢铁材料视为弹塑性体,在大变形的情况下,则可忽略弹性变形,将其视为刚塑性体。为了改善铸件品质,在临近凝固终了的高温/超高温粘塑性区施加变形载荷,进行连续累积变形,由此产生高温/超高温粘塑性变形过程。而对于接近固相线温度区间内钢铁材料金属流动规律的研究鲜有涉及。为实现钢材材料的高温/超高温变形,有必要对钢铁材料的高温粘塑性金属流动规律进行研究,建立生产过程力能参数计算模型,这对开发高温/超高温粘塑性变形工艺具有重要的意义。

钢铁材料高温/超高温变形通过外在载荷施加变形力来补偿铸坯凝固过程中产生的体积收缩,同时,抑制富集溶质元素因鼓肚变形和收缩变形向铸坯中心的流动。高温/超高温条件下压下变形还可以有助于破碎铸件凝固过程中形成的柱状晶、枝晶,减少枝晶间发生的“搭桥”行为,改善中心疏松问题,为后续生产工序提供优质致密的铸件。

另外,高温变形可使高温奥氏体在变形过程中发生动态再结晶,通过再结晶获得等轴均匀奥氏体组织,而且可改善发达的铸态组织,实现铸态组织调控。钢在高温变形条件下,高温奥氏体的再结晶行为是由变形温度、变形速率与Zener-Hollomon参数(称为Z参数)的关系决定的,Z参数可表示为:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp[Q_d / (RT)]$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为变形速率; Q_d 为动态再结晶激活能; R 为气体常数; T 为绝对温度。

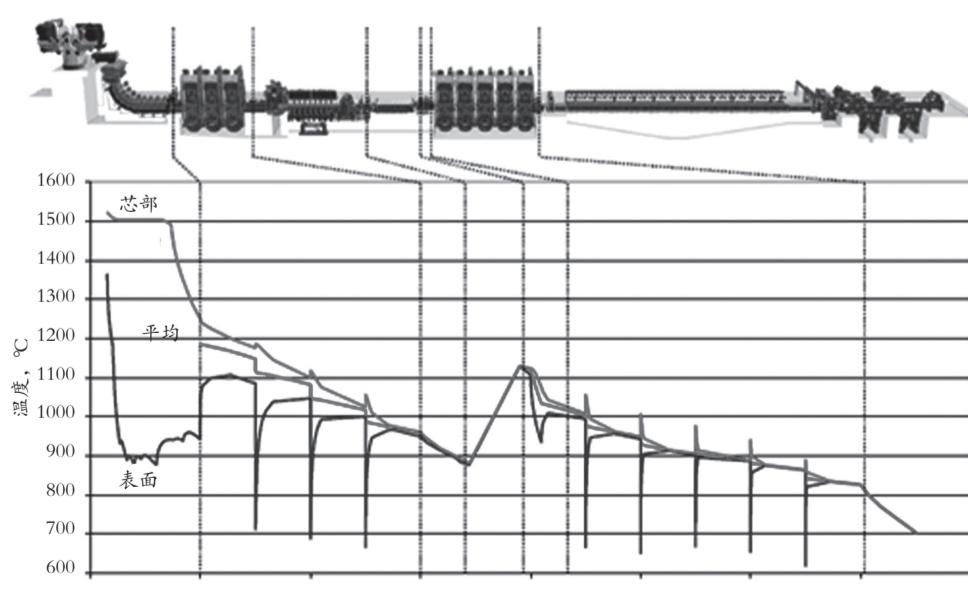
Z 为温度补偿变形速率因子,用以描述奥氏体动态再结晶能否发生,且 Z 越小,越有利于动态再结晶的发生。在变形速率一定的条件下,变形温度越高, Z 越小。因此,提高变形温度,有利于实现奥氏体的动态再结晶,甚至实现连续动态再结晶。在高温条件下,铸坯芯部温度远高于表面温度,在压缩变形时,芯部可以承受较大的变形。因此,利用芯部较高的变形温度及大变形的共同作用,可望实现芯部组织的动态再结晶,改善芯部组织。

目前,在热轧钢材的生产中普遍采用动态再结晶细化原始奥氏体组织。铸坯重新加热进行充分奥氏体化后,在1200~950℃范围内,通过连续变形实现动态再结晶。对于铸态组织条件下特别是处于粘塑性状态的高温奥氏体的动态再结晶或多次动态再结晶,不但可以改善原始铸态组织,还可细化奥氏体晶粒。若动态(或连续动态)再结晶获得的细化奥氏体组织能在铸造组织中保留下来,则为后续产品的晶粒细化提供了有利条件。

2.2 高温/超高温变形过程的温度控制技术

实现钢铁材料高温/超高温变形过程的温度精确控制是保证调控其内在组织的关键。超高温状态下,钢铁材料形成表层硬化层,芯部处于粘塑性状态。结合材料厚度方向热传导特性,在保持粘塑性状态变形的同时,实现粘塑性过程到材料刚性的精确控制,作用至关重要。温度控制的精度不仅关系到变形过程中重要关键参数的计算,同时也关系到后续组织性能的控制。

温度数学模型是进行高温/超高温变形过程控制的前提和基础。目前工业上应用的温度模型大多数都是建立在传热学基础上的,从模型形式上来看,基本上可以分为两类,一类



下转 B05 版

上接 B04 版

是简化的解析模型,这类模型形式相对简单,以求解轧件平均温度为目标;另一类是有限差分模型,有限差分模型除了可以求解轧件的平均温度外,还可以给出轧件厚度方向的温度分布。

1) 高温 / 超高温材料变形过程温度模型的建立。模型建立过程中主要考虑如下环节:铸件凝固过程与同步输送过程的辐射和对流换热;材料变形过程中温度的变化,这一过程包括因材料变形过程中与相关设备接触热传导而引起的温降,高温钢铁材料受载发生塑性变形产生的变形热而导致材料的温升;变形过程中冷却介质对材料本身温度造成的温降。

2) 高温 / 超高温条件下变形材料热物性参数的确定。变形材料热物理性能参数是温度模型的基础,主要包括比热、热传导率、导温系数和密度等物性参数。这些参数随着温度的变化而变化,其中比热和热传导率随温度变化的影响较大。导温系数可由导热系数、密度和比热计算得出。因此,在研究过程中,需对高温 / 超高温条件下材料热物性参数进行测定。

3) 变形控制系统温度的预测。在变形过程温度的精确控制时,需合理地预测变形材料内温度分布情况,提高材料变形过程中长度方向温度控制的均匀性。采用有限元等数值计算方法,模拟分析凝固过程的铸件温度场分布以及热传导过程,获得高温铸件的温度演变规律。

4) 变形过程温度控制的自学习。变形过程温度模型主要包括空冷换热模型、水冷换热模型、材料变形温升模型、材料与其他设备之间热传导温降模型等方面。温度模型自学习需要考虑上述各因素的影响,利用变形过程不同阶段材料实测温度,提高温度控制的精度与稳定性。

5) 材料变形过程特定位温度控制技术。凝固成形过程中,为便于后续工序的使用,

一定尺寸条件下对于头尾等位置需要进行特殊控制处理。由于材料变形过程头尾温度控制影响因素较多,控制难度较大,因此需要采用预控和反馈等相结合的控制策略,提高变形过程头尾温度控制精度,为变形过程材料长度方向温度控制精度提供初始条件。

2.3 高温 / 超高温粘塑性变形控制的装备技术

钢铁材料在高温变形过程中,内部组织处于完全奥氏体状态,其塑性变形具有以下优点:变形抗力小,延展性好,回弹小。然而,变形温度继续升高时,高温效应及复杂的工作条件,给超高温变形装备及配套技术的开发带来较大难题。主要体现在以下两个方面:

1) 高温条件下的特定零部件

当温度高于 1200℃,钢铁材料塑性成形时,除了具有塑性变形特征外,粘性特征也变得更为显著,即具有粘塑性变形的特征,使得铸坯尺寸控制更为复杂。超高温条件下,与变形铸坯直接接触的施加载荷部件由于热效应作用将发生膨胀,且在受力件上还存在温度梯度,进而影响装备的尺寸精度。因此,超高温粘塑性变形装备的施加载荷的部件,除了需要克服高温工况外,还需考虑抵抗热效应导致的工作件尺寸偏差问题。

2) 高响应性装备自动化控制系统

一方面,金属在高温 / 超高温条件下变形时,内部组织结构将发生复杂的变化,常常伴随有动态再结晶、动态回复及加工硬化等现象,导致变形抗力、相变潜热等发生复杂的变化;另一方面,为保证铸件的质量,在高温变形过程中,变形速率、变形量、变形温度及铸件尺寸需进行联动控制,常常需要进行预控和反馈等相结合的控制策略。因此,这就需要高温变形装备的自动化控制系统及其配套机构具有高的响应性能,方能适应铸件高温变形的控制需求。

3 技术路线及实施方案

课题研究总体技术路线如图 2 所示。该课题将研究高温

/ 超高温粘塑性变形工艺技术原理及装备技术,建立可涵盖高温 / 超高温粘塑性变形工艺技术原理、原型装备与关键技术及典型钢铁材料产品工艺技术应用在内的技术体系。该课题的主要内容包括:

1) 高温 / 超高温粘塑性变形金属流动规律的研究;

2) 高温 / 超高温变形过程铸坯质量及组织调控技术;

3) 高温 / 超高温变形过程的温度控制技术;

4) 高温 / 超高温变形装备及其控制技术;

5) 典型高品质钢铁材料产品工艺技术。

3.1 高温 / 超高温粘塑性变形金属流动规律的研究

采用实验室热模拟实验方法,建立典型钢铁材料高温变形条件下的粘塑性本构方程,确定本构方程中表征粘性性质的材料常数。以钢铁材料高温粘塑性本构方程为基础,采用有限元数值模拟方法,研究分析钢铁材料高温变形过程中的金属流动规律。在实验室条件下进行高温塑性变形实验,并与有限元数值模拟计算的结果进行对比分析。

3.2 高温 / 超高温变形过程铸坯质量及组织调控技术

研究铸件高温变形工艺下,变形温度、变形速率及变形量对铸件芯部偏析、疏松及缩孔的影响规律,用以指导、优化高温铸件变形工艺及参数,研究变形率等参数对中心偏析、疏松及缩孔等缺陷的影响控制规律。在实验室条件下,研究不同铸态组织形态的奥氏体在超高温 / 高温变形过程的变形行为,研究动态再结晶及再结晶奥氏体晶粒的长大规律,建立动态再结晶模型以及变形抗力模型,研究分析高温变形对铸态组织的调控机制。

3.3 高温 / 超高温变形过程的温度控制技术

在实验室条件下,采用高温 / 超高温变形过程的模拟实验,研究高温 / 超高温变形过程的温度演变规律,获得钢铁材料高温粘塑性状态的热物性参数。采用有限元模拟方法,结合实验室高温 / 超高温变形过程特点,分析高温钢铁材料粘塑性变形过程各维度方向的温度变化规律。根据实验室研究结果,创建高温 / 超高温变形过程温度控制模型,采用适当的控制策略,开发高温 / 超高温钢铁材料变形过程中特定

位置的高精度温度控制技术和方法。

3.4 高温 / 超高温变形装备及其控制技术

结合高温 / 超高温热变形实验,采用数值分析方法,研究高温 / 超高温变形过程中,关键部件的应力应变分布,为开发高温 / 超高温变形装备提供理论数据。开发高温 / 超高温变形过程的自动控制系统及其控制技术和方法,为开发适合高温 / 超高温条件下可实现高精度及高响应性装备提供技术储备。

3.5 典型高品质钢铁材料产品工艺技术

以开发典型的高品质板带材、棒材、线材、型材等钢铁材料为目标,基于高温 / 超高温变形工艺理论技术,研究高温 / 超高温变形工艺并配合后续热变形工艺条件下材料的组织演变行为及力学性能,研究与开发高品质热轧钢铁材料产品及工艺技术。

4 研究计划

研究拟利用 4 年周期,研究和开发集高温 / 超高温粘塑性变形工艺理论、原型装备与关键技术、典型钢铁材料产品工艺技术应用为一体的成套技术体系,具体研究计划如下。

◆ 2014 年: 1) 通过实验室热模拟实验,研究高温 / 超高温条件下,变形过程中的应力—应变关系,确定本构方程中表征粘性性质的材料常数,建立典型钢材的高温变形条件下的粘塑性本构方程; 2) 以钢铁材料高温粘塑性本构方程为基础,采用数值模拟方法分析钢铁材料高温变形过程中的金属流动规律,为高温 / 超高温变形实验奠定理论基础; 3) 结合数值模拟计算的结果,在实验室条件下进行高温 / 超高温变形实验,研究变形过程中金属流动规律。

◆ 2015 年: 1) 研究铸件

高温 / 超高温变形工艺下,变形温度、变形速率及变形量对铸件芯部偏析、疏松及缩孔的影响规律,用以指导、优化高温铸件变形工艺及参数,研究变形率等参数对中心偏析、疏松及缩孔等缺陷的影响控制规律。在实验室条件下,研究不同铸态组织形态的奥氏体在超高温 / 高温变形过程的变形行为,研究动态再结晶及再结晶奥氏体晶粒的长大规律,建立动态再结晶模型以及变形抗力模型,分析高温变形对铸态组织的调控机理; 3) 在实验室条件下,采

用高温 / 超高温变形过程的模拟实验,研究影响变形过程中高温钢铁材料的温度控制规律。

◆ 2016 年: 1) 通过变形

过程模拟实验,确立钢材热物性参数,并采用数值模拟方法,结合实验室高温 / 超高温变形过程特点,分析材料变形过程中各维度方向的温度变化规律; 2) 根据实验室研究结果,创建高温 / 超高温变形过程温度控制方法和模型,研究相关温度控制策略,开发高温 / 超高温钢铁材料变形过程的高精度控制技术; 3) 结合高温 / 超高温热变形实验,采用数值模

拟分析方法,研究高温 / 超高温变形过程关键部件的应力应变分布规律,为开发高温 / 超高温变形装备提供理论数据; 4) 设计和开发高温 / 超高温变形原型装备及技术,研究分析变形过程的自动控制系统及其控制机构响应性的影响因素,为开发高控制精度及高响应性的工业化成套装备提供技术储备。

◆ 2017 年: 基于高温 / 超

高温变形工艺理论技术,研究高温 / 超高温变形工艺并配合后续热变形工艺条件下材料的组织演变行为及力学性能,开发典型的高品质钢铁材料产品工艺应用技术。进一步完善高温 / 超高温粘塑性变形工艺技术原理及装备技术,建立涵盖高温 / 超高温粘塑性变形工艺技术原理、原型装备与关键技术及典型钢铁材料产品工艺技术应用在内的技术体系,为该技术的工业推广应用提供技术支持。

5 预期效果

通过钢铁材料高温 / 超高温粘塑性变形工艺技术理论研究,分析钢铁材料高温 / 超高温变形工艺对钢材芯部偏析、疏松、缩孔及铸态组织的调控机制,建立和完善高温 / 超高温粘塑性变形的金属流动规律和温度控制技术,研发满足工业化生产需求的原型装备及自动控制技术。建立涵盖高温 / 超高温粘塑性变形工艺原理、原型装备与关键技术及典型钢铁材料的产品工艺技术在内的成套技术体系,将对提高板、带、型、棒、线等各门类热轧钢材产品高品质生产,起到重要推动和促进作用。同时,也有望为小压缩比变形条件下实现典型热轧钢铁材料的高品质生产提供了可行性及新的工艺技术路线。

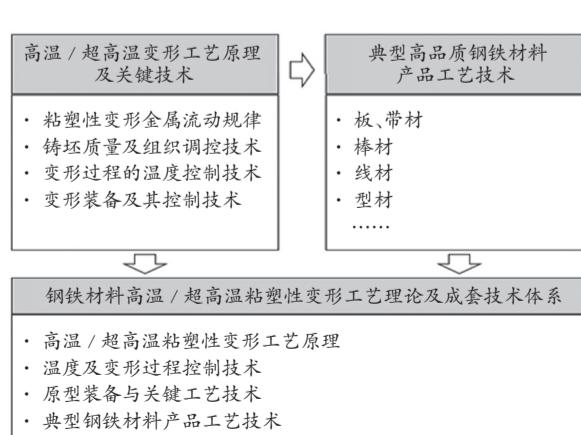


图 2 课题研究总体技术路线



RAL