

轧制

## 皮尔格热轧工艺参数对 06Cr19Ni10/Q235 双金属复合管结合层及椭圆度的影响

何宗霖<sup>1</sup>, 陈建勋<sup>1</sup>, 双远华<sup>1</sup>, 苟毓俊<sup>2</sup>, 丁小凤<sup>1</sup>, 桂海莲<sup>1</sup>, 黄晰萌<sup>3</sup>

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 交通学院, 山西 太原 030024;  
3. 山西钢合力新材料科技有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为了提高皮尔格热轧双金属复合管的质量, 提出了临界理论。针对送进量和回转角等工艺参数, 对 06Cr19Ni10/Q235 双金属复合管皮尔格热轧工艺进行了数值模拟和实验研究, 探究了送进量和回转角对双金属复合管结合层及椭圆度的影响, 验证了临界理论的可靠性。结果表明: 较小的回转角会使双金属复合管结合层处受力均匀, 且结合层处所受应力更大。当回转角与送进量的比值接近临界值  $20^{\circ} \cdot \text{mm}^{-1}$  时, 双金属复合管结合层夹杂物的最大尺寸小于  $8 \mu\text{m}$ , 椭圆度为 1.2 mm, 成形性较好; 当低于临界值  $20^{\circ} \cdot \text{mm}^{-1}$  时, 双金属复合管结合层夹杂物的最大尺寸小于  $6 \mu\text{m}$ , 椭圆度为 1.1 mm, 局部产生开裂; 当高于临界值  $20^{\circ} \cdot \text{mm}^{-1}$  时, 双金属复合管结合层夹杂物的最大尺寸达到  $25 \mu\text{m}$ , 椭圆度为 11.8 mm, 会发生开裂和凸耳现象。

**关键词:** 皮尔格热轧; 双金属复合管; 送进量; 回转角; 椭圆度; 结合层

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.014

**中图分类号:** TG339

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 06-0096-06

## Effect of Pilger hot-rolling process parameters on bonding layer and ovality of 06Cr19Ni10/Q235 bimetal composite pipe

He Zonglin<sup>1</sup>, Chen Jianxun<sup>1</sup>, Shuang Yuanhua<sup>1</sup>, Gou Yujun<sup>2</sup>, Ding Xiaofeng<sup>1</sup>, Gui Hailian<sup>1</sup>, Huang Ximeng<sup>3</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. College of Vehicle Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
3. Shanxi Gangheli New Material Technology Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of bimetal composite pipes by Pilger hot-rolling, the critical theory was put forward. For the process parameters such as feeding amount and rotation angle, the numerical simulation and experimental research were carried out on the Pilger hot-rolling process of 06Cr19Ni10/Q235 bimetal composite pipe. Then, the influences of feeding amount and rotation angle on bonding layer and ovality of bimetal composite pipe were studied, and the reliability of the critical theory was verified. The results show that the smaller rotation angle makes the stress on the bonding layer of bimetal composite pipe uniform, and the stress on the bonding layer is greater. When the ratio of rotation angle to feeding amount is close to the critical value  $20^{\circ} \cdot \text{mm}^{-1}$ , the maximum size of inclusion in the bonding layer of bimetal composite pipe is less than  $8 \mu\text{m}$ , the ovality is 1.2 mm, and the formability is good. When the ratio is below the critical value  $20^{\circ} \cdot \text{mm}^{-1}$ , the maximum size of inclusions in the bonding layer of bimetal composite pipe is less than  $6 \mu\text{m}$ , the ovality is 1.1 mm, and cracking occurs locally. When the ratio is higher than the critical value  $20^{\circ} \cdot \text{mm}^{-1}$ , the maximum size of inclusions in the bonding layer of bimetal composite pipe reaches  $25 \mu\text{m}$ , the ovality is 11.8 mm, and cracking and earing occur at the same time.

**Key words:** Pilger hot-rolling; bimetal composite pipe; feeding amount; rotation angle; ovality; bonding layer

双金属复合管是一种兼具两种材料性能的新型管材<sup>[1-3]</sup>。通过特殊的加工方式, 将两种不同金

属材料的管材复合在一起。常见的复合方式分为两类: 一类是机械复合, 一类是冶金复合。机械复合主要靠结合层处两种金属表面的塑性变形产生的机械咬合, 使得两种金属在结合层处产生一定的结合力, 但该结合力较弱, 机械复合管的使用寿命较低, 且对应用场景要求较高<sup>[4]</sup>。而冶金复合达到了原子键结合的程度, 使复合管的应用寿命大幅提升。

收稿日期: 2023-02-12; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 山西省科技重大专项 (20191102009); 山西省重点研发计划项目 (201903D121049); 太原科技大学博士科研启动金项目 (20222045); 太原科技大学大学生创新训练项目 (XJ2022024)

作者简介: 何宗霖 (1982-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 2022021@tyust.edu.cn

冶金复合管的复合工艺种类较多,如爆炸复合法、离心浇注复合法、离心铝热剂法和激光包覆法等<sup>[5-6]</sup>。但都存在不同程度的问题,如效率低、成本高、污染严重等。近几年,借助热轧工艺,冶金复合管的复合工艺得到了迅速发展<sup>[7-8]</sup>。张晶晶等<sup>[9]</sup>对 NM500/Q345R/NM500 复合钢板在不同压下率下进行了热轧实验,借助 SEM 等手段对该复合板的微观组织和缺陷进行了分析。白于良等<sup>[10]</sup>对钛/钢进行预轧组坯,再对该组坯感应加热至适轧温度后热轧成形,制备了钛/钢冶金复合板。吕泽华等<sup>[11]</sup>对碳钢/奥氏体不锈钢/马氏体不锈钢进行了真空热轧复合,发现结合层为冶金结合且无开裂现象。李豪<sup>[12]</sup>采用数值模拟和实验研究的方法,针对热轧碳钢/不锈钢复合板进行了微观组织和力学性能分析,研究了复合层的热状态和力学行为规律。

考虑到双金属无缝复合管热轧工艺的成形性,本文借助有限元数值模拟和实验验证的方法,对皮尔格热轧不锈钢/碳钢双金属无缝复合管的送进量和回转角进行了研究,探究了关键工艺参数对复合管结合层及椭圆度的影响。

## 1 皮尔格轧制双金属复合管的成形理论分析

### 1.1 皮尔格轧制双金属复合管的工艺原理

皮尔格轧制是无缝钢管生产的一种常用方法。管材按一定频率送进,在芯棒和具有周期性变截面孔型的共同作用下,靠逐渐收缩的变截面孔型辗压管坯,实现减径减壁效果,如图 1 所示。同步齿轮在直流电机的驱动下旋转,由于同步齿轮和直齿条啮合,使得活动机架连同轧辊在水平方向上水平滚动。当活动机架水平移动至最远端时,驱动电机反转使活动机架向相反方向移动至另一最远端,从而实现在两极限位置间往复运动。在两极限位置,双金属复合管的管坯按照一定的送进量和回转角度沿轧制方向平移,从而实现双金属复合管的轧制成形。

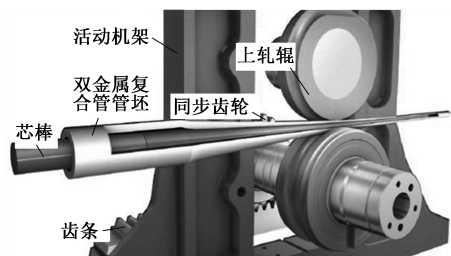


图1 皮尔格二辊周期轧管机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Pilger two-roller cycle pipe mill

### 1.2 孔型特征

皮尔格轧制双金属复合管的模具包括轧辊和芯棒,其中轧辊的孔型和芯棒的外形曲线决定了双金属在轧制过程中的塑变特征,如图 2 所示。沿着轧制方向(X 方向)分为变形区和精整区,其中变形区为复合管的主要受力区。根据变形区孔型特征,可将复合管沿横截面分为孔顶(I区域)、孔侧(II区域)和孔边(III区域)3个区域,不同的送进量和回转角度等将会对双金属复合管的成形性产生影响。

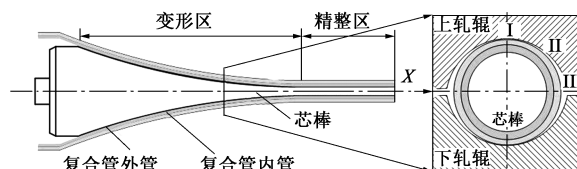


图2 皮尔格热轧双金属复合管孔型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of groove for Pilger hot-rolling bimetal composite pipe

## 2 有限元模型的建立

通过 Solidworks 软件构建了皮尔格热轧双金属复合管的有限元模型并导入 Deform 3D 中定位。模型包括上辊、下辊、推块、芯棒和复合管管坯,如图 3 所示。工艺参数设置如表 1 所示。

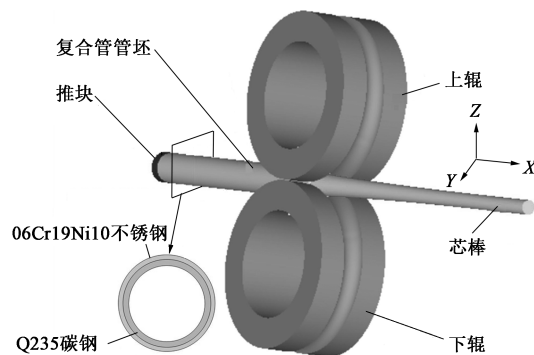


图3 皮尔格热轧双金属复合管的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of Pilger hot-rolling bimetal composite pipe

## 3 结果分析

### 3.1 送进量对双金属复合管成形性的影响

#### 3.1.1 对轧制力的影响

图 4 为不同送进量对皮尔格热轧双金属复合管的轧制力的影响。从图 4 可看出,增大送进量会导致轧制力增大,这是因为较大的送进量会使轧辊在轧制过程中与复合管的接触面积增大,且较大的轧

表 1 有限元模型的工艺参数

Table 1 Process parameters of finite element model

参数	06Cr19Ni10 不锈钢覆管	Q235 碳钢基管
外径/mm	$\Phi 38$	$\Phi 35$
壁厚/mm	1.50	1.50
轧制温度/ $^{\circ}\text{C}$	1200	1200
轧制速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	1682.17	1682.17
回转角/ $(^{\circ})$	26、31、57	26、31、57
送进量/mm	6、8、10	6、8、10
摩擦因数	0.10	0.10
屈服强度/MPa	177	235
杨氏模量/GPa	200	210
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7.98	7.85
泊松比	0.30	0.25

制力会促使双金属的塑变程度加剧。根据薄膜理论，这时双金属间的薄膜破碎形成夹杂物，复合管结合层处裸露出原子。当两侧原子间距缩短至原子键的

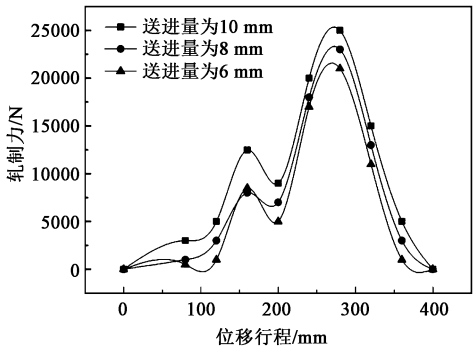


图 4 送进量对皮尔格热轧双金属复合管的轧制力的影响

Fig. 4 Effect of feeding amount on rolling force for Pilger hot-rolling bimetal composite pipe

作用范围内时，可实现冶金复合<sup>[13]</sup>。结合层的夹杂物含量过高，势必会引起结合层的金属结合力不足。

3.1.2 对前伸量的影响

沿 X 方向在基管和覆管外壁分别取等间隔的 3 个点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  进行追踪，如图 5 所示，图 5a~图 5c 为覆管表面，图 5e~图 5f 为基管表面。复合管追

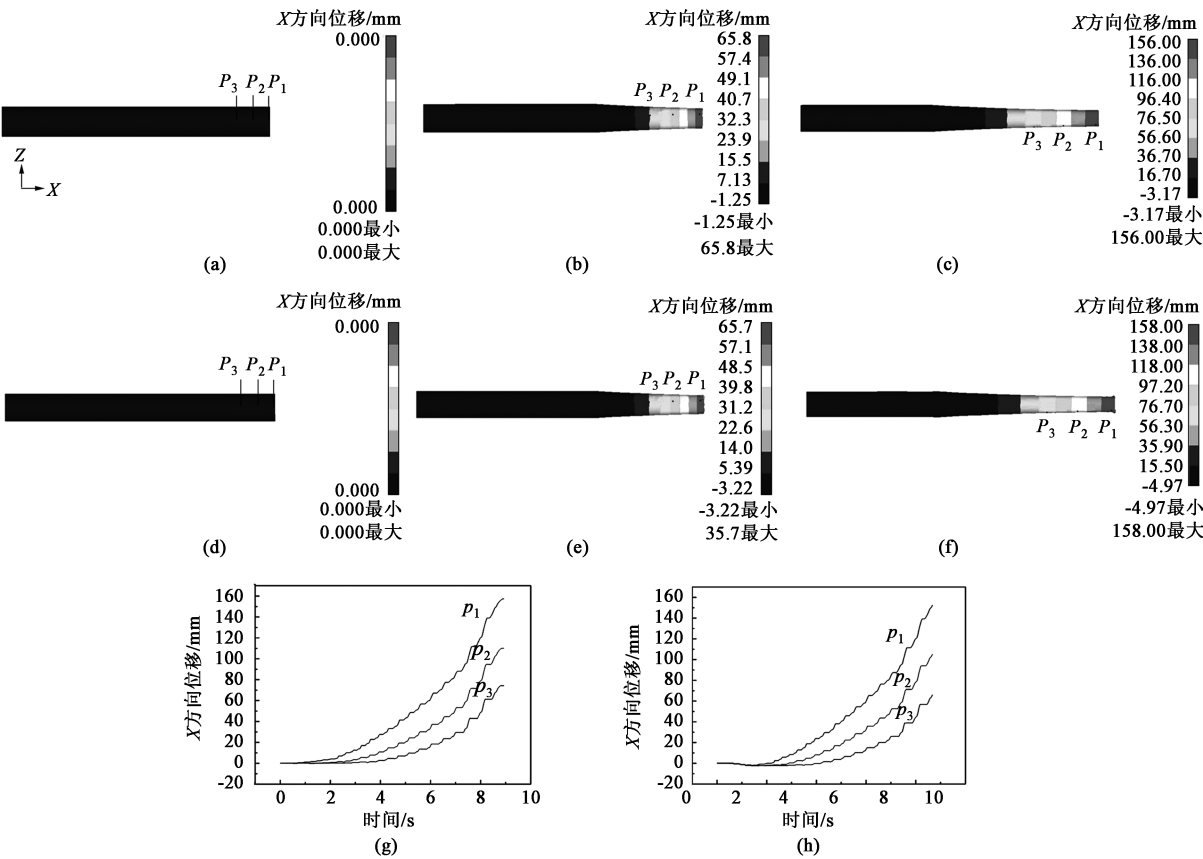


图 5 皮尔格热轧双金属复合管在 X 方向的质点位移变化规律

(a) 覆管, 0 s (b) 覆管, 4 s (c) 覆管, 8 s (d) 基管, 0 s (e) 基管, 4 s (f) 基管, 8 s (g) 覆管质点位移图 (h) 基管质点位移图

Fig. 5 Displacement change law of particle for Pilger hot-rolling bimetal composite pipe in X-direction

(a) Outer pipe, 0 s (b) Outer pipe, 4 s (c) Outer pipe, 8 s (d) Inner pipe, 0 s (e) Inner pipe, 4 s (f) Inner pipe, 8 s (g) Displacement curves of outer pipe particle (h) Displacement curves of inner pipe particle

踪点的位移沿  $X$  方向逐渐增大, 如图 5g 和图 5h 所示, 3 个点之间的距离沿  $X$  方向也逐渐增加, 表明随着皮尔格轧辊周期式的碾压轧辊, 越靠近出口段, 轴向延伸越大, 并遵循体积不变定律。由此看出, 增大送进量时, 会使得金属在  $X$  方向上的延伸加剧。由图 2 所示皮尔格轧辊孔型特征可知, 这将同时导致周向的金属流动加剧。

### 3.2 回转角对双金属复合管结合层应力的影响

由图 6 可看出, 覆管的应力状态变化较基管剧烈。回转角为  $26^\circ$  和  $31^\circ$  下的基管等效应力分布非常

均匀。随着回转角度逐渐增加至  $57^\circ$ , 基管和覆管的等效应力逐渐由均匀向不均匀过渡, 这说明小角度回转会使复合管在轧制过程中受力更均匀。而对比图 6a 和图 6d、图 6b 和图 6e、图 6c 和图 6f 可看出, 基管外表面所受的应力由图 6d 中的  $59.7 \text{ MPa}$ , 降至图 6e 中的  $35.3 \text{ MPa}$ , 再降至图 6f 中的  $18.1 \text{ MPa}$ , 这将对复合管结合层处存在的夹杂物产生均匀地碎化作用。由于较小回转角比大回转角会使基管和覆管受力更均匀, 且受到的结合层应力更大, 所以, 对基管和覆管的复合存在积极意义。

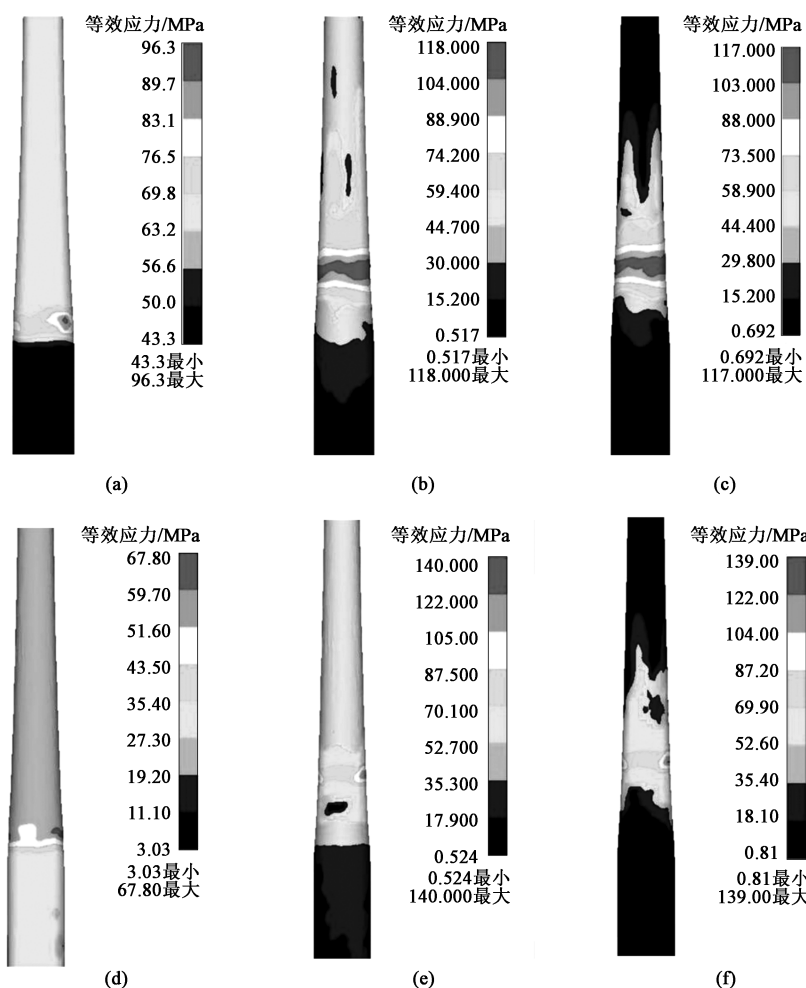


图6 不同回转角度对皮尔格热轧双金属复合管等效应力的影响

(a) 覆管,  $26^\circ$  (b) 覆管,  $31^\circ$  (c) 覆管,  $57^\circ$  (d) 基管,  $26^\circ$  (e) 基管,  $31^\circ$  (f) 基管,  $57^\circ$

Fig. 6 Effects of different rotation angles on equivalent stress for Pilger hot-rolling bimetal composite pipe

(a) Outer pipe,  $26^\circ$  (b) Outer pipe,  $31^\circ$  (c) Outer pipe,  $57^\circ$  (d) Inner pipe,  $26^\circ$  (e) Inner pipe,  $31^\circ$  (f) Inner pipe,  $57^\circ$

### 3.3 实验验证

研究表明, 送进量和回转角对双金属复合管的成形性存在耦合作用, 本文提出了送进量和回转角

比例系数  $k = \frac{\theta}{m}$ , 其中:  $\theta$  表示回转角,  $(^\circ)$ ;  $m$  表示

送进量, mm。

按照图 7 所示比例系数  $k$  确定实验方案并进行实验。图 8 为不同  $k$  值下结合层夹杂物的细化程度图, 图 8a~图 8c 对应的界面夹杂物最大尺寸分别为: 6、8 和  $25 \mu\text{m}$ 。可以看出, 随着  $k$  值的增大,



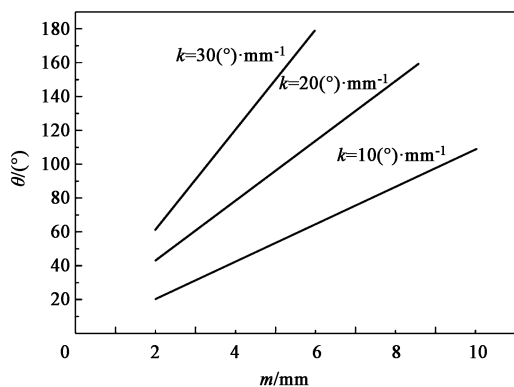


图 7  $k$  对皮尔格热轧双金属复合管成形性的影响

Fig. 7 Effect of  $k$  on formability for Pilger hot-rolling bimetal composite pipe

界面夹杂物含量增加且细化程度逐渐降低。这是由于在  $k$  值较小状态下, 同样的送进量对应的回转角较小, 而较小的回转角使得基管和覆管在结合层的应力分布更大、更均匀, 有利于结合层夹杂物的细化。

图 9 为不同  $k$  值下双金属复合管的外形图, 如图 9 中 A 点所示, 在相同送进量的条件下, 较小的  $k$  值对应较小的回转角, 且椭圆度较低只有 1.1 mm。虽然, 较小的回转角有利于双金属结合层处夹杂物局部的细化, 却不利于双金属沿周向协调流动, 从而在孔边 (III 区域) 处发生了开裂现象。而较大的  $k$  值, 在相同的回转角条件下, 又有着较大的送进量。过大的送进量, 使得单道次参与到轧

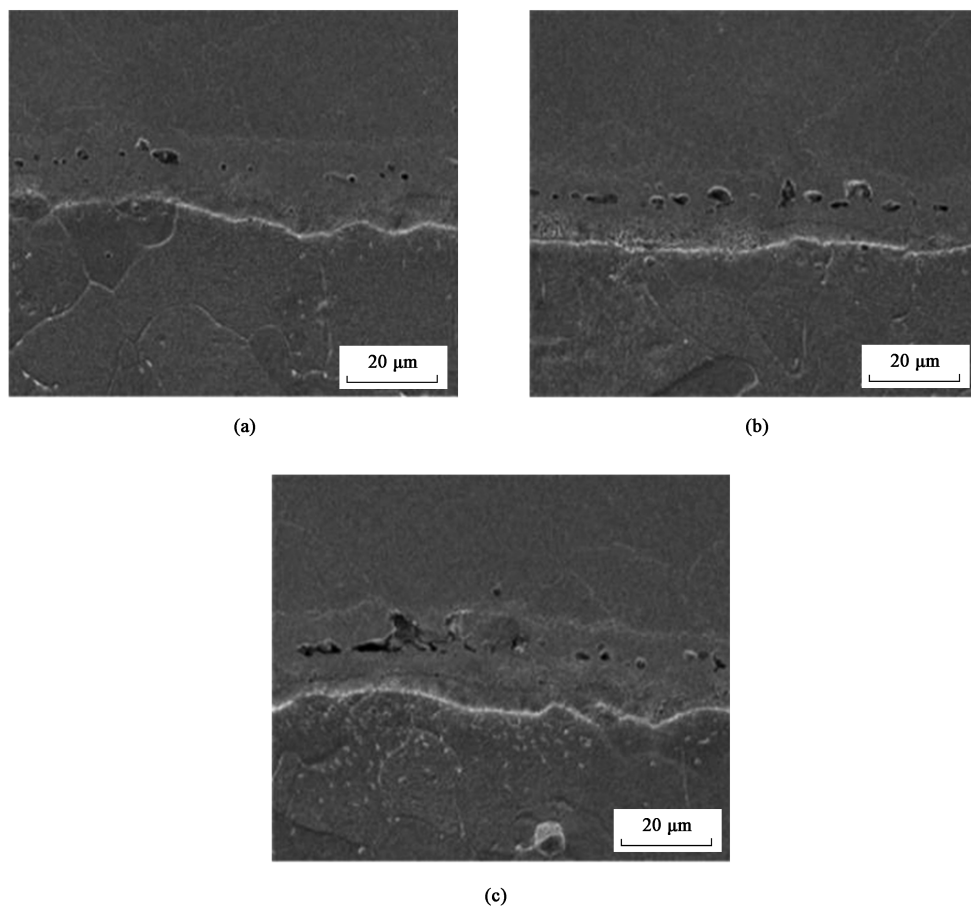


图 8 不同  $k$  值下结合层夹杂物的细化程度图

(a)  $k=10 (^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}$  (b)  $k=20 (^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}$  (c)  $k=30 (^\circ) \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 8 Refinement level diagrams of inclusions in bonding layer under different  $k$  values

制变形中的双金属体积过大, 多余的金属无法在  $X$  方向上延伸, 根据体积不变定律, 这将导致复合管双层金属沿周向流动并大量聚集, 导致金属沿着孔侧 (II 区域) 的轧制力大幅度提升, 从而造成大量

的金属从孔边 (III 区域) 处挤出, 椭圆度达到 11.8 mm 并形成了凸耳。同时, 由于较大  $k$  值下结合层夹杂物的尺寸含量较多, 使得双层金属结合力较低造成了较大程度的开裂, 如图 9 中 C 点所示。按

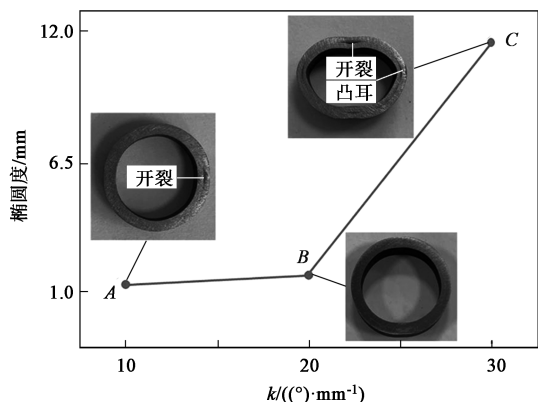


图9 不同 $k$ 值下皮尔格热轧双金属复合管的椭圆度与外形图

Fig. 9 Ovality and contour drawings of Pilger hot-rolling bimetal composite pipe under different  $k$  values

照实验工艺参数, 当 $k$ 值接近临界值 $20(^{\circ}) \cdot \text{mm}^{-1}$ 时, 如图9中B点所示, 不仅保证了双金属在轧制变形中有足够的轧制力, 且结合层处夹杂物细化充分, 同时有利于双金属在塑性成形中的协调流动, 使得椭圆度较低至1.2 mm, 成形性较好。

## 4 结论

(1) 送进量的增大会使轧制力增大, 有利于复合管的结合, 但同时也会引起双金属单道次轧制金属体积过大, 从而引起开裂和凸耳等现象。

(2) 较小的回转角有利于双金属在轧制变形中获得更均匀的受力状态, 有利于结合层夹杂物的细化, 但不利于促进双金属沿周向的流动。

(3) 验证了临界理论, 当达到临界 $k$ 值附近时, 送进量和回转角将相互耦合, 双金属结合层夹杂物细化充分、椭圆度较低、成形性较好。

### 参考文献:

[1] Alcaraz J L, Gil-Sevillano S J, Martinez-Esnaola J M. A fracture condition based on the upper bound method for the extrusion of bi-metallic tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 61 (3): 265-274.

[2] Wright H D, Oduyemi T O S, Evans H R. The experimental behaviour of double skin composite elements [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1991, 19 (2): 97-110.

[3] 王纯, 毕宗岳, 张万鹏, 等. 国内外双金属复合管研究现状 [J]. 焊管, 2015, 38 (12): 7-12.

Wang C, Bi Z Y, Zhang W P, et al. Research status on double-metal composite pipe at home and abroad [J]. Welded Pipe and Tube, 2015, 12 (38): 7-12.

[4] 王永飞, 赵升吨, 张晨阳. 双金属复合管成形工艺研究现状及发展 [J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50 (3): 84-89.

Wang Y F, Zhao S D, Zhang C Y. Research status and development of forming technology for bi-metal-lined pipe [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50 (3): 84-89.

[5] Niu G, Sui Y D, Zeng H B, et al. Effect of centrifugal casting temperature on the microstructure and properties of ZTAP/HCCI matrix composites [J]. Materials Research Express, 2021, (8): 026513.

[6] 汪华林, 李海林, 吴东棣. 离心铝热法制造陶瓷衬里复合管Ⅲ: 中试研究 [J]. 化工机械, 1998, (5): 13-15, 62.

Wang H L, Li H L, Wu D L. Fabrication of ceramic lined composite pipes by centrifugal thermit process Ⅲ: Pilot study [J]. Chemical Machinery, 1998, (5): 13-15, 62.

[7] Nie H H, Liang W, Chen H S, et al. Vacuum hot pressed AZ31/UCF/AZ31 composite sheets: Microstructure and mechanical properties [J]. Vacuum, 2017, (144): 247-255.

[8] Ding Y, Cao R, Yan Y J. Effects of heat treatment on fracture mechanism of martensite/austenite MLS composite plates by hot roll bonding [J]. Materials Science & Engineering A, 2020, (773): 138727.

[9] 张晶晶, 刘洁, 曹志刚, 等. 不同轧制压下率对热轧 NM500/Q345/NM500 复合板界面微观组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 52-56.

Zhang J J, Liu J, Cao Z G, et al. Effect of different rolling reduction rate on microstructure of interface of hot-rolled NM500/Q345/NM500 composite plate [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 52-56.

[10] 白于良, 李晶琨, 刘雪峰, 等. 感应加热温度对冷-热轧制成形钛/钢复合板界面的影响 [J]. 工程科学学报, 2020, 42 (12): 1639-1646.

Bai Y L, Li J K, Liu X F, et al. Effect of induction heating temperature on the interface of cold-hot-rolled titanium/steel composite plates [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42 (12): 1639-1646.

[11] 吕泽华, Agamuradov Dayanch, 张志雄, 等. 热轧双覆层不锈钢/碳钢板组织与性能研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (7): 168-175.

Lyu Z H, Agamuradov D, Zhang Z X, et al. Research on microstructure and properties of double cladding stainless steel / carbon steel clad plate by hot rolling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (7): 168-175.

[12] 李豪. 热轧复合不锈钢-碳钢板层的界面层性能与塑性变形行为 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.

Li H. Interface Layer Properties and Plastic Deformation Behavior of Hot Rolling Bonded Stainless/Carbon Steel Clad Plate [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2020.

[13] Vaidyanath L R, Nicholas M G, Milner D R. Pressure welding by rolling [J]. British Welding Journal, 1959, (6): 13-28.