DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2025.4183

烧结温度对 Inconel 625 多孔材料孔结构和拉伸性能的影响

李广忠，李亚宁，许忠国
(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室，陕西 西安 710016)

摘　要：采用粉末烧结工艺制备 Inconel 625 多孔材料，分析了 Inconel 625 多孔材料的典型孔隙特征并进行 3D-CT 建模表征，研究不同烧结温度对 Inconel 625 多孔材料的性能，如形貌、孔隙率、最大孔径和透气度等的影响。结果表明，随着烧结温度的升高，抗拉强度逐渐提高，当烧结温度为 1 250 ℃时，Inconel 625 多孔材料抗拉强度可达 224 MPa。高温拉伸结果显示，Inconel 625 多孔材料的高温拉伸强度随测试温度的升高而降低，而塑性则随测试温度升高而提高。

关键词：发汗冷却；Inconel 625；烧结；多孔材料；高温强度

中图分类号：TG146.1+5; TF125　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2025)03-0224-08

Effect of Sintered Temperature on the Pore Structure and Tensile Properties of Porous Inconel 625 Materials

LI Guangzhong, LI Yaning, XU Zhongguo
(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The preparation of an Inconel 625 porous material via powder sintering was studied. The typical pore characteristics of the Inconel 625 porous material were analysed and characterized through 3D-CT modelling. The effects of different sintering temperatures on the properties of the Inconel 625 porous material, such as morphology, porosity, maximum pore diameter, and air permeability, were studied. The tensile test results at room temperature reveal that the tensile strength gradually increases with increasing sintering temperature. When the sintering temperature is 1 250 ℃, the tensile strength of the Inconel 625 porous material reaches 224 MPa. The high-temperature tensile results of the Inconel 625 porous material indicate that with increasing test temperature, the tensile strength decreases, whereas the plasticity increases.

Key words: transpiration cooling; Inconel 625; sinter; porous material; high-temperature strength

Inconel 625 镍铬合金具有优良的抗拉伸与抗蠕变性能，特别是在高温下具有良好的抗拉强度、屈服强度、持久性能及塑性，即使在 980 ℃的高温环境中，仍然可以保持较好的力学性能与疲劳稳定性[1-5]。由于 Mo、Nb 元素在 Ni、Cr 基体中的固溶强化作用，使得 Inconel 625 合金的强度非常高，无需沉淀硬化处理[6]。因此，Inconel 625 合金可应用于航空设备和燃气轮机及核工业、化学工业等领域[7-8]。

多孔金属作为多孔材料的重要分支，特指含孔隙金属，是具有优异物理特性和良好机械性能的新型工程材料[9-11]。Inconel 625 多孔材料不仅具有 Inconel 625 镍铬合金的性能，也具有多孔金属材料的功能特性，因此在高温过滤等行业获得了广泛关注[12-13]。目前，制备 Inconel 625 多孔材料的主要方法有粉末冶金、3D 打印等，其中粉末冶金法具有工艺成熟、成本低等优势，是 Inconel 625 多孔材料的主要制备方法[14-17]。王昊等[18]通过模压–气氛烧结工艺研究了不同烧结温度对多孔 Inconel 625 合金形貌与透气等性能的影响，指出 1 240 ℃烧结的 Inconel 625 多孔材料的剪切性能达到最优，抗剪切力可达 51.0 kN。秦子珺等[19]以氩气雾化法制备的镍基高温合金 FGH4096 粉末为原料，采用放电等离子烧结工

收稿日期：2024-09-23
基金项目：陕西省财政厅功能材料专项(0601YC2307)
作者简介：李广忠，1979 年生，硕士，正高级工程师. 主要从事金属多孔材料和氢能材料方面的工作. Email: shlgznin@126.com
引用格式：李广忠，李亚宁，许忠国. 烧结温度对 Inconel 625 多孔材料孔结构和拉伸性能的影响[J]. 铸造技术，2025, 46(3): 224-231.
LI G Z, LI Y N, XU Z G. Effect of sintered temperature on the pore structure and tensile properties of porous Inconel 625 materials[J]. Foundry Technology, 2025, 46(3): 224-231.

中国知网　https://www.cnki.net

艺制备 FGH4096 高温合金，研究表明放电等离子烧结工艺虽能在一定程度上消除原始颗粒边界，但改善合金晶粒尺寸的作用不明显。

已有文献主要关注 Inconel 625 多孔材料设计、制备工艺等方面，对其孔隙结构研究较少，有必要对多孔材料的孔隙特性进行表征。此外，对于多孔材料的力学性能，尤其是高温力学性能也尚未有深入研究，尚未解明材料的力学行为和断裂机制，不能为该材料的应用提供设计依据。

本文采用粉末压制–烧结工艺制备 Inconel 625 多孔材料，重点研究了烧结温度对 Inconel 625 多孔材料形貌、孔隙率、最大孔径和透气度的影响规律，并通过 3D-CT 获取 Inconel 625 多孔材料典型的孔结构并进行建模，分析了该材料的孔隙率、孔尺寸及其分布、平均迂曲度、孔等效球分布和平均配位数等孔结构特性。依据最新应用工况要求，评估了烧结温度等对 Inconel 625 多孔材料拉伸性能的影响。

1　实验材料与方法

实验以粒度为 100~200 μm 的 Inconel 625 合金粉末为原料，其形貌如图 1 所示。在 180 MPa 压力下模压成形，制成 ϕ160 mm 片状坯料，随后在真空度 <9.0×10^{-2} Pa 的条件下进行烧结，烧结温度分别为 1 100、1 150、1 200 和 1 250 ℃(±10 ℃)，升温速率 10 ℃/min，保温 2 h。

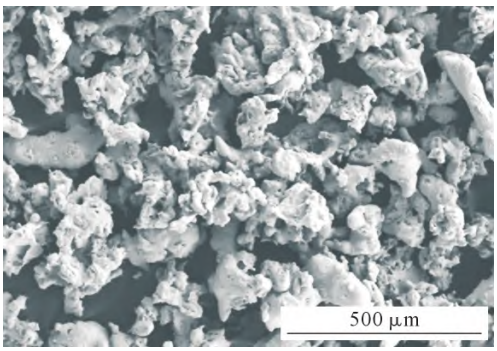

图 1　粒度为 100~200 μm Inconel 625 粉末颗粒 SEM 像
Fig.1　SEM image of Inconel 625 powder particles with sizes ranging from 100 to 200 μm

利用 ZEISS Xradia 520 型计算机断层成像(CT)对孔隙结构进行观察，并使用商业软件 AVIZO 对 CT 数据进行可视化处理，建立实际物理模型。利用 JSM-6460 型扫描电子显微镜(SEM)观察原料粉末和多孔 Inconel 625 合金材料的微观形貌；利用 ADVANCE D8 X 射线衍射仪(XRD)对样品进行物相分析，利用 PSM165 孔径分析仪进行样品最大孔径和透气度测试；根据 GB/T 5163《烧结金属材料(不包括硬质合金) 可渗性烧结金属材料密度、含油率和开孔率的测定》测试其孔隙度。根据 GB/T228.1 和 GB/T228.2 分别进行室温和高温拉伸强度的测试。拉伸性能试验在微机控制电子万能试验机上进行，拉伸速率均为 0.15 mm/min。

2　实验结果及讨论

2.1　Inconel 625 多孔材料物相

在 1 100、1 150、1 200 和 1 250 ℃下对烧结制备的 Inconel 625 多孔材料试样进行了 XRD 表征，如图 2 所示。可以看出，不同烧结温度制备的Inconel 625 多孔试样均以 γ 相镍基固溶体为主。在 1 250 ℃下烧结制备的 Inconel 625 多孔材料衍射峰值最大，衍射峰最尖细，表明此温度下烧结制得的 Inconel 625 多孔试样晶化程度最好，结晶度最高。

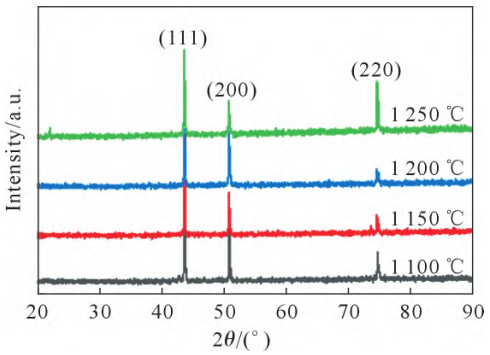

图 2　不同烧结温度制备的多孔 Inconel 625 材料 XRD 谱
Fig.2　XRD patterns of Inconel 625 porous materials prepared at different sintering temperatures

2.2　烧结温度对 Inconel 625 多孔材料形貌的影响

图 3 是经 1 100、1 150、1 200 和 1 250 ℃烧结的 Inconel 625 多孔材料的表面形貌。从图 3a 可以看出，在 1 100 ℃烧结时，Inconel 625 颗粒已经烧结在一起，但仍可分辨出单个颗粒。颗粒表面较粗糙并有小凸起，颗粒之间烧结颈较细长，部分相邻颗粒之间的烧结颈尚未形成。从图 3b 和 c 可以看出，在 1 150 和 1 200 ℃烧结时，颗粒形状仍可分辨，相邻颗粒的烧结颈变粗、变短、变多；尤其是 1 200 ℃烧结的样品，颗粒表面和孔道变得圆滑。而当烧结温度达到 1 250 ℃时，Inconel 625 粉末颗粒表面析出更细小凸起，尺寸较小颗粒完全熔入基体与烧结颈，使得粉末之间的烧结颈尺寸更粗，原始粉末颗粒无法清晰分辨，如图 3d 所示。

Inconel 625 熔点为(1 320±30) ℃，再结晶温度为 1 100 ℃，当烧结温度超过该材料的再结晶温度时，粉末表面扩散加快后烧结才明显进行[20-21]。即孔隙中粉末颗粒突出处自由表面在烧结温度超过再结晶温度时，原子开始向邻近颗粒接触区域迁移，且孔隙中粉末颗粒突出处自由表面流出的原子数等于流

中国知网　https://www.cnki.net

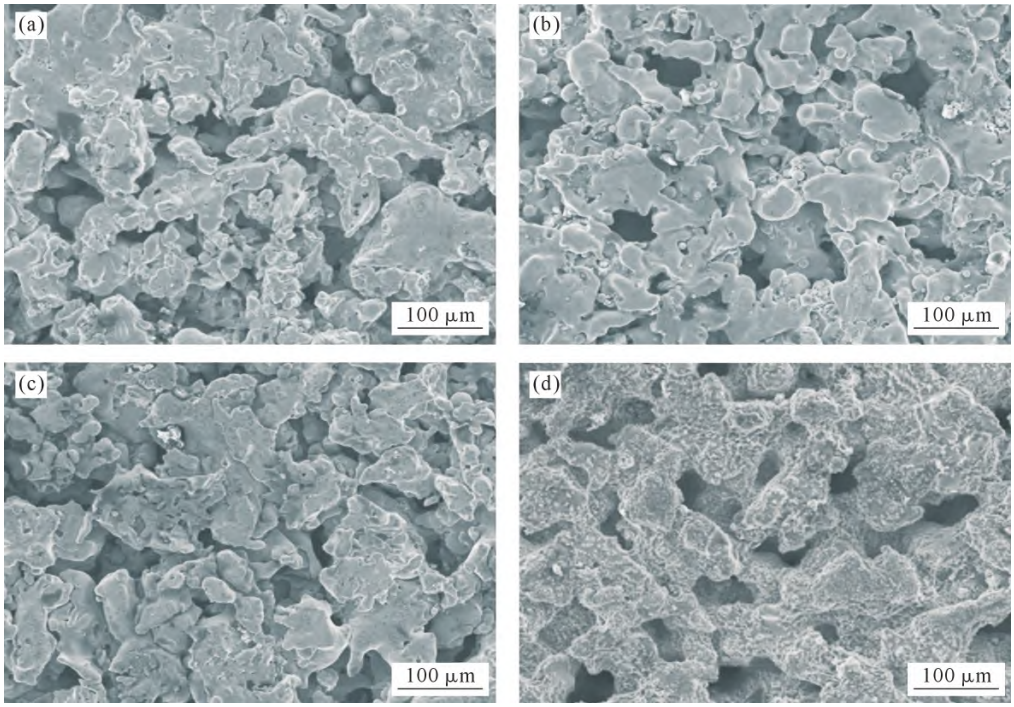

图 3 不同烧结温度制备的 Inconel 625 多孔材料表面 SEM 像:(a) 1 100 ℃; (b) 1 150 ℃; (c) 1 200 ℃; (d) 1 250 ℃
Fig.3 SEM images of the surfaces of Inconel 625 porous materials prepared at different sintering temperatures: (a) 1 100 ℃; (b) 1 150 ℃; (c) 1 200 ℃; (d) 1 250 ℃

入邻近接触区的原子数,从而形成烧结颈。4 组试样的烧结温度均超过 1 100 ℃,在烧结过程中,颗粒表面由于能量较高,实际上已经处于熔融状态,而颗粒内部仍处于固态。随着温度升高,粉末颗粒表面原子扩散过程逐渐加快,有较多物质迁移,颗粒间相互熔合加快,孔隙逐渐减小。因此,在不同烧结温度下,孔壁呈现不同的特征。其他相同条件下,随烧结温度提高,孔壁由疏松向致密转变,由粗糙向圆滑转变,许多小孔连通向闭合小孔转变。

2.3 Inconel 625 多孔材料典型孔隙特征

多孔结构的孔特征是其功能的主要决定因素。为得到符合实际的多孔 Inconel 625 镍基高温合金材料孔结构特征,首先对 1 200 ℃下烧结的多孔 Inconel 625 镍基高温合金材料进行三维断层扫描,采集得到的部分断层扫描图像如图 4 所示,其扫描精度为 3 μm,可有效表征孔结构特征。利用该三维断层扫描图像,使用 Avizo 软件建立三维模型,并以此为基础对其孔结构特性进行表征与可视化,如图 5 所示。由图 5a 和 b 可知,孔隙率即为孔体积占该体积立方体的比例,使用模型计算得到该模型的孔隙率为 43.35%。将三维模型中的孔位置与孔形态进行进一步提取,得到图 5c。图中孔路径为孔道几何中心的连线,孔路径颜色为其孔道半径,为表征孔道宽度,对其进行统计得到表 1,其中迂曲度用以表征孔道的迂回曲折程度,该值通常大于 1,越接近 1 表明孔道越平直,有利于流体渗透。将孔路径中所有交点及末端统一定义为“孔节点”,可用于明确孔在三维空间中的连接关系并进一步定量表征孔结构特征,孔节点数量的增加意味着该区域孔结构趋于复杂。

由表 1 可知,等效半径在 20 μm 以上的孔道与等效半径 10~20 μm 的孔道占据孔道大部分的长度

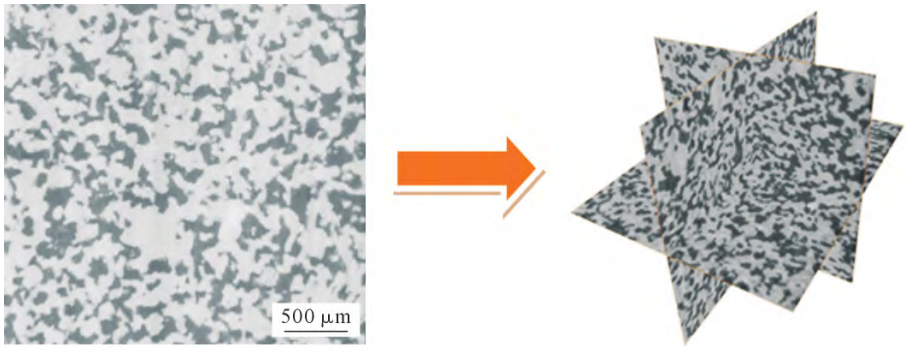

图 4 Inconel 625 多孔材料的三维断层扫描图像
Fig.4 3D tomography image of the Inconel 625 porous material

中国知网 https://www.cnki.net

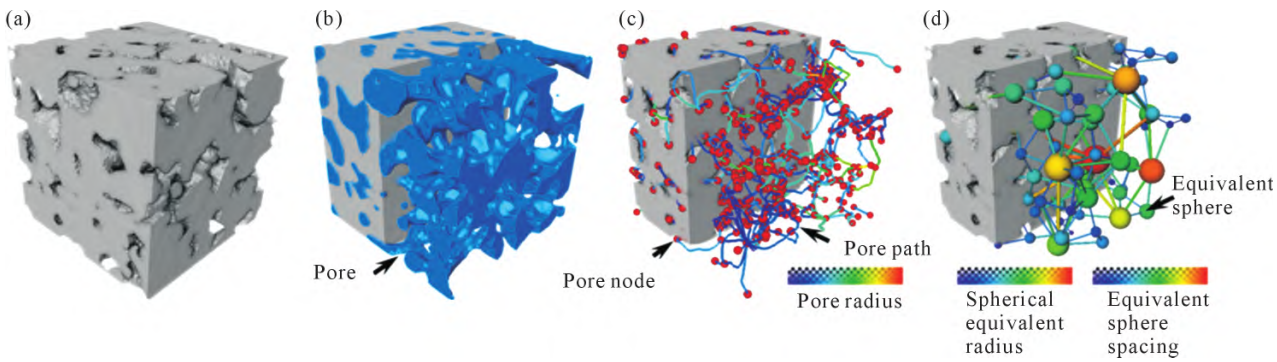

图 5 Inconel 625 多孔材料孔隙特征可视化图像：(a) 三维模型；(b) 孔三维模型；(c) 孔道三维模型；(d) 孔等效球半径[1]

Fig.5 Visual image of the pore characteristics of the Inconel 625 porous material: (a) 3D model; (b) 3D model of the pores; (c) 3D model of the pore channels; (d) equivalent spherical radius of the pores[1]

表 1 三维模型中孔隙路径统计

Tab.1 Statistics of the pore path in the 3D model

Equivalent radius of the pore channel/μm	Proportion of total pore channel length%	Proportion of the total pore channel volume/%	Average tortuosity
≥20	12.49	32.43	1.08
10~20	54.20	58.00	1.13
<10	33.31	9.57	1.20

与体积，是其主体部分。等效半径 10 μm 以下的孔道占总长度 33.31%，仅占孔道总体积的 9.57%，则可认为其对孔隙总容积的贡献不大，通常称之为孔隙喉道，即前文所述“孔径”。另外，孔道整体迂曲度接近 1，可认为孔道相对平直。而随着孔道等效半径增加，其迂曲度逐渐降低，即在多孔 Inconel 625 镍基高温合金中，孔道变宽的同时其平直程度也增加，这对增强流体渗透率有利。

图 5d 为以孔为主体的等效球半径，表 2 为孔等效球半径的统计数据。其中平均配位数为某个孔与其他孔相连的平均孔数，用以表征该孔的连通程度。平均配位数越大，说明该孔与其他孔连接的节点越多，为 0 则说明该孔为闭孔或处于模型边缘。

表 2 三维模型中等效球统计

Tab.2 Equivalent sphere statistics in the three-dimensional model

Equivalent spherical radius /μm	Proportion of total pore volume /%	Proportion of total pore surface area/%	Verage coordination number
≥80	6.67	4.86	19
40~80	77.81	72.16	9
10~40	15.47	22.68	2
<10	0.05	0.30	0

由表 2 数据可知，等效球半径≥40 μm，即体积≥2.68×10^5 μm^3 的孔占 Inconel 625 多孔材料中孔的大部分，其平均配位数较多且随着体积增大而增加，说明这些较大尺寸孔彼此相连成为该材料中流体渗透的主要路径。最大的孔等效球半径在 80 μm 以上且配位数高达 19，该孔可能是在烧结过程中由多个粉末颗粒彼此接触并制约而产生。等效球半径较小的孔配位数也较少，说明这些孔的主要功能是连接较大的孔，可能是由少数粉末颗粒彼此紧密接触而残存的空隙形成。等效球半径小于 10 μm 的孔平均配位数为 0，说明这些微小孔是闭孔或处于模型边界处，且仅占孔隙总体积的 0.05%，对孔流体渗透性能的影响可忽略不计。

2.4 烧结温度对 Inconel 625 多孔材料孔隙性能的影响

图 6 和 7 为 Inconel 625 多孔材料最大孔径、透气系数与烧结温度的对应关系曲线。由图 6 可知，Inconel 625 多孔材料的最大孔径随烧结温度的升高先略微升高，然后逐渐下降，透气系数与之相同。出现上述结果是因为当烧结温度较低时(如 1 100 ℃)，烧结过程生坯中的挥发物没有完全挥发，表面扩散缓慢，开孔分布不均匀；1 150 ℃烧结后材料生坯中的挥发物相对已挥发完全，且烧结过程中表面扩散加剧，物质迁移量大，局部致密或留下大孔，最大孔径变大，相应的多孔材料的透气系数增大。随着烧结温度进一步提高，粉末之间的扩散进一步加剧，孔结构开始收缩，最大孔径逐步变小，伴随着孔隙率的降低，该多孔材料的透气能力下降，即透气系数降低。

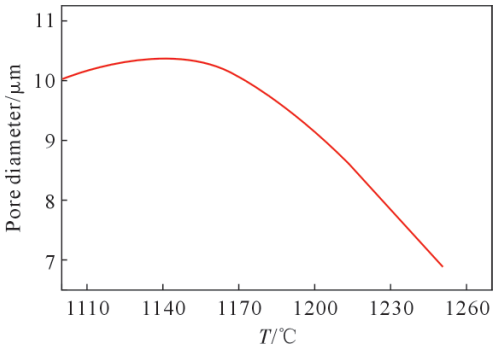

图 6 烧结温度与 Inconel 625 多孔材料最大孔径对应关系

Fig.6 Correspondence of the sintering temperature to the maximum pore size of the Inconel 625 porous material

中国知网 https://www.cnki.net

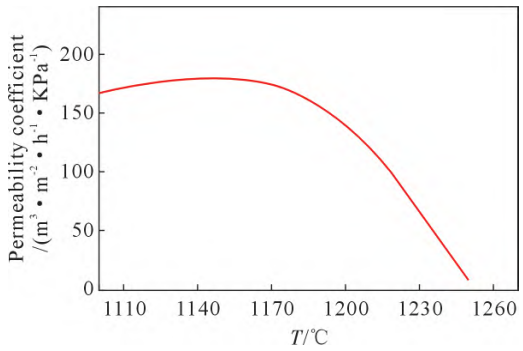

图 7 烧结温度与 Inconel 625 多孔材料相对透气系数对应关系

Fig.7 Correspondence between the sintering temperature and relative permeability coefficient of the Inconel 625 porous material

图 8 是 Inconel 625 多孔材料孔隙率与烧结温度的对应关系。由图 8 可知，在其他条件相同的情况下，Inconel 625 多孔材料的孔隙率随烧结温度的升高而下降，而且下降幅度随温度的升高而增大。分析可知，金属粉末的烧结过程是粉末间由点接触到烧结颈形成，以及烧结颈的增粗变短而推进致密化的过程。烧结温度越高，金属粉末之间的烧结颈形成和长大的速度越快，而烧结颈长大的过程也是多孔材料孔隙收缩、小孔收缩的过程，即烧结温度越高，孔隙率越低。同时可以看出，温度越高，对 Inconel 625 多孔材料烧结收缩加速作用越大。1 200 ℃烧结样品孔隙率测试结果为 43.01%，与三维模型中 43.35%相差不大，说明了建模的准确性。

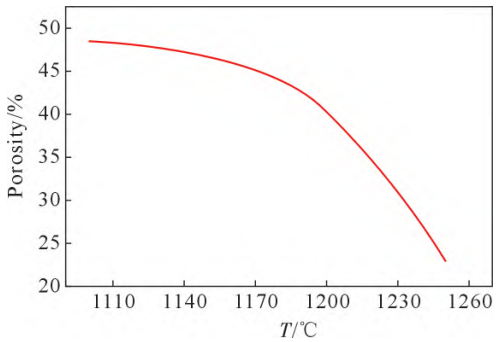

图 8 烧结温度与 Inconel 625 多孔材料孔隙率对应关系

Fig.8 Correspondence of the sintering temperature to the porosity of the Inconel 625 porous material

2.5 烧结温度对 Inconel 625 多孔材料室温拉伸强度的影响

Inconel 625 作为常用的镍基高温合金，其制备的零件服役环境对材料强度有一定要求。图 9 为在生坯制备工艺和烧结时间相同的情况下，不同烧结温度下获得的 Inconel 625 多孔材料拉伸应力–应变曲线。在 1 100、1 150、1 200 和 1 250 ℃下，烧结 2 h 对应样品抗拉强度分别为 26、38、74 和 224 MPa。温度的提高有利于 Inconel 625 粉末之间的物质迁移从而促进烧结颈的形成；温度越高，烧结颈的数量越多，且有利于烧结颈长大，导致 Inconel 625 粉末之间的粘结面积增加，使粉末间的连接更加牢固。反之，烧结温度太低，Inconel 625 粉末之间的物质扩散速度较慢，烧结颈形成比较困难，导致 Inconel 625 多孔材料的拉伸强度较低。此外，从材料理论方面可知，阻碍粉末之间烧结发育的因素很多，如 Inconel 625 粉末颗粒表面的不完全接触及其表面的气体和氧化膜等也随温度升高而迅速减弱[18]，即实际的有效连接面积成为影响材料拉伸性能的主导因素，Inconel 625 多孔材料的拉伸强度随烧结温度的升高而增大，孔隙率下降。

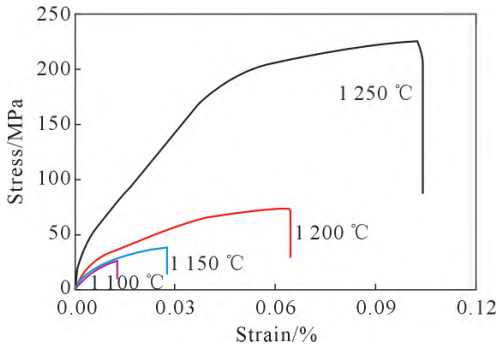

图 9 Inconel 625 多孔材料拉伸应力–应变曲线

Fig.9 Tensile stress-strain curves of Inconel 625 porous materials

进一步分析 Inconel 625 多孔材料的拉伸曲线可知，合金的拉伸大体分为 3 个阶段：①弹性变形阶段。主要是 Inconel 625 粉末沿拉力方向围绕烧结颈发生小偏移，Inconel 625 多孔结构出现了较小变形，拉伸曲线近乎于一条直线。该阶段试样受到外力发生变形，撤除外力后变形可以完全恢复，Inconel 625 多孔材料没有产生塑性变形。②塑性变形和强化阶段。在这一阶段，后期应力增加明显变缓，烧结颈和孔结构进一步塑性变形，局部一小部分孔结构和烧结颈开始断裂，但大部分的烧结颈还没被破坏。在该阶段试样受到外力产生塑性变形，撤去外力后变形无法恢复。③断裂阶段。应力达到多孔材料的抗拉强度之后，由于材料本身存在缺陷，大量的烧结颈和孔结构在试样的某个局部发生不可逆断裂，此处的 Inconel 625 多孔结构遭到破坏，应力–应变曲线迅速下降，直至试样完全失去负载能力并断裂。

烧结温度越低，第 1 阶段与第 2 阶段之间的区别越不明显，这是由于低烧结温度下烧结颈较细小，极小的偏移即可导致烧结颈的断裂，多孔材料宏观上几乎丧失塑性变形能力。对在 1 100~1 250 ℃烧结的 Inconel 625 多孔材料进行室温拉伸，其拉伸断口形貌如图 10 所示。结合图 10 分析可以发现，随着温度

中国知网 https://www.cnki.net

升高，Inconel 625 多孔材料的孔隙形状趋近于圆形，且 Inconel 625 粉末颗粒表面越来越光滑，颗粒间的烧结颈发育越来越大。其原因是烧结温度超过了 Inconel 625 粉末的再结晶温度，粉末中原子的自扩散速度与流动速度随温度升高而加快，表面效应导致粉末表面形成液膜，而该液膜在表面张力的驱动下彼此相连并向凹坑处移动且逐渐填满凹坑。这一过程使表面趋于平滑，减少了拉伸过程中易成为裂纹源的应力集中部位，因此可以提高 Inconel 625 多孔材料拉伸强度。此外，高温下 δ 相的析出也是 Inconel 625 多孔材料强度上升的主要原因。由图 8 和图 10d 可知，Inconel 625 多孔材料烧结温度过高，会导致其孔隙率显著降低，对该材料在过滤分离，以及发汗冷却等领域的应用不利。

2.6　Inconel 625 多孔材料的高温拉伸性能

为了进一步掌握 Inconel 625 多孔材料在高温条件下的机械性能，采用 1 200 ℃烧结的样品进行不同温度条件下的高温拉伸性能测试，结果如图 11 所示。由图可知，随着样品拉伸强度检测温度从 600 ℃提高到 900 ℃，Inconel 625 多孔材料的抗拉强度呈下降趋势，在 600 ℃时最高为 50 MPa，而 900 ℃时仅为 15 MPa 左右，这主要是因为多孔材料的高温抗拉强度取决于其烧结颈部位的结合强度，材料表面即孔隙部位，导致抗拉强度下降。

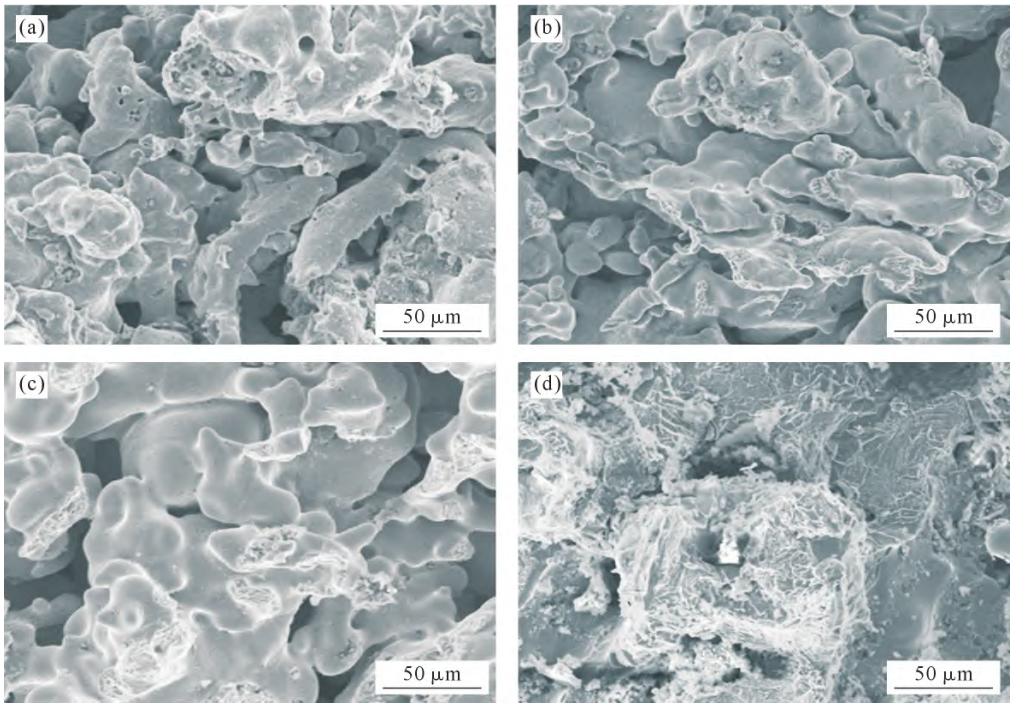

图 10　不同烧结温度制备 Inconel 625 多孔材料室温拉伸断面 SEM 像片：(a) 1 100 ℃; (b) 1 150 ℃; (c) 1 200℃; (d) 1 250 ℃

Fig.10　SEM images of room-temperature tensile fracture of Inconel 625 porous materials prepared at different sintering temperatures: (a) 1 100 ℃; (b) 1 150 ℃; (c) 1 200℃; (d) 1 250 ℃

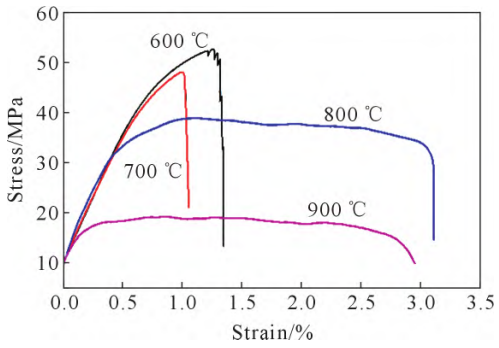

图 11　1 200 ℃烧结 Inconel625 多孔材料高温拉伸应力–应变曲线

Fig.11　High-temperature tensile stress-strain curves of Inconel 625 porous materials sintered at 1 200 ℃

图 12 为不同高温条件下样品高温拉伸断口形貌。由图中可以看出，所有的断口表面均有大量撕开烧结颈断口存在，表明 Inconel 625 多孔材料的拉伸强度主要由烧结颈贡献，烧结颈发育的程度决定了多孔材料的拉伸强度。但不同温度下，Inconel 625 多孔材料的烧结颈断口形貌也有不同。放大的断口图像表明，断口形貌处有韧窝与解理台阶存在，为韧脆混合型断裂；随着温度上升，脆性断裂特征比例上升。

断口边缘处有较大凹坑，推测是在拉伸变形中此处存在夹杂物，随着塑性变形程度的增加夹杂物处更易产生裂纹聚集。在切应力的作用下，使得位错运动过程中造成位错受阻，引起应力集中，造成断裂过程中该部分基体剥落。该处的 EDS 结果显示 Nb 元素富集，这是 Laves 相、碳化物、δ 相等硬脆相产生的必要条件，与上述分析相符。

中国知网　https://www.cnki.net

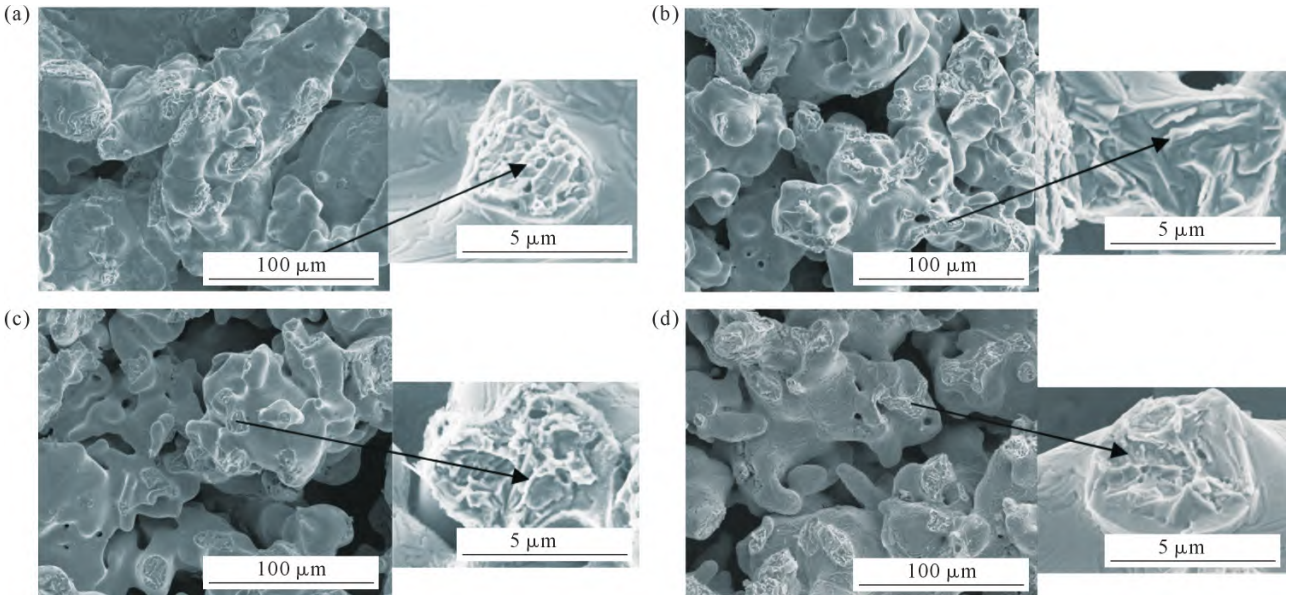

图 12 1 200 ℃烧结 Inconel 625 多孔材料高温拉伸断面 SEM 照片:(a) 600 ℃; (b) 700 ℃; (c) 800 ℃; (d) 900 ℃
Fig.12 SEM images of high-temperature fracture of Inconel 625 porous materials sintered at 1 200 ℃: (a) 600 ℃; (b)700 ℃; (c) 800 ℃; (d) 900 ℃

高温下随着原子运动加剧,会促进位错运动,当运动到晶界处时被钉扎在晶界处的析出相阻碍,导致位错塞积现象愈发明显, 从而阻碍位错的进一步运动。而且位错塞积导致碳化物处应力集中的概率更大,在高温变形过程中,使裂纹从此处萌生的概率增大。高温下晶粒长大造成晶界减少,当裂纹开始扩展,晶界的阻碍作用也减弱。以上因素的共同作用导致随着温度上升,高温拉伸强度下降。

另外,当温度增加后伸长率显著增加,这是由于高温拉伸时晶粒长大,导致材料的塑性增加。同时在高温下,合金内部可能发生动态再结晶,这种再结晶可以消除应力集中,减少变形阻力。高温下晶界的滑移活动也更加活跃,使得晶界对应变的阻力减小,位错的运动速度增加,容易融合和减少位错密度,有助于降低材料的塑性变形阻力,增加伸长率。再结晶后的晶粒提供了一部分强度, 但不足以弥补拉伸应力作用下晶界部位缺陷裂纹的扩展, 此时的塑性流动无法提供更高的强度。

3 结论

(1)研究了烧结温度对 Inconel 625 多孔材料形貌的影响规律,结果表明,在其他条件相同的情况下,随着烧结温度的提高,孔壁由粗糙向圆滑转变,当温度达到 1 250 ℃时,材料表面存在许多小颗粒。随着烧结温度进一步提高,粉末之间的扩散进一步加剧,孔结构开始收缩,最大孔径逐步变小,且伴随着孔隙率的降低,导致该多孔材料的透气能力下降,透气系数降低。

(2)随着烧结温度的升高,Inconel 625 多孔材料的室温拉伸强度不断提高,1 250 ℃烧结的样品拉升强度可达 224 MPa。对 1 200 ℃烧结的 Inconel 625 多孔材料样品进行高温拉伸测试, 结果表明样品的拉伸强度随着测试温度的升高而降低, 塑性随测试温度升高而提高。为了保证烧结颈充分发育,同时具有合适的多孔性能及力学性能,将 Inconel 625 多孔材料烧结温度控制在 1 200 ℃是合理的选择。

参考文献:

[1] 牛群. 孔隙对粉末烧结 GH4169 合金阻尼与拉伸性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
NIU Q. Effect of porosity on damping and tensile properties of power sintered GH4169 alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[2] MARCHESE G, LORUSSO M, PARIZIA S, BASSINI E, LEE J W, CALIGNANO F, MANFREDI D, TERNER M, HONG H U, UGUES D, LOMBARDI M, BIAMINO S. Influence of heat treatments on microstructure evolution and mechanical properties of Inconel 625 processed by laser powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 729: 64-75.

[3] 陈长风,姜瑞景,张国安,郑树启,戈磊. 镍基合金管材高温高压 H_2S/CO_2 环境中局部腐蚀研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(3): 427-432.
CHEN C F, JIANG R J, ZHANG G A, ZHEN S Q, GE L. Study on local corrosion of nickel-base alloy tube in the environmentof high temperature and high pressure H_2S/CO_2[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(3): 427-432.

[4] 师昌绪,仲增墉.我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281-1288.
SHI C X, ZHONG Z Y. Development and innovation superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288.

中国知网 https://www.cnki.net

[5] 赵新宝，谷月峰，鲁金涛，严靖博，尹宏飞. GH4169 合金的研究新进展[J]. 稀有金属材料与工程，2015, 44(3): 769-773.
ZHAO X B,GU Y F, LU J T, YANG J B, YIN H F. New research development of superalloy GH4169[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(3): 769-773.

[6] 杨鹏辉，杜琳琳，王 蓉，喇培清，郭铁明. Inconel 625 合金国内外研究现状综述[J]. 铸造技术，2023, 44(4): 322-331.
YANG P H, DU L L, WANG R, LA P Q, GUO T M. Review of the current status of domestic and international research on Inconel 625 alloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(4): 322-331.

[7] 赵洪炯，鲁中良，曹继伟，徐文梁，李涤尘. 定向多孔 GH3536 制备及其力学性能[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(5): 1694-1700.
ZHAO H J, LU Z L, CAO J W, XU W L, LI D C. Preparation and mechanical properties of oriented porous GH3536[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(5): 1694-1700.

[8] 陆恒. 热等静压近净成形 Inconel 625 涡轮盘数值模拟与试验研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
LU H. Numerical simulation and experiment of near net shaping Inconel 625 turbine disk under hot isostatic pressing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[9] 奚正平，汤慧萍，等. 烧结金属多孔材料[M]. 北京：冶金工业出版社，2009.

[10] HUANG W Y, LI Y T, REN Y J, SUN J S, XIA Z H, ZHOU L B, LI C, CHEN J, NIU Y, ZHAO Y H. Effect of scanning speed on the high-temperature oxidation resistance and mechanical properties of Inconel 625 alloys fabricated by selective laser melting[J]. Vacuum, 2022, 206: 111447.

[11] ZHOU B, YUAN W, HU J Y, TANG Y, LU L S, YU B H. Uniaxial tensile behavior of porous metal fiber sintered sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 2003-2008.

[12] WANG Y, LIU Y, TANG H P, LI W J, HAN C. Oxidation behavior and mechanism of porous nickel-based alloy between 850 and 1 000 ℃[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1558-1568.

[13] WANG Y F, CHEN X Z, SU C C. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 374: 116-123.

[14] 张敏，刘畅，任博，严凯，陈长军，王晓南. 3D 打印激光制备多孔镍合金组织和力学性能研究[J]. 中国光学，2016, 9(3): 335-341.
ZHANG M, LIU C, REN B, YAN K, CHEN C J, WANG X N. Microstructure and mechanical properties of porous Ni alloy fabricated by laser 3D printing[J]. Chinese Optics, 2016, 9(3): 335-341.

[15] 袁晓静，邱贺方，曾繁琦，罗伟蓬，王旭平，杨俊华. 固溶处理对脉冲微弧等离子增材制造 Inconel 625 构件力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2022, 51(11): 4297-4305.
YUAN X J, QIU H F, ZENG F Q, LUO W P, WANG X P, YANG J H. Effect of solution treatment on mechanical properties of Inconel 625 fabricated by pulsed micro-arc plasma additive manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(11): 4297-4305.

[16] TENG Q, LI S, WEI Q S, SHI Y S. Investigation on the Influence of heat treatment on Inconel 718 fabricated by selective laser melting: Microstructure and high temperature tensile property[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 35-45.

[17] LI H, LIU R T, CHEN J, WANG Z B, XIONG X. Preparation of nickel porous materials by sintering nickel oxalate and sodium chloride after blending and reduction[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 3149-3157.

[18] 王昊，荆鹏，李广忠. 烧结温度对多孔 Inconel 625 合金性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2021, 50(10): 3693-3697.
WANG H, JING P, LI G Z. Effect of sintering temperature on properties of porous Inconel 625 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(10): 3693-3697.

[19] 秦子珺，刘锋，江亮. SPS 工艺制备镍基高温合金的微观组织[J]. 粉末冶金材料科学与工程，2018, 23(5): 488-494.
QIN Z J, LIU F, JIANG L. Microstructure of nickel-based superalloys prepared by spark plasma sintering[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2018, 23(5): 488-494.

[20] 阮建明，黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京：机械工业出版社，2012.

[21] 汪强兵，李广忠，汤慧萍，杨保军，奚正平，王培. 粉末及烧结工艺对金属多孔材料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2017, 46(9): 2684-2687.
WANG Q B, LI G Z, TANG H P, YANG B J, XI Z P, WANG P. Effect of powder and sintering process on properties of powder metal porous materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(9): 2684-2687.

中国知网　https://www.cnki.net