不同放电能量下铜粉的电磁压实特性与烧结体性能研究

董东营，王重伍，蒋浩，李光耀，崔俊佳
（湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室，长沙 410082）

摘要：目的 研究放电能量对铜粉电磁压实特性与烧结体性能的影响，提升铜材料的制备效率与质量。**方法** 通过电磁粉末压实技术在不同放电能量下制备铜压坯，研究压坯的相对致密度与微观形貌随放电能量的变化趋势。随后对其进行真空烧结，对烧结体的拉伸性能与断口形貌进行测试，评估放电能量对烧结体性能的影响。**结果** 随着放电能量的增加，铜压坯的相对致密度逐渐增大并趋于平稳。在 20 kJ 时，压坯的相对致密度较好，为 0.968。压坯端面的孔隙随放电能量的增大逐渐减少，上端面的压实质量总体好于下端面。压坯烧结后拉伸载荷与位移随放电能量的增大逐渐增大，在 20 kJ 时试样的拉伸强度与断裂伸长率均达到了最大，分别为 224.7 MPa 和 29.2%。拉伸试样的微观断口显示，断口表面的孔隙逐渐减小，颗粒边界熔合效果逐渐提升，韧窝越发明显。**结论** 试验结果表明，电磁粉末压实技术制备的铜材料在 20 kJ 的放电能量时具有较好的压实与烧结性能，为铜粉电磁压实工艺参数的设计提供了参考。

关键词：电磁压实；铜粉；烧结体；微观形貌；拉伸强度
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.005
中图分类号：TG146.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2021)04-0029-08

Study on Electromagnetic Compaction Characteristics and Sintered Body Properties of Copper Powder under Different Discharge Energies

DONG Dong-ying, *WANG Chong-wu*, *JIANG Hao*, *LI Guang-yao*, *CUI Jun-jia*
(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the influence of discharge energy on the electromagnetic compaction characteristics and sintered body properties of copper powder, and to improve the preparation efficiency and quality of copper materials. In this work, copper compacts were prepared by electromagnetic powder compaction technology under different discharge energies. The change trend of the relative density and micro-morphology of compacts with the discharge energy was studied. Then, the compacts were vacuum sintered, and the tensile properties and fracture morphology were tested to evaluate the effect of discharge energy on the performance of the sintered body. Results showed that the relative density of the copper compacts gradually increased and tended to stabilize as the discharge energy increased. At 20 kJ, the relative density of the compacts reached the maximum, which was 0.968. The pores of the end face of compacts gradually decreased with the increase of discharge energy, and the compaction quality of the upper end face was generally better than that of the lower end face. After the compacts were sintered, the tensile load and displacement gradually increased with the increase of discharge energy. The tensile strength and elongation at break of the specimen both reached the maximum at 20 kJ, which were 224.7 MPa and 29.2%, respectively.

收稿日期：2021-04-21
基金项目：国家自然科学基金（51975202）；湖南省自然科学基金（2019JJ30005）
作者简介：董东营（1992—），男，博士生，主要研究方向为电磁粉末压实。
通讯作者：崔俊佳（1983—），男，教授，博士生导师，主要研究方向为汽车轻量化、异种材料高效连接技术。

The microscopic fracture of the tensile specimens showed that the pores on the fracture surface were gradually reduced, the effect of particle boundary fusion was gradually improved, and the dimples became more obvious. In conclusion, the test results showed that the copper materials prepared by electromagnetic powder compaction technology had better compaction and sintering performance at a discharge energy of 20 kJ, which can be a reference for the establishment of the electromagnetic compaction process parameters of copper powder.

KEY WORDS: electromagnetic compaction; copper powder; sintered body; micro-morphology; tensile strength

纯铜呈紫红色，具有较好的延展性、导热性与导电性，被广泛应用于电缆、电气与电子元器件中，同时也被用于散热零部件的制造[1—2]。纯铜材料的零部件通常使用挤压、切削方式获得，会面临局部加工硬化、工艺复杂与效率低下等问题，因此亟需一种成形效率高、操作简单、质量好的铜材零部件制备方法。

粉末高速压制成形技术具有成形效率高、质量好、近净成形等优势，属于高能率成形[3—4]。常见的高速压制方式有液压驱动、火药驱动、机械机构以及电磁驱动[5—7]。液压驱动与机械机构方式存在复杂的油路与机构，易发生故障，需要经常维护。炸药属于易燃易爆品，存在安全隐患。电磁驱动利用磁场产生斥力，驱动冲头快速使粉末压制成形，具有结构简单、操作方便、绿色环保的特点[8]，因此许多学者针对电磁粉末压制工艺参数进行了研究。Park 等[9]对 ZrO_2 纳米粉的电磁压实行为进行研究，随着电磁压力的增加，氧化锆的晶粒尺寸逐渐减小，相对致密度可以达到 98%。杨勇[10]与李敏[11]通过数值模拟与试验对不同放电电压下电磁粉末压制机理进行探究，发现粉末致密的原因是空气绝热的极短时间内，粉末颗粒发生大变形、热软化，进而使颗粒结合。Yan 等[12]研究了电磁粉末压实过程中温度演化的机理，通过建立多粒子有限元方法的数值模型，揭示了压实过程中温度升高主要是由颗粒的塑性变形引起的。

压坯性能对材料制备的质量有直接的影响，基于电磁压制工艺参数，学者们对压坯的性能同样进行了研究。Lee 等[13]研究了压实温度与钝化度对铜粉电磁压实过程中压坯力学性能的影响。Chae 等[14]对镁合金电磁致密后的微观组织与抗压强度进行了研究。桂衍旭[15]与 Shin 等[16]在电磁压实工艺实验中分别探究了放电参数对碳化硅陶瓷与 Nd-Fe-B 合金致密性能的影响。烧结工艺为粉末压实技术中的重要环节，使粉末颗粒发生熔合进一步增强压坯的性能，因此压坯的烧结工艺引起了研究者们的关注。史德璋[17]基于放电等离子烧结技术研究了碳纳米管铜基复合材料中碳纳米管质量分数对材料性能的影响。还有一些学者针对放电等离子烧结技术制备了高熵合金，研究了烧结参数对压坯烧结质量的影响[18—19]。Constantin 等[20]在激光烧结工艺下研究了铜粉的冷压性能，发现粉末体的致密度与表面粗糙度相对传统压实工艺均得到了提升。

以上文献针对多种材料电磁粉末压实的工艺参数、压实特性与烧结性能进行了探究，但是缺乏针对纯铜粉电磁压实特性与烧结性能的系统研究。由于铜材料广阔的应用前景与先进制备技术的要求，文中针对纯铜的电磁粉末压实特性与烧结性能进行研究。首先在不同放电能量下探究纯铜粉的电磁压实特性，通过对不同放电能量下压坯致密度的测试，分析铜压坯致密度随放电能量变化的规律。随后针对压坯烧结前后的拉伸性能进行测试，分析放电能量对铜压坯力学性能的影响。最后利用电子显微镜对压坯烧结前后的微观形貌进行观测，分析不同放电能量下铜粉颗粒的分布趋势。铜粉电磁压实特性与烧结性能的研究对其工艺参数的建立具有重要的参考价值。

1 材料与方法

1.1 电磁粉末压实原理

电磁粉末压实技术属于高速成形，是将电流产生的电磁能转换为粉末压制的机械能。电磁粉末压制技术的原理如图 1 所示。整个电磁粉末压实系统是由电磁放电设备和粉末压实装置两个部分组成，其中电磁放电设备中的电容器与粉末压实装置的放电线圈通过高压电缆连接在一起，从而实现整个系统的能量传递与转换。具体地，首先将装好粉末的模具放置在冲头下方。调节放大器的位置，使冲头压在模具的上模冲，然后将压实装置的螺母锁定。接通电源后，电磁脉冲发生器中的电容器将被充电。充电完成后，根据设定的放电能量进行放电。在放电过程中，有较大的电流迅速流过压实装置的线圈，同时，在线圈周围产生强磁场。由于存在磁场，会在驱动板上感应出电流，在驱动板上的感应电流也会产生磁场。线圈和驱动板产生的磁场会相互排斥，瞬间会产生强大的冲击力，冲击力通过放大器的收集被集中在冲头上，冲头通过冲击力快速推动上模冲快速压实粉末。从图 1b 可以得到粉末压实的具体过程。下模冲被固定，通过上模冲对粉末进行单向轴向压实。然后将模具从压实工作台上移开，并将一个小圆柱体放在下模冲的下面，通过液压装置将挤压力缓慢施加到小圆柱体上，从模具中获得压坯。

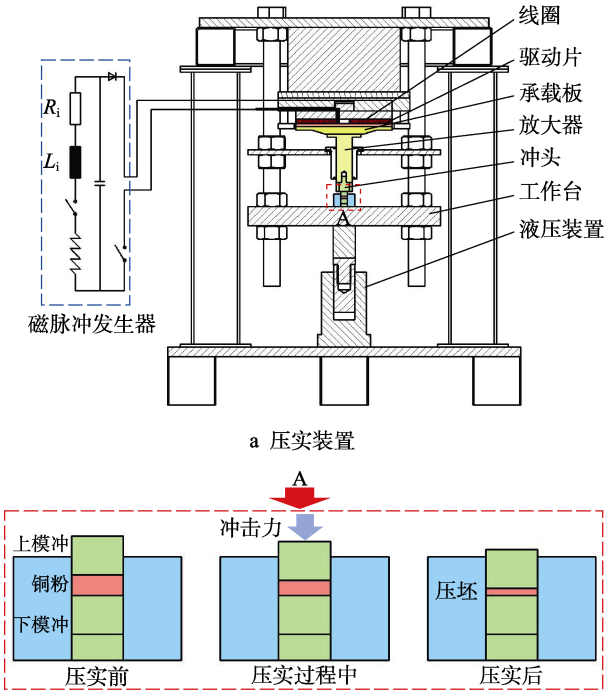


图 1　电磁粉末压实原理

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic powder compaction principle

1.2　实验材料与制备方法

1.2.1　铜粉材料

采用铜粉的平均粒径为 50 μm，纯度为 99.9%，比表面积为 0.9 m^2/g，体积密度为 2.7 g/cm^3，形貌为枝晶状，颜色为红色。通过环境扫描电子显微镜获得的铜粉微观形貌如图 2 所示。可以看到铜粉颗粒形状不规则，呈枝晶状，且颗粒表面附着球形颗粒，凹凸不平。铜粉颗粒的形貌有利于在高速压制过程中使颗粒发生断裂，填充颗粒间的孔隙，提升压坯的致密度。

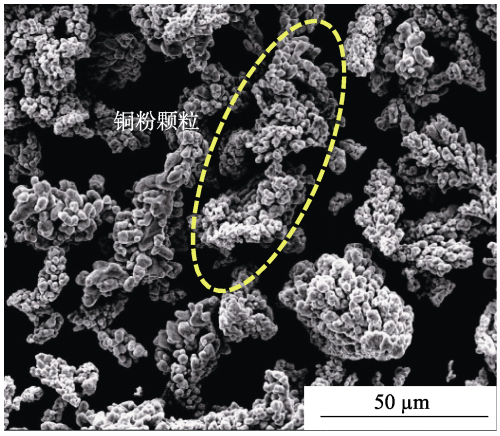


图 2　铜粉微观形貌

Fig.2 Microscope morphology map of copper powder

1.2.2　压制与烧结

铜粉是通过电磁压实技术被压制成形，其成形设备如图 3 所示。电磁粉末压实设备分为电磁脉冲放电设备（磁脉冲发生器）与粉末压实平台。电磁脉冲放电设备的最大放电电压与能量分别为 16 kV 和 48 kJ。在粉末压实执行过程中，首先将定量的铜粉装入模具中并将上下模冲装配好。文中控制的装粉量为粉体高度为 8 mm，质量大约为 6.72 g。随后将装好粉末的模具放置在工作台上并置于冲头下方，使用液压装置顶升工作台使驱动片与线圈贴合并锁紧螺母。然后闭合电磁脉冲放电设备开关对电容进行充电，充电完成时以设定能量进行放电。文中实验设定 6 个放电能量，分别为 12，14，16，18，20，22 kJ。放电时粉末压实平台中的线圈会流过高压强电流，同时线圈周围产生强磁场。线圈的强磁场在驱动片上产生感应电流，与感应电流的感应磁场相互排斥，进而驱动放大器上的冲头在毫秒级别内冲击上模冲[21]，随后在模具中上下模冲的作用下使粉末体压实成形，最终由

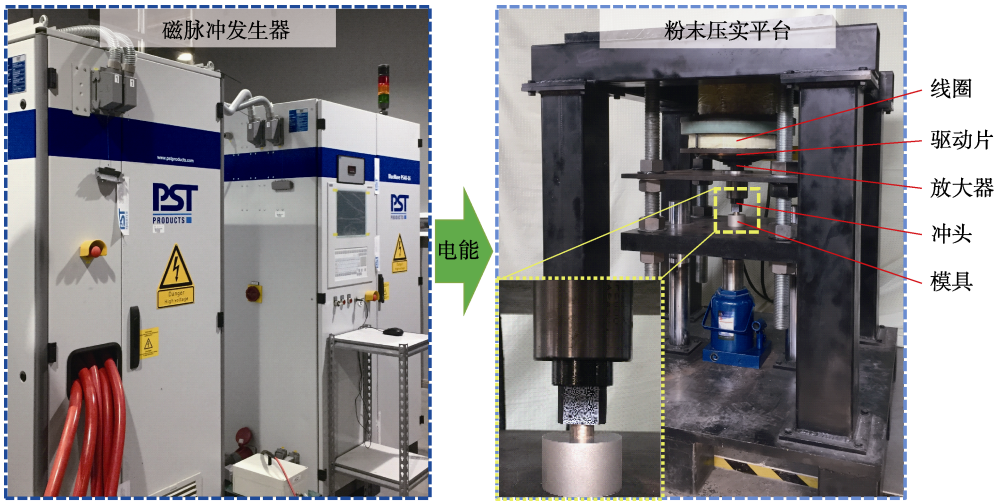


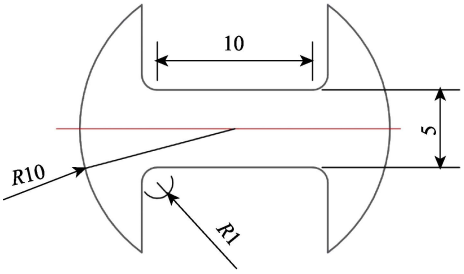
图 3　电磁粉末压实设备

Fig.3 Electromagnetic powder compaction devices

下而上脱模获得铜压坯。铜压坯大气环境烧结易被氧化，影响压坯性能，所以文中采用真空烧结炉对铜压坯进行真空烧结。真空度为 10^{-2} Pa，烧结温度为 800 ℃，升温速率与保温时间分别为 10 ℃/min 和 2 h。保温结束后随炉冷却至室温，防止试样与设备损伤，控制降温速率小于 10 ℃/min。

1.3 微观与力学性能测试方法

为了探究放电能量对铜粉颗粒分布的影响，利用环境扫描电子显微镜针对铜压坯进行微观形貌观测。随后利用电火花线切割机将烧结后的压坯切割成拉伸试样，具体试样尺寸如图 4 所示。切割完成后将试样表面打磨平整，并去除尖角防止影响试样力学性能的测试。针对拉伸试样通过电子万能材料试验机进行拉伸测试，获得试样的力-位移曲线以此评估电磁压实制备的铜材的拉伸性能。最后利用电子显微镜观测拉伸试样断口，结合实验数据从微观方面进一步分析铜材的拉伸性能与失效行为。



a 尺寸示意

b 样件实物

图 4 拉伸试样

Fig.4 Tensile specimen

2 结果与分析

2.1 相对致密度分析

为了探究放电能量对铜粉压实特性的研究，相对致密度随放电能量的变化趋势如图 5 所示。不同放电能量下的相对致密度分别为 0.888，0.925，0.948，0.96，0.968，0.97，相对 12 kJ 的致密度变化率分别为 4.167%，6.757%，8.108%，9.009%，9.234%，从相对致密度变化率可以得到相对致密度的增大趋势随放电能量的增加逐渐减缓。放电能量 20 kJ 与 22 kJ 的压坯相对致密度相近，相对致密度变化率曲线变化平缓。由于考虑到人身安全与节能减排，在试验效果相近的前提下需要尽可能采用较低的放电能量。综合以上考虑，放电能量为 20 kJ 的压坯相对致密度较好，因此以下将针对放电能量为 12~20 kJ 的铜粉压实特性与烧结体性能进行分析。不同放电能量下铜压坯的形貌如图 6 所示。铜压坯表面均有明显的金属光泽，表面无明显缺陷。在放电能量为 12~20 kJ 时，铜压坯的相对致密度提升了 9.009%。这是由于随着放电能量的增加，压实力逐渐增大，铜粉颗粒发生较大的挤压变形，通过位移重排填充了孔隙，粉末颗粒之间更加紧密地结合在一起。从图 5 可得，在 12~16 kJ 时，压坯的相对致密度增加了 6.757%，相对致密度的增长率最大。在放电能量 16 kJ 之后，压坯相对致密度的增加趋势明显降低，说明粉末体在放电能量为 16 kJ 左右时发生快速致密，致密效果更加明显。放电能量为 18~20 kJ 时，相对致密度的变化趋势趋于平缓，说明粉末体致密程度较高，压坯的最大相对致密度达到了 0.968，表明电磁粉末压实技术可以使铜粉达到较高的致密程度。

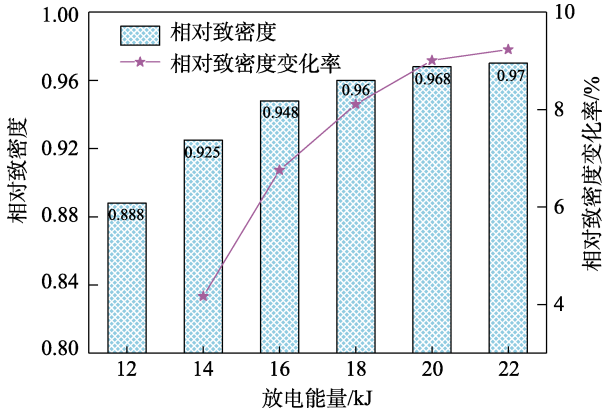


图 5 不同放电能量下压坯相对致密度分布趋势

Fig.5 Relative density distribution trend of compacts under different discharge energies

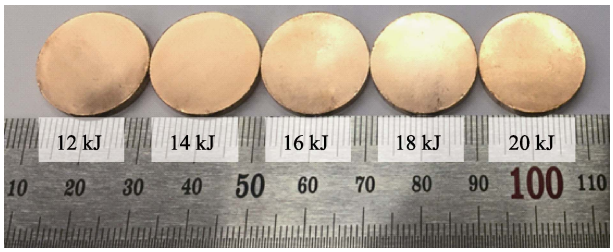


图 6 不同放电能量下电磁压实的铜压坯形貌

Fig.6 Morphology of copper compacts prepared by electromagnetic compaction under different discharge energies

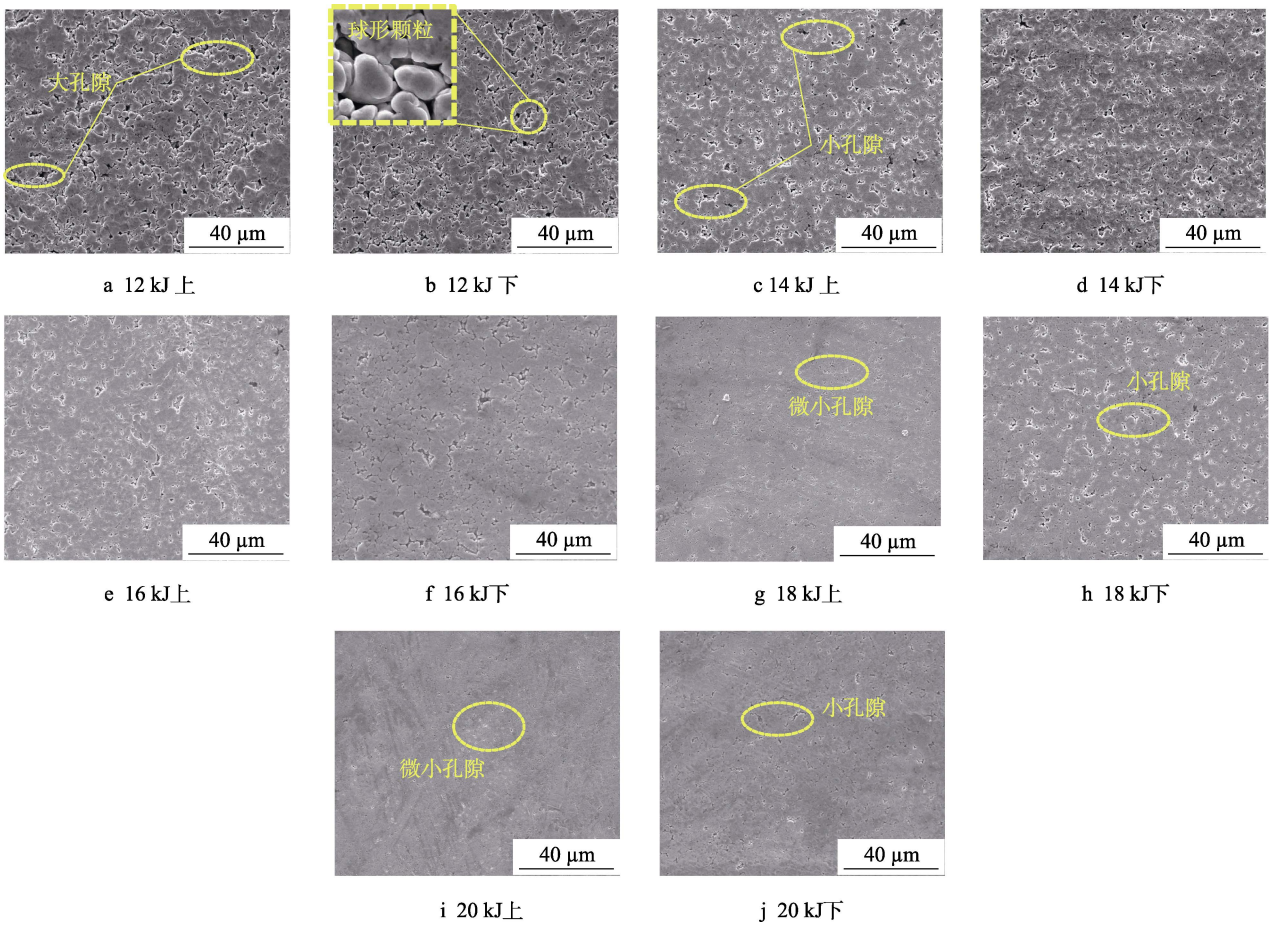
2.2 压坯微观形貌

压坯的微观形貌能够直接影响材料制备的质量，

因此利用环境扫描电子显微镜对不同放电能量下的压坯端面微观形貌进行了观测。压坯上下端面的微观形貌如图 7 所示。放电能量为 12 kJ 时，压坯表面的孔隙较大而且比较密集。从孔隙的放大图（见图 7）可以得到，存在较小的颗粒填充在孔隙中，表明铜粉颗粒在压实过程中发生了流动且颗粒进行了重排。同时可以得到孔隙中的颗粒边界依然存在原始颗粒的球形边界，这是由于铜粉颗粒受到的压制力较小，导致颗粒没有发生充分的变形，因此颗粒边界没有很好的结合与填充，造成了表面孔隙的产生。在 14~ 18 kJ 时，压坯表面的孔隙明显减少，且表面平整度逐渐增加。这是由于随着放电能量的增加，压实力逐渐增大，使粉末颗粒发生较大的位移和变形，造成颗粒之间的孔隙很好地被填充。在冲头的剧烈冲击下，粉末颗粒发生剧烈变形，导致孔隙逐渐减少与变小的同时，表面的平整度也在增加。在 20 kJ 时铜压坯表面仅存在少量的小孔隙，表面质量相对有了较大的提升。结合相对致密度分析，压坯表面孔隙的减小对应相对致密度的增加。在 20 kJ 时压坯的相对致密度达到了 0.968，接近于铜的理论密度。结果表明相对致密度的增加可以有效提升压坯的表面质量。在相同放电能量下，压坯上端面的孔隙少于下端面，端面质量相对较好。这是由于在粉末压实过程中，应力是由上至下传播的。具体地，粉末体受到冲击时，上边缘位置受到模具内壁摩擦力与冲头冲击力的作用产生应力集中，先于其他位置致密，然后应力由中心向下端面传播对粉末进行压实。由于粉末体的上部致密时会消耗部分能量，导致下端面致密时压实应力有所减小，因此上端面的压实质量会好于下端面。

2.3　拉伸性能分析

利用真空烧结炉对压坯进行烧结，探究放电能量对压坯烧结性能的影响。铜压坯烧结前后的相对致密度如表 1 所示。可以看到烧结体的相对致密度相对于压坯均有了提升，随着放电能量的增加，相对密度的提升率逐渐减小。烧结体的最大相对致密度达到了 0.981，接近于纯铜的理论密度。表明烧结工艺可以进一步提升压坯的致密度，压坯致密程度较低时，烧结工艺对压坯相对致密度有明显的提升效果。放电能量为 20 kJ 时，压坯致密程度较高并接近于理论密度，压坯烧结后相对密度的增长率最小，说明压坯的致密程度会对烧结体相对密度的提升有明显的影响。



a 12 kJ 上　b 12 kJ 下　c 14 kJ 上　d 14 kJ下

e 16 kJ上　f 16 kJ下　g 18 kJ上　h 18 kJ下

i 20 kJ上　j 20 kJ下

图 7　不同放电能量下铜压坯上下端面的微观形貌

Fig.7 Micro-morphologies of the upper and lower end faces of copper compacts under different discharge energies

表 1 铜压坯与烧结体的相对致密度结果对比

Tab.1 Comparison of relative density results between copper compacts and sintered bodies

放电能量/kJ	压坯相对致密度	烧结体相对致密度	密度增长率/%
12	0.888	0.919	3.49
14	0.925	0.954	3.14
16	0.948	0.969	2.22
18	0.96	0.978	1.88
20	0.968	0.981	1.34

将烧结体切割成拉伸试样，对烧结体进行拉伸测试，进一步探究不同放电能量下压坯的烧结性能。拉伸试样的力-位移曲线如图 8 所示。烧结体的拉伸载荷与位移随着放电能量的增加逐渐增大。在 20 kJ 时，烧结体的拉伸强度与断裂伸长率分别为 224.7 MPa 和 29.2%。这是由于烧结体致密度的提升导致内部颗粒结合更加紧密，拉伸试样的力学性能得到提升。拉伸载荷的增加幅度不大，这是由于烧结体的致密度均相对较高，以及铜材料力学特性的限制。试样的拉伸位移有明显的增长趋势，表明随着放电能量的增加，铜粉颗粒间结合效果会得到提升，拉伸载荷可以很好地传递，使粉末颗粒发生充分变形。放电能量较低时，由于孔隙、颗粒间结合强度不高等缺陷的存在，导致烧结过程中无法消除缺陷的影响，造成试样拉伸时易在颗粒边界处产生裂纹，使试样发生断裂，材料表现出拉伸位移小与韧性差的特点。

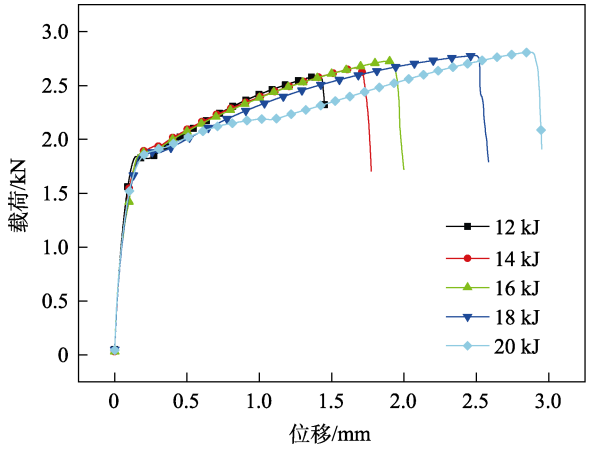
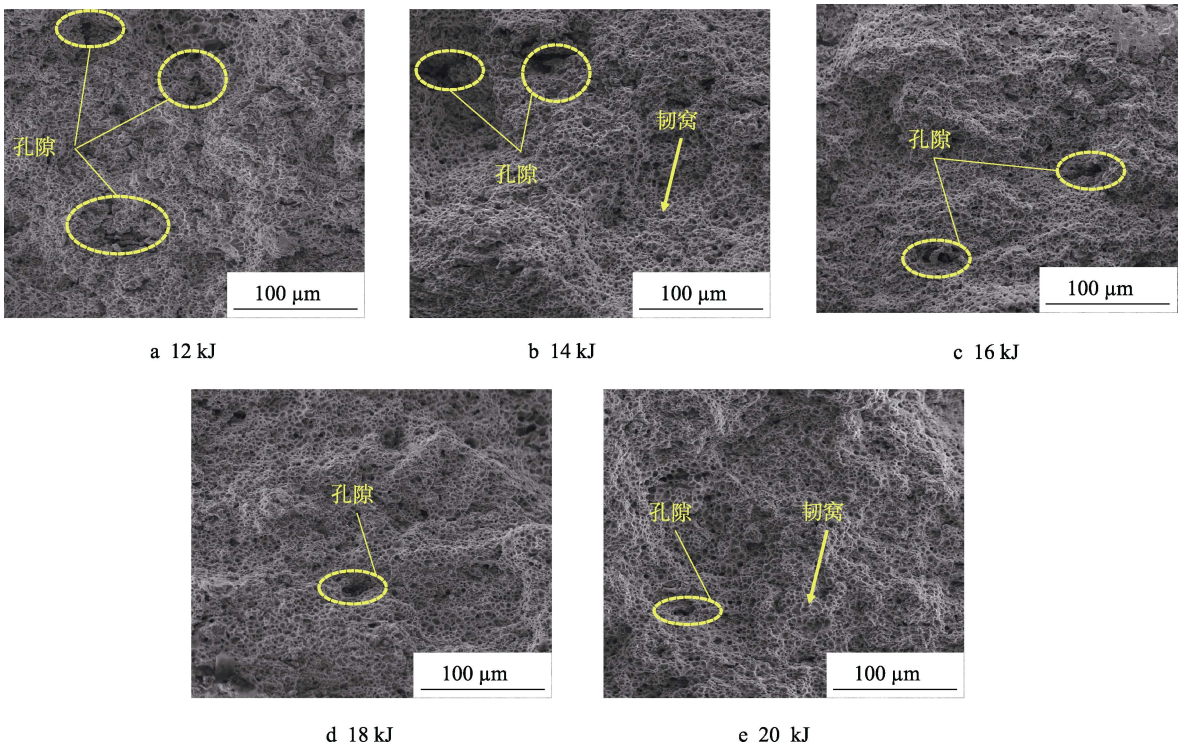


图 8 不同放电能量下拉伸试样的力-位移曲线

Fig.8 Force-displacement curves of tensile specimens under different discharge energies

2.4 拉伸显微断口

为了更好地分析不同放电能量下烧结体的拉伸性能，使用电子显微镜针对拉伸试样断口进行观测。不同放电能量下拉伸试样的断口微观形貌如图 9 所示。可以看到，试样断口表面存在明显的韧窝，表明试样在断裂过程中发生塑性变形，最终发生韧性断裂。放电能量为 12~14 kJ 时，断口表面存在明显的孔隙，说明放电能量较低时，烧结体内部的颗粒结合效果不好，导致孔隙的产生。在拉伸时孔隙周围易产生裂纹，导致试样失效，解释了放电能量较低时拉伸载



a 12 kJ　b 14 kJ　c 16 kJ

d 18 kJ　e 20 kJ

图 9 不同放电能量下拉伸试样的断口微观形貌

Fig.9 Micro-morphology of fracture of tensile specimens under different discharge energies

荷与位移较小的原因。随着放电能量的增加，可以看到断口表面的孔隙尺寸与数量逐渐减小，同时韧窝越发明显。这是由于放电能量的增加会导致压实应力增大，进而增加颗粒的变形与流动，增强颗粒间的结合强度，减少压坯内部的孔隙缺陷。在烧结时颗粒边界将会进行更好的熔合，进一步增强颗粒间的结合强度。在 20 kJ 时，断口表面仅存在较小的孔隙，颗粒间没有明显的边界，熔合效果较好并且韧窝更加粗大。表明 20 kJ 时颗粒间结合得非常紧密，相对致密度较高，受到拉伸载荷时颗粒间能够很好地传递载荷使颗粒发生塑性变形，可以有效发挥材料的力学性能，因此在 20 kJ 时拉伸试样的载荷与位移均达到了最大，烧结体的抗拉强度与韧性得到了明显提升。

3　结语

通过压坯致密度、端面微观形貌、烧结体拉伸强度以及断口微观的测试，分析了放电能量对铜粉电磁压实特性与烧结体性能的影响，得到如下主要结论。

1）随着放电能量的增加，铜压坯的致密度逐渐增大并趋于平稳。在 16 kJ 时粉末体致密速率最快，相对致密度提升最为明显。在 20 kJ 时压坯的相对致密度较好，为 0.968。

2）铜压坯端面上颗粒间的孔隙随放电能量的增加逐渐减少和减小，在 20 kJ 时压坯表面仅存在少量的微小孔隙，然而，压坯的下端面孔隙的尺寸与数量均大于上端面，压实质量相对较差。

3）压坯的相对致密度经过烧结后得到了提升，增长率随放电能量增加逐渐降低。烧结体的拉伸载荷与位移逐渐增大，放电能量为 20 kJ 时拉伸强度与断裂伸长率分别为 224.7 MPa 和 29.2%。在放电能量较低时，主要表现为烧结体的韧性较差。

4）拉伸试样断口的微观形貌显示，随着放电能量的增加，断口表面的孔隙逐渐减小，同时韧窝越发明显。在 20 kJ 时铜粉颗粒间没有明显的颗粒边界，熔合效果较好，这也是拉伸强度与韧性均有明显提升的原因。

参考文献：

[1] 王艳. 碳纳米管/铜复合材料的制备及性能研究[D]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2019: 1—10.
WANG Yan. Study on Preparation and Properties of carbon Nanotube/Copper Composites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Aeronautics, 2019: 1—10.

[2] DONG D Y, HUANG X S, CUI J J, et al. Effect of Aspect Ratio on the Compaction Characteristics and Micromorphology of Copper Powders by Magnetic Pulse Compaction[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(10): 1—11.

[3] 周媛, 李同舟. 粉末冶金高速压制致密化机制的研究进展[J]. 四川有色金属, 2018(3): 67—68.
ZHOU Yuan, LI Tong-zhou. Research Progress on Densification Mechanism of High-Speed Compaction of Powder Metallurgy[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2018(3): 67—68.

[4] 都志斌. 粉末冶金高速压制形成方法研究[J]. 中国金属通报, 2018(3): 80—80.
DU Zhi-bin. Research on Forming Method of Powder Metallurgy High-Speed Press[J]. China Metal Bulletin, 2018(3): 80—80.

[5] 赵铮. 颗粒增强铜基复合材料的爆炸压实和数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1—11.
ZHAO Zheng. Research on Explosive Compaction and Numerical Simulation of Particle Reinforced Copper Matrix Composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 1—11.

[6] 郑玉凯. 高速压制技术制备钛基材料的工艺与性能[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 1—14.
ZHENG Yu-kai. Processing and Properties of the High-Velocity Compaction Preparation of Titanium-Based Materials[D]. Changsha: Central South University, 2013: 1—14.

[7] DONG D Y, HUANG X S, LI G Y, et al. Study on Mechanical Characteristics, Microstructure and Equation of Copper Powder Compaction Based on Electromagnetic Compaction[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 253: 123449.

[8] CUI J J, HUANG X S, DONG D Y, et al. Effect of Discharge Energy of Magnetic Pulse Compaction on the Powder Compaction Characteristics and Spring Back Behavior of Copper Compacts[J]. Metals and Materials International, 2020: 1—13.

[9] PARK H Y, KILICASLAN M F, HONG S J. Densification Behaviour Analysis of ZrO_2 Nanopowders for Dental Applications Compacted by Magnetic Pulsed Compaction[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 141: 208—215.

[10] 杨勇. 基于集磁器的脉冲粉末压制的机理研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013: 66—78.
YANG Yong. A Mechanism Research on Pulse Powder Compaction of Collector Magnetic[D]. Ningbo: Ningbo University, 2013: 66—78.

[11] 李敏. 置氢 Ti6Al4V 粉末磁脉冲压实—烧结体组织结构与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 63—82.
LI Min. Microstructure and Properties of Ti6Al4V Alloy Prepared by Magnetic Pulse Compaction and Sintering of Hydrogenated Powder[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 63—82.

[12] YAN S W, HUANG S Y, LIU W, et al. Experimental and Numerical Investigation of Temperature Evolution dur-

ing Electromagnetic Pulsed Compaction of Powders[J]. Powder Technology, 2017, 306: 1—9.

[13] LEE G H, RHEE C K, LEE M K, et al. Nanostructures and Mechanical Properties of Copper Compacts Prepared by Magnetic Pulsed Compaction Method[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 375/376/377: 604—608.

[14] CHAE H J, KIM Y D, KIM T S. Microstructure and Mechanical Properties of Rapidly Solidified Mg Alloy Powders Compacted by Magnetic Pulsed Compaction (MPC) Method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509S: S250—S253.

[15] 桂衍旭. 碳化硅粉末磁脉冲致密/无压烧结试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 25—44.
GUI Yan-xu. Experiments of Densification of SiC Powders by Magnetic Pulse Compaction and Pressureless Sintering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 25—44.

[16] SHIN D W, KIM D S, MADAVALI B, et al. Densification Mechanism and Its Effect on the Magnetic Properties of Nd-Fe-B Bonded Magnets Through the New High-Energy Compaction Method[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 482: 280—286.

[17] 史德璋. 碳纳米管铜基复合材料的制备及性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2015: 28—43.
SHI De-zhang. Preparation and Properties of Carbon Nanotubes Reinforced Copper Matrix Composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2015: 28—43.

[18] COLOMBINI E, ROSA R, TROMBI L, et al. High Entropy Alloys Obtained by Field Assisted Powder Metallurgy Route: SPS and Microwave Heating[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 210: 78—86.

[19] KANG B, KONG T, RYU H J, et al. The Outstanding Tensile Strength of Ni-Rich High Entropy Superalloy Fabricated by Powder Metallurgical Process[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 235: 121749.

[20] CONSTANTIN L, FAN L S, MORTAIGNE B, et al. Laser Sintering of Cold-Pressed Cu Powder without Binder use[J]. Materialia, 2018, 3: 178—181.

[21] JIANG H, ZENG C C, LI G Y, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113162.