

# 工艺参数对楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比的影响

彭文飞<sup>\*1,2</sup>, 朱健<sup>1,2</sup>, 束学道<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 宁波 315211)

**摘要:** 借助 ANSYS/LS-DYNA 软件, 建立楔横轧层合轴有限元模型, 根据四因素三水平的正交实验进行部分厚径比轧制实验。通过有限元数值模拟, 分析工艺参数成形角、展宽角、断面收缩率和轧制温度对厚径比的影响规律。结果表明: 轧制实验结果和有限元模拟的结果相符合, 有限元模型可以用来预测厚径比。厚径比随着展宽角的增大先迅速下降, 后缓慢下降; 随着轧制温度的增大先增加, 后缓慢增加; 随着断面收缩率的增大先缓慢增加, 后趋于平缓; 随着成形角的增大变化不明显。对厚径比的影响主次为: 展宽角、轧制温度、断面收缩率、成形角。研究结果有助于指导层合轴覆材厚度和基材半径尺寸的调控与设计。

**关键词:** 层合轴; 厚径比; 工艺参数; 楔横轧; 影响分析

**中图分类号:** TB331; TG335.19

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3851(2017)01-0160-08

## Influence of process parameters on thickness-radius ratio of cross-wedge rolling of laminated shaft of 42CrMo/Q235 composites

PENG Wenfei<sup>\*1,2</sup>, ZHU Jian<sup>1,2</sup>, SHU Xuedao<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** By using ANSYS/LS-DYNA software, the finite element (FE) model of cross-wedge rolling of laminated shafts was established. Some thickness-radius ratio rolling experiments were carried out under the orthogonal experimental designed with four factors and three levels. Through finite element simulation, the effect of process parameters including forming angle, spreading angle, area reduction and rolling temperature on thickness-radius ratio were analyzed. The results show that the rolling experimental results accord with the simulation results, which shows that finite element model can be used to predict thickness-radius ratio. With the increase of spreading angle, the thickness-radius ratio sharply decreases first and then slowly decreases. With the increase of temperature, the thickness-radius ratio strengthens first and then slowly strengthens. With the increase of area reduction, the thickness-radius ratio slowly strengthens first and then changes little. With the increase of forming angle, the thickness-radius ratio change is not obvious. The influencing sequence on the thickness-radius ratio is spreading angle, rolling temperature, area reduction and forming angle in turn. The research results contribute to control and design clad material thickness and matrix material radius size of laminated shaft.

**Keywords:** laminated shaft; thickness-radius ratio; process parameters; cross-wedge rolling; influence analysis

收稿日期: 2016-01-11; 录用日期: 2016-03-14; 网络出版时间: 2016-03-31 08:33

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160331.0833.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(51405248; 51475247); 国际科技合作项目(CB11-13); 浙江省新苗计划资助项目(2015R405073)

通讯作者: 彭文飞, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为塑性成形工艺与装备, 复合材料成形技术 E-mail: pengwenfei@nbu.edu.cn

引用格式: 彭文飞, 朱健, 束学道. 工艺参数对楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(1): 160-167.

PENG W F, ZHU J, SHU X D. Influence of process parameters on thickness-radius ratio of cross-wedge rolled of laminated shaft of 42CrMo/Q235 composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(1): 160-167 (in Chinese).

轴类零件多处于高温高压等恶劣环境, 容易发生轴的磨损或断裂等问题, 给设备和工作者的安全带来隐患<sup>[1-2]</sup>。传统思路是选用性能优异的高温合金、不锈钢等新材料<sup>[3]</sup>, 但成本昂贵。层合轴通过覆层材料选择耐高温、耐磨的合金钢, 基层材料选择韧性好、成本低的普碳钢, 利用楔横轧在高温和高轧制力上的优势, 满足了层合轴焊得上和焊得好的要求, 实现了层合轴能够在复杂环境工作以及成本降低的要求。基于此, 本文选择楔横轧层合轴的解决思路。

目前, 国内外对楔横轧的研究主要集中在单层金属轴上, 例如 T91<sup>[4]</sup>、6061 铝合金<sup>[5]</sup>、25CrMo4<sup>[6]</sup>、21-4N<sup>[7]</sup>、4Cr9Si2<sup>[8]</sup>、45 #<sup>[9]</sup> 等。对楔横轧层合轴的相关研究却较少。课题组刘文萍等<sup>[10]</sup>通过有限元模拟, 对楔横轧同种材料层合轴展宽段应力进行了分析, 验证了楔横轧同种材料层合轴的可行性; 张建华等<sup>[11]</sup>通过有限元模拟对楔横轧层合轴界面结合机制进行了研究, 为改善层合轴界面处的结合质量提供了理论依据。由于层合轴厚径比(覆材厚度对基层半径的比值)直接影响到覆材厚度和基材半径的分配关系, 是楔横轧层合轴能顺利保证力学性能和减低成本的前提。然而, 对于楔横轧层合轴的厚径比研究却少有报道, 并且不同材料层合轴厚度分配关系不明确。在实际情况中, 工艺参数是影响层合轴的覆材厚度和基材半径分配的关键因素。因此, 有必要讨论工艺参数对层合轴厚径比的影响。

为较好地研究层合轴厚度分配关系, 本文建立楔横轧层合轴有限元模型, 通过实验验证该模型的合理性, 并根据该有限元模型分析工艺参数对厚径比的影响规律。

1 有限元模型的建立

1.1 材料应力-应变曲线

覆层材料选择高强度钢 42CrMo, 基层材料选择普碳钢 Q235。引用文献[12-13]中的数据, 在此基础上利用 Gleeble -3500 型热模拟实验机补充若干实验, 获得在轧制温度( $T$ )950~1 150 °C、应变速率( $\dot{\epsilon}$ )分别为 0.1~50 s<sup>-1</sup>和 0.1~20 s<sup>-1</sup>下得到 42CrMo 和 Q235 的真应力-应变曲线如图 1 和图 2 所示。

1.2 轧制模型的简化

楔横轧层合轴的成形过程是一个复杂的多体接

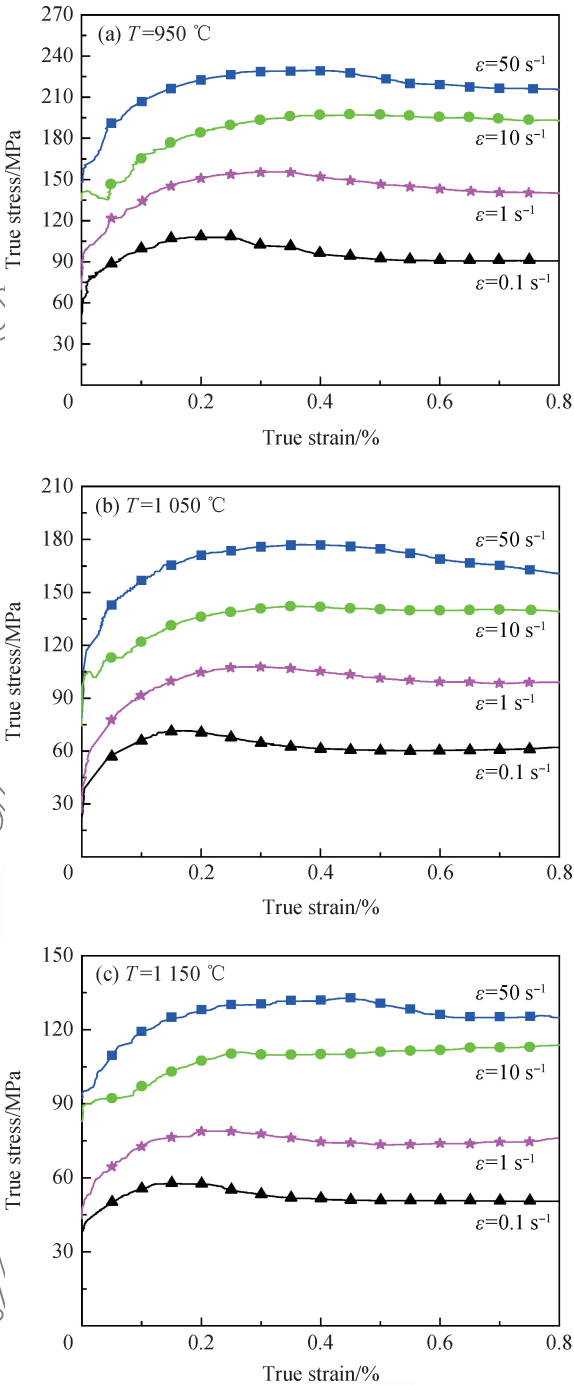


图 1 42CrMo 真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves of 42CrMo

触弹塑体大变形过程, 既存在径向压缩和轴向延伸变形, 又存在横向扩展变形, 而且其边界为复杂的非线性边界条件。建立有限元分析模型时, 需充分考虑上述多种因素, 才能较真实地描述层合轴成形过程<sup>[14-16]</sup>。为此, 作出假设: (1) 忽略模具的弹性变形与局部压扁变形, 将模具视为刚性体, 覆材、基材视为柔性体; (2) 轧制过程是在很短时间内完

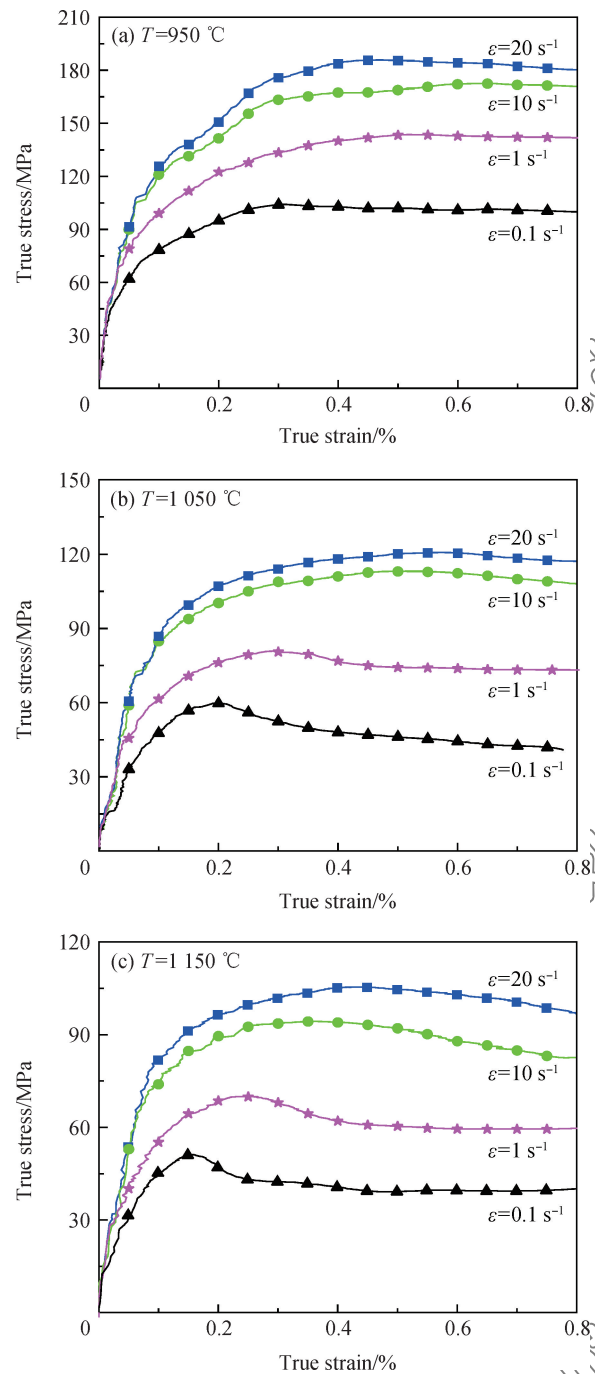


图 2 碳钢 Q235 真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of steel Q235

成，认为轧件在轧制时温度保持恒定；(3) 由于轧件具有对称性，取轧件的 1/2 进行计算，并在对称面上给予轴向位移约束；(4) 覆材与模具的接触类型为表面对表面的自动接触模型 (ASTS)，模具为目标面，覆材表面为接触面，两者之间的摩擦取静摩擦因子为 0.45，动摩擦因子为 0.3；(5) 覆材与基材的接触属于柔体对柔体的接触，采用粘结法，将

两层金属粘在一起，在轧制过程中不产生相对滑动。

楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴有限元模型如图 3 所示。

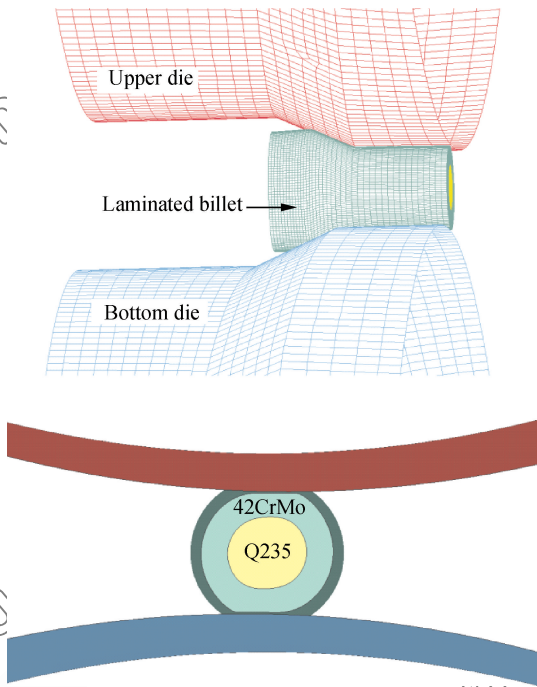


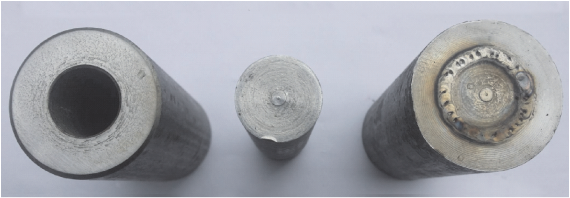
图 3 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴有限元模型

Fig. 3 Finite element model of cross-wedge rolling for 42CrMo/Q235 composite laminated shaft

## 2 实验验证有限元模型

为了验证有限元模型的正确性，根据有限元模拟的工艺参数设置了轧制实验。将层合轴的覆材和基材小过盈配合，在层合轴的两侧端面处焊接起来，覆材和基材组装如图 4 所示。

将坯料在中频加热炉中依次按表 1 所列温度加热，放入如图 5 所示的 H630 楔横轧机 (宁波大学浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室) 上进行轧制。将获得的轧件沿轴向线切割，制备成金相实验试件。



(a) 42CrMo (b) Q235 (c) 42CrMo/Q235

图 4 覆材和基材组装

Fig. 4 Assembly of clad and matrix materials

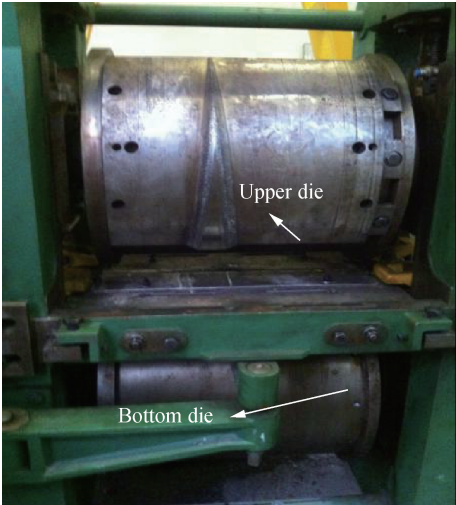


图 5 H630 楔横轧机  
Fig. 5 H630 cross-wedge rolling mill

使用水砂纸由粗到细研磨试件切割面、抛光、清洗, 用 4% 硝酸液对试件进行腐蚀, 显现出结合界面, 如图 6 所示。通过游标卡尺测量轧件的覆材厚度和基材半径, 获得厚径比, 与在相同参数下有限元数值模拟数据进行比较, 结果如表 1 所示。由

表 1 中误差  $\delta$  发现, 有限元计算数据和实验数据最大误差在 6% 以内, 建立的有限元模型可以用来分析厚径比。



图 6 线切割后经处理的 42CrMo/Q235 复合材料轧件  
Fig. 6 Disposed 42CrMo/Q235 composite laminated shaft after wire-cutting

表 1 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比的有限元模拟与实验方案及结果

Table 1 Projects and results of finite element simulation and experiment on thickness-radius ratio of cross-wedge rolling for 42CrMo/Q235 composites laminated shafts

| Item | Forming angle $\alpha/(^{\circ})$ | Spreading angle $\beta/(^{\circ})$ | Area reduction $\Psi/\%$ | Rolling temperature $T/^{\circ}\text{C}$ | Experiment thickness-radius ratio | Simulation thickness-radius ratio | Error $\delta/\%$ |
|------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1    | 30                                | 5                                  | 50                       | 1 150                                    | 0.764                             | 0.790 0                           | 3.29              |
| 2    | 27                                | 3                                  | 55                       | 1 150                                    | 0.837                             | 0.861 3                           | 2.82              |
| 3    | 30                                | 3                                  | 60                       | 1 050                                    | 0.818                             | 0.864 3                           | 5.36              |

3 厚径比影响分析

3.1 显著性分析

以厚径比作为实验指标, 选择成形角  $\alpha$ 、展宽角  $\beta$ 、断面收缩率  $\Psi$  及轧制温度  $T$  作为考察因素, 每个因素选择三个水平, 列出实验方案, 并利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元模拟软件针对实验组进行有限元模拟, 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比有限元模拟正交实验设计方案及结果如表 2 所示。

楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴成形角、展宽角、断面收缩率和轧制温度的方差分析如表 3 所示, 由计算的  $F$  值与查临界值表比较可判断, 展宽角  $\beta$  对厚径比影响显著性较高, 轧制温度  $T$  对厚径比影响显著性次之, 断面收缩率  $\Psi$  对厚

径比影响显著性较低, 成形角  $\alpha$  对厚径比影响不显著。

3.2 工艺参数对厚径比的影响

在表 2 中的 9 组实验中, 因为每个因素在各水平出现的次数是相同的, 每个因素对厚径比的影响是对等的, 所以各因素的厚径比之和的差异就可以用来反映因素在各水平上的差异, 对于每个因素, 以水平数为横坐标, 每组厚径比之和  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为纵坐标, 可得出各个因素对厚径比的影响趋势图。

3.2.1 成形角

图 7 为成形角在  $24^{\circ} \sim 30^{\circ}$  下对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响。由图 7(a) 可知, 成形角在  $24^{\circ} < \alpha < 27^{\circ}$  时, 厚径比随

表 2 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比有限元模拟正交实验设计方案及结果

Table 2 Projects and results of orthogonal experimental design on thickness-radius ratio of cross-wedge rolling for 42CrMo/Q235 composites laminated shafts by finite element simulation

| Item    | Forming angle $\alpha/(^{\circ})$ | Spreading angle $\beta/(^{\circ})$ | Area reduction $\Psi/\%$ | Rolling temperature $T/^{\circ}\text{C}$ | Matrix material radius/mm                               | Clad material thickness/mm | Simulation thickness-radius ratio |
|---------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1       | 24                                | 3                                  | 50                       | 950                                      | 7.611 30                                                | 6.363 05                   | 0.836 0                           |
| 2       | 24                                | 5                                  | 55                       | 1 050                                    | 7.532 30                                                | 5.943 0                    | 0.789 0                           |
| 3       | 24                                | 7                                  | 60                       | 1 150                                    | 6.970 97                                                | 5.475 70                   | 0.785 5                           |
| 4       | 27                                | 3                                  | 55                       | 1 150                                    | 7.217 00                                                | 6.216 06                   | 0.861 3                           |
| 5       | 27                                | 5                                  | 60                       | 950                                      | 6.965 24                                                | 5.408 51                   | 0.776 5                           |
| 6       | 27                                | 7                                  | 50                       | 1 050                                    | 7.869 70                                                | 6.099 00                   | 0.775 0                           |
| 7       | 30                                | 3                                  | 60                       | 1 050                                    | 6.623 51                                                | 5.724 70                   | 0.864 3                           |
| 8       | 30                                | 5                                  | 50                       | 1 150                                    | 7.762 80                                                | 6.132 60                   | 0.790 0                           |
| 9       | 30                                | 7                                  | 55                       | 950                                      | 7.487 40                                                | 5.787 80                   | 0.773 0                           |
| $K_1$   | 2.410 5                           | 2.561 6                            | 2.401 9                  | 2.385 5                                  | $K=7.250\ 6$<br>$S_T^2=0.011\ 24$<br>$S_e^2=0.000\ 020$ |                            |                                   |
| $K_2$   | 2.412 8                           | 2.355 5                            | 2.423 3                  | 2.428 3                                  |                                                         |                            |                                   |
| $K_3$   | 2.427 3                           | 2.333 5                            | 2.436 3                  | 2.436 8                                  |                                                         |                            |                                   |
| $S_T^2$ | 0.000 055                         | 0.010 535                          | 0.000 130                | 0.000 500                                |                                                         |                            |                                   |

Notes:  $K_i$ — Sum of simulation thickness-radius ratio corresponding to  $i$  level of each factor ( $i$ =first, second, third);  $K$ —Total simulation thickness-radius ratio;  $S_T^2$ — Sum of squares of deviations(SSD) of each factor;  $S_T^2$ — Total SSD;  $S_e^2$ — Total sum of squares for error (SSE).

表 3 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴成形角、展宽角、断面收缩率和轧制温度的方差分析

Table 3 Analysis of variance of forming angle, spreading angle, area reduction and rolling temperature of 42CrMo/Q235 composites

| Deviation sources                        | SSD       | Degree of freedom | $F$ value | Critical value of $F$ |      |      | Significant level |
|------------------------------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------------------|------|------|-------------------|
|                                          |           |                   |           | 0.1                   | 0.05 | 0.01 |                   |
| Forming angle $\alpha/(^{\circ})$        | 0.000 055 | 2                 | 2.75      | 5.39                  | 9.28 | 29.5 | $<0.1$            |
| Spreading angle $\beta/(^{\circ})$       | 0.010 535 | 2                 | 526.75    | 5.39                  | 9.28 | 29.5 | $>0.01$           |
| Area reduction $\Psi/\%$                 | 0.000 130 | 2                 | 6.5       | 5.39                  | 9.28 | 29.5 | $0.1>F>0.05$      |
| Rolling temperature $T/^{\circ}\text{C}$ | 0.000 500 | 2                 | 25        | 5.39                  | 9.28 | 29.5 | $0.05<F<0.01$     |
| $S_e^2$                                  | 0.000 020 | 1                 |           |                       |      |      |                   |

Note:  $F = S_T^2/S_e^2$

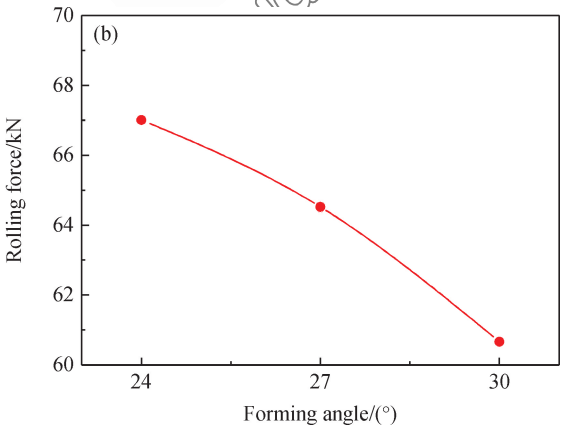
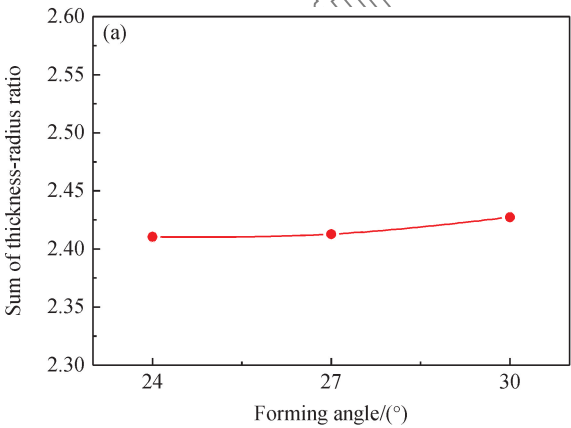


图 7 成形角在 24°~30°下对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响

Fig. 7 Influence of forming angle from 24° to 30° on sum of thickness-radius ratio and rolling force for 42CrMo/Q235 composite laminated shafts

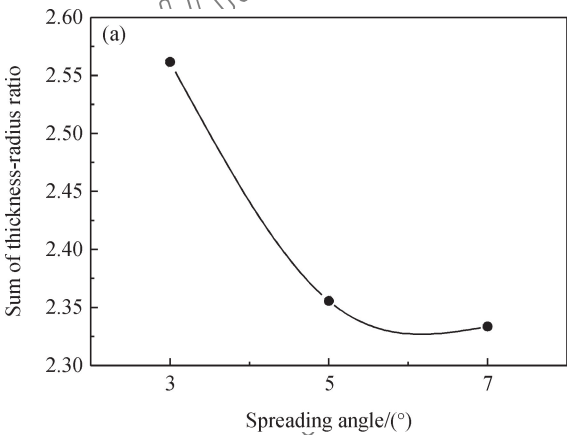
着成形角增加变化不明显。原因是随着成形角的增加，轧制力不断减小，如图 7(b)所示。但是，成形角在不同范围内增加时，轧制力变化幅度不相同。当成形角从 24°增加到 27°时，轧制力减少的幅度为

3.7%，对厚径比的影响不明显。当成形角从 27°增加到 30°时，轧制力减少的幅度为 6.0%，由于楔横轧变形是由外到内变化，此时覆材厚度变化大，基材半径变化较小，此阶段厚径比较 24°~27°时的厚

径比有上升趋势。

3.2.2 展宽角

图 8 为展宽角在  $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$  下对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响。由图 8(a) 可知, 展宽角在  $3^{\circ}<\beta<5^{\circ}$  时, 厚径比下降趋势较大, 下降幅度为 8% 左右; 当在  $5^{\circ}<\beta<7^{\circ}$  时, 展宽角下降趋势缓慢, 下降幅度为 1.0%。原因是随着展宽角增加, 轧制力不断增大, 如图 8(b) 所示。但是, 展宽角在不同范围内增加时, 轧制力变化幅度不相同。当展宽角从  $3^{\circ}$  增加到  $5^{\circ}$  时, 轧制力增加的幅度为 9.3%。楔横轧变形是由外到内变化, 导致覆材厚度变化大, 基材半径变化相对小, 厚径比下降趋势较大。当展宽角从  $5^{\circ}$  增加到  $7^{\circ}$  时, 轧制力增加的幅度为 3.01%。覆材厚度变化小, 基材半径变化也较小, 但覆材厚度变化仍然比基材半径变化大, 因而厚径比下降趋势缓慢。



3.2.3 断面收缩率

图 9 为断面收缩率在 50% ~ 60% 下对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响。由图 9(a) 可知, 断面收缩率在  $50\%<\Psi<55\%$  时, 厚径比上升趋势较小, 缓慢增加, 增加幅度为 1.0%; 在  $55\%<\Psi<60\%$  时, 厚径比增加趋势趋于平缓。原因是随着断面收缩率的增大, 金属变形容易渗透到基层材料中心, 轧制金属轴向流动越容易, 导致轧制力下降, 如图 9(b) 所示。但是, 断面收缩率在不同范围内增加时, 轧制力变化幅度不相同。当断面收缩率从 55% 增加到 60% 时, 轧制力减小幅度为 2.6%。根据楔横轧变形由外到内特点, 厚径比变化为水平状。当断面收缩率从 50% 增加到 55% 时, 轧制力减小幅度为 4.2%。此时覆材厚度变化小, 而基材半径变化也较小, 但覆材厚度变化仍然比基材半径变化

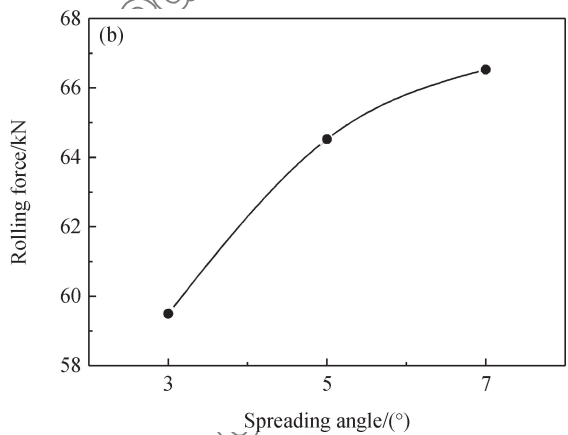


图 8 展宽角在  $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$  下对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响

Fig. 8 Influence of spreading angle from  $3^{\circ}$  to  $7^{\circ}$  on sum of thickness-radius ratio and rolling force for 42CrMo/Q235 composite laminated shafts

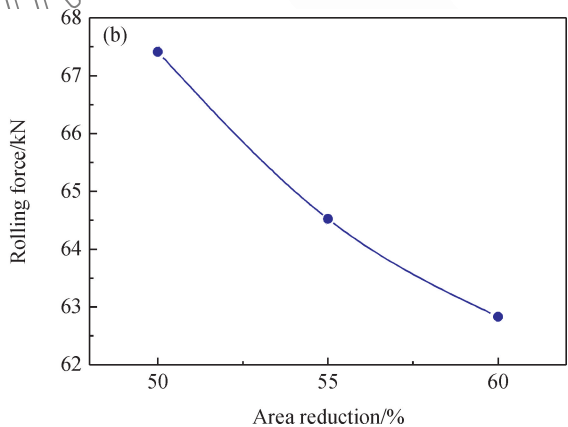
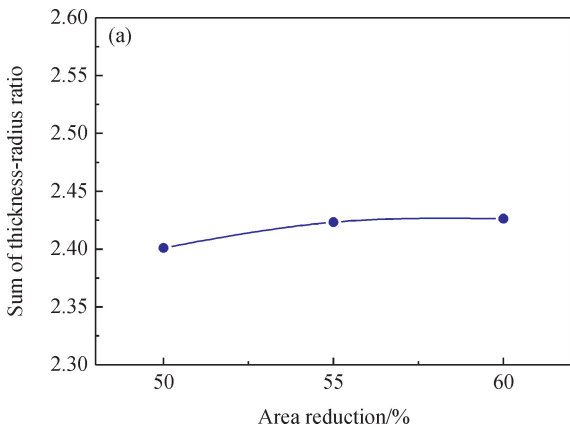


图 9 断面收缩率在 50% ~ 60% 下对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响

Fig. 9 Influence of area reduction from 50% to 60% on sum of thickness-radius ratio and rolling force for 42CrMo/Q235 composite laminated shafts

大, 导致厚径比在该阶段较 55%~60% 阶段的厚径比为上升趋势。

3.2.4 轧制温度

图 10 为轧制温度 950~1 150 °C 对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响。如图 10(a)可知, 温度 950 °C<T<1 050 °C 时, 厚径比上升趋势较小, 增加幅度为 1.8%; 1 050 °C<T<1 150 °C 时, 厚径比上升趋势平缓。原因是随着温度的增大, 金属变形抗力减低, 轧制力下降,

如图 10(b)所示。但是, 温度在不同范围内增加时, 轧制力变化幅度不相同。当温度从 950 °C 增加到 1 050 °C 时, 轧制力减少的幅度为 3.0%, 楔横轧变形是由外到内变化, 导致覆材厚度变化大, 基材半径变化相对小, 厚径比上升趋势较大。当温度从 1 050 °C 增加到 1 150 °C 时, 轧制力减少的幅度为 2.1%。覆材厚度变化小, 基材半径变化也较小, 但覆材厚度变化仍然比基材半径变化大, 则该阶段厚径比上升趋势平缓。

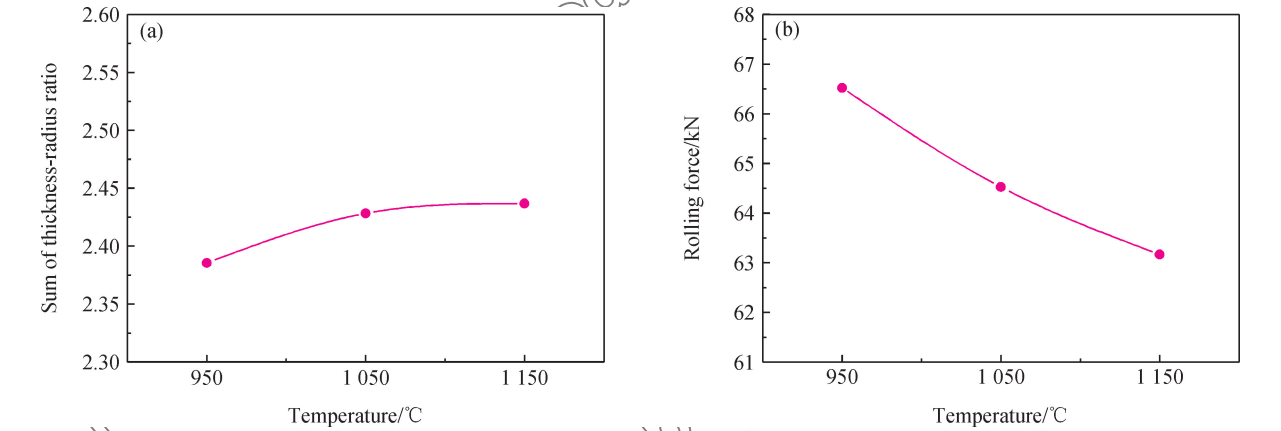


图 10 轧制温度 950~1 150 °C 对 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比和轧制力的影响  
Fig. 10 Influence of temperature range 950~1 150 °C on sum of thickness-radius ratio and rolling force for 42CrMo/Q235 composite laminated shafts

4 结 论

(1) 在选取的工艺参数范围内, 对楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比影响程度的大小的因数依次是: 展宽角、轧制温度、断面收缩率、成形角。

(2) 在选取的工艺参数范围内, 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比随着展宽角的增加先迅速下降, 幅度为 8% 左右, 后缓慢下降, 幅度为 1.0%; 随着断面收缩率的增大先缓慢增加, 幅度为 1.0%, 后趋于平缓; 随着轧制温度的增加先增加, 幅度为 1.8%, 后缓慢增加; 随成形角的增加变化不明显。

(3) 实验证明有限元计算复合材料层合轴厚径比是可行的, 模拟结果可以用来研究厚径比的影响规律。

参考文献:

[1] ARATANI M, ISHIGURO Y, HASHIMOTO, et al. Development of UTS 980 MPa grade steel tube with excellent formability for automotive body parts[J]. Lecture Notes in

Electrical Engineering, 2013, 199(11): 213-224.  
[2] 杨合, 李落星, 王渠东, 等. 轻合金成形领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 31-42.  
YANG H, LI L X, WANG Q D, et al. Research on the development of advanced forming for lightweight alloy materials area[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 31-42 (in Chinese).  
[3] CASSADA W, LIU J. Aluminum alloys for aircraft structure [J]. Journal of Advanced Materials and Processing, 2002, 160(12): 27-29.  
[4] 杨勇, 何涛, 汪泽轩, 等. T91 楔横轧成形过程的数值模拟与分析[J]. 锻压技术, 2015, 40(10): 148-153.  
YANG Y, HE T, WANG Z X, et al. Numerical simulation and analysis on cross wedge rolling process for T91[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(10): 148-153 (in Chinese).  
[5] PATER Z, GONTARZ A, TOFIL A. Analysis of the cross-wedge rolling process of toothed shafts made from 2618 aluminium alloy[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 16(2): 162-166.  
[6] 霍元明, 王宝雨, 林建国, 等. 楔横轧高铁车轴钢 25CrMo4 塑性损伤形成机理[J]. 东北大学学报, 2013, 34(11): 1625-1629.

- HUO Y M, WANG B Y, LIN J G, et al. Damage mechanics research for the high-speed railway axle steel 25CrMo4 during hot cross wedge rolling[J]. Journal of Northeastern University, 2013, 34(11): 1625-1629 (in Chinese).
- [7] 郑振华, 刘晋平, 王宝雨, 等. 成形角对楔横轧 21-4N 合金钢气门心部质量的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(2): 228-233.
- ZHENG Z H, LIU J P, WANG B Y, et al. Effect of forming angle on the central quality of 21-4N valves by cross wedge rolling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(2): 228-233 (in Chinese).
- [8] 黄江华, 刘晋平, 王宝雨, 等. 4Cr9Si2 马氏体钢气门楔横轧工艺研究[J]. 中南大学学报, 2013, 44(7): 2744-2750.
- HUANG J H, LIU J P, WANG B Y, et al. Process research on 4Cr9Si2 martensite steel valve in CWR[J]. Journal of Central South University, 2013, 44(7): 2744-2750 (in Chinese).
- [9] 张宁, 王宝雨, 胡正寰. 楔横轧成形 GH4169 合金的热力耦合数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(11): 1396-1401.
- ZHANG N, WANG B Y, HU Z H. Thermomechanical coupled numerical simulation of GH 4169 alloy for cross wedge rolling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(11): 1396-1401 (in Chinese).
- [10] 刘文萍, 彭文飞, 束学道, 等. 楔横轧同种材料层合轴的展宽短应力分析[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 82-87.
- LIU W P, PENG W F, SHU X D. Stress analysis of spreading stage for cross wedge rolled the same material laminated shaft[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(5): 82-87 (in Chinese).
- [11] 张建华, 彭文飞, 沈法, 等. 基于应力应变的楔横轧层合轴分界面结合机理研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17): 80-83.
- ZHANG J H, PENG W F, SHEN F, et al. Research on interface binding mechanism of cross wedge rolling laminated shaft based on stress and strain[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(17): 80-83 (in Chinese).
- [12] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42Cr Mo 钢的热压缩流变应力行为[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(8): 549-553.
- LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Flow stress behaviors of 42CrMo steel during hot compression[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(8): 549-553 (in Chinese).
- [13] 孙影, 张麦仓, 董建新, 等. Q235 钢的热变形特性[J]. 钢铁, 2006, 18(5): 42-45, 59.
- SUN Y, ZHANG M C, DONG J X, et al. Hot deformation behavior of Q235 steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 18(5): 42-45, 59 (in Chinese).
- [14] 李传民, 束学道, 胡正寰. 楔横轧多楔轧制铁路车轴可行性有限元分析[J]. 中国机械工程, 2006, 17(19): 2017-2019.
- Li C M, SHU X D, HU Z H. Feasibility study on multi-wedge cross wedge rolling of railway axles with finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 17(19): 2017-2019 (in Chinese).
- [15] 束学道, 彭文飞, 聂广占, 等. 楔横轧大型轴件轧制力规律研究[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(1): 102-106.
- SHU X D, PENG W F, NIE G Z, et al. The study of rolling force on forming large-sized shaft-part by cross wedge rolling[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(1): 102-106 (in Chinese).
- [16] 彭文飞, 焦思佳, 束学道, 等. 楔横轧非对称轴类件的可行性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4280-4285.
- PENG W F, JIAO S J, SHU X D, et al. Feasibility of cross wedge rolling asymmetric shaft parts[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(11): 4280-4285 (in Chinese).