

井下大功率电加热器连续轧制成形工艺

张万鹏^{1,2}, 张锦刚^{1,2}, 宋红兵^{1,2}, 周超^{1,2}, 谢航^{1,2}, 田小江^{1,2},
王效岗³, 邢煜林³

- (1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 陕西 西安 710018;
2. 中国石油集团宝石管业有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
3. 太原科技大学 高端重型机械装备研究院, 山西 太原 030024)

摘要: 井下大功率电加热器是电加热技术的核心装备, 国内尚未有制造技术成熟的生产单位。结合已有的管棒材轧制理论以及刚性电缆生产工艺, 提出一种井下大功率电加热器连续轧制工艺, 将金属板带卷管、粉末灌装以及连续轧制集合为一条生产线。通过试验以及有限元法, 针对外护套减径变形、填充氧化镁粉末轧实密度、等效屈服强度以及界面结合强度等关键影响因素展开研究。最终制备得到良好的电加热器, 其氧化镁粉末最大轧制密度约为 $2.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 等效屈服强度约为 120 MPa, 连续管与电加热器可实现有效结合, 机械结合力可达 3.4 MPa。

关键词: 氧化镁粉末; 连续轧制; 电加热器; 连续管; 复合材料

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.012

中图分类号: TG335.6⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 12-0098-09

Continuous rolling forming process of underground high-power electric heater

Zhang Wanpeng^{1,2}, Zhang Jingang^{1,2}, Song Hongbing^{1,2}, Zhou Chao^{1,2}, Xie Hang^{1,2}, Tian Xiaojiang^{1,2},
Wang Xiaogang³, Xing Yulin³

- (1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China;
2. CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co., Ltd., Baoji 721008, China;
3. High-end Heavy Machinery Equipment Research Institute, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Underground high-power electric heater is the core equipment of electric heating technology, and there is no production unit with mature manufacturing technology in China. Therefore, combining existing theories of tube and bar rolling with the production process of rigid cables, a continuous rolling process for underground high-power electric heater was proposed, and the metal strip coiling, powder filling and continuous rolling were combined into a production line. Then, through experiments and finite element methods, the key influencing factors such as diameter reduction deformation of outer sheath, rolling density of magnesium oxide powder filling, equivalent yield strength and interface bonding strength were studied to prepare a good electric heater. Its maximum rolling density of magnesium oxide powder was about $2.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and the equivalent yield strength was about 120 MPa. Furthermore, the continuous tube and the electric heater are effectively combined, and the mechanical bonding force reached 3.4 MPa.

Key words: magnesium oxide powder; continuous rolling; electric heater; continuous tube; compound material

电加热技术是我国中低熟度页岩油原位转化、煤炭地下干馏、富油煤等资源清洁开发先导试验的热点技术。我国中低成熟度页岩油原位转化潜力巨大, 但由于储层类型多样, 开采难度大, 且页岩气

多分布在人口高密度地区, 现有开采技术受到水资源消耗的严重制约。因此, 我国中低成熟度页岩油资源只能采用水平井体积压裂^[1] + 电加热技术方式^[2] 开采。在绿电消纳方面, 采用电加热技术逐步取代地面天然气加热炉, 可形成“风光发电——电加热器加热采油”的绿色、环保的运行机制, 符合国家双碳目标以及绿色发展战略。井下大功率电加热技术是利用电阻发热产生的热量, 为资源提供稳定持久的加热, 在井下长期服役中需要承受井下高温、高压以及氯离子、硫化氢等介质腐蚀, 对其可

收稿日期: 2024-08-13; 修订日期: 2024-11-17

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性技术攻关项目 (2022DJ1409)

作者简介: 张万鹏 (1976-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: bsgzwp@cnpc.com.cn

靠性要求很高, 应具有良好的耐压、耐腐蚀的特点, 在石油开采建设中起到了非常重要的作用。

目前, 国外壳牌、道达尔等能源公司早已开始了相关电加热技术及装备的研究, 投资数十亿美元进行试验, 建立了多个示范区进行技术验证, 掌握了井下大功率电加热器的制造核心技术, 掌握了金属板带、卷管纵焊技术, 可连续生产超长、大功率电加热器, 生产工艺稳定、效率高, 质量可靠^[3-8]。但国内尚未有成熟的井下大功率电加热器生产单位, 且国内电加热器金属护套为无缝钢管, 主要采用电热丝对焊方式, 将 9 m 长度钢管焊接延长到一定长度后进行多次拉拔、退火后卷取成盘, 其对接接头给可靠性带来严重隐患。另外, 国内对于大功率电加热器配套工具与控制系统的研究基础薄弱, 无成熟方案。而且国内尚无井下大功率电加热器相关标准, 不能有效指导电加热器的制造与性能评价^[9-16]。

由于目前国内油气生产装备严重依赖国外, 亟需开展井下大功率电加热器制造技术攻关。针对现有的技术, 本文提出一种新的井下大功率电加热器连续加工工艺, 包括矿物绝缘氧化镁粉末灌装、不锈钢带辊压成管、轧制复合和感应加热等主要部分。基于轧制理论对其中管材减径, 氧化镁等效屈服强度以及护套与连续管之间的结合强度等关键因素进行研究, 井下大功率电加热器的研制, 将为提高稠油采收率、开发页岩油资源提供技术、装备保障, 为实际生产提供一定的理论依据以及指导意义。

1 轧制成形理论以及计算模型

1.1 轧制成形理论

井下大功率电加热器采用 SUS304 不锈钢或者 2205 双相不锈钢作为外护套, 加热电芯作为内部芯棒, 在护套与芯棒之间填充压实的矿物绝缘氧化镁粉末。其连续轧制生产线主要包括氧化镁粉末灌装装置、钢带成管装置、感应加热、轧制装置以及收集装置, 整个生产工艺流程见图 1。

井下大功率电加热器由于其结构特殊, 轧制过程较为复杂, 不能将其视为管材减径或者棒材减径, 对此, 基于轧制理论, 建立了矿物绝缘电缆轧制成形计算模型。该刚性电缆轧制理论可为井下大功率电加热器生产制备提供一定的理论指导。

1.2 井下大功率电加热器计算模型

井下大功率电加热器的连续成形工艺中主要涉及管材塑性变形减径、粉末紧实以及复合轧制成形

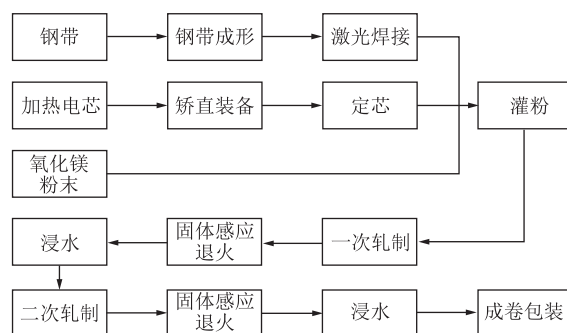


图 1 井下大功率电加热器生产工艺流程

Fig. 1 Production process flow of underground high-power electric heater

3 个部分, 整个复合材料的变形过程可以等效为 3 个部分, 分别为压实阶段、过渡阶段以及延伸阶段。

1.2.1 空心管轧制变形

在压实阶段, 可以视为外部钢护套在轧辊的作用下减径、内部氧化镁填充粉末逐步密实, 此时可看作外层金属的减径变形, 因此, 可以等效为空心管减径变形, 利用空心管力能参数公式进行计算^[17]。

空心管接触面积 F 的计算公式如下:

$$F = (0.8 \sim 0.85) b_i \sqrt{\frac{1}{2} (b_{i-1} - a_i) [D_{\min} - \frac{1}{2} (b_{i-1} - a_i)]} \quad (1)$$

式中: b_i 、 b_{i-1} 分别为本机架和上一机架的孔型宽度, mm; a_i 为本机架的孔型高度, mm; D_{\min} 为孔型槽底的最小直径, mm。

减径区的平均单位压力 P_1 为:

$$P_1 = \eta \sigma \frac{2h_0}{d_{pi}} \quad (2)$$

式中: η 为非接触区影响系数; σ 为轧件的变形抗力, MPa; h_0 为轧制前铜壁厚度, mm; d_{pi} 为本机架轧管区孔型高度平均值, mm。

其中:

$$\eta = 1 + 0.9 \times \frac{d_{pi}}{l'} \sqrt{\frac{h_0}{d_{pi}}} \quad (3)$$

式中: l' 为减径区长度, mm。

在过渡阶段中, 钢护套内表面与氧化镁粉末接触, 随着轧制过程的进行, 氧化镁此时逐渐达到最大相对密度。

1.2.2 延伸阶段变形计算

随后, 变形过程进入最后延伸阶段, 在该阶段复合材料可等效为棒材, 参照实心棒材的变形特点进行轧制力计算^[18]。

棒材轧制接触表面的水平投影面积 F_B 的计算公式如下:

$$F_B = d_{kl}^2 \xi \sqrt{A \left(\frac{1}{\omega} - 1 \right)} \quad (4)$$

式中: d_{kl} 为轧制后轧件的高度, mm; A 为轧辊转换直径, $A = D_0/H$, D_0 为轧辊直径, mm, H 为孔型高度, mm; ω 为压下系数; ξ 为参数。

$$\xi = \frac{u_k \delta_i}{\sqrt{2}} (1.62 - \delta_{i-1}) \left(1 + \frac{0.4}{u_k \delta_i} \right) \quad (5)$$

式中: δ_{i-1} 和 δ_i 分别为轧件在前后孔型中氧化镁粉末的充满度; u_k 为孔型轴比。

棒材轧制变形区的垂直平均单位压力 P 的计算公式如下:

$$P = 1.15 \sigma n_\sigma \quad (6)$$

式中: n_σ 为轧件的应力状态系数。

对式 (6) 分析可以发现, 在延伸阶段将电加热器视为棒材后, 材料的屈服强度 R_{eL} 受到 3 部分影响, 因此, 对于井下大功率电加热器而言, 此时的变形抗力可以分为 3 个部分, 分别是电加热器护套变形抗力 $\sigma_{\text{护套}}$ 、氧化镁变形抗力 $\sigma_{\text{氧化镁}}$ 以及加热芯棒变形抗力 $\sigma_{\text{芯棒}}$ 。由于电加热器在实际加工时是长距离连续成形, 可在计算时视作无限长, 所以, 护套、氧化镁以及芯棒之间的体积比等效为截面面积之比, 根据各自截面所占的面积百分比, 计算整个电加热器的变形抗力, 计算公式如下:

$$\sigma_{\text{总}} = \sigma_{\text{护套}} \times \frac{S_{\text{护套}}}{S_{\text{总}}} + \sigma_{\text{氧化镁}} \times \frac{S_{\text{氧化镁}}}{S_{\text{总}}} + \sigma_{\text{芯棒}} \times \frac{S_{\text{芯棒}}}{S_{\text{总}}} \quad (7)$$

式中: $S_{\text{护套}}$ 、 $S_{\text{氧化镁}}$ 、 $S_{\text{芯棒}}$ 和 $S_{\text{总}}$ 分别为电缆纵截面的护套面积、氧化铁面积、芯棒面积和总面积, mm^2 。

2 有限元轧制模型

利用 ABAQUS 有限元模拟软件建立多种轧制模型, 为简化计算, 将轧辊设置为刚体, 将管材模型定义为变形体, 将仅考虑轧制时的作用力, 模型仅有一对刚体轧辊与变形体管材, 具体 304 不锈钢材料的屈服强度为 205 MPa, 密度设置为 $7.89 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 所有模型外形尺寸单位为 mm。

2.1 连续管单道次轧制

金属带材经过辊压成管工艺以及连续焊接工艺后, 形成连续管, 方便矿物绝缘粉末灌装, 经过后期轧制, 使得填充粉末逐步密实。为分析管材在减径过程中的变化趋势, 设计建立二辊单道次有限元轧制模型, 材料选择 304 不锈钢, 直径为 $\Phi 25.4 \text{ mm}$, 壁厚为 1.1 mm , 设计减径率分别为 1%~4%, 孔型分别为

圆孔与椭圆孔, 轧制速度选取 $6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 并转化为角速度, 轧辊直径为 $\Phi 80 \text{ mm}$, 辊缝设置为 1 mm 。建立的二辊轧机模型如图 2 所示。

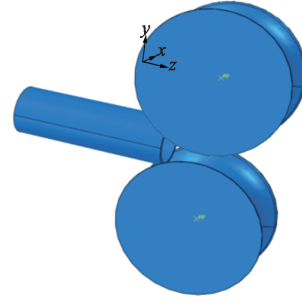


图 2 二辊轧制模型

Fig. 2 Two-roller rolling model

2.2 井下大功率电加热器轧制

将电加热器的导体芯棒视为氧化镁变形体, 组成外层钢护套、内层氧化镁的结构, 设置为变形体, 并进行装配, 模型如图 3 所示, 连续轧制模型每道次减径率设置为 2%。设置 3 种不同密度的氧化镁进行模拟计算。



图 3 二辊连续轧制有限元模型

Fig. 3 Finite element model of two-roller continuous rolling

2.3 连续管与电加热器复合轧制

考虑到电加热器在服役过程中需要承受井下高压、高温等严苛环境, 为增加其可靠性, 现设计在电加热器外新增一层不锈钢护套, 如图 4 所示, 以增加井下大功率电加热器的使用寿命。

选取连续管护套材料为 304 不锈钢, 直径为 $\Phi 15 \text{ mm}$, 壁厚为 1 mm ; 电加热器护套材料选择紫铜, 直径为 $\Phi 15 \text{ mm}$, 壁厚为 1 mm ; 由于氧化镁粉末是由许多颗粒构成的, 是一个非连续体, 但是相关非连续介质力学的基础还不完善, 故将其设为连续体; 电加热器芯棒材料选择紫铜, 直径为 $\Phi 8 \text{ mm}$, 每道次轧制减径率为 2%, 建立的轧制模型如图 5 所示。连续管护套与电缆之间的接触设置为罚接触, 摩擦因数设置为 0.15。

3 实验方案

氧化镁粉末作为电加热器中必不可少的绝缘材料, 其在轧制过程的变形复杂。由于粉末是由众多

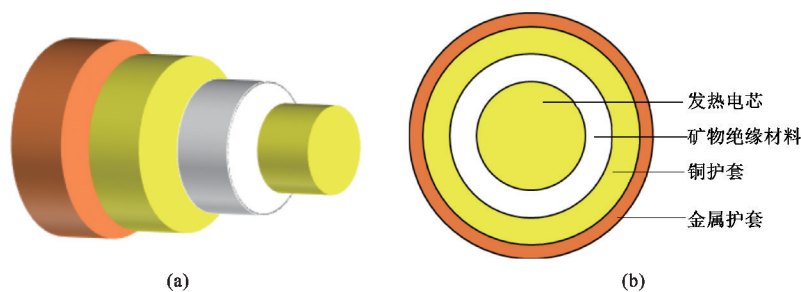


图 4 连续管与电加热器复合结构示意图
(a) 正视图 (b) 侧视图

Fig. 4 Schematic diagrams of composite structure for continuous tube and electric heater
(a) Front view (b) Side view



图 5 8 机架连续轧制模型
Fig. 5 Eight-stand continuous rolling model

微小颗粒组成，在理论计算中，需要对其等效屈服强度进行测算，分析粉末等效屈服强度对于提高井下大功率电加热器的精度以及质量是很有必要的。

3.1 氧化镁屈服强度测量试验方案

首先，取外径为 $\Phi 15\text{ mm}$ 、壁厚为 1 mm 的铜管以及 $\Phi 7\text{ mm}$ 的铜棒分别作为井下大功率电加热器的护套以及芯棒，长度均为 100 mm 。然后，准备一定的氧化镁粉末，将芯棒穿过铜管，保证芯棒在铜管中央，将氧化镁粉末填入缝隙内部。最后，将制备好的电加热器经过相同减径率的轧制，测得相应的轧制力，通过现有的棒材轧制力计算公式，得到相应的屈服强度，初始参数见表 1。

表 1 初始材料参数

Table 1 Initial material parameters

参数	质量/g	灌装长度/mm	灌装面积/ mm^2	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
数值	19.4	93	94.2	2.21

使用万能试验机进行拉拔试验，保证减径率达到 20%，将拉拔后的试样经过单机架减径轧制，轧辊直径为 $\Phi 95\text{ mm}$ ，辊型为圆孔型，减径率为 2%，测量轧制力。

3.2 氧化镁配比试验方案

采用一定颗粒比例配比的氧化镁粉体可以提高其在电加热器内部填充时的堆积密度，提高其使用性能，因此，确定合适的比例尤为重要。取直径为 $\Phi 14\text{ mm}$ 、长度为 1 mm 的紫铜管进行氧化镁配比灌

装试验，具体比例见表 2。

表 2 氧化镁颗粒配比

Table 2 Magnesium oxide particle ratios

编号	颗粒尺寸				
	60 目	80 目	100 目	140 目	200 目
1	—	10	—	—	—
2	4	2	2	1	1
3	3	3	2	1	1
4	2	2	3	2	1
5	—	—	—	—	10

首先，选取一定长度的铜管，对其一端封闭，从另一侧灌装不同配比的氧化镁粉且振实，每次灌粉质量通过称量得出，测量铜管的总长以及封口处长度，计算初始灌装密度。然后，对已灌装好的铜管进行拉拔试验，前后减径量约为 20%，根据拔后管径长度，计算拔后氧化镁密度。最后，将拔后的铜管，经过二辊轧机轧制，通过测试轧制力的大小，计算氧化镁达到一定密度后的屈服强度。

3.3 连续管护套与电加热器复合轧制实验

根据模拟结果，制备连续管护套与电加热器复合轧制试样，具体试验方案如下：用 304 不锈钢无缝连续管与电加热器组合，制备复合轧制试样，其中 304 不锈钢无缝连续管的外径为 $\Phi 16\text{ mm}$ ，壁厚为 1 mm ；电加热器外径为 $\Phi 13.8\text{ mm}$ ，使用 8 机架连续轧制设备进行试验。

4 结果与讨论

4.1 连续管单道次轧制模拟结果

对轧辊设置的参考点提取反力，测得轧制过程中不同减径率与孔型下的轧制力，结果见表 3。从表 3 中可以看出，对于二辊管材轧制而言，圆孔型相较于椭圆孔型，产生的轧制力相对较小。

表 3 二辊轧制力测量结果 (N)

Table 3 Test results of two-roller rolling force (N)

减径率/%	圆孔	椭圆孔
1	1606	2158
2	1959	2610
3	2215	2946
4	2556	3325

图 6 为二辊不同减径率下圆孔型的管材截面应力云图。从图 6 中可以看出,随着轧辊减径率的增加,管材形变量增加,当减径率为 3% 时 (图 6c),此时管材周向等效应力达到最大;当减径率达到 4% 时 (图 6d),管材在轧制力的作用下沿着辊缝方向流动,表明在该减径率下材料更容易产生应力集中。

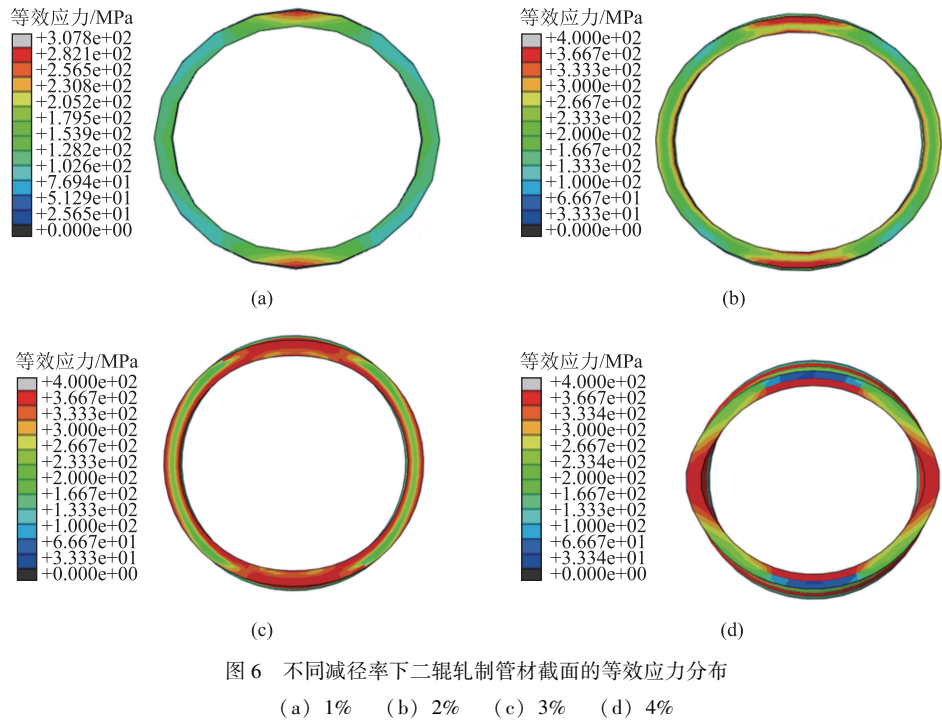


Fig. 6 Equivalent stress distributions on cross-sections of pipe under different diameter reduction rates by two-roller rolling

4.2 氧化镁的等效屈服强度

成品井下大功率电加热器在连续轧制过程中,其重要的绝缘性能由矿物填充粉末的密度决定,研究其密实度有较大意义。采用等效思想将电加热器护套、绝缘粉末以及导电芯棒作为整体考虑,在整个轧制过程中,将氧化镁粉末视作具有一定屈服强度的连续体,整体变形过程可视为棒材轧制变形。

将制备好的电加热器经过相同的减径拉拔工艺,使得内部氧化镁达到一定的密度 (2.80 g · cm⁻³),并将拉拔后的管材进行 2% 减径轧制试验,利用安装在机架上的测力传感器测得实时轧制力约为 9850 N;然后,利用测得的轧制力与式 (7) 计算得到氧化镁的屈服强度约为 120 MPa。

4.3 电加热器氧化镁不同密度下的等效屈服强度

轧制后不同氧化镁粉末配比条件下的铜管轧制力以及氧化镁等效屈服强度的计算结果 (取紫铜的屈服强度为 60 MPa) 如表 4 和表 5 所示。

表 4 试验参数统计结果

Table 4 Experimental parameters statistic results

试验方案	灌粉长度 l_1/mm	灌粉质量 m/g	灌粉密度 $\rho_1/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	拔后长度 l_2/mm	拔后密度 $\rho_2/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	90	21.0	2.06	119	2.77
2	91	22.2	2.15	121	2.88
3	89	20.9	2.14	115	2.82
4	87	21.0	2.18	114	2.89
5	88	20.9	2.09	119	2.76

试验结果显示,方案 4 中氧化镁配比条件下具有较好的振实密度,以及在经过轧制后具有较高的屈服强度。这是由于氧化镁的结晶密度一般为 3.58 g · cm⁻³,但是由于在灌装后颗粒大小不同,因此,存在一定的孔隙,且灌装完成后的电加热器在经过后续拉拔后其内部粉末会在模具的作用下进一步碎化,使得最终密度达到接近实际结晶密度的 70%~80% 左右。

表 5 氧化镁的等效屈服强度

Table 5 Equivalent yield strength of magnesium oxide

试验方案	轧制力实测值/kg	轧制力换算/N	总屈服强度/MPa	计算 MgO 屈服强度/MPa
1	945.7	9457	95.58	115.6
2	974.3	9743	98.59	120.3
3	972.6	9726	98.40	120.0
4	987.4	9874	99.87	122.3
5	966.7	9667	97.76	119.6

对模型中的氧化镁设置 3 种不同密度，进行轧制模拟实验，提取每道次的轧制力，并绘制不同密度下的轧制力曲线，如图 7 所示。

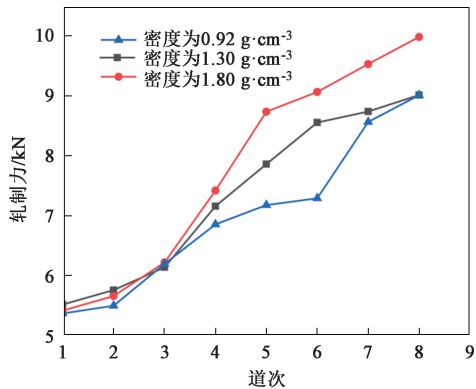


图 7 不同氧化镁密度下的轧制力曲线

Fig. 7 Rolling force curves at different densities of magnesium oxide

从图 7 中可以看出，随着轧制道次的增加，氧化镁逐步密实，电加热器的轧制力随着轧制道次的增加而增加。基于仿真结果，当电加热器经过 8 道次轧制后，其轧制力约为 9600 N 左右，与实验结果接近，此时氧化镁的等效屈服强度约为 125.6 MPa，验证了计算结果的准确性。

4.4 连续管与电加热器复合轧制

连续管与电加热器复合轧制模拟结果如 8 所示，图 8a~图 8h 分别为 8 个机架的变形情况。对比每道次轧制过程中的电缆变化情况可以发现，随着轧制道次的增加，电缆逐渐趋于稳定轧制阶段，应力相对减小，主要变形量存在于连续管护套和电缆外表面之间。

从图 8 中可以发现，随着轧制道次的增加，连续管护套与电加热器护套的壁厚逐渐减小，最终轧制结果如图 9 所示。对有限元结果取截面图进行分析测量，测量结果取平均值，相关结果如表 6 所示。从表 6 中数据可以看出，轧制前后护套与电加热器的断面收缩率分别为 69%与 72%，表明护套与电加热器的协调变形情况良好。图 10 为轧制后复合材料的截面应力云图与应变云图，从图 10 中可以看出，轧制后护套与电加热器均匀变形，应变相同，因此，判断连续管与电加热器二者形成机械结合，且情况良好。

根据有限元模拟结果，设计相应的复合材料轧制试验，试验结果如图 11 所示，连续管外护套

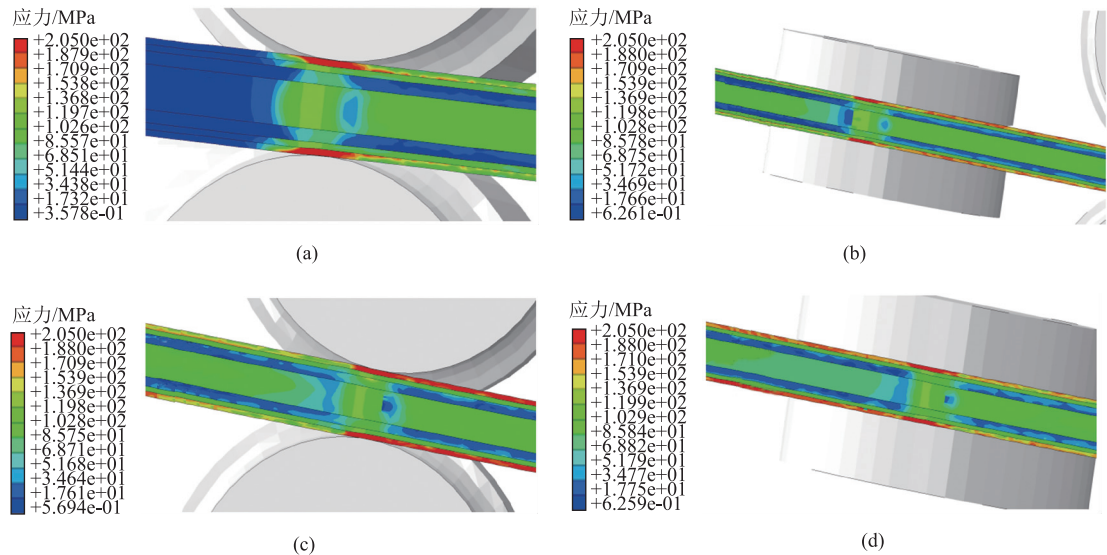


图 8 各道次轧制变形情况

(a) 第 1 机架 (b) 第 2 机架 (c) 第 3 机架 (d) 第 4 机架 (e) 第 5 机架 (f) 第 6 机架 (g) 第 7 机架 (h) 第 8 机架

Fig. 8 Rolling deformation condition of each pass

(a) The first stand (b) The second stand (c) The third stand (d) The fourth stand (e) The fifth stand (f) The sixth stand (g) The seventh stand (h) The eighth stand

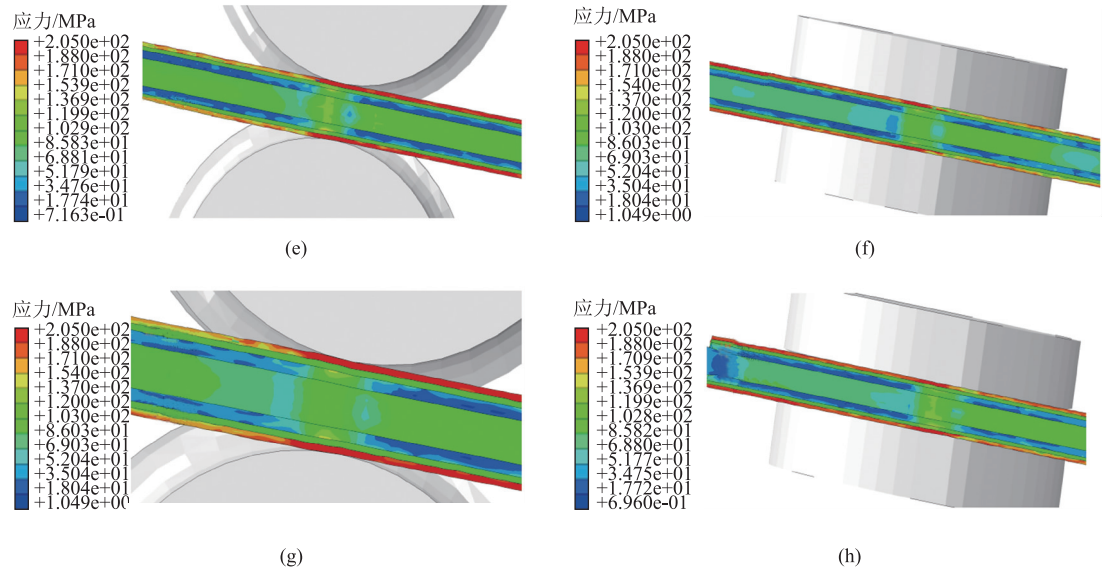


图 8 (续)



图 9 轧制完成后的应力云图
Fig. 9 Stress nephogram after rolling

与电加热器结合情况良好，对其进行界面结合强度检测，试验采用时代试金万能试验机，夹持端的上端采用管专用夹具。

参照 CJ/T 192—2017^[19] 和 SY/T 6623—2018^[20]，规定的机械结合力为 0.2~0.5 MPa^[21]。拉伸过程中的试验力最大值约为 13.12 kN，试验结果见图 12，经过计算可得，界面结合强度约为 3.4 MPa，远高于规定数值，说明外加护套连续管轧制试验较为成功。

表 6 轧制前后复合材料尺寸变化

Table 6 Dimensional changes of composite materials before and after rolling

参数	初始尺寸						轧后尺寸								断面收缩率/%	
	长度/ mm	护套 外径/ mm	护套 壁厚/ mm	护套 面积/ mm ²	电缆 外径/ mm	电缆 面积/ mm ²	护套 长度/ mm	电缆 长度/ mm	护套 外径/ mm	护套 壁厚/ mm	护套 面积/ mm ²	电缆 外径/ mm	电缆 面积/ mm ²	护套	电 加 热器	
数值	200.00	Φ15.00	1.00	175.84	Φ13.00	530.66	279.46	279.49	Φ12.72	0.82	122.49	Φ11.085	385.87	69	72	

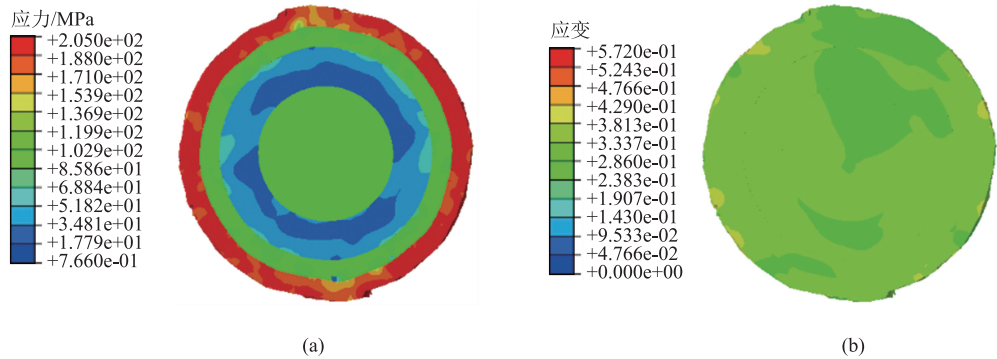


图 10 轧制完成后的截面应力云图 (a) 与应变云图 (b)
Fig. 10 Stress nephogram (a) and strain nephogram (b) of section after rolling



图 11 复合试验实物图

Fig. 11 Actual picture of composite experiment

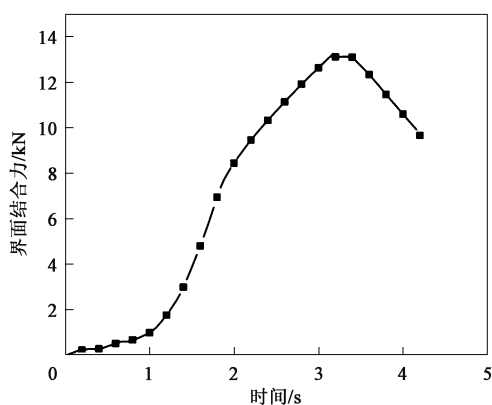


图 12 复合试验界面结合力曲线

Fig. 12 Interface bonding force curve of composite experiment

5 结论

(1) 对管材轧制变形展开相关研究, 通过分析轧制孔型与减径率对管材截面的影响, 发现当减径率为 3% 时, 管材变形良好。

(2) 采用等效思想, 建立关于氧化镁屈服强度的计算模型。通过仿真与试验结果对比, 对建立的计算模型进行验证, 结果与模型基本符合, 氧化镁最终轧实后, 等效屈服强度约为 120 MPa。通过灌装氧化镁不同颗粒配比的轧制试验, 得到最佳氧化镁颗粒配比下的氧化镁粉末在压实后屈服强度能达到 122.3 MPa。

(3) 对连续管护套与电加热器进行复合轧制试验与模拟, 建立有限元模型, 通过试验与有限元的验证, 经过轧制的复合材料具有良好的机械结合力, 可达 3.4 MPa。

参考文献:

[1] 许宁, 张俊杰, 叶锋, 等. 非常规油藏蓄能体积压裂的合理压裂

规模研究 [J]. 石油地质与工程, 2024, 38 (2): 97-101.

Xu N, Zhang J J, Ye F, et al. Research on the reasonable fracturing scale of energy storage volume fracturing in unconventional oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2024, 38 (2): 97-101.

[2] 张万鹏, 张锦刚, 宋红兵, 等. 井下大功率电加热器制造工艺与应用 [J]. 焊管, 2023, 46 (9): 33-40, 48.

Zhang W P, Zhang J G, Song H B, et al. Manufacturing process and application of underground high-power electric heaters [J]. Welded Pipe, 2023, 46 (9): 33-40, 48.

[3] 胡文瑞. 中国石油非常规油气业务发展与展望 [J]. 天然气工业, 2008 (7): 5-7, 129-130.

Hu W R. Development and prospect of china petroleum's unconventional oil and gas business [J]. Natural Gas Industry, 2008 (7): 5-7, 129-130.

[4] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (4): 385-399, 454.

Zou C N, Zhang G S, Yang Z, et al. Concept, characteristics, potential, and technology of unconventional oil and gas; A discussion on unconventional oil and gas geology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40 (4): 385-399, 454.

[5] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25 (2): 1-13.

Li G X, Zhu R K. The current situation, challenges, and concerns of unconventional oil and gas development in China petroleum [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (2): 1-13.

[6] 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 等. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27 (1): 1-11.

Li G X, Lei Z D, Dong W H, et al. Progress, challenges, and prospects of china petroleum's unconventional oil and gas development [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27 (1): 1-11.

[7] 唐崇健. 矿物绝缘电缆生产线的兴建与改造 [J]. 电线电缆, 2003 (6): 15-18.

Tang C J. Construction and renovation of mineral insulated cable production line [J]. Wire and Cable, 2003 (6): 15-18.

[8] 孙江河. 国内外中低熟页岩油原位改质机理研究进展 [J]. 石化技术, 2022, 29 (5): 144-146.

Sun J H. Research progress on insitu upgrading mechanism of medium low maturity shale oil at home and abroad [J]. Petrochemical Technology, 2022, 29 (5): 144-146.

[9] 薛华庆, 杜发平, 徐文林. 油页岩电加热原位开采技术研究进展 [J]. 天然气技术, 2010, 4 (1): 18-20, 77.

Xue H Q, Du F P, Xu W L. Research progress on insitu electric heating mining technology for oil shale [J]. Natural Gas Technology, 2010, 4 (1): 18-20, 77.

[10] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45 (4): 537-545.

Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H. The connotation and strategic position of insitu transformation of shale oil underground [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4): 537-545.

(下转第 120 页)