

推/张力轧制不锈钢/碳钢复合钢筋的有限元模拟与实验研究

高亚男¹ 张艳菊¹ 郝瑞朝² 肖宏³ 张高悦¹

(河北钢铁集团承钢公司 1 设备部; 2 维检中心, 承德 067002;

3 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 秦皇岛 066004)

摘要 为了研究推/张力(0~15 MPa)对不锈钢(Cr18Ni8, 2 mm 壁厚管)/碳钢(0.06%~0.12% C, Φ 16 mm, 圆棒)复合钢筋轧制过程的影响,应用有限元软件 Msc. Marc 建立了复合钢筋轧制过程的有限元模型。通过模拟考察了推/张力对不锈钢/碳钢复合钢筋的宽展变形,结合面的接触应力和不锈钢圆周壁厚的影响,重点通过实验考察了推力轧制对两金属结合强度的影响。结果表明,施加张力后轧件宽展量减小,而施加推力后其值增加;不锈钢壳与碳钢芯间的接触应力随推力的增加、张力的降低而增大。推力轧制有利于两金属的复合,可以提高复合不锈钢和碳钢芯的结合强度。

关键词 奥氏体不锈钢 碳钢 复合钢筋 推力轧制 张力轧制

Finite Element Simulation and Experimental Study on Stainless Steel/Low Carbon Steel Clad Rebar by Thrust/Tension Rolling

Gao Ya'nan¹, Zhang Yanju¹, Hao Ruichao², Xiao Hong³ and Zhang Gaoyue¹

(1 Equipment Management Department, 2 Maintenance Center, Chengde Steel Co, Hebei Iron and Steel Group Corp, Chengde 067002; 3 National Engineering Research Center for Cold Strip Rolling Equipment and Yanshan University, Technology, Qinhuangdao 066004)

Abstract In order to study the influence of the thrust/tension (0~15 MPa) on rolling process of stainless steel (Cr18Ni8, 2 mm thickness tube)/low carbon steel (0.06%~0.12% C, Φ 16 mm, round bar) clad rebar, a finite element model for clad rebar rolling process is established by using finite element software Msc. Marc. The influence of thrust/tension on lateral spread and contact stress of interface of stainless steel/carbon steel clad rebar and circumferential thickness of stainless steel wall is studied by simulation, the key point is to study the thrust rolling on bonding strength of both metals. Results show that with exerting tension the lateral spread of rolling stock decreases, but increases with exerting thrust; with increasing thrust and decreasing tension the contact stress between clad stainless steel and core carbon steel increases. The thrust rolling is available to bond both metals and increases the bonding strength of clad stainless steel and core carbon steel.

Material Index Austenite Stainless Steel, Carbon Steel, Clad Rebar, Thrust Rolling, Tension Rolling

目前常见的双金属复合材料包括板材、管材、棒材等,主要的生产工艺有爆炸、焊接、冷轧、热轧、挤压、拉拔等。

Eivani 等人通过冷挤压工艺研制出了 Cu/Al 双金属复合棒材,并研究了剪切强度随温度、道次的增加变化情况^[1]。Khosravifard 等人用 ANSYS/LS-DYNA 模拟分析这种复合棒材的冷挤压过程^[2]。贾建波等应用卸载理论对薄壁双金属复合管材在塑性成形后的接触面上的配合性质以及材料性能之间的关系进行了分析和研究^[3,4]。凌星中采用钎焊的方法,通过在不锈钢复合管和碳钢管间放置钎料,经连续感应加热复合而成^[5]。采用热轧法生产双金属复合板材,双金属棒线材,相对其他方法更加经济和高效,其生产工艺成为越来越重要的研究课题。许多学者对于复合板热轧生产工艺进行了研究并取得了

一定的成果^[6-8]。

不锈钢/碳钢复合棒材兼有不锈钢的美观、耐磨、耐腐蚀性和碳钢的强度高、成本低等特点,目前已应用于要求耐腐蚀的化工、海洋开发等领域中。国内外对于不锈钢/碳钢复合棒材热轧的研究刚刚开始,对其工艺研究也处于探索阶段。Dyja 等建立了热轧的数学模型,模拟了双金属棒材在轧制过程中的金属流动,分析了双金属复合棒材轧制工艺,通过实验进行了验证^[9]。日本的中筋和行采用旋转减径机轧制出不锈钢复合钢筋,金属间实现了冶金结合^[10]。

张力控制是棒材连轧的关键技术,对其控制的好坏是整个轧制过程成功的关键之一。张力的产生会影响轧辊载荷、扭矩以及轧件的变形^[11]。然而,张力轧制在复合钢筋生产工艺中应用的研究到目前

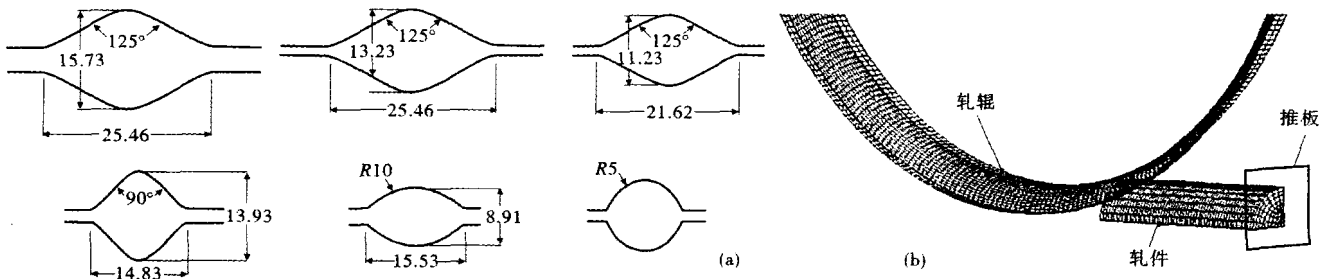


图 1 (a) 菱-菱型孔型系统; (b) 轧制过程的有限元模型
 Fig. 1 (a) Diamond-diamond sequence; (b) Finite element model for rolling process

为止未见相关报道。

本文采用商业有限元软件 Msc. Marc, 建立不锈钢/碳钢复合钢筋推力、张力轧制的有限元模型, 进行轧制过程的有限元仿真。考察张力、推力对不锈钢/碳钢两种金属应力、应变以及金属间接触应力、结合作用影响规律。并通过轧制实验进行验证, 为不锈钢/碳钢复合钢筋的工业化生产提供理论依据。

1 模型建立

1.1 孔型

轧制过程同样分 6 个道次, 选用菱-菱孔型系统轧制前 3 个道次, 第 4 道次进入方形孔, 后通过椭圆-圆孔型系统两道次轧制成型。孔型参数见图 1 (a), 其延伸系数分别为 1.244、1.312、1.327、1.189、1.25、1.11, 总延伸系数为 3.54。

1.2 双金属棒材的有限元模型

复合钢筋来料的直径为 20 mm (断面面积 314 mm²), 不锈钢厚度为 2 mm 壁厚管。轧制过程的三维有限元模型见图 1 (b), 由于对称性, 采用 1/4 模型。复合钢筋外壳材料为 304 不锈钢, 端面划分 20 个单元, 轴向方向划分 100 个单元, 芯部材料为 Ck15, 端面 51 个单元, 长度方向 90 个单元。轧制时, 推板沿轧制方向以小于轧辊的速度推动轧件进入孔槽, 随着咬入, 轧件速度提高, 尾部脱离推板, 靠摩擦力继续咬入, 直至稳定轧制。轧件初始轧制温度 1 150 ℃, 环境温度为 20 ℃。假设轧辊为刚体。为了降低计算时间, 采用 1/4 模型完成。

除了对轧件施加位移约束、热传导以及对流等条件之外, 分别对轧件的头部施加前推力、前张力, 对尾部施加后推力、后张力, 用来代替连轧过程

中产生的张力。模拟过程中, 为了与实验条件尽可能的保持一致, 并节省计算时间, 因此对轧制模型进行简化, 采用单道次轧制, 并在轧件两端施加轴向的拉应力或压应力来模拟连轧中的张力轧制或推力轧制。

以第 1 道次为研究对象, 考察张力/推力在复合钢筋轧制过程中的影响。尤其重点研究张力/推力对两金属间接触应力的影响, 不锈钢壁厚的分布规律, 金属的变形规律。分别在轧件的头尾施加张力或推力 0、10、15 MPa, 来模拟张/推力轧制。

2 仿真结果分析

2.1 对轧制力的影响

图 2 (a) 为轧件受张应力和推应力时, 轧辊所受轧制力的变化情况。在两端受力由 0 ~ 15 MPa。由图 2 (a) 可以看出, 轧制力随轧件所受推应力的增加而线性增大, 随张应力的增加, 呈线性减小趋势。因为在轧制过程中, 变形区的金属受到纵向压应力, 施加张力可以使纵向压应力的值降低, 甚至出现纵向拉应力, 金属质点的纵向阻力减小, 单位轧制力降低, 引起轧制力降低。前后推力会引起变形区金属纵向压应力增大, 金属纵向阻力增加, 引起轧制力

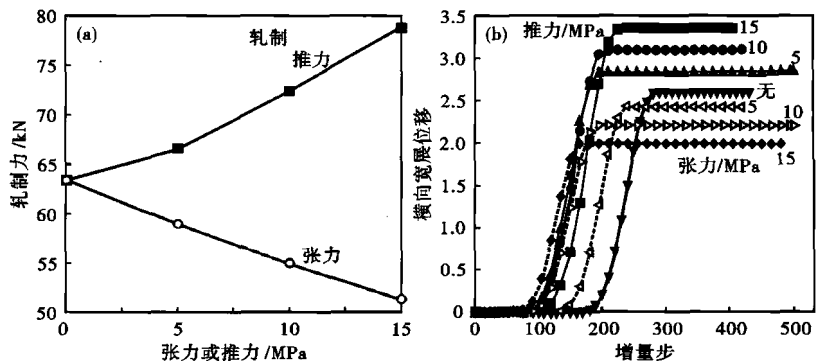


图 2 张力和推力对轧制力 (a) 和轧件宽展 (b) 的影响

Fig. 2 Effect of tension and thrust on rolling force (a) and lateral spread (b) of stock

增大。

2.2 对宽展的影响

轧制时,金属的流动是受最小阻力定律和体积不变条件决定的,当金属的纵向阻力小于横向流动阻力时,金属将大部分沿纵向延伸,导致宽度方向宽展较小。张力或推力轧制时,改变了轧制变形区的应力状态,必定会影响到金属的流动规律。

图2(b)为不锈钢壳外表面辊缝处2369号节点在宽展方向的位移量,即宽展量随增量步的关系。由图2(b)可以看到,在施加推力作用时,轧件的宽展量随推力的降低而减小,而施加张力作用时,宽展量随张力的增加而减小。从推应力15 MPa到张应力15 MPa,宽展改变约1.4 mm,改变量较大,说明张力/推力对棒材轧制宽展作用明显。

轧件的主要宽展和延伸变形发生在后滑区,因此,前滑区应力状态的改变对金属的宽展变形影响不明显。而后滑区的应力状态的改变对金属的宽展变形影响很大,施加张力使纵向流动阻力减小,延伸变形变大,根据体积不变原则,宽展减小,推力的作用恰恰相反。张力或推力改变了钢筋的应力状态,以至于影响宽展的改变。同时,由于材料的力学属性不同,在张力轧制下,张力对两金属变形作用肯定是不一致的。因此考察不锈钢壁厚随张力或推力的改变规律。图3(a)为宽展侧壁厚与压下侧壁厚随张力/推力的变化趋势。可知,两侧的壁厚都随推应力的增加而增加,随张应力的增加而减小。

2.3 对应力/应变的影响

在轧制过程中,轧辊对复合棒作用一个向下的轧制压力,变形通过不锈钢壳传递到碳钢芯,在两金属间产生一定的接触应力,界面间的接触应力状态

直接影响着轧制后两种材料的复合强度。在轧制变形区内,金属受到三向压应力作用,而张力或推力的施加必然改变轴向应力的大小,导致其它两向应力发生变化,进而影响不锈钢壳与碳钢芯间的接触应力。图3(b)在270步时,施加作用力对不锈钢内表面的压下侧与宽展侧节点的最大接触法向应力的影响。其中横坐标为负值代表推应力,正值代表张应力,可以看到两侧的接触法向应力都随推力的降低,张力的增加而减小。因此,推力有利于不锈钢复合钢筋轧制过程中两金属的复合,而张应力是一个消极因素。

图3(c)压下侧,界面处芯与壳对应两节点延伸方向应变即Z向应变差随轧制过程的变化趋势。观察到轧制稳定后,几种情况下的芯与壳Z向应变的差都为正值,说明轧制后芯的纵向应变大于壳的纵向应变,而且随推力的减小,张力的增加,两金属的Z向延伸应变差减小。在实际轧制过程中,由于两种材料的属性差异,界面两侧金属的延伸应变必然存在差异,这就造成复合后,两金属间会存在内应力,金属间延伸应变差越大,复合后内应力越大,这对复合钢筋的质量是有害的。因此应尽量减小轧制过程中的应变差,由图3(c)可知,张力轧制可以减小金属间的延伸应变差。

2.4 对圆周壁厚的影响

对不锈钢复合钢筋进行6道次轧制,观察施加5 MPa张力,5 MPa推力以及无作用力的情况下各道次的断面形状及不锈钢壁厚分布,如图4所示。可以发现5 MPa的推力或张力对复合钢筋的变形有一定的影响,推力轧制不锈钢的宽展较无作用力的情况下明显增加,第3道次尤其明显,而施加张力后

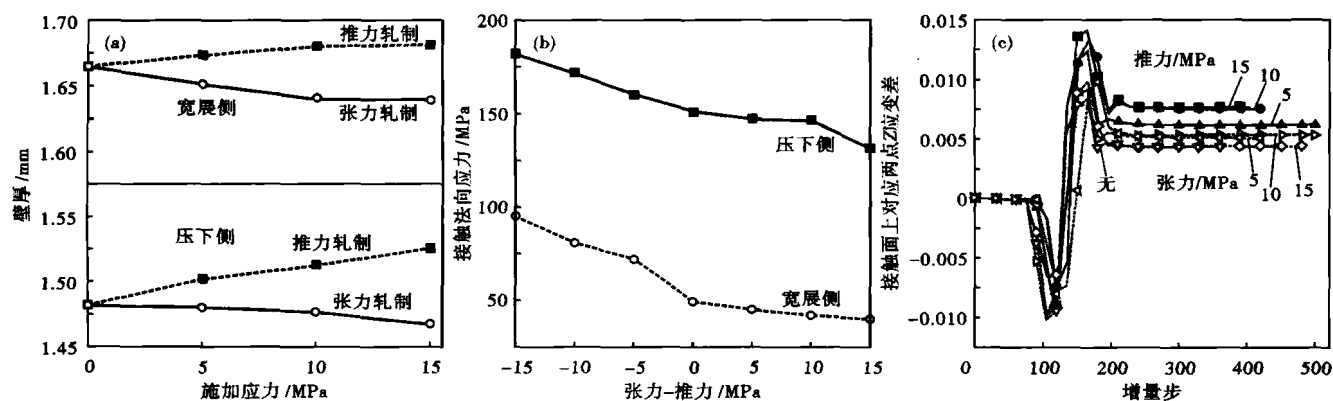


图3 张力和推力对壁厚(a),不锈钢内表面接触法向应力(b)和压下侧界面对应节点Z应变差(c)的影响

Fig.3 Effect of tension and thrust on wall thickness (a), contact normal stress of stainless steel inner surface (b) and on corresponding nodes Z strain difference at reduction side interface (c)

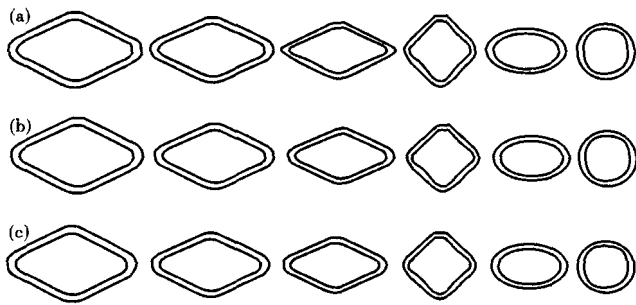


图 4 轧制过程复合钢筋的断面形状:(a)推力 5 MPa;(b)无作用力;(c)张力 5 MPa

Fig. 4 Cross section of cladding rebar in rolling: (a) thrust 5 MPa; (b) no force; (c) tension 5 MPa

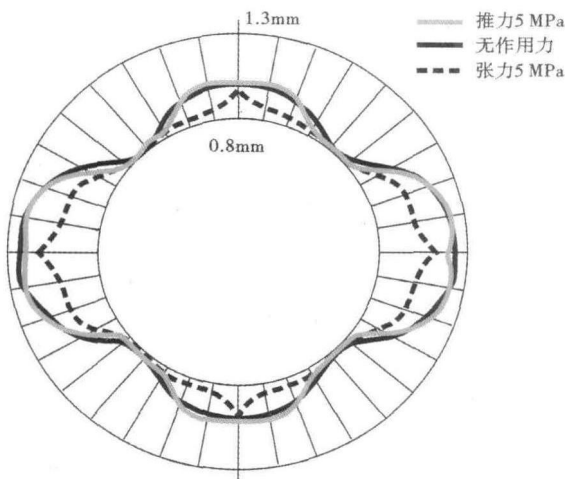


图 5 不同条件下第 6 道次后复合厚度分布

Fig. 5 Distribution of cladding thickness after six pass at different condition

宽展降低。

下面观察复合钢筋经 6 道次轧制后不锈钢壁厚的具体分布情况。图 5 复合钢筋 6 道次轧制后不锈钢壁厚圆周分布图,可以看到施加推力和未施加推力的情况下,壁厚分布变化不大,而施加张力后,壁厚变薄,最大值与最小值之差以及不均匀程度降低。

3 实验

通过前面的研究发现,如果不锈钢复合钢筋在

轧制过程存在张应力,这对于两金属的结合是不利的,因此轧制过程中,机架间应尽量不产生张力,或使之处于微推力的状态。

由于轧机能力有限,轧件较细较短,温降速度快,连轧实施起来困难较大,实验同样采用单道次轧制,使用气动装置,在轧制过程给轧件施加恒定推力,来实现推力轧制。通过实验考察微推力在复合钢筋轧制中的应用效果,测试推力对金属间复合程度和金属变形的影响。实验材料选用 304 不锈钢和 Q195 碳钢,其材料成分及性能见表 1。图 6 为自然轧制状态下,轧制前后复合钢筋各道次断面形貌。

表 1 304 不锈钢和 Q195 碳钢的化学成分及力学性能
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of stainless steel 304 and carbon steel Q195

牌号	成分/%				σ_s / MPa	σ_b / MPa	λ /%
	C	Mn	Cr	Ni			
304	0.08	0.75	18~20	8~9	206	520~700	>40
Q195	0.06~0.12	0.25~0.50	-	-	195	315~430	>33

表 2 推力轧制对界面剪切强度的影响
Table 2 Effect of thrust rolling on interface shearing strength

道次	剪切强度/MPa	
	无推力	10 MPa 推力
3	310	350
6	335	425

表 2 为第 3 和第 6 道次轧制后,未施加推力和 10 MPa 推力下,两金属剪切强度对比。可以发现无论是第 3 道次还是第 6 道次,施加推力可以显著提高不锈钢和碳钢芯的结合强度,可以计算出剪切结合强度提高了 12%。

轧制过程中,推力使轧件的宽展增加,由于孔型轧制宽展侧受到孔槽侧壁的约束,这势必使轧件内部横向压应力增大,使不锈钢与碳钢芯的接触应力增加,因为金属间的接触应力是影响两材料复合强

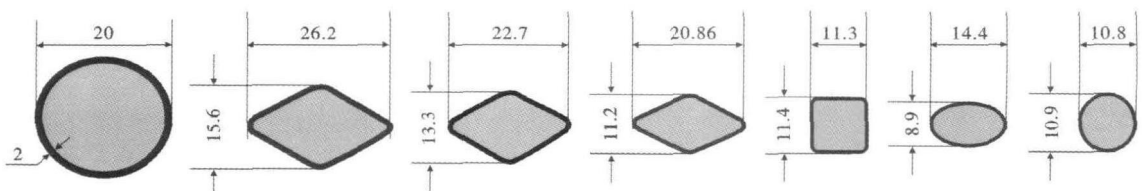


图 6 轧件断面尺寸及形貌

Fig. 6 Cross section size and morphology of stock

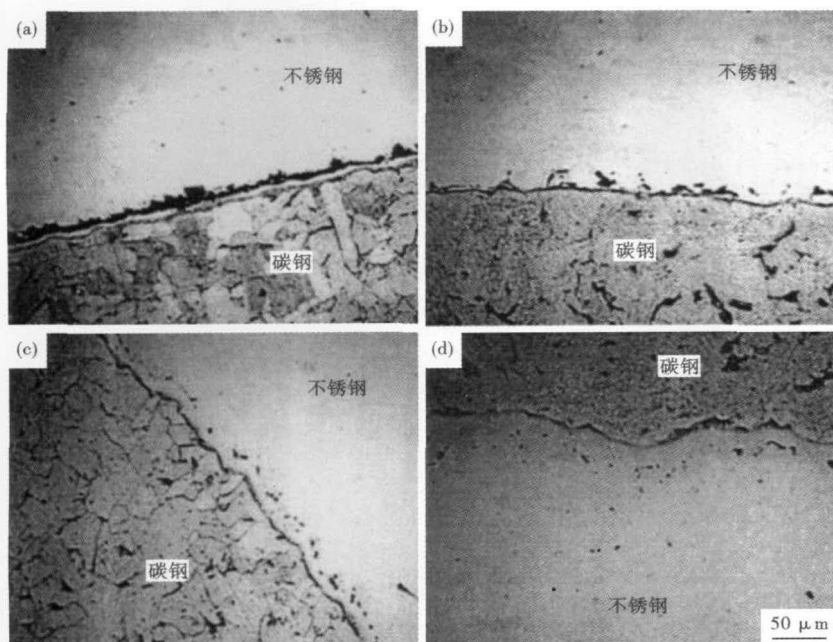


图7 第1道次(a)(b)和第6道次(c)(d)复合界面的形貌:(a)(c)无推力;(b)(d)推力10 MPa

Fig. 7 Morphology of cladding interface after first pass (a)(b) and sixth pass (c)(d): (a)(c) non thrust; (b)(d) thrust 10 MPa

度的重要因素,因此剪切强度提高了。图7为第1和第6道次施加推力和无推力钢筋界面的金相照

片,随轧制道次增加,金属间的结合越来越致密,而施加推力,结合效果进一步提高。

4 结论

(1) 张力/推力轧制对复合钢筋宽展作用明显。施加张力后轧件宽展减小,延伸量增加,而施加推力后宽展量增加。

(2) 张力或推力轧制影响不锈钢壳与碳钢芯间的接触应力,其值随推力的增加、张力的降低而增大。

(3) 推力轧制对不锈钢壁厚分布的影响不大,而施加张力后,壁厚变薄,最大值与最小值之差以及不均匀程度降低。因此,在保证两金属复合的条件下使用张力轧制。

(4) 推力有利于不锈钢复合钢筋轧制过程中两金属的复合,可以提高不锈钢和碳钢芯的结合强度,增强金属间的结合致密程度。

参考文献

- [1] Eivani A R, Taberi A K. A New Method for Producing Bimetallic Rods[J]. Materials Letters, 2007, 61: 4110-4113.
- [2] Khosravifand A, Ebrahimi R. Investigation of Parameters Affecting Interface Strength in Al/Cu Clad Bimetal Rod Extrusion Process [M]. Materials & Design, 2010, 31(1): 493-499.
- [3] 贾建波,徐岩. 双金属管塑性成形工艺[J]. 北华大学学报, 2009, 10(3): 279-284.
- [4] 王学生,王如竹. 基于径向自锁密封的双金属复合管的液压成形[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6): 905-908.
- [5] 凌星中. 冶金结合复合钢管研制和应用[J]. 焊管, 2006, 29(1): 42-46.
- [6] Tzou G Y, Tieu A K, Huang M N. Analytical Approach to the Cold-and-hot Bond Rolling of Sandwich Sheet with Outer Hard and Inner Soft Layers[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126: 664-669.
- [7] He P, Yue X, Zhan J H. Hot Pressing Diffusion Bonding of a Titanium Alloy to a Stainless Steel with an Aluminum Alloy Interlayer[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 486: 171-176.
- [8] Rydz D. The Optimal Conditions for Production of Bimetallic Plate St36K + 0H13J in Asymmetrical Hot Rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157-158: 609-612.
- [9] Dyja H, Lesik L, Milenim A, et al. Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Temperature Distributions during the Process of Rolling Bimetallic Rods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126: 731-735.
- [10] Nakasuji K. Development of Manufacturing Process of Clad Bar by Rotary Rolling[J]. ISIJ International, 1997, 37(9): 899-905.
- [11] 朱英韬,张竟祥,杨永立,等. 棒材连轧机架间张力相互影响的研究及应用[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(3): 21-23.

高亚男(1982-),男,博士(燕山大学),2005年河北理工大学毕业,冶金工艺研究。E-mail: llovvr@163.com

收稿日期:2013-02-06

欢迎全国各冶金机械及相关行业
在《特殊钢》杂志上刊登宣传广告