

热轧板带边部缺陷形成机理及研究现状

邱洪双¹ 王晓南¹ 宁忠良²

(1. 东北大学; 2. 抚顺新钢铁有限责任公司)

摘要 对热轧板带常见的边部缺陷如边裂、边部夹层和“黑线”等进行了概述性总结,对其形成机理以及研究现状进行了介绍,并给出了有关于边部夹层和黑线的最新研究成果。利用显示动力学方法和重启方法,以现场实际轧制参数为基础,对五道次可逆立—平轧制过程进行数值模拟。对比数值模拟结果与现场实测值,误差均在允许范围之内,可以为立—平轧制的各道次提供准确的轧制参数,且为消除边部夹层和黑线提供了理论依据。同时阐述了有限元软件在热轧板带生产中的应用现状以及亟待解决的问题,对以后的课题研究具有一定的指导意义。

关键词 热轧带钢 边部缺陷 夹层 黑线 数值模拟

FORMATION MECHANISM AND RESEARCH STATUS OF HOT ROLLING STRIP EDGE DEFECT

DI Hongshuang¹ WANG Xiaonan¹ Ning Zhongliang²

(1. Northeastern University; 2. Fushun new Iron & Steel Co., Ltd)

ABSTRACT This paper gives a summary of familiar edge defects, such as edge crack defect, edge sandwich defect and seam-defect and so on. The formation mechanism and research status is introduced, and the new research results of edge sandwich defect and seam defect are given. Base on rolling parameter from factory, this paper numerically simulated the five-pass reversible vertical-horizontal rolling of different vertical roll shapes process by using explicit dynamic method and restart method. Contrasted simulation results with field test data, the error is all in the limit of tolerance. The result helps to provide exact rolling parameter and theory of edge sandwich defect and seam defects elimination. It also expatiates on application of finite element software on hot rolling strip and problems to be solved, and instructive to further study.

KEY WORDS Hot rolling strip Edge defect Edge sandwich Seam-defect Numerical simulation

0 前言

在板带材生产过程中,板带的质量问题是我们关注的主要问题,它直接影响到板带材的力学性能和工艺性能。其中,在应力集中和温度变化剧烈的板带边部,更易在轧制过程中产生各种缺陷,从而影响板带的整体质量,降低产品的成材率,进而降低了生产效益。因此,对于板带材边部缺陷问题,国内学者进行了众多的研究与讨论。热轧带钢常见的边部缺陷^[1-2]有以下几种:边裂、单边浪、边部夹层以及黑线等。缺陷的产生原因众多,可以说生产中的每一个环节都可能影响到板带的边部质量。例如,钢坯的微裂纹,对钢坯加热不均和夹杂物的不均匀分布等原因都会在轧制过程中促使边部缺陷的产生。本文总结性叙述了几种重要的板带材边部缺陷及其形成机理,并给出了现有的研究成果。东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室主要通过数值模拟的方式对研究较少的边部夹层和“黑线”缺陷的产生机理进行了研究和分析,并得出了边角部金

属在立—平轧制^[3-4]过程中的基本流动规律,为解决生产实际问题提供了基础理论。

1 热轧板带常见边部缺陷形成机理及研究现状

1.1 边裂

热轧带钢边裂缺陷是指钢板边缘沿长度方向的一侧或两侧出现破裂,其裂口处有氧化色或夹杂的缺陷,严重者钢板边部全长呈锯齿,图1为边裂缺陷。带钢边裂是热连轧过程中常出现的缺陷,其产生的原因相当复杂,国内外都进行过许多研究,不同轧机、不同材质和不同生产工艺对其产生的原因均不同。但许多研究结果均表明,热轧带钢边裂缺陷产生的主要原因是:板坯边缘存在角横裂、皮下气泡以及边部有夹杂;轧件边部温度过低或轧制张力设定过大;板坯的硫、铜含量较高,轧制时钢板的热脆性大^[5]。

刘波^[5]通过相关工艺调查分析、金相检验和跟踪试验等方法,研究了热轧带钢边裂缺陷的产生原因,主要是由于铸坯表层气泡密集,加热过程中表层

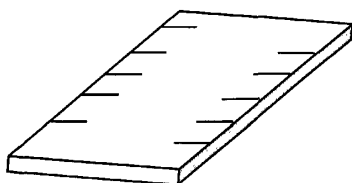
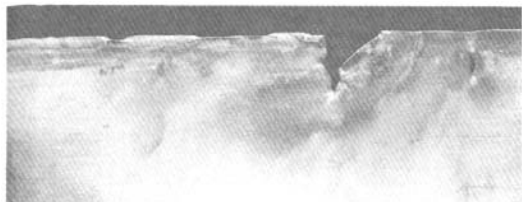


图1 边裂缺陷

金属氧化,气泡暴露以及铸坯本身存在角横裂缺陷,在轧制过程中都不能焊合而产生的。黄海玲等^[6]通过光学显微镜观察,对带钢边部裂纹产生的原因进行了分析。带钢产生边部裂纹的原因是多方面的,但主要原因是夹杂物及三次渗碳体的析出增加了钢的脆性,另外就是组织偏析、脱碳严重导致钢的整体延展性不一致,易产生边裂。这些因素并不是单独作用于带钢中,有时有几个因素同时影响导致边裂。赵琼^[7]采用低倍组织试验、化学成分分析及金相检验等方法,对出现边裂的带钢卷进行了解剖分析。结果表明:钢坯的内在缺陷、加热温度偏高及加热不均匀是产生边裂的主要原因;钢坯存在着粗大柱状晶、皮下裂纹、角裂及大量的夹杂等内在质量问题;钢坯在进加热炉之前已有微裂纹;钢坯加热温度偏高,且各处加热温度不均,造成组织异常,而引起性能下降,造成钢坯在热轧后出现边裂。魏立国等^[8]针对该宝钢分公司厚板厂投产以来 Q345B/C 钢板边部裂纹一度频繁发生的问题,对厚板边部的非连续弧形裂纹缺陷取样,进行金相分析,并对连铸板坯进行对比轧制试验,证实钢板边裂是由连铸板坯角部横向裂纹引起。分析了影响板坯角部横裂的结晶器保护渣、二冷水、结晶器、浇注速度等工艺因素。在此基础上,提出了改善板坯角部横裂的有效措施,即改进保护渣性能、优化二冷水水量分配、弱化结晶器冷却、稳定结晶器锥度和采用合适的浇注速度等。实施以上措施后,钢板边部裂纹大幅度减少。王宏霞等^[9]采用宏观检验、金相检验及扫描电镜能谱分析等方法,对出现边裂的带钢卷进行解剖分析,造成热轧板边裂缺陷的主要原因是连铸坯存在原始表面裂纹、表面针孔等缺陷。连铸坯料在加热和轧制过程中,轻微的角部裂纹在轧制时,随轧件延伸而被焊合,而较严重的角部裂纹在加热和轧制过程中,裂纹扩大并暴露于表面形成边裂,并在轧

制压力下,裂纹向纵深方向扩展。

1.2 单边浪

带钢之所以产生单边浪形是因为带钢宽度方向上各点的延伸率不同,延伸大的部位会产生浪形, l_d 、 l_c 和 l_w 分别表示轧机出口带钢宽度方向上传动侧、中部和工作侧的长度,如果 $l_d > l_c > l_w$ 则产生传动侧浪,当 $l_w > l_c > l_d$ 时产生工作侧浪^[10]。图2为单边浪缺陷。

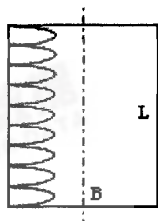


图2 单边浪缺陷

李汉俊^[11]解析了热轧带钢侧弯及单边浪板形,认为在轧制过程中,两者属于同一类的不良板形,即都是由于带钢两边纵向不均匀延伸的结果,在理论解析方法上和实际控制形式上是相同的。并根据轧制工艺参数,能够定量求出带钢侧弯时的弯曲度和单边浪时的浪延伸差。刘小龙等^[10]研究了热轧带钢轧制过程中的辊缝状态、坯料楔形、坯料宽度方向上温度不均、坯料板形不良、轧机入口导板不对中、轧辊两侧磨损不均、飞剪切头切尾不干净、轧机机座两侧刚度系数不同等导致带钢产生单边浪的原因,并对减小带钢单边浪提出了相应的控制措施和方法,一方面要制定合理的工艺制度,加强设备的点检和维护,另一个方面要提高操作人员的水平,以提高热轧带钢产品的质量。

1.3 边部夹层

边部夹层缺陷又称为分层缺陷,在粗轧的开始阶段,轧件的宽厚比较小,在轧制过程中容易出现双鼓变形,如果双鼓变形不能得到即时的纠正,随着轧制过程的进行,上下表面的双鼓形逐渐靠近,最后造成产品边部夹层,图3为双鼓变形引起的边部夹层缺陷。防止这种缺陷的措施为:第一,采用立辊轧边,及时纠正双鼓变形,可以完全避免边部夹层;第二,在没有立辊的情况下,合理安排道次压下量,也能减轻或避免双鼓形,减小出现边部夹层的可能性,或者减小夹层的宽度,通过切边切掉夹层的区域。



图3 双鼓变形引起的边部夹层缺陷

程维玮等^[12]针对带钢边部夹层缺陷进行了金相显微组织观察和扫描电镜电镜与能谱分析,确定

了边部夹层的原因是为方坯加热时间较短,初轧温度较低,其心部温度低于表层温度,这样,方坯轧制成钢带过程中,与轧辊接触的表层变形量将大于心部,从而最终在带钢非轧制面中间部位出现了凹陷、上下两边凸起的曲线。提出以下措施:严格加热工艺执行纪律,严格控制生产节奏,确保加热温度及轧件温度的均匀性,经过改进后,基本消除了该缺陷。

1.4 黑线

“黑线”是常出现在粗轧中间坯距板边缘10~20mm的区域,经过对粗轧中间坯抽样调查,发现“黑线”问题具有普遍性。并且经过随后的精轧过程,其位置基本不发生变化。该缺陷影响了成品的表面质量,降低了产品的成材率。目前国内关于带钢边部出现“黑线”的问题的相关研究比较少。东北大学国家重点实验室对该缺陷的形成做了初步的理论研究。运用大型商业有限元软件ANSYS10.0/LS-DYNA建立立一平轧制三维有限元模型,结合重启动方法和显示动力学方法^[13-14]对多道次立一平轧制过程进行模拟分析,成功的利用单道次轧制模型求解了多道次轧制问题。对“狗骨”材在随后平轧过程中的变形情况进行了分析和比较,并探索了不同立辊形状对轧件边角部金属流动的影响规律,为解决“黑线”问题提供了可靠的理论依据。通过对轧件边角部金属跟踪,发现轧件的边角部金属在轧制过程中流动到轧件的上下表面,且在相同的轧制工艺条件下,孔型立辊轧制的翻平量大于平立辊轧制的翻平量;由于边角部的金属在轧制过程中始终处于低温、高应力应变状态,并且逐渐流动到轧件上下表面,每道次新生成的边界金属同样处于相同的状态,最终有可能导致轧件边部沿长度方向产生“黑线”等缺陷,因此给定合理的立辊侧压规程,是消除“黑线”缺陷的重要手段之一。

2 数值模拟与优化的新进展

由于热带轧生产过程一个非常复杂的弹塑性大变形过程,既有材料非线性、几何非线性,又有边界接触条件非线性变化,因此其变形机理非常复杂,难以用准确的数学关系式来描述。随着板带轧制技术的日益发展,人们对其在成型过程中的变形规律、变形力学的分析越来越重视。有限元技术随着大型有限元模拟软件的日益成熟和完善,已成为一种被广泛应用于板带轧制过程的有效数值计算方法^[15]。

利用有限元技术对多道次轧制过程进行数值模拟已被广泛的应用,目前主要有以下几种分析方式。第一种是直接建立多道次连轧模型进行模拟^[16],该方法的优点是反映了整个连轧过程板带变形的情况,

能够很好的分析轧件头尾形状,缺点是单元的数目多,从而造成计算时间长,且不能很好的反映轧件性能参数随温度变化的特性。第二种是针对每道次分别建立轧制模型进行模拟^[17],该方法的优点是单元数量少,计算时间短,能很好的反映各道次的材料模型以及计算轧制力、前滑等轧制过程参数,缺点是不能很好的反映整个轧制过程的连续性。此外,除第一道次,后面所有道次都忽略了前一道次板带的宽展、弹性回复以及残余应力等因素对该道次的影响,以至不能得到较准确的轧件头尾形状等。第三种是通过几何模型更新方法和有限元方法^[13]分析了多道次轧制过程中轧件的变形行为,它根据前一次分析的位移结果进行有限元模型几何更新,在变形了的外形基础上建立一个修订的几何模型。这种方法作用于所有的节点或被选择的节点,但是它并不对实体模型进行更新。目前,在以上方法的基础上,东北大学国家重点实验室将ANSYS/LS-DYNA中的重启动方法^[18]和显示动力学相结合成功的分析了多道次立一平轧制过程,充分的考虑了前一道次的应力应变对后一道次的影响,既可兼顾头尾轧件形状,同时更好的控制了轧制参数。相对于几何模型方法来说,此方法更有利于分析实际生产情况,为实现板坯多道次可逆轧制分析提供了新方法,并且为研究边部夹层、黑线等缺陷的理论研究提供了重要手段。在相同的轧制工艺条件和有限元网格划分条件下,分别对平立辊和孔型立辊5道次立一平轧制过程进行了数值模拟,以下为初步研究成果介绍。

2.1 立辊轧制对边部夹层影响

不同道次平轧后板坯中部横断面形状及网格变化如图4所示:

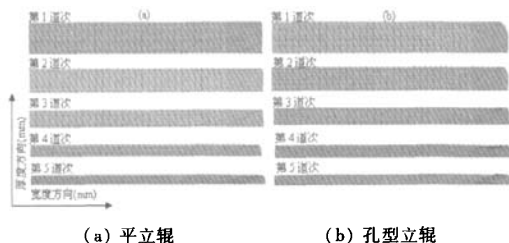


图4 不同道次平轧后板坯中部横断面形状及网格变化趋势

图4(a)为经过平立辊侧压及平轧后的板坯中部横断面形状及网格变化,图4(b)为经过孔型立辊侧压及平轧后的板坯中部横断面形状及网格变化。宽展是轧件受到压下后,金属横向流动的结果。经过综合分析,影响宽展诸因素可以归纳为两个方面:一为几何尺寸的影响,二为摩擦因数的影响。根据

轧件端面形状参数 l/h (接触弧长与平均厚度之比) 的不同, 可以分为薄件、厚件和中等厚度轧件三种情况, 塔尔诺夫斯基建议是: 厚件为 $l/h < 0.8$; 中等厚度轧件 $0.8 < l/h < 1.5$; 薄件 $l/h > 1.5$ 。

平轧后分别对各道次计算, 得到形状参数 l/h 值为 1.06、1.43、1.935、2.853、3.37, 即前两道次属于中等厚件的变形, 而后三道次属于薄件的变形。厚件的变形主要受到轧件变形区外端刚性区的影响, 由于表面变形难以深入到轧件中部, 故易出现双鼓变形, 如图 4(a) 中前两道次的横断面形状图。而薄件的变形主要受到表面摩擦的影响, 一般为单鼓形, 如图 4(a) 的后三道次横断面形状图。双鼓变形对轧制过程会产生不利的影响, 在轧制过程中, 如果双鼓变形不能得到及时的纠正, 随着轧制过程的进行, 上下表面的双鼓形逐渐靠近, 最终将造成产品边部夹层缺陷。但是由图 4(a) 中第三道次的鼓形变化可以看出, 立辊的侧压可以对第二道次产生的双鼓变形进行纠正, 有效的避免边部夹层。在图 4(b) 中, 从第 1 道次到第 5 道次轧件的横断面均呈现单鼓形, 出现这种差别的原因是由于在孔型辊立轧过程中, 狗骨峰的位置向宽展中心移动, 狗骨变形的峰值厚度减小, 从而在后续平轧时使得轧件边角部处狗骨的纵向压下减小, 金属横向流动较均匀, 因此使得表面宽度回展量减小不易产生双鼓形。因此, 立辊轧制可以有效的纠正双鼓变形, 在相同的轧制工艺条件下, 孔型立辊轧制较平立辊轧制能够更好的抑制边部夹层缺陷的产生。

2.2 “黑线”形成机理研究

图 5(a) 为平立辊轧制的边角部金属流动规律, 图 5(b) 为孔型立辊轧制的边角部金属流动规律。节点 a 为轧件上表面与侧表面交线上的节点, b、c 和 d 为轧件侧表面上的节点, 图 5(a) 中节点 a、b、c 和 d 距轧件上表面距离分别为 0、5.9617mm、11.9234mm 和 48.6931mm。图 5(b) 节点 e、f、g 和 h 距轧件上表面距离分别为 0、5.9617mm、29.8083mm 和 41.7319mm。由图 5(a) 中节点 a 在曲线上的位置变化可以看出, 经第 1 和第 3 道次立轧之后点 a 均保留在轧件的侧表面上, 而在随后的平轧过程中逐渐翻平到轧件的上表面, 并且逐渐向板坯的宽度中心面移动; 而节点 b 在立轧之后均保留在轧件的侧表面上, 但是节点 b 在第 3 道次平轧之后翻平到轧件的边角部, 即形成新的边界, 之后的流动情况与节点 a 相似; 节点 c 在前几道次始终保持在轧件的侧表面上, 当经过最后第 5 道次平轧之后节点 c 翻平到轧件上表面与侧表面的交线处, 即节点 c 形成

最终的边界; 而节点 d 则始终在轧件的侧表面上, 并没有流动到轧件的上表面。即节点 c 为是否发生翻平现象的分界点。由图 5(b) 中节点 e 在曲线上的位置变化可以看出, 除了第 1 道次的立轧以外, 始终保留在轧件的上表面上, 且相对位置变化并不大; 而节点 f 在第 2 道次的平轧后移动到轧件上表面和侧表面的交线处, 形成新的边界点, 随着轧制过程的进行, 逐渐向板坯宽度中心移动; 节点 g 在前几道次始终保持在轧件的侧表面上, 当经过最后第 5 道次平轧之后节点 g 翻平到轧件上表面与侧表面的交线处, 形成最终的边界节点; 而节点 h 则始终在轧件的侧表面上, 并没有流动到轧件的上表面。即节点 g 为是否发生翻平现象的分界点。

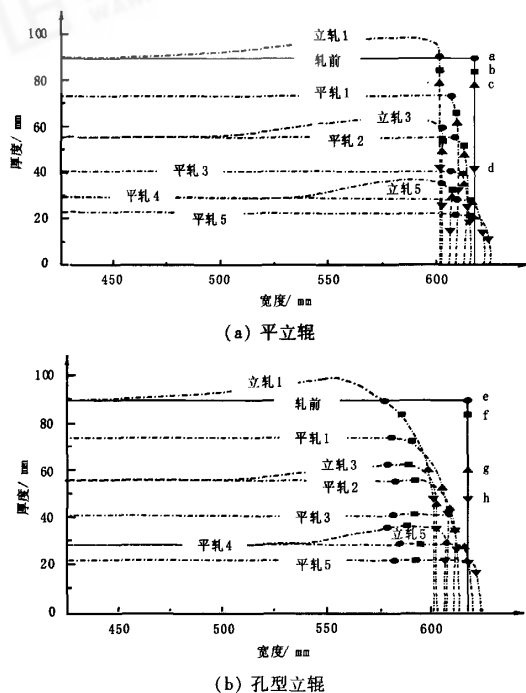


图 5 边角部金属流动规律

对比分析图 5(a) 和图 5(b), 在轧制过程中, 轧件边角部的金属逐渐翻平到轧件的上下表面, 且在相同的轧制工艺条件下, 孔型立辊轧制的翻平量要大于平立辊轧制的翻平量。初步分析翻平现象的形成机理: 翻平现象的发生条件是轧件侧表面的减少量大于轧辊与轧件接触面积的增加量。金属翻平量的大小取决于接触条件和轧件的几何尺寸。据文献报道^[19], 板坯的边角部在轧制过程中始终处于低温和高应力应变状态, 对于图 5 中的八个节点, 它们的接触摩擦条件是相同的, 由图中节点的位置变化可以得出, 平轧道次中轧件发生宽展和翻平, 轧辊对轧件向内的摩擦力造成角部

(下转第 27 页)

月。洗萘工艺改造完成后,在确保煤气的冷却效果和安全输送条件下,实现了冷凝液流程畅通,操作控制简单方便,降低了电耗和煤气的无组织放散。特别是在 2007 年 6 月 8[#] 6m 焦炉也投产后,横管初冷器满负荷运行的情况下,没有因阻力过大而停用处理过,阻力保持小于 1000Pa,器后煤气集合温度 21℃~23℃,综合经济效益可观。

4 结论

1) 横管初冷器萘析出是绝对的,不堵塞是相对的。初冷器的清扫是不可或缺的手段,但清扫方法

要恰当,要避免萘及其同系物的恶性循环。

2) 喷洒管上喷洒孔孔径的扩大是必要的;在喷洒管上增设单独控制阀、增设蒸汽清扫支管是必须的。

3) 焦油氨水分离槽自动连续排焦油是基础,调节好相界面乳浊液中的焦油比例是洗萘系统高效运行的关键。

5 参考文献

(上接第 4 页)

金属受到强烈的拉应力作用并最终流动到轧件上表面,因此越靠近轧件上表面的节点越容易发生翻平现象,随着平轧过程的进行,新生成的边界推动着原始的边界向板坯宽度中心移动,而同时强烈的拉应力状态有可能诱发各种缺陷的产生;而立轧过程宏观上抵消了部分的宽展变形,使得轧件的尺寸得到控制,微观上使得角部金属处于压应力状态,避免了角部金属在轧制过程中一直处于不利的拉应力状态和由此产生的“黑线”缺陷,即立轧具有一定的修复微小缺陷的作用,从而改善和提高了带钢的边部质量。

3 结语

随着现代钢铁工业的快速发展,要求在节能节材的前提下开发出高性能材料的制备技术来满足国民经济发展的需求。目前,关于热轧带钢边部缺陷的研究角度主要是集中在宏观检验、金相检验及扫描电镜能谱分析等方法上,着重从立辊调宽工艺设定上的研究较少,深入研究该领域关键性的基础理论问题具有重要的理论和实际意义。随着计算机软硬件技术以及有限元计算技术的发展,有限元法在板带轧制的二维问题解决方面的应用已较成熟。但在三维变形的有限元模拟方面,其应用还不成熟,尤其是网格生成与重划分方面,是未来的主要研究方向。

4 参考文献

- [1] Esa Ervasti, Ulf Sta? hlberg. Behaviour of longitudinal surface cracks in the hot rolling of steel slabs[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94: 141-150.
- [2] D. C. Koa, S. H. Leeb, D. H. Kimc, et al. Design of sizing press anvil for decrease of defect in hot strip[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 738-742.
- [3] Xiong Shangwu, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins. Three-dimensional modelling of the vertical-horizontal rolling process[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2003, 39: 1023-1037.
- [4] Xiong Shangwu, Liu Xianghua, Wang Guodong, et al. Three-dimensional thermo-mechanical finite element simulation of the vertical-horizontal rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 11: 89-97.

- [1] 李海桥,邵有辉,何勳德,等. 横管初冷器喷洒系统的改造经验. 燃料与化工. 2003, 34(4): 198-199.

- [5] 刘波. 热轧带钢边部缺陷的成因研究[J]. 四川冶金, 2006, 28(2): 16-20.
- [6] 黄海玲, 崇鹏. 带钢边部裂纹原因分析[J]. 研究与探讨, 2007(3): 3-4.
- [7] 赵琼. 热轧带钢边部原因分析[J]. 理化检验-物理分册, 2004, 40(12): 629-632.
- [8] 魏立国, 朱岩, 徐国栋, 等. 宝钢厚板边部裂纹成因分析和改善[J]. 宝钢技术, 2006(6): 47-50.
- [9] 王宏霞, 王俊海. 热轧钢带边部原因分析[J]. 山东冶金, 2007, 29(3): 70-71.
- [10] 刘小龙, 褚俊威. 热轧带钢单边浪控制与调整[J]. 梅山科技, 2008(1): 13-17.
- [11] 李汉俊. 热轧带钢侧弯及单边浪板形的分析与控制[J]. 钢铁研究, 1993(4): 11-16.
- [12] 程维伟, 赵如意. 带钢窄边线状裂纹缺陷的形成原因及预防措施[J]. 南钢科技与管理, 2006(4): 6-8.
- [13] Yu Hai-liang, Liu Xiang-hua, Zhao Xian-ming, et al. FEM analysis for V-H rolling process by updating geometric method[J]. Mater Process Technol, 2006, 180(1-3): 323-327.
- [14] 喻海良, 刘相华, 李长生. 多道次立-平辊轧制轧件角部金属流动状态有限元模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(10): 982-985.
- [15] 冯桂超. 热轧粗轧过程金属变形规律的有限元模拟研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [16] Zhu Guo-ming, Wu Di, Zhao Xian-ming. Four pass cogging simulation of H beam by FEM[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2002, 3: 226-228.
- [17] Li Xue-tong, Wang Min-ting, Du Feng-shan, et al. FEM simulation of temperature field in roughing trains of hot strip rolling[J]. Steel Rolling, 2003, 20(5): 7-9.
- [18] Li Yu-chun, Shi Dang-yong, Zhao Yuan. Basic theory and engineering practice of ANSYS10.0/LS-DYNA[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006. 353-354.
- [19] 章传国, 韩静涛, 刘靖, 等. 立辊调宽热轧粗轧过程三维有限元模拟[J]. 塑性工程学报, 2005, 13(1): 74-77.