

轧制

层状金属界面空洞的形成与演化

刘 鑫¹, 帅美荣¹, 谢广明², 李海斌¹, 李 亮¹

(1. 太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024;

2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 异种金属在复合变形过程中由于金属特性差异以及塑性变形不同步, 在界面处极易产生空洞缺陷, 而空洞的形成和演化对于双金属间界面结合有着极为不利的影响。采用有限元仿真技术模拟了不同张力系数下不锈钢/碳钢复合钢筋变形过程中空洞的发展演变规律。结果表明: 在4道次三辊“切线”孔型中, 位于辊缝区域的金属为自由变形; 在变形初期覆层金属产生翘曲, 此时芯部金属的宽展较小, 逐步形成界面空隙及空洞; 微张力轧制促使空洞在第2道次中进一步扩大, 然而微张力能够改善覆层金属的壁厚均匀度; 在第3、4道次精整孔型中, 空洞逐渐收缩消失, 顺利完成轧制。复合界面的显微形貌表明, 随着轧制温度的升高, 界面氧化物分解, 界面层空洞逐渐消失; 当轧制温度高达1200℃时, 界面深度差仅为3 μm, 复合效果较好。

关键词: 层状金属; 轧制; 微张力; 微观形貌; 空洞

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.023

中图分类号: TG331

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 07-0162-06

Formation and evolution of interface voids in laminated metal

Liu Xin¹, Shuai Meirong¹, Xie Guangming², Li Haibin¹, Li Liang¹

(1. Engineering Research Center of Heavy Machinery Ministry of Education, Taiyuan University of Science and Technology,

Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In the process of composite deformation for dissimilar metals, due to the different in metal properties and the asynchronous plastic deformation, it is easy to produce the void defects at the interface area, and the formation and evolution of void defects have an extremely adverse effect on the bimetallic interfacial bonding. Therefore, the development and evolution laws of voids in the deformation process for stainless steel/carbon steel composite rib under different tension coefficients were simulated by the finite element simulation technology. The results show that in the four passes with three-roll “tangent” feature, the metal in the roll gap area is in free deformation, and the cladding metal warps at the initial stage of deformation. At this time, the core metal has a small width, and the voids and voids are gradually formed at the interface. Moreover, the micro-tension rolling promotes the voids to expand further in the second pass, and the micro-tension improves the uniformity of wall thickness for the cladding metal. In the third and fourth passes of finishing, the voids gradually shrink and disappear, and the rolling process is successfully completed. The micro-morphologies of composite interface show that with the increasing of rolling temperature, the interface oxides are gradually decomposed, and the voids in the interface layer disappear. When the rolling temperature reaches 1200℃, the interface depth difference is only 3 μm, and the composite effect is better.

Key words: laminated metal; rolling; micro-tension; micro-morphology; void

在现代化工业中, 单一材料越来越难以满足性

能以及成本要求^[1-2], 层状金属制品是由两种或两种以上物理和化学性质不同的金属通过复合工艺在界面上实现冶金结合的一种复合材料, 可以整合各组元材料的性能优势, 充分发挥材料的应用潜能, 提高其综合应用性能。目前, 已有的复合方法有爆炸复合、轧制复合、拉拔复合、挤压复合、喷射沉积等以及多种工艺的组合作^[3-5]。轧制复合产品的尺寸灵活、可调性高、危险性小, 且适用于大批量生产, 已成为应用广泛的金属层状复合材料制备方法^[6-7]。

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075357); 山西省重点研发计划 (201903D121043); 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 (东北大学) 开放课题 (2020RALKFKT013); 山西省研究生教育改革研究课题 (2020YJJG241); 山西省研究生教育创新项目 (2021Y709)

作者简介: 刘 鑫 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1176743646@qq.com

通信作者: 帅美荣 (1978-), 女, 博士, 教授

E-mail: ruoxin2001@163.com

对于棒线材复合轧制而言，其复合质量的关键在于多机架孔型连续成形匹配及孔型设计的合理性。高亚男^[8]通过有限元模拟比较了平椭-圆与菱-菱孔型系统对碳钢/不锈钢复合钢筋轧制效果的影响，发现平椭-圆孔型系统轧制的产品的壁厚均匀度最好。北京科技大学开展了耐腐蚀复合螺纹钢筋的研究，采用焊接+孔型轧制的工艺方法进行了复合钢筋轧制实验，并同时应用有限元软件对复合轧制进行了模拟研究^[9]。废铁屑、不锈钢的压缩结合+轧制复合生产不锈钢/碳钢复合钢筋的方法在 20 世纪末已在欧美得到了应用，美国 STELAX 公司和同时期的英国威尔士轧钢企业阿巴尼斯钢铁公司、日本的 Nippon 钢铁公司等企业利用这种方法进行了大规模的不锈钢/碳钢复合钢筋的生产^[10]，研究发现，在多道次孔型轧制过程中，在界面结合处出现了空洞缺陷^[11]，容易导致碳钢和不锈钢界面的结合强度降低，且在使用中易出现腐蚀缺陷。

为了改善复合棒材覆层均匀与空洞缺陷的关键问题，本文拟采用四机架三辊“切线”孔型轧制系统。三辊孔型具有宽展小、道次压缩量大等变形特点，可以有效地抑制复合界面诱发缺陷产生的变形行为，从而解决由于异种金属的特性差异以及变形不同步而诱发的质量问题。

1 有限元模拟界面空洞演化

1.1 界面金属质点流动分析

本文采用四机架三辊减径“切线”孔型系统，以不锈钢覆层壁厚 2 mm 为例，研究空洞的发展演变规律。覆层金属流动对孔洞的生成及发展极为重要，提取如图 1 所示的轧制第 1 道次辊缝区域界面处的两节点，对其等效应力进行分析，节点记为点 1、点 2，等效应力值如表 1 所示，其中，负号表示压应力，正号表示拉应力， S_{xx} 、 S_{yy} 、 S_{zz} 分别为周向、径向及轴向等效应力。在咬入阶段，点 1、点 2 沿轴向承受约 20 MPa 的拉应力，沿径向与周向承受压应力，沿周向受到的压应力最大，达到 65 MPa，致使辊缝两侧的金属开始向辊缝处聚集。而随着轧制的进行，在稳定轧制阶段，沿周向方向的压应力剧增，两节点的平均压应力为 203 MPa，同时由于辊缝处无孔型约束，随着沿轧制方向的阻力增大，进一步导致辊缝两侧的金属向辊缝处大量堆积，造成空洞处覆层厚度增加，加剧了覆层的不均匀度。

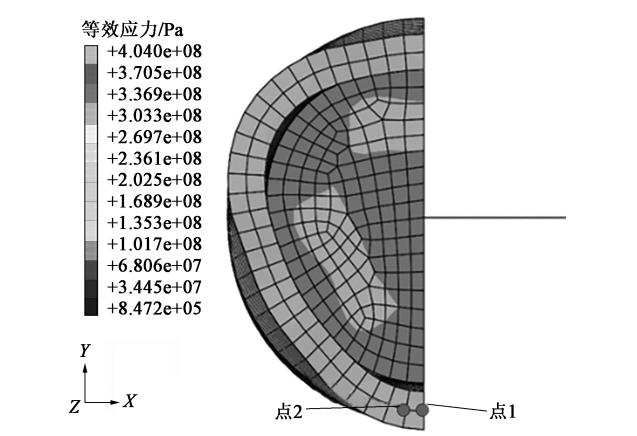


图 1 辊缝区域节点位置
Fig. 1 Positions of nodes at roll gap area

表 1 辊缝处覆层节点的等效应力 (MPa)
Table 1 Equivalent stress of cladding nodes at roll gap (MPa)

阶段	点	S_{xx}	S_{yy}	S_{zz}
咬入阶段	1	-63	-9.2	+19
	2	-65	-9.4	+20
稳定轧制阶段	1	-190	-9.2	-44
	2	-216	-16.0	-80

1.2 空洞发展演变

图 2 为轧件在各变形阶段中的应变云图。可以清晰地看出界面空洞的生成及扩展过程，空洞的发展演变依次经历了形成、发展、收缩 3 个阶段。在初轧阶段的咬入瞬间，如图 2a 所示，轧辊辊底首先与覆层金属表面产生接触，承受较大的轧制力；然而此时沿周向的金属受力不均匀，导致覆层发生明显的“翘曲”变形，导致覆层与芯部之间形成孔隙。随着轧制过程的进行，如图 2b 所示，轧辊对覆层金属表面的作用面积增大，孔隙长度虽有所收缩，但异种金属流动不同步性质逐渐凸显。辊缝处覆层沿 X 方向的最大位移可达 1.1 mm，而芯部沿 X 方向的最大位移仅为 0.58 mm，二者相差将近 1 倍，孔隙宽度达到最大。在轧制出口处，如图 2c 所示，轧件已经充盈孔型，变形深入至芯部，空洞面积收缩明显，仅在辊缝区域留有微小孔洞。

图 3 为不锈钢/碳钢复合钢筋在第 2、第 3、第 4 道次下的横断面的径向应变云图，受弧三角孔型影响，不锈钢/碳钢复合钢筋在第 1 道次时由于变形量小等因素，未能形成牢固冶金结合，因此，会在第 2 道次界面产生更大的空洞缺陷，进一步降低复合质量。轧件经过后两道次精整孔型后，空洞现象才得到很好的抑制；且最终获得壁厚均匀、圆度较好的复合产品。

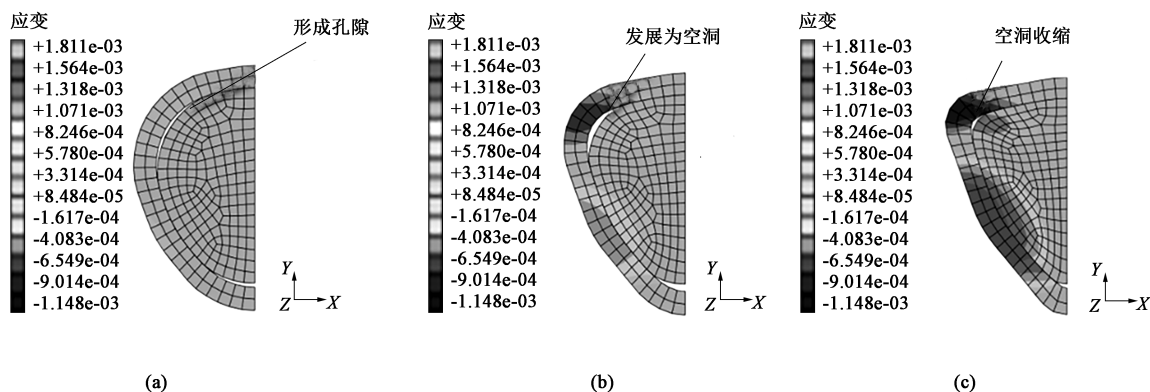


图2 第1道次变形中界面空洞演化

(a) 咬入阶段 (b) 稳定轧制阶段 (c) 出口阶段

Fig. 2 Evolution of interface voids during the first pass deformation

(a) Bite state (b) Stable rolling state (c) Exit state

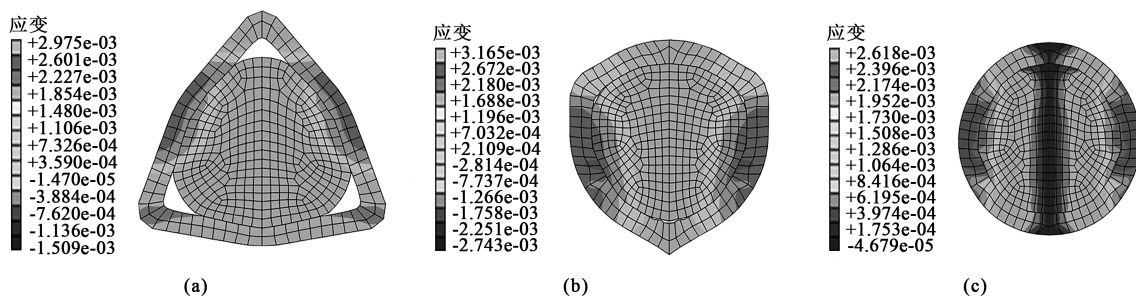


图3 第2、3、4道次出口处金属断面径向应变云图

(a) 第2道次 (b) 第3道次 (c) 第4道次

Fig. 3 Radial strain nephograms of metal sections at exits for the second, third and fourth passes

(a) The second pass (b) The third pass (c) The fourth pass

2 应力工况对空洞扩展的影响

图4为不同推/张力作用下,即推力系数为0.97、无推/张力、张力系数为1.02时复合钢筋在4个道次出口处的应力云图。从图4中可以看出,在推力作用下,经过第2道次孔型轧制后金属界面产生了较小的空洞;在张力作用下,界面空洞出现增大趋势;然而,张力作用却使得空洞在后续精整阶段消失,产品覆层均匀度及圆度最好。如图5所示,在张力轧制下,第2道次出口处复合金属的横截面面积为 246 mm^2 ,稍小于推力作用下的横截面面积 256 mm^2 ,进一步揭示了连轧机架间的张力减小了覆层与芯部的接触面积,导致界面产生较大的空洞。

3 界面空洞形貌微观分析

利用Vhx-2000超景深显微镜对不锈钢/碳钢界

面进行分析。当轧制温度为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,如图6a所示,不锈钢和碳钢表面不可避免地部分氧化,形成脆性氧化物,在变形过程中,脆性氧化物破裂,从金属基体上脱离,经过腐蚀作用,在结合面表面形成沟状界面层,其最大深度可达 $36.570\text{ }\mu\text{m}$ 。说明此时碳钢与不锈钢之间并未产生实质结合,其中间层由金属基体碎粒、氧化物以及杂质组成,且中间存在孔隙。当轧制温度为 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,如图6b所示,中间层虽仍低于两侧金属,但深沟状形貌已经消失,高温下界面氧化物被分解^[12],界面图像仅保留有少量孔隙产生的空洞,且界面最大深度大幅减小至 $5.162\text{ }\mu\text{m}$,仅为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时界面最大深度的14%左右。当轧制温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,如图6c所示,界面平整,中间层没有空洞出现,界面最大深度仅为 $3.054\text{ }\mu\text{m}$,复合效果最好。由此可见,高温下材料的变形抗力降低,在轧制力作用下双金属更容易紧密接触,易于消除界面孔隙;

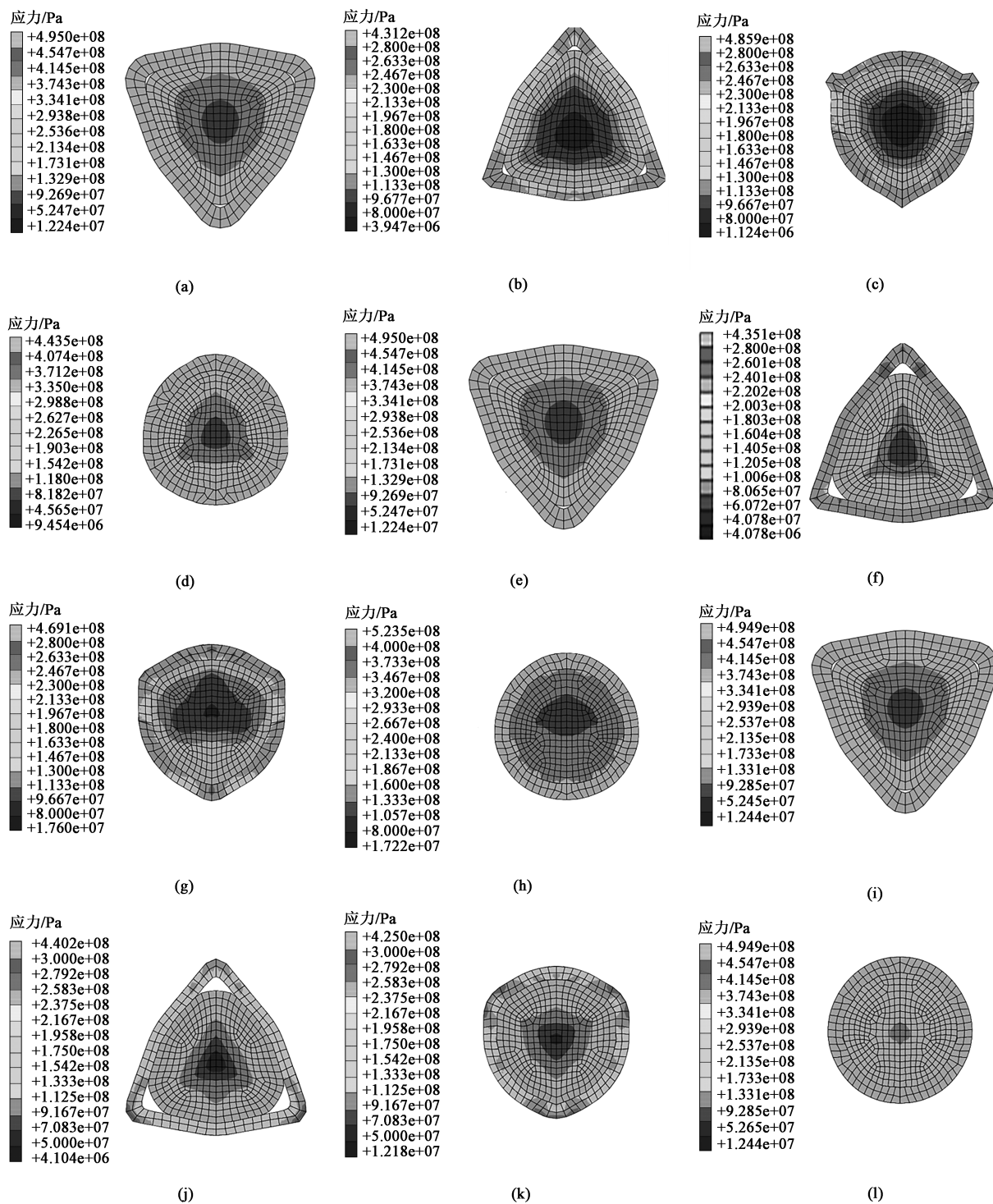


图 4 推/张力轧制出口处断面应力云图

- (a) 推力轧制, 第 1 道次 (b) 推力轧制, 第 2 道次 (c) 推力轧制, 第 3 道次 (d) 推力轧制, 第 4 道次 (e) 无推/张力轧制, 第 1 道次 (f) 无推/张力轧制, 第 2 道次 (g) 无推/张力轧制, 第 3 道次 (h) 无推/张力轧制, 第 4 道次 (i) 张力轧制, 第 1 道次 (j) 张力轧制, 第 2 道次 (k) 张力轧制, 第 3 道次 (l) 张力轧制, 第 4 道次

Fig. 4 Sections stress nephograms at exit of push/tension rolling

- (a) Push rolling, the first pass (b) Push rolling, the second pass (c) Push rolling, the third pass (d) Push rolling, the fourth pass (e) No push/tension rolling, the first pass (f) No push/tension rolling, the second pass (g) No push/tension rolling, the third pass (h) No push/tension rolling, the fourth pass (i) Tension rolling, the first pass (j) Tension rolling, the second pass (k) Tension rolling, the third pass (l) Tension rolling, the fourth pass

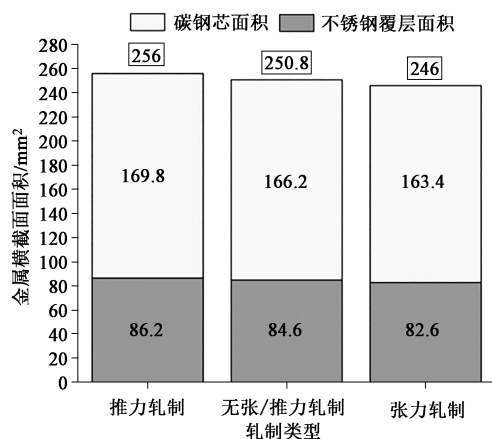


图 5 推/张力轧制下第 2 道次的金属横截面面积

Fig. 5 Cross-sectional area of metal at the second pass under push/tension rolling

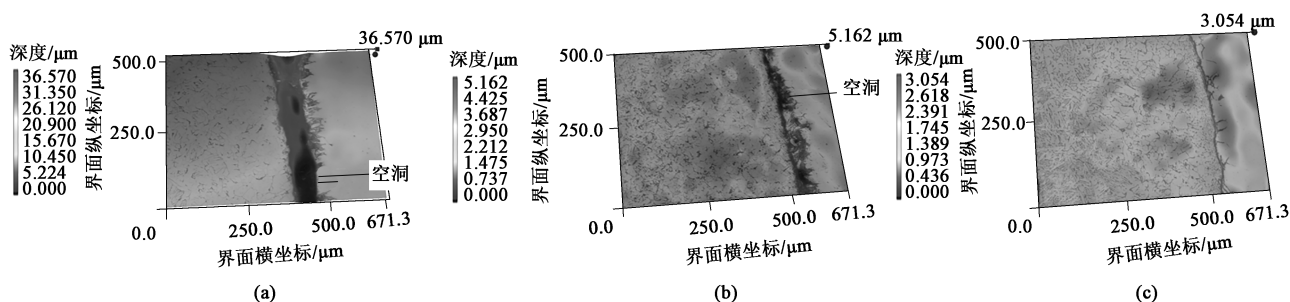


图 6 不同轧制温度下不锈钢/碳钢界面形貌

(a) 900 °C (b) 1050 °C (c) 1200 °C

Fig. 6 Interface morphologies of stainless steel/carbon steel under different rolling temperatures

力改变辊缝处质点的应力方向,促使覆层金属沿轧制方向延伸,减少覆层金属沿辊缝区域堆积,从而改善覆层厚度的均匀度。因此,采用微张力并辅以合适的孔型系统,能够获得壁厚均匀、圆度较好的复合产品。

(3) 高温高压下双金属更容易紧密接触,易于消除界面孔隙;同时促进界面上新相生成,导致界面的氧化物与杂质大量减少,提高双金属冶金结合强度。当轧制温度达到 1200 °C 时,金属界面产生熔融,中间层几乎没有空洞出现,界面最大深度仅为 3.054 μm,复合效果最好。

参考文献:

- [1] 张婷, 许浩, 李仲杰, 等. 层状金属复合材料的发展历程及现状 [J]. 工程科学学报, 2021, 43 (1): 67-75.
Zhang T, Xu H, Li Z J, et al. Development and present situation of laminated metal composites [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43 (1): 67-75.
- [2] 吴伟, 蔡庆伍, 余伟, 等. 耐腐蚀复合钢筋的生产工艺和技术 [J]. 轧钢, 2015, 32 (Z1): 135-138.
Wu W, Cai Q W, Yu W, et al. Production processes and technologies of corrosion resistant composite bar [J]. Steel Rolling,

同时促进界面新相生成,导致界面氧化物与杂质大量减少,提高冶金结合强度。

4 结论

(1) 在异种金属成形过程中,空洞形成是双金属材料特性以及塑性变形工艺等关键影响因素耦合作用的结果。空洞依次经历形成、发展、收缩 3 个阶段。不锈钢覆层并未受到内层金属的牵制,此时变形并未深入渗透到碳钢内部,二者变形不协同,很容易在辊缝处形成空隙;随着变形的深入,空洞继续扩大;在精整孔型中,空洞缺陷得到较好的抑制。

(2) 采用微张力轧制,导致覆层和芯部金属的接触面积减小,一定程度上致使空洞扩大。然而微张

2015, 32 (Z1): 135-138.

- [3] 刘宝玺, 林曾孟, 殷福星. 多级结构的金属材料强韧化机理研究进展 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (3): 49-61.
Liu B X, Lin Z M, Yin F X. Research on the strengthening and toughening mechanism of metallic materials with multiscale hierarchical structure [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (3): 49-61.
- [4] Xie X, Yin S, Raelison R, et al. Al matrix composites fabricated by solid-state cold spray deposition: A critical review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 86: 20-55.
- [5] 班慧勇, 梅懿潇, 石永久. 不锈钢复合钢材钢结构研究进展 [J]. 工程力学, 2021, 38 (6): 1-23.
Ban H Y, Mei Y X, Shi Y J, Research advances of stainless-clad bimetallic steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38 (6): 1-23.
- [6] Dhib Z, Guermazi N, Monique Gaspérini, et al. Cladding of low-carbon steel to austenitic stainless steel by hot-roll bonding: Microstructure and mechanical properties before and after welding [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 656: 130-141.
- [7] 余伟, 蔡庆伍, 吴伟, 等. 耐海水腐蚀不锈钢/碳钢复合带肋钢筋轧制技术 [A]. 第十一届中国钢铁年会 [C]. 北京: 2017.

(下转第 174 页)