

成形性能表征及调控

NiAl 合金变截面管件热态气压成形-反应制备复合工艺

刘 钢¹, 王 宝¹, 王东君¹, 邱高松², 王忠尧¹

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘要: NiAl 金属间化合物具有较高的高温强度且密度低于传统镍基高温合金, 针对 NiAl 合金变截面薄壁构件制造难题, 开展了 Ni/Al 叠层材料变截面管件热态气压成形-NiAl 合金反应制备的复合成形工艺研究。首先, 通过 Ni/Al 界面调控, 制备出层间结合紧密且塑性高的 Ni/Al 叠层圆筒坯; 然后, 在不同工艺参数下研究了 Ni/Al 叠层材料的热态气压成形规律及微观损伤控制方法, 成形出贴模良好的变截面管件; 最后, 通过反应制备将 Ni/Al 叠层材料构件转变为 NiAl 合金构件。研究表明: 温度和气压加载速率是 Ni/Al 叠层材料热态气压成形的关键参数, 在合理的温度下, 通过气压加载速率调控应变速率, 可避免微观损伤、控制圆角精度; 经反应制备获得的 NiAl 合金变截面薄壁构件, 其 900 ℃ 时的抗拉强度达到 110 MPa。

关键词: NiAl 合金; Ni/Al 叠层材料; 反应制备; 变截面管件; 热态气压成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.001

中图分类号: TG394

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 05-0001-06

Compound process on hot gas pressure forming and reaction preparation for NiAl alloy tubular components with variable cross-section

Liu Gang¹, Wang Bao¹, Wang Dongjun¹, Qiu Gaosong², Wang Zhongyao¹

(1. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Power Machinery Research Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: NiAl intermetallic compound has higher high-temperature strength and lower density than traditional nickel-base superalloy. Therefore, aiming at the manufacturing problems of NiAl alloy thin-walled components with variable cross-section, the composite forming process of hot gas pressure forming for Ni/Al laminated material tubular components with variable cross-section and NiAl alloy reaction preparation was carried out. Firstly, the Ni/Al laminated cylindrical billets with tight bonding between layers and high plasticity were prepared by controlling the Ni/Al interface, and the hot gas pressure forming law and micro-damage control method of Ni/Al laminated materials were studied under different process parameters. Then, the variable cross-section tubular components with good fittingness were formed. Finally, Ni/Al laminated material components were transformed into NiAl alloy components by reaction preparation. The research shows that the temperature and the gas pressure loading rate are the key parameters of hot gas pressure forming for Ni/Al laminated materials. At a reasonable temperature, adjusting the strain rate through the gas pressure loading rate can avoid the microscopic damage and control the fillet accuracy. The tensile strength of NiAl alloy thin-walled components with variable cross-section prepared by reaction preparation reaches 110 MPa at 900 ℃.

Key words: NiAl alloy; Ni/Al laminated materials; reaction preparation; tubular components with variable cross-section; hot gas pressure forming

NiAl 合金具有很好的耐高温、抗氧化性能, 且抗蠕变性能与 Ni 基高温合金相近, 但其密度较低, 约为 $5.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 可以有效降低构件质量, 适于制造在 900~1100 ℃ 服役的构件, 在一定程度上可以填补高温合金和高温结构陶瓷之间的使用温度空白^[1-4]。近年来, 研究人员通过电弧熔炼、高温自

蔓延合成和粉末冶金等工艺制备出各类 NiAl 基金, 并通过体积成形方法获得一定形状的构件^[5]; 但是由于 NiAl 金属间化合物的成形性能差, 在薄壁构件成形时开裂难以避免^[6-8]。

由于 Ni 和 Al 箔材均具有良好的塑性, 哈尔滨工业大学提出了以 Ni/Al 叠层箔材为原料的 NiAl 合金曲面薄壁构件反应制备成形方法^[9], 避开 NiAl 金属间化合物成形性能差的难题, 研制出半圆形曲面板材构件^[10]和半锥形薄壳构件^[11]; 太原理工大学利用固体颗粒介质内压成形-原位反应复合成形工

收稿日期: 2023-02-06; 修订日期: 2023-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175298)

作者简介: 刘 钢 (1970-), 男, 博士, 教授

E-mail: gliu@hit.edu.cn

艺制备出 NiAl 合金锥形筒壳构件, 同时利用热态气压成形-原位反应复合制备工艺成功获得了 NiAl 合金球冠薄壳构件^[12]。但是, 更具应用潜力的 NiAl 合金变截面管件还未见报道, 变截面管件热态气压成形相比于板壳件, 在密封控制、壁厚均匀性、气压加载路径、原始圆筒坯制备方面均存在较大的挑战。本文针对航空航天发动机对于轻质耐热管件的需求, 研究了 Ni/Al 叠层圆筒坯制备工艺、NiAl 合金变截面管件热态气压成形-反应制备复合工艺, 旨在提出合理的工艺参数、验证工艺可行性, 为 NiAl 合金变截面管件的制造提供新的技术途径。

1 Ni/Al 叠层圆筒坯制备及界面中间层调控

1.1 变截面管件及圆筒坯尺寸设计

为了研究 Ni/Al 叠层圆筒坯热态气压成形能力, 覆盖一定范围的变截面薄壁构件, 设计了由圆截面过渡到方截面的变截面管件 (图 1), 筒坯初始外径为 $\Phi 40$ mm, 方截面尺寸为 40 mm \times 40 mm, 棱边外圆角半径为 6 mm, 最大胀形量为 19.1%, 构件总长度为 160 mm。作为工艺规律研究模型, 初始筒坯长度取 165 mm, 成形后切去工艺段后剩余 160 mm, 壁厚取 2.7 mm, 并在实验中观察壁厚变化情况。

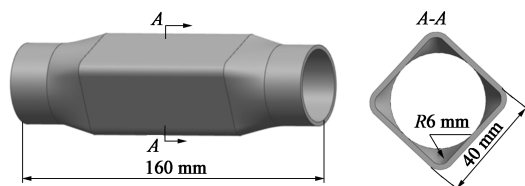


图 1 变截面管件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tubular component with variable cross-section

1.2 Ni/Al 叠层圆筒坯制备与箔材中间层均匀化处理

Ni/Al 叠层圆筒坯的卷制根据 NiAl 构件反应制备要求, 选择 Ni 箔厚度为 60 μm , Al 箔厚度为 100 μm ; 考虑 Ni/Al 叠层圆筒坯的壁厚还会受到扩散反应过程中热压温度、压力和时间的影响, 如图 2a 所示, 使用长度为 230 mm 的矩形箔材连续缠绕成 Ni/Al 叠层箔, 然后经反应制备得到 Ni/Al 叠层圆筒坯, 矩形箔长度由缠绕圆筒截面外圆和内圆的平均长度、反应减薄率和圆筒坯目标壁厚计算获得。Ni/Al 叠层圆筒坯的制备过程需要实现 Ni 箔与 Al 箔之间的层间结合, 除去金属箔材之间的气体, 防止后续热态气压成形造成的 Ni/Al 叠层材料的氧化或者产生内部孔洞。图 2b 为真空热态模压时, 在 600 $^{\circ}\text{C}$ 、施加 10 MPa 载荷、保压 1 h (记为 600 $^{\circ}\text{C}$ /10 MPa/1 h) 条件下制备的 Ni/Al 叠层圆筒坯, 圆筒坯长度为 160 mm, 圆筒坯半径为 20 mm。此步骤主要起到除去箔间气体并实现初步层间结合效果的作用, 但是, 由于锥形刚性模具无法在叠层箔表面施加足够均匀的载荷, 此时的 Ni/Al 叠层圆筒坯在成形过程中容易出现分层剥离。

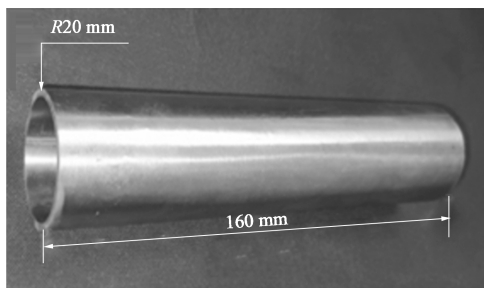
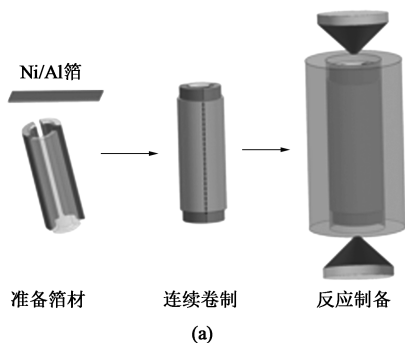


图 2 600 $^{\circ}\text{C}$ /10 MPa/1 h 条件下制备 Ni/Al 叠层圆筒坯的过程 (a) 和实物照片 (b)

Fig. 2 Preparation process (a) and physical photo (b) of Ni/Al laminated cylindrical billet under condition of 600 $^{\circ}\text{C}$ /10 MPa/1 h

为了保证 Ni/Al 叠层圆筒坯在后续热态气压成形中不分层剥离、提高材料的协调变形能力, 提出采用热态气压加载方式调控 Ni/Al 叠层圆筒坯的中间层厚度。采用热态气压成形设备, 将 Ni/Al 叠层圆筒坯置于等径模腔中, 施加合模力至 100 kN, 利用冲头将圆筒坯端部密封后, 在

600 $^{\circ}\text{C}$ 下施加 10 MPa 气压并保压 40 min (记为 600 $^{\circ}\text{C}$ /10 MPa/40 min), 实现 Ni/Al 叠层箔材之间较好的界面结合。图 3 为 Ni/Al 叠层圆筒坯经中间层均匀化处理后, 在取样点 1、2 和 3 处的微观组织, 可见 Ni/Al 叠层圆筒坯的微观组织分布较为均匀, 中间层 (NiAl₃ 和 Ni₂Al₃) 的厚度约为 12 μm 。

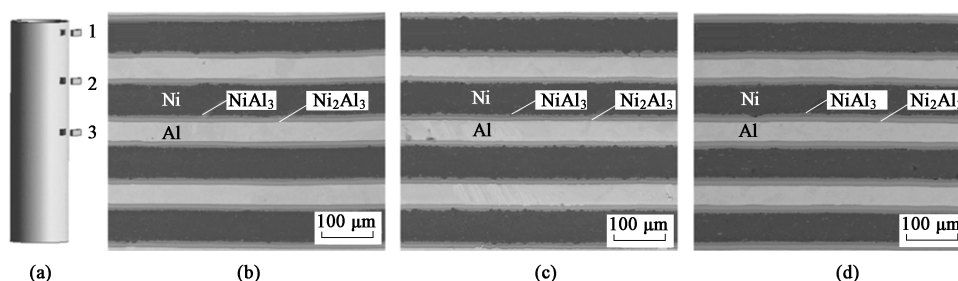


图3 Ni/Al 叠层圆筒坯不同位置的微观组织

(a) 取样位置 (b) 位置1 (c) 位置2 (d) 位置3

Fig. 3 Microstructures of Ni/Al laminated cylindrical billet at different positions

(a) Sampling positions (b) Position 1 (c) Position 2 (d) Position 3

1.3 Ni/Al 叠层材料变截面管件热态气压成形及微观裂纹控制

气压加载方式会影响管材的温度场分布和变形速率, 决定了成形构件的微观组织性能及壁厚均匀性。因此, 研究不同的气压加载方式对 Ni/Al 叠层变截面管件制备的影响。图 4 为 3 种加载方式下变截面管件的圆角半径和壁厚分布变化曲线。3 种加载方式分别为: (1) 快速加载, 即以 $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率升压至 12 MPa (记为 $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}-12 \text{ MPa}$); (2) 慢速加载, 即以 $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率升压至 12 MPa (记为 $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}-12 \text{ MPa}$); (3) 台阶式加载, 即全部以 $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率首先升压至 5 MPa, 保压 30 s, 然后升压至 8 MPa, 保压 150 s, 最后升压至 12 MPa (记为 $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}-5-8-12 \text{ MPa}$)。从图 4a 中看出: 成形的变截面管件的圆角半径变化

呈“慢-快-慢”的变化速率, 逐渐接近 6 mm, 而在刚达到屈服点时管件才开始缓慢变形, 气压升高至 12 MPa 时变形速率达到最大, 而在保压阶段为了使管件继续变形, 变形速率开始逐渐降低; 为了获得更准确的温度场分布, 台阶式加载以 $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加载速率达到 5 MPa 并保持 30 s, 然后升压至 8 MPa 并保压 150 s, 保证管件与冷空气发生充分热交换, 使管件各位置的温度场分布更加均匀。图 4a 中插图 of 变截面管件横截面, 根据受力方式将 1~7 和 13~19 位置称为直壁段, 7~13 位置称为圆角段, 7 和 13 位置称为过渡段。图 4b 为 3 种气压加载方式下的管件壁厚分布曲线, 壁厚分布趋势基本一致, 表现为过渡段的壁厚最薄, 直壁段和圆角段的壁厚稍大。3 种气压加载方式成形的管件壁厚均比较均匀, 壁厚差值在 0.05~0.07 mm 之间。

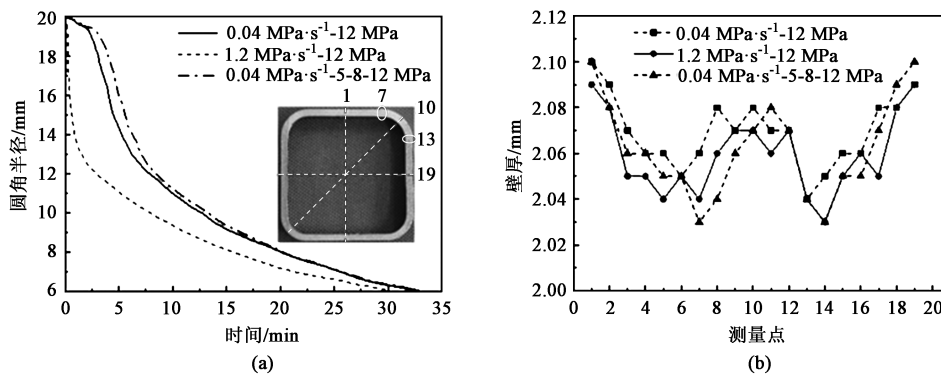


图4 625 °C 时不同气压加载方式下圆角半径 (a) 和壁厚分布 (b) 变化曲线

Fig. 4 Change curves of fillet radius (a) and wall thickness distribution (b) under different gas pressure loading modes at 625 °C

图 5 为 625 °C 下 3 种气压加载方式制备管件在不同位置的层状结构。从图 5a~图 5c 看出, 快速气压加载时变截面管件不同位置的中间层均出现了微裂纹。这是因为: 中间层 (NiAl_3 和 Ni_2Al_3) 化学键的复杂性和共价键的强烈方向性导致中间层存在低温脆性, 在低温或者高应变速率下变形时仅有 3 个独立滑

移系开动, 滑移位错不易通过晶界, 裂纹易在晶界形核扩展而造成沿晶断裂。经高温拉伸验证, Ni/Al 叠层材料在温度高于 575 °C、应变速率低于 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时中间层发生韧脆性转变, 具有较好的塑性变形能力, 否则呈脆性断裂特征。而快速气压加载时, 圆角半径处最大应变速率达 $4.25 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 因此, 导致叠

层圆筒坯的中间层 (NiAl_3 和 Ni_2Al_3) 发生脆性断裂。为了避免成形出现微裂纹, 需要降低成形初期的气压加载速率, 最终保证整个热态气压成形过程

中的变形应变速率均低于 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。通过调整气压加载速率, 实现了 Ni/Al 叠层圆筒坯完全贴模, 且变截面管件内部无微裂纹等损伤, 如图 5d~图 5i 所示。

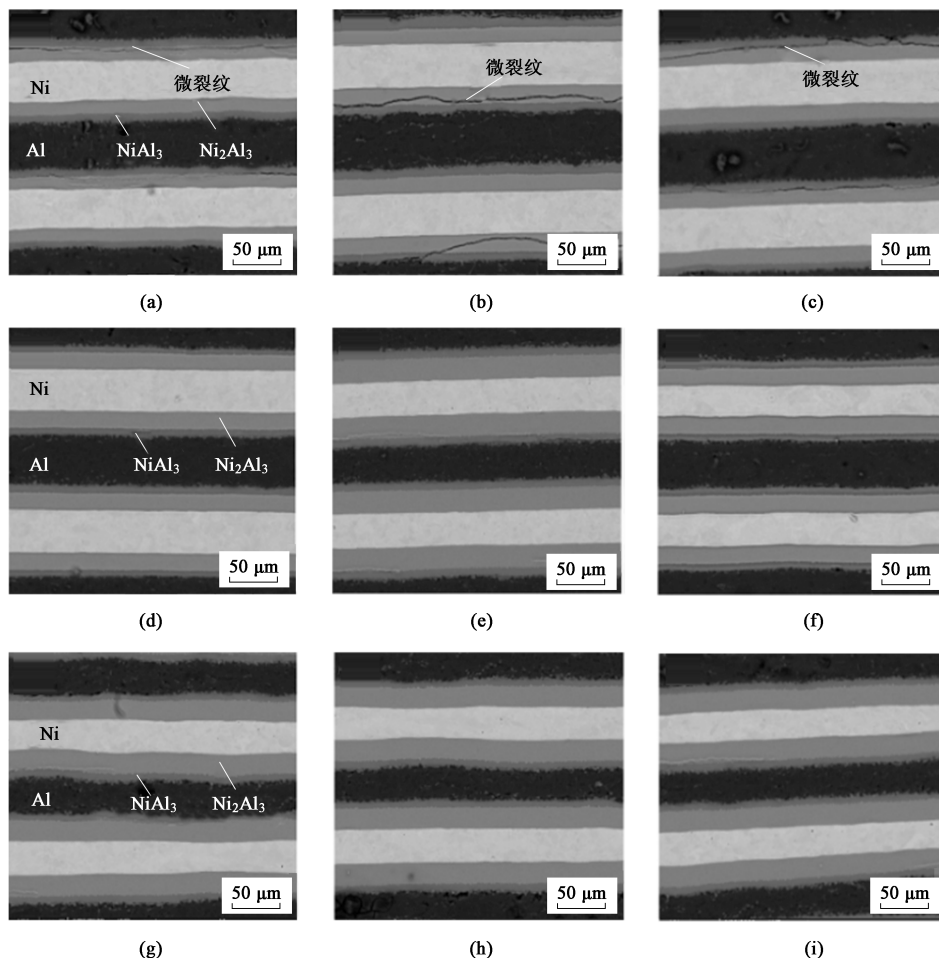


图 5 625 °C 时不同气压加载方式下成形的 Ni/Al 叠层材料变截面管件的层状结构

(a) $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, 直壁段 (b) $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, 过渡段 (c) $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, 圆角段
(d) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, 直壁段 (e) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, 过渡段 (f) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, 圆角段

(g) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –5–8–12 MPa, 直壁段 (h) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –5–8–12 MPa, 过渡段 (i) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –5–8–12 MPa, 圆角段

Fig. 5 Layered structures of Ni/Al laminated material tubular components with variable cross-section formed under different gas pressure loading modes at 625 °C

(a) $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, straight section (b) $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, transition section (c) $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, round corner section

(d) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, straight section (e) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, transition section (f) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –12 MPa, round corner section

(g) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –5–8–12 MPa, straight section (h) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –5–8–12 MPa, transition section

(i) $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ –5–8–12 MPa, round corner section

2 NiAl 合金变截面管件反应制备及性能评价

在热态气压成形的基础上, 管件在 1200 °C 反应 1 h 使 Ni/Al 叠层变截面管件发生均质化反应, 转变为 NiAl 合金构件。图 6a 为均质化后 NiAl 合金变截面管件, 经检测, 其尺寸精度偏差小于 0.1 mm;

图 6b~图 6d 为横截面直壁段、过渡段和圆角段外侧的微观组织, 图 6e~图 6g 为横截面直壁段、过渡段和圆角段内侧的微观组织。管件内、外侧的微观组织经 XRD 和能谱分析, 确定最终产物均为 NiAl 单相, 说明此时已经获得了均质化的 NiAl 合金构件。

图 7 为在采用 NiAl 合金变截面管件的直壁段切取的拉伸试样测得的高温拉伸性能。当温度在

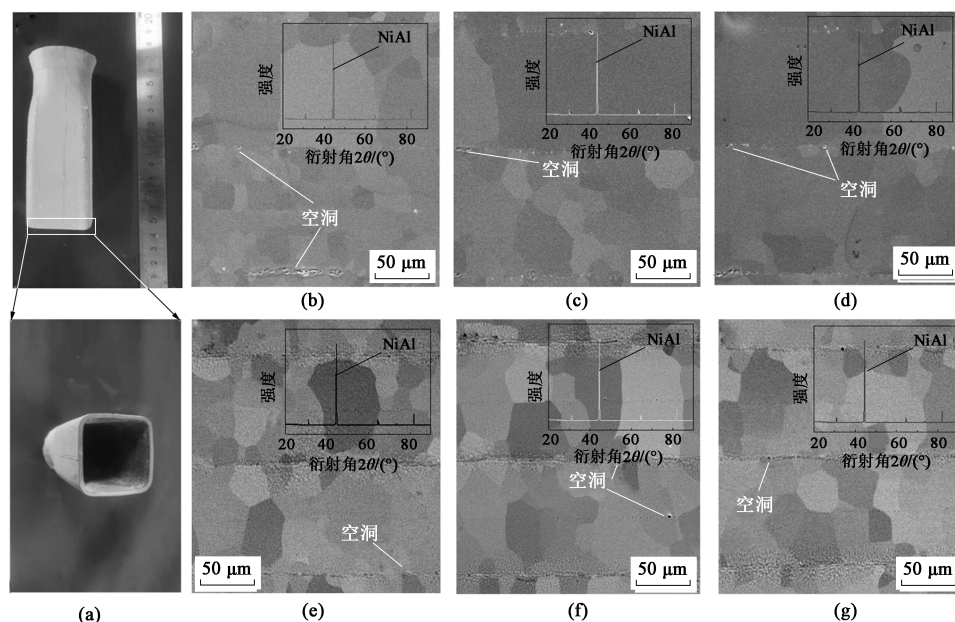


图6 NiAl 合金变截面管件及其不同位置的微观组织

- (a) 均质化后 NiAl 合金变截面管件 (b) 直壁段外侧 (c) 过渡段外侧 (d) 圆角段外侧 (e) 直壁段内侧
(f) 过渡段内侧 (g) 圆角段内侧

Fig. 6 NiAl alloy tubular components with variable cross-section and microstructures of different positions

- (a) NiAl alloy tubular components with variable cross-section after homogenization (b) Lateral segment of straight section
(c) Lateral segment of transition section (d) Lateral segment of round corner section (e) Medial segment of straight section
(f) Medial segment of transition section (g) Medial segment of round corner section

850 ℃以上时, 构件具有较好的高温强度和塑性。850 ℃时, 构件的抗拉强度为 135 MPa, 伸长率达到 57.1%; 900 ℃时, 构件的抗拉强度为 110 MPa, 伸长率为 63.5%; 1000 ℃时, 构件的抗拉强度为 74 MPa, 伸长率为 77.1%。

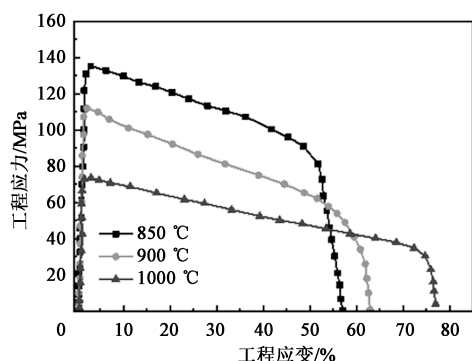


图7 NiAl 合金变截面管件试样工程应力-工程应变曲线

Fig. 7 Engineering stress-engineering strain curves of NiAl alloy tubular components with variable cross-section

3 结论

- (1) 采用 Ni、Al 箔材可卷制成 Ni、Al 交替的

叠层圆筒坯, 在 600 ℃/10 MPa/40 min 热态气压加载条件下, 可使圆筒坯的 Ni、Al 箔材之间获得较均匀的、壁厚约为 12 μm 的中间层, 确保了叠层圆筒坯层间紧密结合, 可用于热态气压成形。

(2) 当气压加载速率为 $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 管件成形过程中的应变速率达到 $4.25 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, 由于中间层 (NiAl_3 和 Ni_2Al_3) 难以协调变形, 导致产生微裂纹的产生; 当气压加载速率为 $0.04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 则避免了微裂纹。可见气压加载速率对 Ni/Al 叠层圆筒坯成形性能具有重要的影响, 通过优化气压加载速率可获得无裂纹缺陷的 Ni/Al 叠层材料变截面管件。

(3) 将 Ni/Al 叠层材料变截面管件经 $1200 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 均质化反应后, 可获得完全为单质相的圆-方变截面 NiAl 合金管件。管件性能测试表明, 在 900 ℃时, 构件的抗拉强度为 110 MPa、伸长率为 63.5%, 达到了传统工艺 NiAl 合金的高温强度。后续还需针对具体产品服役条件要求, 进一步研究 NiAl 合金变截面管件综合性能的调控方法。

参考文献:

- [1] 郭建亭. 金属间化合物 NiAl 的研究进展 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 68 (6): 1013-1027.

- Guo J T. Research progress of intermetallic NiAl alloys [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 68 (6): 1013-1027.
- [2] Hu L, Hu W, Gottstein G, et al. Investigation into microstructure and mechanical properties of NiAl-Mo composites produced by directional solidification [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 539: 211-222.
- [3] Wang L, Su Y N, Yao C L, et al. Microstructure and mechanical property of novel NiAl-based hypoeutectic/eutectic/hypereutectic high-entropy alloy [J]. Intermetallics, 2022, 143: 107476.
- [4] Zhu X, Zhang T, Marchant D, et al. The structure and properties of NiAl formed by SHS using induction heating [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (3): 1251-1260.
- [5] 王宝, 王东君, 刘钢. 轻质耐高温 NiAl 基金属制备与复杂构件成形技术进展浅析 [J]. 自然杂志, 2020, 42 (3): 269-275. Wang B, Wang D J, Liu G. Preparation of light and high-temperature resistant NiAl-based alloy and development of its complex component forming [J]. Chinese Journal of Nature, 2020, 42 (3): 269-275.
- [6] Schulz C, Kauffmann A, Laube S, et al. Role of orientation relationship for the formation of morphology and preferred orientation in NiAl-(Cr, Mo) during directional solidification [J]. Acta Materialia, 2022, 231: 117857.
- [7] Wang D J, Liang Y, Ning H W, et al. Effects of Zr and Co on the microstructure and mechanical properties of NiAl-based alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 883: 160815.
- [8] Sheng L Y, Guo J T, Ren W L, et al. Preliminary investigation on strong magnetic field treated NiAl-Cr(Mo)-Hf near eutectic alloy [J]. Intermetallics, 2011, 19 (2): 143-148.
- [9] 苑世剑, 王东君, 刘钢. 一种含 V 元素的 NiAl 基金属薄壁构件的成形制备方法 [P]. 中国: 202110695246, 2021-09-24.
- Yuan S J, Wang D J, Liu G. A forming preparation method of NiAl-based alloy thin-walled components containing V element [P]. China: 202110695246, 2021-09-24.
- [10] Sun Y, Lin P, Yuan S J. A novel method for fabricating NiAl alloy sheet components using laminated Ni/Al foils [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 754: 428-436.
- [11] 孙营, 林鹏, 苑世剑. 超高温 NiAl 合金锥形薄壳件制备成形一体化新工艺 [J]. 推进技术, 2021, 42 (11): 2617-2624. Sun Y, Lin P, Yuan S J. A new integrated process of forming and reaction synthesis for ultra-high temperature NiAl alloy thin-walled conical components [J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42 (11): 2617-2624.
- [12] 黄忠森. NiAl 合金薄壁构件内压胀形-原位反应复合成形工艺研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021. Huang Z S. Study on the Composite Process of Internal Pressure Forming-in-situ Reaction Synthesis of NiAl Alloy Thin-walled Components [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

第十三期“锻压企业质量工程师”培训班（模锻工艺与标准）在盐城成功举办

由全国锻压标准化技术委员会（以下简称“锻标委”）主办、江苏森威精锻有限公司协办、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司承办的“第十三期‘锻压企业质量工程师’培训班（模锻工艺与标准）”于 2023 年 5 月 19-22 日在江苏省盐城市成功举办。本次培训共有 40 余位教师和学员参加，分别来自全国 20 余家单位。全国锻压标准化技术委员会副主任委员金红、秘书长魏巍出席开幕式。

本次培训班以“模锻工艺与标准”为主题，安排了智能制造发展及热点技术概论、数值模拟技术在精密模锻工艺的应用与发展、模锻工艺过程控制及模锻件质量控制与评定、锻造车间安全生产与环境保护要求、摩擦与润滑条件对精锻成形的影响、锻后热处理工艺影响因素及控制要点、模具寿命的影响因素与改进方法、锻件常见缺陷分析等授课环节。全程 3 天，共计 23 个学时。

为了确保此次培训的教学质量，使大家学有所获、学有所感，锻标委秘书处精心挑选、聘请了国内从事智能制造、模锻工艺、数值模拟等领域的专家、教授担任培训教师。这些老师各自的专业领域中有很高的造诣，先后承担了一系列的国家重点科研项目，发表了大量的学术文章与著作，具有丰富的科研经验与实践经验。他们分别是：中国机械总院集团北京机电研究所有限公司产业发展部部长孙勇、上海交通大学胡成亮教授、邯郸峰驰精密制造有限公司张军改总工、贵州安大航空锻造有限责任公司陈祖祥主管、江苏森威精锻有限公司龚爱军副总经理。5 位授课教师所授课程内容丰富、案例详实，实际与理论相结合，受到了学员们的一致好评。在授课过程中，教师们结合国内外锻压行业生产实际，并结合各自所讲的课程内容，分别对《GB/T 25135—2010 锻造工艺质量控制规范》、《GB/T 12361—2016 钢质模锻件 通用技术条件》等 10 项国家和行业标准进行了解读和分析，使学员们对模锻工艺的质量控制、安全生产与相关标准应用有了较为全面和深入的理解。

锻标委秘书处安排学员们前往江苏森威精锻有限公司进行了参观学习。龚爱军副总经理及公司工作人员介绍了江苏森威精锻有限公司的生产及运营情况，对学员们的提问进行了详细的解答。

经过 3 天的培训，学员们普遍反映此次培训的内容丰富实用、讲解透彻到位、理论与实践并重，课堂氛围融洽，学员们的热情高涨、积极踊跃。此次培训促使锻压企业学习规范化生产、提高企业生产技术和市场竞争能力，不仅大幅提升了对相关国家标准和行业标准的理解和使用能力，也充分了解了模锻工艺的相关知识，收获颇丰。

全国锻压标准化技术委员会