DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3025

复合区基体调控对 Al_2O_3p/40Cr 钢球形网络构型复合材料压缩性能的影响

魏绍生[1,2],龚文豪[1],张西鹏[1],卢德宏[1]

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院,云南 昆明 650093;2. 云南机电职业技术学院 机械工程学院,云南 昆明 650203)

摘　要:采用金属微粉对 Al_2O_3p/40Cr 钢球形网络构型复合材料的复合区基体进行调控,研究了金属微粉对构型复合材料压缩性能的影响。结果表明,Fe320 合金粉调控的构型复合材料压缩屈服强度、抗压强度、断裂应变,分别比还原铁粉调控复合材料提升了 26.0%、25.4%、21.3%。结果表明,Fe320 粉提高了构型复合材料复合区基体中 Ni 等合金元素含量,而还原铁粉则略微降低了复合区基体合金元素含量,因此 Fe320 粉强化了复合区基体。同时,球形网络复合结构中,裂纹在复合区内部纵向扩展,基体区对裂纹扩展有明显阻碍作用。因此,构型结构与复合区基体强化协同提高了构型复合材料的压缩力学性能。

关键词:复合区基体;调控;网络构型复合材料;压缩力学性能

中图分类号:TG142　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)04-0363-08

Influence of Composite Matrix on Compressive Properties of Al_2O_3p/40Cr Steel Based Spherical Network Architecture Composites

WEI Shaosheng[1,2], GONG Wenhao[1], ZHANG Xipeng[1], LU Dehong[1]

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Yunnan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, China)

Abstract: The influenceof the composite zone matrix on the compression properties of Al_2O_3p/40Cr steel network architecture composites was studied by adjusting the matrix withmetallic powders. The results show that the compressive yield strength, compressive strength and fracture strain of the Fe320 adjustedarchitecture composite increased by 26.0%, 25.4% and 21.3%, respectively, compared with the reduced iron powder adjustedarchitecture composite. The reason is that Fe320 powder increases the content of alloying elements such as Ni in the composite matrix, while iron powder slightly reduces the content of alloying elements in the composite matrix, so Fe320 powder strengthens the composite matrix. At the same time, in the spherical network composite architecture, the cracks propagate vertically inside the composite zone, and the matrix zone of the architecture composites obviously hinders crack propagation. Therefore, the combination of architecture structure and matrix strengthening in the composite zone improves the compressive properties of architecture composites.

Key words: composite matrix; adjusting; network architecture composite; compression mechanical properties

近年来,采用构型化方法提高金属基复合材料强韧综合性能,成为国内外复合材料研究的热点[1-7]。Al_2O_3 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料因硬度高、耐磨性好、成本低等优势,成为目前备受关注的新一代高性能耐磨复合材料[2,8-11]。但是,Al_2O_3 增强复合材料一直存在着耐磨性与强塑性不匹配的问题,即陶瓷颗粒加入量的提高反而会降低材料的强度和塑性,强化效果差[12],进而影响耐磨件的使用寿命。为此,本课题组近年来一直从事构型化改善 Al_2O_3 颗粒/钢基复合材料的强韧性和耐磨性研究工作。

收稿日期:2023-02-06

基金项目:国家自然科学基金(51865024)

作者简介:魏绍生,1972 年生,博士研究生.研究方向:金属基复合材料.电话:13669730026, Email: 1400833260@qq.com

通讯作者:卢德宏,1968 年生,博士,教授.研究方向:复合材料和耐磨材料.电话:13888324279, Email: zhizhu197644@sina.com

引用格式:魏绍生,龚文豪,张西鹏,等.复合区基体调控对 Al_2O_3p/40Cr 钢球形网络构型复合材料压缩性能的影响[J].铸造技术,2023,44(4):363-370.

WEI S S, GONG W H, ZHANG X P, et al. Influence of composite matrix on Compressive properties of Al_2O_3p/40Cr steel based spherical network architecture composites[J]. Foundry Technology, 2023, 44(4): 363-370.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

课题组前期制备了 Al_2O_3p/40Cr 钢三维网络互穿构型复合材料，研究了复合材料的压缩性能、开裂方式等，结果表明三维网络互穿构型复合材料的屈服强度、压缩强度及其应变，分别比 Al_2O_3p 均匀分布增强 40Cr 钢基复合材料（Al_2O_3p/40Cr 均匀复合材料）提高了 144.7%、162.8%和 20.0% [13]。但是研究也表明，裂纹往往萌生于 Al_2O_3/钢复合区内部或复合区 / 基体区界面，并沿着复合区纵向扩展[14]。因此，减少复合区的连接，阻碍裂纹扩展，成为进一步提高构型复合材料强韧性的重要方向。

因此，课题组进一步开发了 Al_2O_3p/钢球形网络构型复合材料[15]。其中，Al_2O_3p/钢复合区呈球形，均匀分布于钢基体中，但球形复合区之间还有小截面柱状连接区域。这种构型相比于柱状三维网络互穿构型，复合区之间的连接程度大为减小。研究表明，Al_2O_3p/高锰钢球形网络构型复合材料的屈服强度、压缩强度及其应变，分别比高锰钢基均匀复合材料提高 203.8%、236.1%和 134.8%。对比三维互穿网络构型的性能提升[13]，球形网络构型复合材料具有更高的强韧综合性能。

同时，构型复合材料的基体其实包含 2 部分，分别是基体区及复合区的基体。其中，为了调节复合区中增强相的体积分数，往往会在增强相预制体中加入一定量的金属微粉作为调节剂，但因此也导致复合区中基体成分发生改变，与基体区成分不一致。这无疑会影响构型复合材料的整体性能。因此，研究复合区基体成分、组织对构型复合材料整体力学性能的影响具有重要意义。

本文采用不同的金属微粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢球形网络构型复合材料中的复合区基体，研究了复合区基体对构型复合材料压缩力学性能的影响，分析了构型复合材料裂纹的萌生、扩展以及开裂形式。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料的选择

使用 Al_2O_3 颗粒（Al_2O_3p）作为构型复合材料增强体，纯度为 99.75%（质量分数，下同），平均粒径为 160~120 μm。基体材料为 40Cr 钢，实际成分（质量分数，%）为：0.39 C、0.31 Si、0.63 Mn、1.103 Cr、其余为 Fe。40Cr 钢是一种调质钢，具有较好的综合力学性能。

为了调控构型复合材料中复合区的基体成分，向 Al_2O_3p 预制体中加入金属微粉，使其在 40Cr 钢液浸渗预制体时，改变钢液的成分。选用 2 种金属微粉：还原铁粉和 Fe320 合金粉。还原铁粉纯度为 99.50%，粒度为 300 μm，如图 1 所示。Fe320 粉化学成分如表 1 所示。采用水玻璃（$Na_2O·mSiO_2$）作预制体的黏结剂，其模数 m 为 3.3，波美度为 40%。选用直径为 2 mm 的 304 不锈钢钢丝网作为固定 Al_2O_3p 预制球的框架。

表1 Fe320合金粉末化学成分 *w*/%
Tab.1 Chemical composition of Fe320 alloy powder

化学元素	C	Si	B	Cr	Ni	Fe
含量	0.4~1.2	1.5~3.0	1.2~2.0	1.2~2.0	10~15	Bal.

1.2 复合材料的制备

首先将 Al_2O_3p、还原铁粉或 Fe320 合金粉（15%，质量分数）、黏结剂（3%，质量分数）用罐磨机混合 20 min（转速 150 r/min），然后将粉末填入带钢丝网（图 1(b)）的塑料模具（图 1(a)）中；借助钢丝网（图 1(b)）的支撑作用，将 Al_2O_3p 预制球（直径 ϕ8 mm）定位于钢丝网的节点处（图 1(c)）；对预制体进行焙烧，温度为 500 ℃，时间为 2 h，使其具有一定的强度。将两层预制体并排预置于砂型型腔中，利用钢丝插入砂型底部固定。

使用 0.5 t 的中频感应炉熔炼 40Cr 钢，出炉温度约为 1 620 ℃。当钢液温度约为 1 570 ℃时，向砂

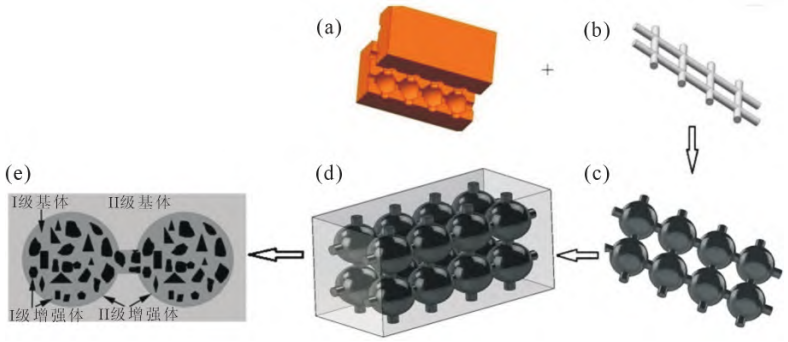


图 1 球形网络复合材料结构示意图：(a) 塑料模具，(b) 不锈钢钢丝网，(c) 球状构型预制体，(d) 球形网络构型复合材料，(e) 球形复合区之间的连接

Fig.1 Schematic diagram of network architecture composites: (a) plastic die, (b) stainless steel network, (c) spherical preform, (d) architecture composite, (e) linked spherical composite zones

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型中浇注钢液，使其浸渗预制体，凝固后获得球形网络构型复合材料，如图 1(d~e)所示。其中，基体区为 40Cr 钢网络，复合区由球形区及其之间的小圆柱区构成，复合区中增强体为 Al_2O_3p，复合区基体是 40Cr 浸渗并熔化预制体中的合金粉后形成的材料。采用水刀切割、磨床打磨制备复合材料压缩试样。压缩试样为长方体形，标准试样尺寸为 18 mm×18 mm×36 mm。制备出的球形网络构型复合材料复合区的体积分数为 36.8%。

采取淬火+中温回火的方式对试样进行热处理，如图 2 所示。

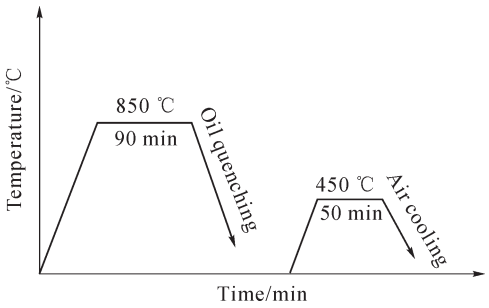


图 2 热处理工艺图

Fig.2 Process curve of heat treatment

1.3 测试与表征

依照标准金相方法制作金相试样，使用浓度为 4%的硝酸酒精溶液浸蚀试样，使用 Nikon M300 光学显微镜观察并拍摄金相组织。采用 ZEISS E-VO18-21-57 型扫描电镜观察复合材料组织，同时使用 X 射线能谱仪(EDS)分析样品成分。X 射线衍射仪选用荷兰帕纳克 Pyrean 锐影，采用 CuKa1 作为单色器，参数设置：扫描速度为 2(°)/min，扫描范围为 2θ=10°~90°。使用 HV-1000Z 型自动转塔显微维氏硬度计检测复合材料的显微硬度。使用美特斯 SHT4305 万能试验机测试试样压缩性能，加载速率为 0.65 mm/min。采用三维 X 射线断层扫描(CT)拍摄试样压缩后的组织形貌，研究复合材料内部裂纹的分布及扩展。

2 结果与讨论

2.1 不同微粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料的微观结构与界面

图 3 (a、c) 分别为加入还原铁粉、Fe320 粉的 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料的金相组织。可以看出，复合区中增强体颗粒分布均匀，颗粒与基体之间存在厚度均匀的界面层。图 3(b、d)为相应复合材料热处理后的微观组织。可以看出，对还原铁粉调控的复合材料，其热处理后复合区基体组织为回火托氏体，主要由粒状渗碳体和片状铁素体组成；Fe320 粉调控复合材料的复合区基体的铁素体和渗碳体组织更加细小，分布更为均匀。

图 4 分别为添加还原铁粉和 Fe320 合金粉的构型复合材料复合区界面的 EDS 分析，其中同一部位的元素含量是 3 个点测量值的平均值，结果如表 2 所示。从图 4(a)可以看出，Al_2O_3p 和基体之间存在厚度为 2 μm 左右的界面层，颗粒和基体都有多种元素向界面层发生了扩散，包括 Al_2O_3p 中的 Al、O 元素，基体中的 Fe、Cr 元素。从表 2 看，加入还原铁粉

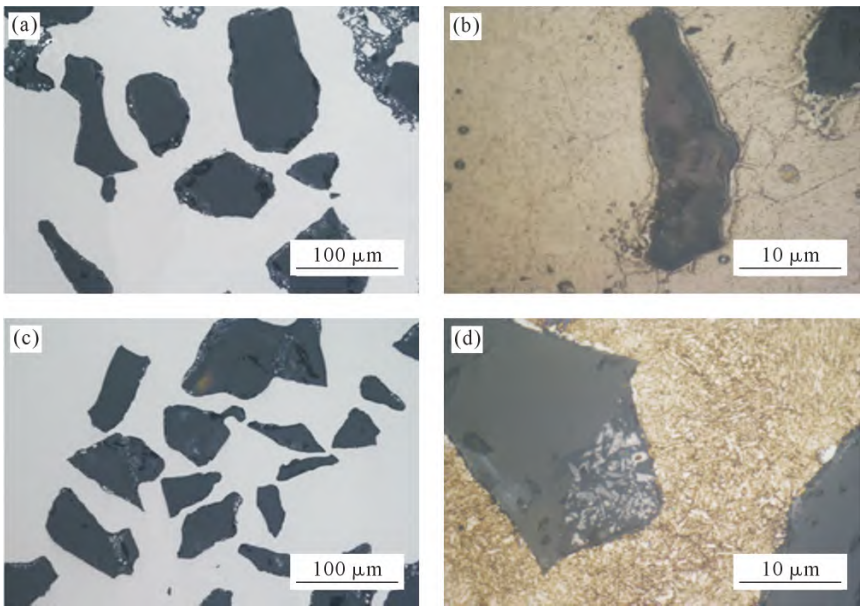


图 3 不同微粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料的金相组织：(a) 还原铁粉调控复合材料(铸态)，(b) 还原铁粉调控复合材料(热处理态)，(c) Fe320 调控复合材料(铸态)，(d) Fe320 调控复合材料(热处理态)

Fig.3 Microstructure of Al_2O_3p/40Cr composites adjusted by different powders: (a) iron powder (as-cast), (b) iron powder (heat treated), (c) Fe320 powder (as-cast), (d) Fe320 powder (heat treated)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

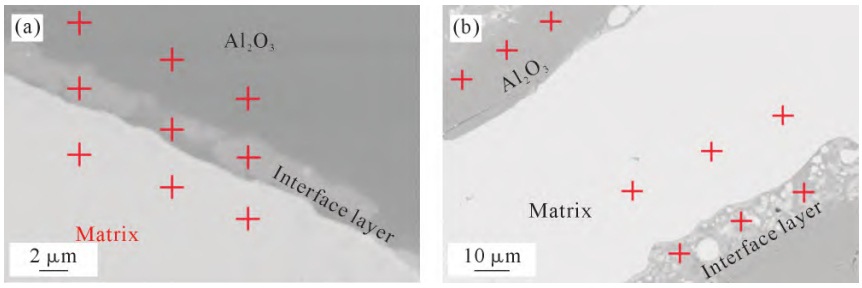


图 4 不同复合材料复合区界面成分 EDS 分析：(a) 含还原铁粉复合材料，(b) 含 Fe320 粉复合材料
Fig.4 EDS analysis at Al_2O_3p/iron interfaces of composite: (a) adjusted by iron powder, (b) adjusted by Fe320 powder

表 2 不同微粉调控的复合材料不同区域主要元素的含量 *w*/%
Tab.2 Element content at different zones in different composites

微粉种类	区域元素	Al	O	Si	Cr	Ni	Mn	Fe
还原铁粉	基体	-	-	0.68	1.06	-	0.66	93.32
	界面层	7.24	19.37	8.82	1.53	-	2.92	6.39
	Al_2O_3p	48.47	40.51	0.42	-	-	-	-
Fe320 粉	基体	-	-	0.49	1.54	1.87	0.53	92.43
	界面层	4.38	21.42	10.08	1.67	2.12	2.98	13.30
	Al_2O_3p	49.34	40.77	-	-	-	-	-

后，基体中的 Cr、Mn 等合金元素与 40Cr 钢的成分基本相同，说明对 40Cr 钢的稀释作用不大，可能是铁粉加入量不多，二者成分差异也不大。

从图 4(b)看出，加入 Fe320 的构型复合材料，其复合区中 Al_2O_3p 与基体之间存在较厚的界面层，约为 10 μm。界面层中同样存在从 Al_2O_3p 扩散来的 Al、O 元素，以及从基体中扩散的 Fe、Cr 元素。同时，复合区基体成分中 C、Ni、Cr 元素含量比 40Cr 钢有所提高，尤其是 Ni 含量增加明显，说明 Fe320 粉显著提高了 40Cr 基体的合金元素含量。这将有助于提高基体的淬透性和力学性能。

图 5 为不同微粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料的 XRD 图谱。可以发现，两种复合材料的物相基本一致，均包括 Al_2O_3、Fe 及 $Al_xFe_xSi_x$ 等相；对于 Fe320 调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料，部分 Cr、Ni 元素在 Fe 中固溶，形成了 Fe-Cr、Fe-Ni 固溶体相。基体中的 Fe_3C 衍射峰并没有发现，可能是含量较少的缘故。

2.2 微粉调控对构型复合材料压缩性能的影响

2.2.1 铸态性能

表 3 为铸态下 40Cr 钢基体和不同微粉调控的 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料的压缩性能。可以看出，Fe320 粉调控的复合材料的屈服强度、抗压强度、断裂应变，相较还原铁粉调控的复合材料，分别提升了 22.6%、35.9%、130.4%。这是因为 Fe320 合金粉的加入，提高了复合材料中 C、Ni 等元素的含量，可能通过固溶、形成更多渗碳体等，提高复合区基体的力学性能。

表 3 铸态 40Cr 钢、不同微粉调控复合材料的压缩性能
Tab.3 Compressive properties of the as-cast materials

材料类型	屈服强度 /MPa	抗压强度 /MPa	断裂应变
40Cr 钢	436.6	未断裂	未断裂
铁粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料	495.4	841.9	0.115
Fe320 调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料	607.3	1 144.0	0.265

2.2.2 热处理态性能

表 4 为热处理态 40Cr 钢和复合材料的压缩性能。40Cr 钢热处理态(高温淬火+中温回火)组织为回火托氏体。热处理后 40Cr 钢的屈服强度较其铸态提

表 4 热处理态 40Cr 钢、复合材料的压缩性能
Tab.4 Compressive properties of heat-treated materials

试样类型	屈服强度 /MPa	抗压强度 /MPa	断裂应变
40Cr 钢	1 026.3	未断裂	未断裂
还原铁粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料	1 196.8	1 367.8	0.047
Fe320 粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料	1 507.6	1 715.4	0.057

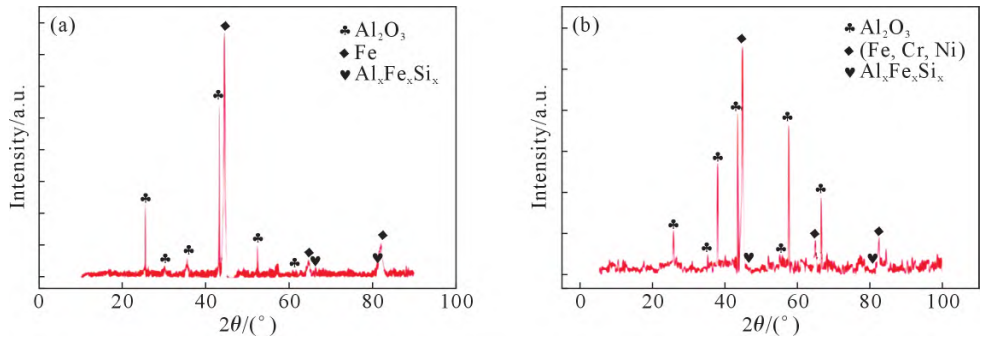


图 5 不同微粉调控的 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料的 XRD：(a) 还原铁粉调控，(b) Fe320 调控
Fig.5 XRD analysis of composite: (a) adjusted by iron powder, (b) adjusted by Fe320 powder

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高了 135.1%。同时，其塑性较好，为避免压缩过程中发生设备损伤，人为停止了对试样的继续压缩，因此没有获得 40Cr 钢的抗压强度和断裂应变值。

首先，对比表 3~4，加入同种合金粉时，热处理态复合材料的屈服强度、抗压强度比铸态复合材料得到了大幅提升。其中，还原铁粉调控的构型复合材料热处理后的屈服强度、抗压强度比热处理前，分别提高了 141.6%和 62.5%；而 Fe320 粉调控的复合材料热处理后比热处理前，分别提升了 148.2%和 49.9%。可见，热处理后 2 种复合材料的屈服强度比铸态上升的幅度，都与 40Cr 钢的提升幅度很强度获得提高。但同时，热处理态复合材料的断裂应变相比铸态复合材料大幅下降。这应当是由于热处理增加了复合材料的强度，但同时使得材料塑性下降。

其次，由表 4 可知，对比加入不同合金粉，热处理后 Fe320 调控的复合材料的屈服强度、抗压强度、断裂应变，相较还原铁粉调控的复合材料，分别提升了 26.0%、25.4%、21.3%。结合表 3 可以看出，对铸态复合材料而言，Fe320 调控的构型复合材料的强度、韧性均优于还原铁粉调控的复合材料。由于二者的主要区别只是 II 级增强体中基体的不同(II 级增强体体积分数相同，II 级基体都是 40Cr 钢)，因此提高构型复合材料基体区强度和塑性，也能够提高构型复合材料整体的强度和塑性。

图 6 为热处理前后不同微粉调控的复合材料和 40Cr 钢的应力–应变曲线图。由图 6(a~b)对比发现，相同材料的热处理态，其强度明显高于铸态，同时塑性却下降明显。这与表 3~4 的结果一致。由图 6(b)可知，两种构型复合材料的变形都以弹性变形为主，塑性变形阶段很短；40Cr 钢塑性变形明显，在本研究试验条件下并没有发生断裂。而 Fe320 粉调控的 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料不但强度比铁粉调控的复合材料高，而且塑性变形也略长。3 种材料弹性变形阶段的曲线斜率相当，说明微粉的加入并未明显影响复合材料的弹性模量。

2.3 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料的裂纹萌生与扩展

2.3.1 还原铁粉调控复合材料压缩表面形貌分析

图 7 为热处理前后还原铁粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料试样压缩失效后的宏观形貌图。图 7(a~b)为铸态复合材料。可以看出，试样压缩变短明显，表面开裂严重，接近脱落。主裂纹不仅沿复合区框架纵向扩展，而且基体区中裂纹沿纵向 45°夹角方向开裂，但并未沿横向贯穿整个材料。图 7(c~d)为热处理态复合材料，与铸态复合材料相比，由于基体强度提高，试样压缩变短较小；沿复合区框架纵向开裂仍为主裂纹的扩展方向，且基体区也沿 45°方向开裂。

将热处理态复合材料表面磨去 2 mm，对复合材料亚表层的裂纹及开裂行为进行观察，如图 8 所示。

图 8(a)中复合区内部裂纹沿着预制体不锈钢框架纵向扩展。图 8(b)表明复合区内裂纹萌生于Al_2O_3p

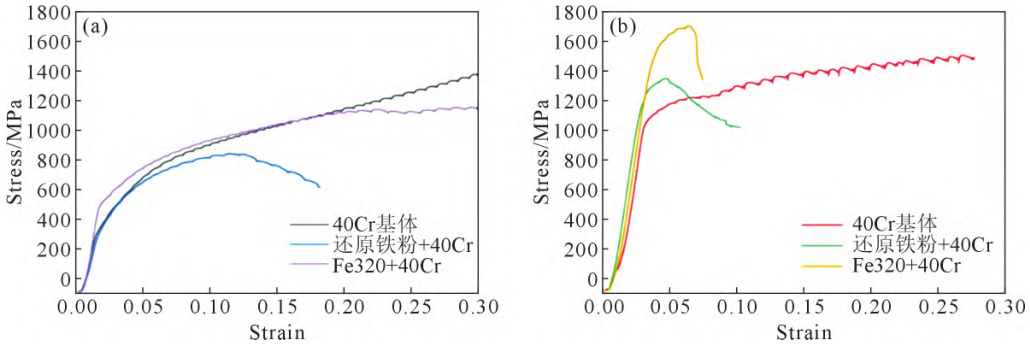


图 6 不同微粉调控的 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料压缩应力–应变曲线：(a) 铸态，(b) 热处理态

Fig.6 Stress-strain curves of Al_2O_3p/40Cr composites: (a) as-cast, (b) heat treated

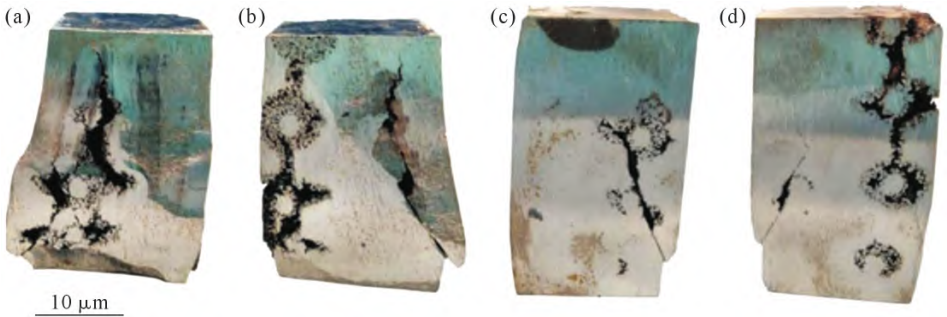


图 7 还原铁粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料压缩开裂试样形貌：(a~b) 铸态，(c~d) 热处理态

Fig.7 Morphology of fracture samples of Al_2O_3p/40Cr architecture composites adjusted by iron powder: (a~b) as-cast, (c~d) heat treated

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

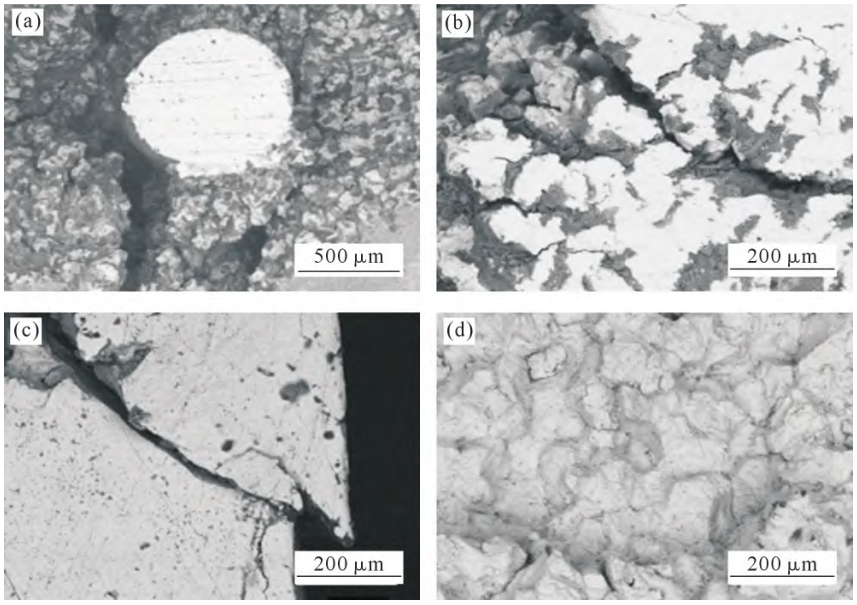


图 8 热处理态还原铁粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢复合材料亚表层开裂图：(a) 预制体框架周围的裂纹，(b) 复合区裂纹，(c) 基体区裂纹，(d) 基体区断裂面

Fig.8 Fracture surface photographs of Al_2O_3p/40Cr architecture composite adjusted by iron powder: (a) cracks around stainless steel network, (b) cracks inside composite zone, (c) cracks inside matrix zone, (d) fracture morphology of matrix zone

内部或 Al_2O_3p/Fe 界面，沿 Al_2O_3p 聚集处扩展，而陶瓷颗粒发生破碎，无法有效偏转与阻止裂纹。从图 8(c~d)的基体部分可以看到，与垂直纵向呈 45°夹角方向出现开裂裂纹，断裂面呈现大小不一的韧窝特征，表明基体部分的压缩断裂仍以韧性断裂为主。

2.3.2 Fe320 粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料内部开裂模式

将 CT 扫描结果重构，获得 Fe320 粉调控复合材料试样的压缩表面形貌，如图 9 所示。由图 9(a)中可以看出，该复合材料表面开裂较为轻微，裂纹主要在复合区与基体区界面处萌生，且沿 45°方向扩展；表面发生了塑性变形而产生褶皱。图 9(b)中的黄色区域表示复合区，绿色线条表示裂纹，裂纹主要在复合区内萌生，且沿框架纵向扩展；由于基体区的阻隔，裂纹没有在两层框架间横向连通。图 9(c)为复合材料的整体形貌图。可以看出，在压缩过程中，基体区和复合区均没有出现明显的剥落破坏，只有表面褶皱，整体保持较为完整的形貌。

通过 CT 扫描分析了 Fe320 粉调控复合材料内部裂纹的萌生与扩展过程，如图 10 所示。在压缩载荷作用下，由于复合区弹性模量高，应力大，对整体复合材料起支撑作用。而基体区则抑制复合区内裂纹的扩展，从而使基体区与复合区网络相互协调变形，提升了球形网络复合区的抗压能力，压缩后的复合区清晰可见，仍保持相当高的完整度。图 10(a~b)中的裂纹 1 位于试样中部，与压缩方向呈 45°方向角，主要在复合区中萌生并扩展至基体。图 10(c)中裂纹 1 被球形网络的不锈钢框架阻隔，形成子裂纹 1-1 和 1-2，两条次裂纹并未大幅度地向基体区继续扩展。图 10(d)中，裂纹 1 再次相连，但裂纹仅在复合区框架的两个结点间扩展，遇到基体与不锈钢框架后，裂纹的扩展减弱。图 10(e)中，裂纹再次通过复合区联通，由于受到基体的阻隔，裂纹并未扩展至其他区域。图 10(b)与(e)现象一致，说明裂纹只能在复合

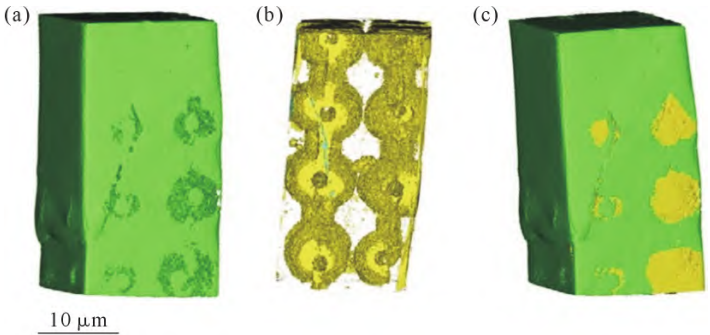


图 9 Fe320 粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料压缩后的三维重构形貌：(a) 基体区，(b) 复合区，(c) 复合材料

Fig.9 3D reconstructed morphology of Al_2O_3p/40Cr architecture composite adjusted by Fe320 powder: (a) matrix zone, (b) composite zone, (c) architecture composite

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

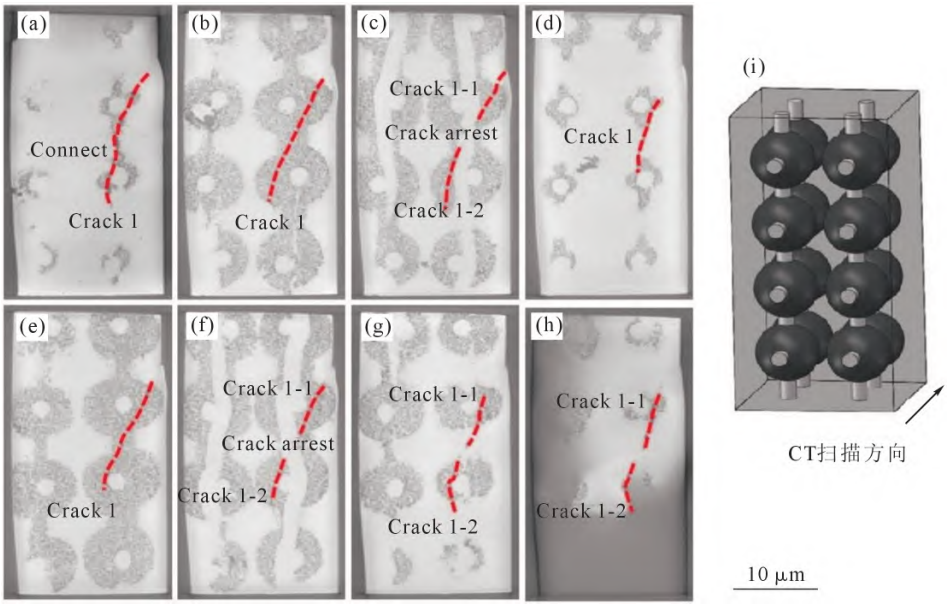


图 10　Fe320 粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料内部裂纹扩展 CT 图：(a~h) 按照 (i) 扫描图，(i) CT 扫描方向

Fig.10　Crack evolution in CT slices of the Al_2O_3p/40Cr architecture composite adjusted by Fe320 powder: (a~h) scanning graphs according to (i), (i) CT scan direction

区内部扩展，基体区对裂纹扩展有明显阻碍作用。图 10(f)与(c)现象一致，说明不锈钢框架具有阻止裂纹扩展的作用。这些都说明球形网络复合材料的构型结构很大程度上决定了裂纹的扩展路径。图 10(g~h)中裂纹 1-1 扩展至基体区，但并未完全与裂纹 1-2 相连，主要沿复合区框架的结点处开裂；裂纹 1-2 向下扩展的过程中发生了明显的偏转，裂纹长度变短；到达试样表面基体区后，基体材料在承担压缩载荷的同时，还抑制和阻碍了裂纹的进一步扩展。

图 10 还从试样内部进一步表明，由于基体区的阻隔，裂纹没有在两层框架间横向连通；也说明球形复合区之间不发生连接，对阻碍裂纹扩展非常重要。

3　结论

(1)Fe320 粉调控 Al_2O_3p/40Cr 钢构型复合材料，其铸态屈服强度、抗压强度、断裂应变，比还原铁粉调控复合材料有明显提高，分别提升了 22.6%、35.9%、130.4%；其热处理态性能，也比还原铁粉调控复合材料有一定提高，分别提升了 26.0%、25.4%、21.3%。

(2)Fe320 粉提高了构型复合材料复合区基体中 Ni 等合金元素含量，而还原铁粉则略微降低了复合区基体合金元素含量。

(3)球形网络复合结构中，裂纹在复合区内部纵向扩展，基体区对裂纹扩展有明显阻碍作用。由于 Fe320 粉强化了复合区基体，减小了裂纹的扩展。因此构型结构与复合区基体强化协同提高了整个复合材料的压缩力学性能。

参考文献：

[1] 张荻，张国定，李志强. 金属基复合材料的现状与发展趋势[J]. 中国材料进展，2010, 29(4): 1-7.
ZHANG D, ZHANG G D, LI Z Q. The current state and trend of metal matrix composites[J]. Materials China, 2010, 29(4): 1-7.

[2] 高义民. 陶瓷颗粒增强铁基表面复合材料的研究现状与最新进展[J]. 铸造，2012, 61(9): 985-990.
GAO Y M. Status and recent progress of research on ceramic particles reinforced iron matrix surface composites[J]. Foundry, 2012, 61(9): 985-990.

[3] BRECHET Y, EMBURY J D. Architectured materials: Expanding materials space[J]. Scripta Materialia, 2013, 68(1): 1-3.

[4] HUANG L J, GENG L, PENG H X. Microstructurally inhomogeneous composites: Is a homogeneous reinforcement distribution optimal?[J]. Progress in Materials Science, 2015, 71: 93-168.

[5] 郭强，李志强，赵蕾，等. 金属材料的构型复合化[J]. 中国材料进展，2016, 35(9): 641-650, 700.
GUO Q, LI Z Q, ZHAO L, et al. Metal matrix composites with microstructural architectures[J]. Materials China, 2016, 35(9): 641-650, 700.

[6] KOYAMA M, ZHANG Z, WANG M M, et al. Bone-like crack resistance in hierarchical metastable nanolaminate steels[J]. Science, 2017, 355(6329): 1055-1057.

[7] ZHANG M Y, ZHAO N, YU Q, et al. On the damage tolerance of 3-D printed Mg-Ti interpenetrating-phase composites with bioinspired architectures[J]. Nature Communications, 2022, 13: 3247.

[8] 王恩泽，徐雁平，鲍崇高，等. Al_2O_3 颗粒/耐热钢复合材料的制备及高温磨料磨损性能[J]. 复合材料学报，2004(1): 56-60.
WANG E Z, XU Y P, BAO C G, et al. Fabrication of Al_2O_3/heat-resistant steel composite and its wear-resistance at high temperature and abrasive[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004(1): 56-60.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[9] 赵散梅，张新明，郑开宏，等. ZTA/高铬铸铁基复合材料的制备及磨损性能研究[J]. 铸造技术，2011, 32(12): 1673-1676.
ZHAO S M, ZHANG X M, ZHENG K H, et al. Fabrication of ZTA/high chromium cast iron matrix composites and its abrasive wear resistant[J]. Foundry Technology, 2011, 32(12): 1673-1676.

[10] 蒋业华，李祖来，卢德宏，等. 陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料[M]. 北京：科学出版社，2019.
JIANG Y H, LI Z L, LU D H, et al. Ceramic particles reinforced iron matrix architecture wear-resistant composites [M]. Beijing: Science Press, 2019.

[11] 卢德宏，蒋业华. 构型陶瓷/钢铁耐磨复合材料研究进展[J]. 精密成形工程，2021, 13(3): 40-48.
LU D H, JIANG Y H. Research progress of wear performance of ceramic particulates reinforced iron matrix architecture composites [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 40-48.

[12] SHAMSUDDIN S, JAMALUDIN S B, HUSSAIN Z, et al. The effects of Al_2O_3 amount on the microstructure and properties of Fe-Cr matrix composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41: 3452-3457.

[13] GONG W H, LU D H, HE G Y, et al. Effect of volume fraction of metal matrix composites framework on compressive mechanical properties of 3D interpenetrating ZTAp/40Cr architectured composites[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29: 859-865.

[14] LU D H, HE G Y, WANG L K, et al.Compressive properties and cracking behaviour of 3D interpenetrating hierarchical Al_2O_3p/steel composite[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(6): 716-724.

[15] 寇宝弘，卢德宏，龚文豪，等. 构型参数及方式对 Al_2O_3p/高锰钢球形网络复合材料压缩性能的影响[J]. 复合材料学报，2023, 40(1): 499-509.
KOU B, LU D H, GONG W H, et al. Influence of architecture parameter and mode on compressive properties of an Al_2O_3p/high manganese steel spherical interpenetrating composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 499-509.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net