第 49 卷 第 1 期：188-197　　高电压技术　　Vol.49, No.1: 188-197
2023 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211701

二硼化钛颗粒材料的电阻变化特性及其在故障限流中的应用

董恩源[1]，朱　玉[1]，王永兴[1]，张立岩[1]，朱宇豪[1]，杜广波[2]
（1. 大连理工大学电气工程学院，大连 116024；2. 中国联合工程有限公司，杭州 310052）

摘　要：二硼化钛(TiB_2)颗粒材料具有故障限流的潜力。为实现这个目标，对颗粒材料的限流特性进行了研究。首先对压力–电阻关系进行了分析，二者满足幂函数关系。然后制作基于颗粒材料的样机，通过试验研究了材料尺寸和机构速度对限流效果的影响，发现材料尺寸越大、速度越快，限流效果越好。为进一步验证材料的限流能力，对材料的耐压特性进行测量，发现颗粒材料电压存在一个饱和值，该值取决于颗粒尺寸与材料性质。最后在 PSCAD 中建立颗粒材料电阻模型，对材料在电力系统中的限流效果进行仿真。仿真结果表明：颗粒材料与电抗器并联限流的方案可行性更高，可将故障电流峰值从 34 kA 限制到 25.9 kA。该研究为颗粒材料在故障限流中的应用提供了参考。

关键词：故障限流；颗粒物质；二硼化钛；饱和电压；电流转移；电阻变化特性

Resistance Variation Characteristics of Titanium Diboride Particles and Its Application in Fault Current Limiting

DONG Enyuan[1], ZHU Yu[1], WANG Yongxing[1], ZHANG Liyan[1], ZHU Yuhao[1], DU Guangbo[2]
(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310052, China)

Abstract: Titanium diboride (TiB_2) granular material has the potential for fault current limiting. To achieve this goal, the current limiting characteristics of granular material have been studied in this paper. First, the force-resistance relationship is analyzed, and they satisfy the relationship of power function. Then, a prototype based on granular material is produced. The influence of material size and mechanism speed on current limitation is studied through experiments. It is found that the larger the material size and the faster the speed, the better the current limiting effect. In order to further verify the current limiting capability of the material, the voltage withstand characteristics of the material are measured. It is found that the voltage of the granular material has a saturation value, which depends on the particle size and material properties. Finally, the resistance model of the granular material is established in PSCAD. The current limiting effect of the material in the power system is simulated. The simulation results show that the current limiting scheme of the granular material and the reactor in parallel is more feasible. The peak value of the fault current can be limited from 34 kA to 25.9 kA. The research in this paper provides reference for the application of granular material in fault current limiting.

Key words: fault current limiting; granular matter; titanium diboride; saturation voltage; current transfer; resistance variation characteristics

0　引言

随着电网容量不断增大，当系统发生故障时，短路电流等级也越来越高，甚至超过断路器的遮断容量[1]。使用故障限流器(fault current limiter，FCL)是解决此问题一种较为经济可行的方法[2]。其原理为：在正常状态下限流器阻抗尽可能小，不对系统产生影响。当发生故障时，在故障线路中迅速插入一个较大的阻抗，从而降低故障电流的水平，使断路器顺利完成开断。

目前故障限流器的种类繁多，常见的有以下几种：1）超导限流器[3-6]：基本原理是利用超导材料的特性，在正常状态下，超导材料电阻几乎为零，不会对系统产生影响。当发生故障时，超导材料迅

基金资助项目：国家自然科学基金 (51877026)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877026).

速失超变为高阻态，实现对故障电流的限制。超导限流器根据不同的结构还可以进一步分为电阻式、变压器式、电感式、磁饱和式等。其缺点主要是超导材料失超后，恢复时间较长，且需要配套的制冷系统体积较大，因此难以大规模推广应用。2）固态限流器[7-9]：利用电力电子器件代替传统开关设备来完成限流阻抗的快速切换，从而限制短路电流。根据不同电路拓扑，固态限流器又可以进一步分为自耦变压器型、串联补偿型、可变阻抗型等。但其主要问题在于需要使用大量电力电子器件，通态损耗严重，且造价昂贵。3）谐振式限流器[10-12]：分为串联谐振式与并联谐振式两种。串联谐振式限流器的工作原理是将电容与电感串联使其工作在谐振状态，阻抗表现为零。当发生短路时，利用快速开关将电容短接，退出谐振状态，实现对短路电流的限制。谐振式限流器的缺点是在运行时会有一定的有功损耗，且可能会产生过电压与过电流对系统产生不利影响。4）电流转移型限流器[13-17]：可分为工频零点电流转移型、强迫过零型、基于电力电子的二次转移型等。该类限流器的主要原理是利用机械开关进行正常通流，当发生故障时，利用各种手段将故障电流转移至并联的电抗器。但该类方法的主要问题在于对电流转移的速度要求过高，通常实现难度较大。5）正温度系数(positive temperature coefficient，PTC)电阻限流器[18]：利用 PTC 材料对于温度较为敏感的特点，当故障发生时，由于电流的热效应，材料温度快速升高，电阻快速增大，实现限流功能。PTC 电阻限流器的主要问题在于 PTC 材料自身通流耐压能力不足，且在故障切除后需要时间恢复，无法实现重合闸。

综上所述，目前的故障限流器在成本、体积以及实际应用上各自存在一些不足。利用颗粒材料进行限流是一种有效的方案[19]。颗粒物质是指尺寸在 1 μm 以上的固体颗粒构成的离散体系[20]。因为体系内部具有强烈的耗散作用和内部摩擦力，颗粒物质具有一些独特的运动规律。导电颗粒物质的电阻在外力作用下会发生明显变化，电阻变化范围可达 5~8 个数量级[21-22]。因此，可将颗粒材料看作一个可变电阻串接在线路中。正常状态下，颗粒材料承受较大外力，表现为一个小电阻；当发生故障时，外力快速减小，颗粒材料的电阻迅速增大，从而实现对短路电流的限制。要实现这个目标，颗粒材料需要满足几个条件：1）在承受较大外力时，电阻应尽量小，从而不对系统产生影响。2）在大电阻状态下材料应能承受大电流和高电压的冲击，从而完成对故障电流的限制。3）电阻的变化速度应尽可能快，从而及时限制故障电流。基于上述要求，二硼化钛(TiB_2)颗粒是一种比较合适的材料。

本文在前期工作的基础上，针对 TiB_2 颗粒的电阻特性和限流特性进行了理论和试验研究。首先分析了 TiB_2 颗粒材料电阻与外力之间的关系。利用斥力机构设计制作颗粒材料的样机，实现电阻的快速变化，并进行了限流试验。试验结果表明，增大材料的整体尺寸和加快斥力机构运动速度可以获得更好的限流效果。然后，针对大电阻状态下的颗粒材料进行高电压、大电流冲击试验，得到了材料的静态电压特性。基于电接触理论与力链理论计算了材料的饱和电压，理论计算值与试验结果基本一致。最后基于试验数据建立颗粒材料的电阻模型。利用 PSCAD 仿真软件，建立了 10 kV 电力系统模型。采用材料直接限流和并联电抗器限流两种方案，对颗粒材料的限流效果进行仿真，并从能量角度，分析了两种方案的可行性。仿真和试验结果表明，使用颗粒材料可以有效的限制故障电流，且并联限流电抗器限流的方案可行性更高。

1　TiB_2 颗粒电阻与外力关系

1.1　颗粒之间的电阻与接触力

TiB_2 材料的物理性质如表 1 所示[23]。由表 1 可见，其有低电阻率、高硬度、强抗氧化性的特点，具备应用于故障限流领域的潜力。

TiB_2 颗粒材料的电阻本质上是接触电阻。为得到颗粒体系电阻与外力的关系，首先对两个颗粒之间的接触电阻进行分析。根据电接触理论[24]，接触电阻 R_c 由收缩电阻 R_s 和膜电阻 R_b 组成，即

$$R_c = 2R_s + R_b = \frac{\rho}{2a} + \frac{\sigma}{\pi a^2} \tag{1}$$

表 1　TiB_2 的物理性质

Table 1　Properties of TiB_2 particles

参数	数值
电阻率ρ/(10^{-8} Ω·m)	14.4
密度/(g·cm^{-3})	4.52
熔点/℃	2980
氧化温度/℃	1100
硬度/GPa	34
弹性模量 E/GPa	574
热导率λ/(W·(m·℃)$^{-1}$)	25
比热容 c/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})	0.63
泊松比 υ	0.11

式中：ρ为颗粒材料本身的电阻率；σ为颗粒表面薄膜的面电阻率；a 为接触点的半径。由于颗粒本身具有较强的抗氧化能力，因此颗粒表面膜电阻主要由导电的吸附膜构成，在接触力大的情况下极易被破坏，故可以忽略。因此 TiB_2 颗粒间的接触电阻主要由收缩电阻 R_s 组成。由式(1)可知，收缩电阻取决于接触点半径 a。根据赫兹接触理论[25]，假设接触点处发生了弹性形变，形变区域是半径为 a 的圆，则形变半径 a 与接触力 f 之间满足

$$a=(\frac{3fr(1-\upsilon^2)}{4E})^{1/3}=0.91\left(\frac{1-\upsilon^2}{E}\right)^{1/3}r^{1/3}f^{1/3} \tag{2}$$

式中 r 为颗粒的半径。将表 1 中的数据代入式(2)并与式(1)联立，可得两个颗粒之间的接触电阻与接触力的关系为

$$R_c=4.584\times10^{-3}r^{-1/3}f^{-1/3} \tag{3}$$

由式(3)可以看出，颗粒的直径越大、受到的接触力越大，颗粒间的接触电阻越小。

1.2 颗粒体系的电阻与外力关系

本文使用的 TiB_2 颗粒直径 d=30 μm，其外观是灰黑色的粉末，如图 1 所示。其具有低电阻率、高硬度、高熔点及强抗氧化性的特点。

为测量颗粒材料整体电阻与外力的关系，将材料放置在绝缘容器中，在绝缘容器两端放置金属触头。使用万能试验机提供试验所需外力，使用 LCR 数字电桥对材料电阻进行测量。试验过程中逐渐增大外压力，并逐步记录对应外压力下的电阻值。典型的电阻与外压力关系如图 2 所示。图中，绝缘容器直径 D=30 mm，材料高度 H=35 mm。由于测量过程中，材料电阻的变化范围较大，为更直观地进行分析，对试验数据采用对数处理。由图 2 可以看出，在对数坐标系中，外压力和电阻近似为一条直线，即二者满足幂函数关系。

对图 2 中的试验数据进行拟合，得到颗粒体系的总电阻 R_{total} 与外压力 F 的关系为

$$R_{total}=6.44\times F^{-0.9455} \tag{4}$$

式(4)与式(3)在形式上是相似的，外力与电阻都呈幂函数关系，只是幂函数指数不同。对于两个颗粒间的接触电阻来说，指数为–1/3，而对于整个颗粒体系来说，指数约为–1。这说明，颗粒体系下电阻与外力的关系，不仅与颗粒间的接触情况有关，还与整个颗粒体系在外压力作用下的结构变化密切相关。当材料高度与容器直径发生变化时，指数也发生变化。但电阻与外力的幂函数关系一直成立。



图 1 TiB_2 颗粒外观

Fig.1 The image of TiB_2

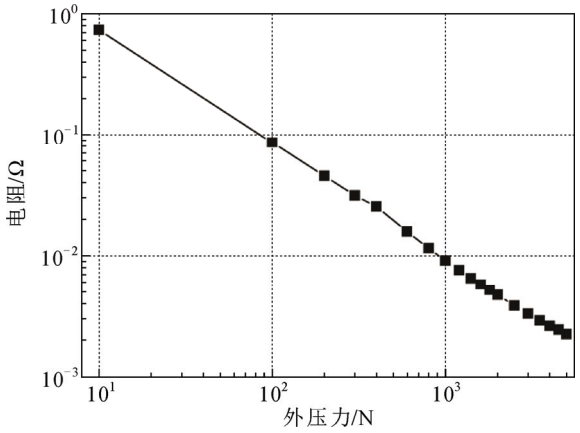


图 2 电阻与外压力的关系

Fig.2 Relationship between resistance and force

2 颗粒材料限流试验及分析

2.1 样机结构及试验电路

要实现颗粒材料的限流功能，需同时满足两个条件：1）提供一个长期的外力使颗粒材料维持在小电阻状态；2）施加在颗粒材料上的外力能快速发生变化。斥力–永磁混合机构既能提供一个长期的保持力，又能实现快速的向下运动，是一个理想的选择。颗粒材料样机的整体结构如图 3 所示。样机下方采用斥力–永磁混合操动机构，依靠永磁机构合闸提供保持力，依靠斥力机构实现快速向下运动。上方为放置在绝缘容器中的颗粒材料。机构通过连接杆和弹簧与绝缘容器下方的金属触头连接。正常情况下，永磁机构向上运动，通过压缩弹簧给材料提供压力，使其维持一个小电阻状态。需要说明的是，颗粒材料长期通流下的电阻大小取决于颗粒材料的尺寸与外加压力大小，例如对于容器直径 D=100 mm，材料高度 H=60 mm 的颗粒材料，在压力 F=5000 N 时，材料的电阻为 1.7 mΩ 左右。

本文设计的限流装置工作过程如下：当系统检测到故障时，发出动作指令。操动机构接到指令后产生触发信号，晶闸管导通，从而控制电容对斥力机构的线圈放电，两个斥力盘之间产生方向相反的磁场进而产生电磁斥力，当电磁斥力大于机构的合闸保持力时，斥力盘将带动连接杆和弹簧一起向下运动，此时材料上承受的力将快速减小，电阻开始增大，完成对故障电流的限制。

试验样机行程为 8 mm，在考虑颗粒材料自身形变(约 2 mm)与防止弹跳对电阻影响的情况下，令弹簧的压缩量为 4 mm。考虑到目前使用的样机合闸保持力较小，试验中使用弹簧刚度为 650 N/mm，因此试验中材料承受的压力为 2600 N。需要说明的是，目前的样机是基于实验室现有的操动机构改造而成，仅是为了验证样机结构与限流功能。目前操动机构的合闸保持力、行程与运动速度还未达到最优，仍有进一步改善的空间。

限流试验电路原理如图 4 所示。试验采用 LC 振荡回路产生电流，其中电容 C_i=60 000 μF，电抗 L_i=0.18 mH，振荡电流周期约为 21 ms。试验中，电容器组充电电压设置为 200~500 V，预期产生峰值 1.4~7 kA 的电流。CB 是投入开关，TB 是颗粒材料样机。试验时，控制 CB 与 TB 之间的动作时序，使样机在电流上升时动作。使用罗氏线圈 Rog 与高压探头测量材料上电流与电压波形，对颗粒材料的限流效果进行分析。

2.2　限流试验波形分析

典型的限流波形如图 5 所示，试验条件为容器直径 D=100 mm，材料高度 H=90 mm，电流源电容充电电压为 400 V，预期电流峰值为 5.6 kA，控制样机在电流上升的第 2 ms 动作。由图 5 可见，样机开始动作后，材料电压开始上升，在 5.2 ms 左右到达峰值。此后由于电流快速下降，即使材料电阻还在继续增大，电压也开始下降。电流相较于预期电流峰值降低 21.4%，电流过零时间也提前了约 4 ms。图 5 中点状线是材料电阻变化曲线，由测量的电压与电流计算得到。可以看出在机构动作后，材料电阻在前期的增加速度较为缓慢。这是因为此时机构的运动速度较慢，使得在机构动作初期，电阻变化较慢。后文对运动速度对限流效果的影响进行了进一步分析。在 0.0064 s 时，电流减小到 0.1 kA，此时材料电阻增大到 1.5 Ω 左右。随着电流进一步减小，材料电阻将继续增大，直至电流过零。整体来看，颗粒材料的限流效果比较明显。

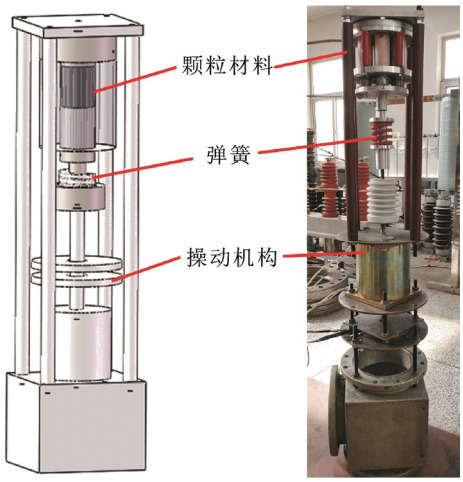


图 3　基于操动机构的样机

Fig.3　Prototype based on operating mechanism

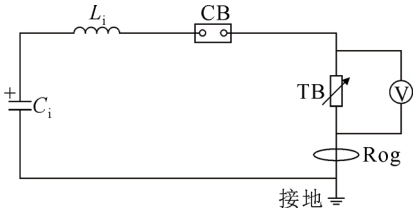


图 4　限流试验原理图

Fig.4　Schematic diagram of current limiting experiment

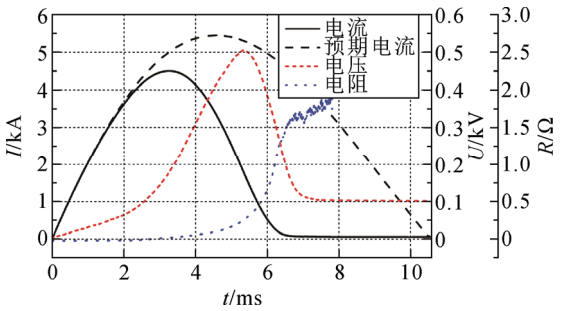


图 5　典型限流波形图

Fig.5　Typical current limiting waveform

2.3　材料尺寸对限流效果的影响

为比较不同尺寸下材料的限流能力，分别改变材料高度 H 和容器直径 D，在不同电流等级下进行限流试验，样机均在 2 ms 左右开始动作，试验结果如表 2 所示。由表 2 可以看出，对于直径 D=100 mm 的容器来说，当材料高度由 60 mm 增加至 90 mm 时，虽然限流后的电流峰值相差不大，但材料的最高电压平均值增大了约 100 V，且平均电流过零时间也提前了约 1 ms，材料的最大电阻也增大了近一倍。这说明增大材料的高度可以提高颗粒材料吸收

能量的能力，尤其是在预期电流 7 kA 时，增大材料高度后限流效果明显更好。

不同容器直径下限流效果的差别更加明显。对 D=30 mm，H=60 mm 的容器来说，材料对于电流峰值的限制效果很弱，尤其是在预期电流为 5.6 kA 时，相比于 D=100 mm 容器，在材料最高电压相差不大的情况下，电流峰值相差了约 1 kA，且电流过零时间也滞后 1.5 ms。尽管材料电压也达到了 400 V，但此时材料已经没有限流效果。同时比较材料的最大电阻也可以看出，与小电流下测量得到的容器直径对电阻的影响规律不同。容器直径越大，材料的电阻反而越大，这与常识是相反的。并且电流越大时，电阻差距越明显，在预期电流 5.6 kA 时，材料电阻可以相差 7 倍。可以看出，在大电流条件下，材料尺寸对电阻的影响与小电流时不同，随着材料整体尺寸的增加，材料的电阻也随之增加。这个现象可以从能量的角度来解释。

由表 2 可见，虽然不同尺寸的材料限流效果不同，但在相同电流等级下，不同尺寸材料吸收的能量基本相同。对于 3 种尺寸的材料来说，其质量分别为 0.085、0.94 和 1.41 kg。以预期电流 5.6 kA 为例，3 种尺寸材料吸收的能量分别为 3.7、3.67 和 3.63 kJ。若不考虑散热，根据公式 $Q=cm\Delta T$，其中 Q 为能量，c 为比热容，m 为质量，ΔT 为温升。则 3 种尺寸下材料的温升分别为 69.1、6.2 和 4.1 K。可以看出，D=30 mm，H=60 mm 的材料温升要远大于另外两种尺寸。由于发热会对材料接触电阻产生影响，此时材料的电阻远小于另外两种情况，导致颗粒材料限流能力下降。因此，为保证颗粒材料的限流能力，应尽可能增大材料的整体尺寸。同时通过改变材料的尺寸，可以使颗粒材料灵活应用于不同的电流等级。

2.4 机构运动速度对限流效果的影响

试验中材料电阻的变化速度取决于斥力机构的运动速度。样机运动速度越快，材料上力的变化速度也越快，理论上电阻的变化速度就更快。为研究机构向下运动速度对限流效果的影响，通过改变电容的充电电压以及加装反力弹簧来调节机构向下运动的速度。分别对运动速度为 1 m/s 和 2 m/s 条件下的样机进行限流试验，不同运动速度下材料的限流波形如图 6 所示。

图 6 中试验条件为容器直径 D=100 mm，材料高度 H=60 mm，预期电流峰值为 5.6 kA。可以看出

表 2 不同尺寸下限流效果的比较

Table 2 Comparison of current limiting effects under different sizes

试验条件	预期电流/kA	峰值电流/kA	峰值电压/V	最大电阻/Ω	半波时间/ms	吸收能量/kJ
D=30 mm, H=60 mm	2.8	2.6	272	0.3	7.7	0.91
	4.2	4.0	380	0.23	8.3	2.26
	5.6	5.4	400	0.14	9.5	3.70
D=100 mm, H=60 mm	2.8	2.3	260	0.9	6.8	0.83
	4.2	3.7	337	1.2	7.7	2.01
	5.6	4.5	383	1	8.0	3.67
	7	6.2	394	0.45	9.1	5.79
D=100 mm, H=90 mm	2.8	2.2	339	1.85	6.0	0.91
	4.2	3.4	432	2.4	6.3	1.98
	5.6	4.4	495	1.7	6.8	3.63
	7	5.6	498	1	8.1	5.97

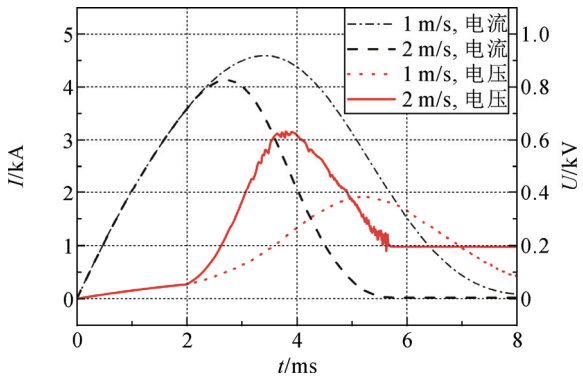


图 6 不同运动速度下的限流效果

Fig.6 Current limiting waveform of different speeds

加快运动速度后，材料电压的上升速度明显加快，大约在 3.8 ms 左右达到最大值 630 V。当运动速度为 1 m/s 时，电压上升速度慢得多，大约在 5 ms 左右达到最大值 383 V。同时，加快运动速度后，限流效果也更加明显，电流峰值相较于运动速度 1 m/s 时降低 10%，电流过零时刻提前 3 ms。相较于预期 10 ms 的持续时间，电流在 5.2 ms 左右到达零点。可以看出，加快机构运动速度可以明显加快电阻的变化速度，从而进一步改善限流效果。通过进一步优化样机结构，设计改进斥力机构，使用刚度更大的压缩弹簧，缩短机构的动作行程，可以使机构的运动时间进一步缩短，电阻变化速度更加迅速，从而满足系统中对故障限流快速性的要求。

3 颗粒材料静态电压分析

在第 2 章中，由于试验电路能量有限，在材料

电阻增大过程中已经将大部分能量吸收，使得电流下降速度变快、电流提前过零。因此材料上的电压只上升到几百伏就开始下降。在实际电力系统中，系统能量可近似看作无限大，同时故障电流等级更高。因此理论上材料电压会增大到极高值，甚至产生过电压。为研究颗粒材料对高电压的耐受情况，本章对大电阻状态下材料的电压特性进行研究。

3.1　静态电压特性

由于颗粒材料本质上是一个电阻，无法直接采用脉冲高压冲击方式进行测量。因此本文使用高压电容器串联电抗器对材料进行放电。电路原理与图 4 类似，使用一个 4.6 μF 的高压脉冲电容器和一个 0.38 mH 的电抗器。电容充电电压为 3~13 kV。颗粒材料同样放置在绝缘容器中。试验过程中材料只承受上端金属触头的重力作用。改变电容充电电压 U_0，测量材料上的峰值电压、峰值电流及平均电阻。试验结果如图 7 所示。可以看出随充电电压 U_0 升高，材料上的电流随之线性增大，同时材料的平均电阻也逐渐减小。但是材料两端的电压并没有线性增大，而是出现“饱和”现象。对于图 7 中的试验条件(D=30 mm，d=30 μm，H=35 mm)，该饱和电压为 1500 V，可以看出材料承受电压的能力有限。

3.2　不同因素对饱和电压的影响

为研究不同因素对饱和电压的影响，分别更改材料高度 H，颗粒直径 d 及容器直径 D，比较不同条件下颗粒材料的饱和电压。试验数据取测量 5 次后的平均值，试验结果如图 8 所示。

图 8(a)为不同材料高度的饱和电压(D=30 mm，d=30 μm)。可以看出材料高度与饱和电压基本呈线性关系。这是因为颗粒材料电阻与材料高度正相关，增加材料高度可以有效提高材料承受的电压。值得注意的是：由于粮仓效应的存在，当材料高度远大于容器直径时，颗粒体系的电阻将会急剧增大，这与图 8(a)中的规律不同。这说明颗粒材料的电阻会受到电流的影响，这导致材料的饱和电压基本只和材料高度呈正相关。

图 8(b)为不同颗粒直径的饱和电压(H=35 mm，D=30 mm)。可以看出随着颗粒直径的增大，颗粒材料的饱和电压也逐渐降低。这也可以从材料电阻的角度来解释，根据式(3)，颗粒直径越小，电阻越大，因此饱和电压值更高。

图 8(c)为不同容器直径的饱和电压(H=35 mm，d=30 μm)。可以看出相较于颗粒直径的影响，容器直径对饱和电压影响较小。只有当容器直径>30 mm 时，饱和电压才随着容器直径的增大略有下降。通过分析发现，当容器直径远大于材料高度时，粮仓效应消失，颗粒体系的整体电阻很小。同时，由于材料上方的金属触头质量随着容器直径增大增加，导致容器直径越大，材料受到的外压力也越大。因此饱和电压随容器直径增大逐渐变小。

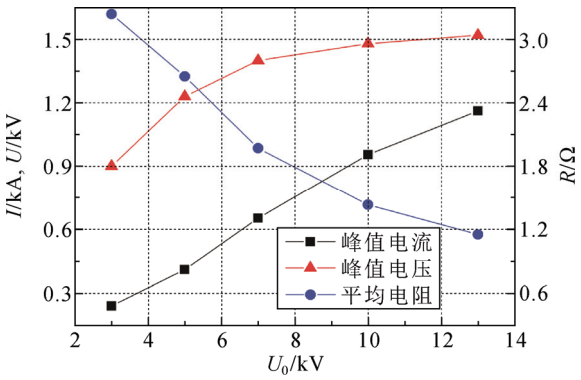


图 7　不同电压下的材料参数

Fig.7　Material parameters under different voltages

3.3　饱和电压的理论分析

为研究饱和电压的本质，下面基于电接触理论和颗粒体系的力链理论进行分析。正常情况下，由于材料受到的力很小，接触点处的面积很小，因此接触电阻很大。当有电流流过时，在接触面会产生电压降 $\Delta U=\rho I/2a$，其中 ΔU 是颗粒间的电压降，I 为流经接触点的电流。对于颗粒材料来说，接触电阻初始值很大，因此当电流流过时，由于焦耳热 I^2R_c 的影响，接触点处的温度会升高，使材料发生一定的软化，导致接触面积增大。此时接触电阻 R_c 减小，接触点温度趋于稳定。若电流继续增大，温度和电压也会继续升高，使接触电阻继续减小，直至再次达到新的平衡。随着电流不断增大，上述过程将会反复发生，直至接触点温度升高至材料的熔点，使材料发生熔焊。此时电压达到最大值 U_m。下面对电压与温度之间的关系进行分析。

当电流流过接触点时会形成一个温度场，由于接触点面积很小，发热的时间常数非常小，约为纳秒级。因此可认为温度场是瞬间建立的，从而可以忽略材料与外部环境的热交换。假设热流只能沿着接触点传导，即电流 I 和热流 ϕ 的途径相同。根据热传导定律和欧姆定律，有

$$\begin{cases} R=\rho\times\dfrac{l}{A}=\dfrac{\Delta U}{I} \\ R_{\mathrm{T}}=\dfrac{1}{\lambda}\times\dfrac{l}{A}=\dfrac{\Delta T}{\phi} \end{cases} \tag{5}$$

式中：R 为电阻；R_{T} 为热阻；l 为接触点长度；A 为接触点面积；λ 为热导率，由式(5)可得

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}R_{\mathrm{T}}}=\lambda\rho \tag{6}$$

由于不考虑散热，焦耳热全部转换为热流，即

$$\phi=-\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}R_{\mathrm{T}}}=UI \tag{7}$$

联立式(6)和式(7)，整理可得

$$U\mathrm{d}U=-\lambda\rho\mathrm{d}T \tag{8}$$

对式(8)进行积分，取积分上限为材料的熔点，并且总接触电压为 $2U$，则最大接触压降 ΔU_{m} 满足

$$\frac{\Delta U_{\mathrm{m}}^{\ 2}}{8}=\int_{T_0}^{T_{\mathrm{m}}}\lambda\rho\mathrm{d}T \tag{9}$$

热导率和电阻率都是温度的函数：$\rho=\rho_0(1+\alpha T)$；$\lambda=\lambda_0(1-\beta T)$，其中 ρ_0 和 λ_0 为常温下的电阻率和热导率，α和β为电阻率和热导率随温度变化的系数。则式(9)可以改写为

$$\begin{aligned}\Delta U_{\mathrm{m}}^2=8\lambda_0\rho_0((T_{\mathrm{m}}-T_0)+(\alpha-\beta)(T_{\mathrm{m}}^2-T_0^{\ 2})/2-\\ \alpha\beta(T_{\mathrm{m}}^3-T_0^{\ 3})/3)\end{aligned} \tag{10}$$

式中：T_0 取室温 25 ℃；T_{m} 取材料的熔点。根据参考文献[26]，系数α和β分别可以取α=0.018 5 ℃$^{-1}$和β=1.91×10^{-4} ℃$^{-1}$。将表 1 中材料的参数和上述数据代入式(10)，可以得 TiB_2 颗粒间的最大接触电压 U_{m}≈1.25 V。

颗粒体系是由力链网络构成的[27]，因此颗粒材料承担的电压等于力链上总的接触数量 m 乘以颗粒间的接触电压 U_{m}。由于本文中力链与重力方向基本一致。对于高度 H，颗粒直径 d 的材料来说，一条力链上的接触数量 m 可以简单假设为 $m=H/d$。则材料整体的饱和电压为 $U_{\mathrm{m}}H/d$。根据此式计算得到不同条件下饱和电压与试验数据的对比如表 3 所示。可以看出理论计算值与试验数据之间最大偏差约为 7.8%(试验条件为 H=35 mm，d=50 μm)。考虑到颗粒直径分布并不均匀，出现一定误差是可以接受的。整体来看，理论值与试验结果误差都在 10%以内，二者基本相符。

4 仿真验证分析

4.1 仿真模型的建立

为研究颗粒材料在实际电力系统中的限流效果，下面使用 PSCAD 软件进行仿真分析。首先在仿真软件里建立颗粒材料模型。颗粒材料可以看作一个可变电阻，将试验测得的电阻曲线导入 PSCAD 的 File Read 模块中，电阻曲线如图 9 所示。

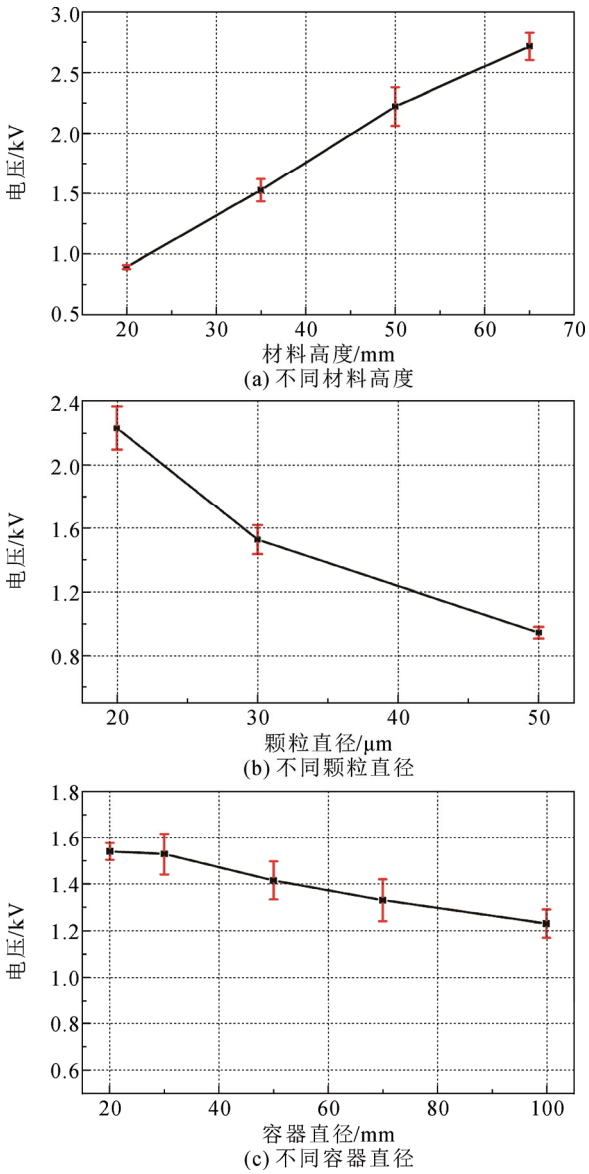


图 8 不同参数下的饱和电压

Fig.8 Saturation voltage under different parameters

表 3 饱和电压理论值与试验数据对比

Table 3 Saturation voltage comparison of theoretical value and experimental data

试验条件	饱和电压		
	试验数据/V	理论计算值/V	偏差/%
H=20 mm，d=30 μm	892	833.3	7
H=35 mm，d=30 μm	1520	1458.3	4.2
H=50 mm，d=30 μm	2219	2083.3	6.5
H=65 mm，d=30 μm	2716	2708.3	0.3
H=35 mm，d=20 μm	2232	2187.5	2
H=35 mm，d=50 μm	943	875	7.8

由图 9 可见，材料电阻可在 1.6 ms 左右增大到 0.2 Ω，且电阻增大速度越来越快。但是由于饱和电压的存在，颗粒材料的电阻不会无限制地增大，而是会受到饱和电压的影响。在仿真中材料尺寸设置为 D=200 mm，H=180 mm，d=30 μm。根据理论计算，此时材料的饱和电压为 7.5 kV。因此在仿真中，需要对材料电压设定一个阈值，材料电阻在电压达到阈值电压后就不再继续增大，而是受到饱和电压和材料电流的控制。

仿真模型以 10 kV 配电系统为例，其基本电路和参数如图 10 所示。其中变压器采用 Γ 型等值电路，G 为理想电源模型，R_L 和 L_L 分别为变压器励磁等效支路电阻和电感，R_T 和 L_T 分别为短路电阻和短路电感，R 和 L 为负荷等效电阻与等效电感，变压器线路的功率因数为 0.9。仿真中采用两种限流方案：一种是依靠颗粒材料 TB 直接进行限流，此时开关 S 断开；另一种方案是利用颗粒材料将电流转移到限流电抗器上进行限流，此时开关 S 闭合。为更好地证明颗粒材料的限流效果，仿真中选择故障情况最为恶劣的三相接地短路故障进行研究，故障发生时刻设定 0.02 s，此时系统电压处于零相位，短路电流最大。假设故障检测时间为 2 ms，斥力机构的动作触发时间为 2 ms，材料电阻在故障发生 4 ms 后开始变化。

4.2　仿真结果分析

使用颗粒材料直接进行限流的波形如图 11 所示，其中虚线是颗粒材料不动作时预期短路电流。由图 11 可见，材料的电压在故障发生后 4 ms 内开始上升，在 1.7 ms 左右上升到饱和电压，此后保持不变。故障电流首半波峰值从 34 kA 限制到 25.4 kA，限流深度为 25.3%。故障电流的第 2 个大半波峰值从 31 kA 限制到 11 kA，限流深度为 64.5%，颗粒材料的限流效果良好。

采用并联电抗器转移限流的波形如图 12 所示。可以看出，随着颗粒材料的动作，材料上的电压快速升高，电流从主支路快速向限流电抗器支路转移，转移时间约为 5.7 ms。当转移完成后，主支路的电流过零，真空开关 CB 可以将颗粒材料从主支路完全切除，此后限流电抗器插入电路，进行稳定限流。故障电流的首半波峰值从 34 kA 限制到 25.9 kA，限流深度为 23.8%。故障电流的第二个大半波峰值从 31 kA 限制到 16.5 kA，限流深度为 46.8%。与直接限流的方式相比，转移限流的第二个大半波限流深度低的原因是限流电抗器的阻抗相对较小。为获得更好的限流效果，可以适当增大限流电抗器的阻抗，但这也会增加电流转移的时间。因此在满足限流要求的前提下，可以尽量选择阻抗小的电抗器。

可以看出，两种方案对故障电流的限制效果基本相同。但是采用直接限流方案时，材料需要承受几十毫秒的大电流，这对材料的承受能力提出了非

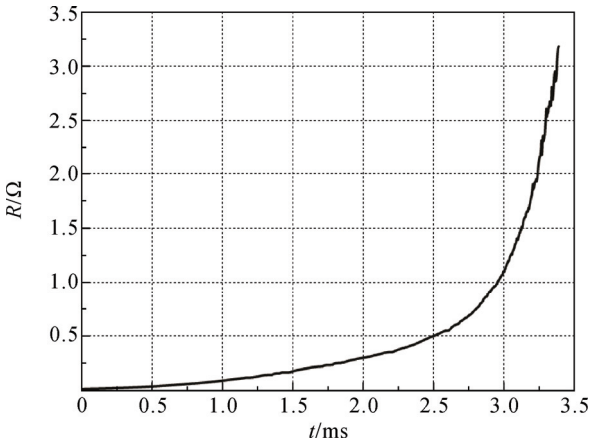


图 9　电阻变化曲线

Fig.9　Resistance variation curve

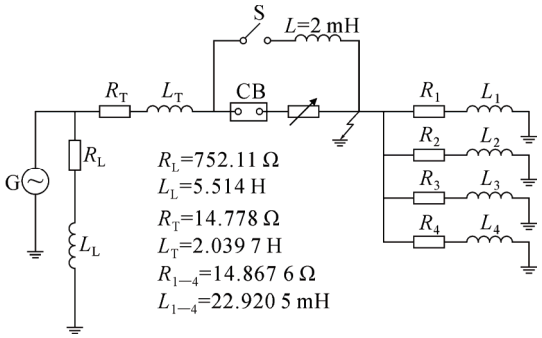


图 10　仿真模型

Fig.10　Diagram of simulation model

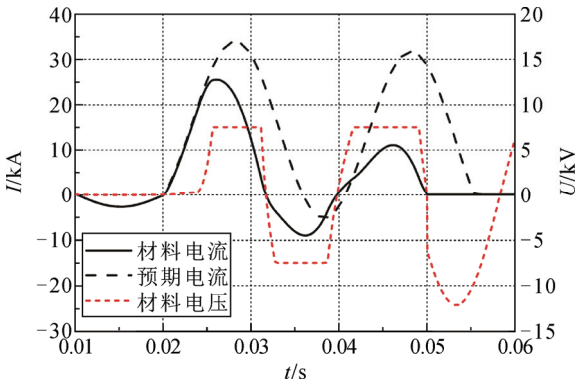


图 11　直接限流波形

Fig.11　Waveform of direct current limiting

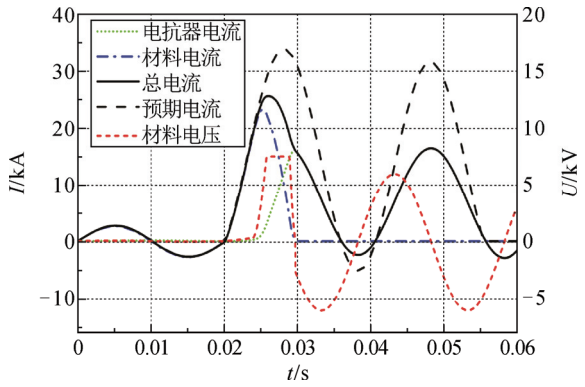


图 12 转移限流波形

Fig.12 Waveform of transfer current limiting

常高的要求。下面从能量的角度对其进行分析，根据仿真结果，采用直接限流方案时颗粒材料所需要吸收的能量约为 1721.3 kJ。假设不考虑散热，材料吸收的能量全部都转换为材料温升，对 H=180 mm，D=200 mm 的材料，其质量为 11.3 kg，温升为 241.8 K。而对于采用转移限流的材料，所需吸收能量约为 483.7 kJ，材料温升为 67.9 K。可以看出采用转移限流方案下，材料的温升大大减小，处于一个合理的范围之内。在实际应用中，可以根据预期短路电流等级，根据材料吸收能量的情况灵活选择不同尺寸的颗粒材料。

5 结论

1）颗粒材料的电阻与外压力呈幂函数关系。因此可以通过改变材料所受外压力，使材料电阻发生明显变化。限流试验结果表明，颗粒材料可以将预期峰值为 5.6 kA 的电流降低 21.4%，并使电流提前 4 ms 过零。

2）颗粒材料的限流能力与材料整体尺寸和机构运动速度密切相关。试验结果表明，材料的限流能力基本与材料体积成正比关系，材料的体积越大，限流能力越强。在相同材料尺寸下，速度为 2 m/s 时的电流峰值相较于 1 m/s 时降低 10%，电流过零时刻提前 3 ms，限流效果明显加强。

3）随着流过颗粒材料的电流逐渐增大，材料上的电压缓慢增大到一个饱和值。这个饱和电压与材料高度、颗粒直径和材料自身的物理性质(热导率、电导率、熔点)有关，对 TiB_2 材料，两个颗粒间的饱和电压为 1.25 V 左右。基于力链与电接触理论计算得到的饱和电压值与试验结果基本一致。

4）通过仿真分析，建立了考虑饱和电压的颗粒材料电阻模型。对颗粒材料直接限流与材料并联电抗器转移限流两种方案进行比较。仿真结果表明，两种限流方案都可以将故障电流峰值从 34 kA 限制到 26 kA 左右。但是材料与电抗器并联转移限流时的温升为 67.9 K，与材料直接限流时 241.8 K 的温升相比大大降低，处于合理范围内。因此材料并联电抗器限流的方案可行性更高。

需要说明的是目前材料样机是基于实验室现有的操动机构改造而成，其行程与运动速度仍有进一步改进的空间。下一步将会设计制作短行程、大保持力以及快速向下运动的操动机构，使得颗粒材料电阻的变化速度进一步加快，从而满足电力系统对故障限流的要求。

参考文献 References

[1] 江道灼，敖志香，卢旭日，等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报，2007，19(3)：8-19，87.
JIANG Daozhuo, AO Zhixiang, LU Xuri, et al. Research and development of short-circuit current limiting technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(3): 8-19, 87.

[2] 孙树敏，刘洪顺，李庆民，等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术，2008，32(21)：75-79.
SUN Shumin, LIU Hongshun, LI Qingmin, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 75-79.

[3] 葛瀚明，刘思远，杨 騄，等. 10 kV/10 kA 超导限流式真空直流开断技术及其试验研究[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2700-2705.
GE Hanming, LIU Siyuan, YANG Kun, et al. 10 kV/10 kA superconducting current-limiting type vacuum DC interrupting technology and its experimental research[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2700-2705.

[4] 张志丰，邱清泉，张国民，等. 220 kV 分裂电抗型超导限流器的仿真与优化设计[J]. 高电压技术，2017，43(4)：1129-1136.
ZHANG Zhifeng, QIU Qingquan, ZHANG Guomin, et al. Modeling and optimal design of 220 kV split reactance type superconducting fault current limiter[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1129-1136.

[5] HAN T H, KO S C, LIM S H. Fault current limiting characteristics of transformer-type superconducting fault current limiter due to winding direction of additional circuit[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 5601906.

[6] YAMAGUCHI H, YOSHIKAWA K, NAKAMURA M, et al. Current limiting characteristics of transformer type superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 2106-2109.

[7] 杨尚瑾，戴朝波，朱宁辉，等. 新型固态故障电流限制器拓扑及仿真[J]. 高电压技术，2020，46(2)：690-697.
YANG Shangjin, DAI Chaobo, ZHU Ninghui, et al. Topology and simulation of novel solid state fault current limiter[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 690-697.

[8] 涂春鸣，姜 飞，郭 成，等. 多功能固态限流器的现状及展望[J]. 电工技术学报，2015，30(16)：146-153.
TU Chunming, JIANG Fei, GUO Cheng, et al. Present state and per-

spectives of multi-function solid-state fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 146-153.

[9] 袁佳歆，陈　凡，赵晋斌，等. 电感式直流限流器研究综述[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1595-1605.
YUAN Jiaxin, CHEN Fan, ZHAO Jinbin, et al. Review on inductive fault current limiters in direct current systems[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1595-1605.

[10] SUGIMOTO S, KIDA J, ARITA H, et al. Principle and characteristics of a fault current limiter with series compensation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 842-847.

[11] 娄　杰，李庆民，肖茂友，等. 基于快速开关的串联谐振型故障限流器的仿真[J]. 高电压技术，2006，32(5)：80-83.
LOU Jie, LI Qingmin, XIAO Maoyou, et al. Simulation of an series resonant type FCL based on fast transfer switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 80-83.

[12] 王华昕，习贺勋，汤广福，等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究[J]. 高电压技术，2007，33(5)：99-102，113.
WANG Huaxin, XI Hexun, TANG Guangfu, et al. Application research of fault current limiter on the EHV grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 99-102, 113.

[13] 刘家好，关永刚，刘卫东. 工频零点电流转移限流及 40.5 kV 快速真空开关仿真[J]. 高压电器，2010，46(11)：16-20.
LIU Jiayu, GUAN Yonggang, LIU Weidong. Fault current limiter based on current commutation at power frequency zero and simulation of 40.5 kV fast vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11): 16-20.

[14] 黄智慧，王　蕾，邹　林，等. 500kV 电网分布式限流方案[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4291-4299.
HUANG Zhihui, WANG Lei, ZOU Lin, et al. Distributed current limiting scheme for 500 kV power grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4291-4299.

[15] 王　晨，徐建霖. 混合型限流及开断技术发展综述[J]. 电网技术，2017，41(5)：1644-1653.
WANG Chen, XU Jianlin. Review of hybrid current limiting and breaking technology development[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1644-1653.

[16] 江壮贤，庄劲武，武　瑾，等. 一种新型双向强迫换流型限流断路器的分析与设计[J]. 中国电机工程学报，2016，36(23)：6484-6489.
JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WU Jin, et al. Analysis and design of a new bidirectional forced current commutation current limiting circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6484-6489.

[17] 刘俊翔，叶菁菁，袁　召，等. 一种基于高耦合分裂电抗器的 500 kV 限流器拓扑[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2828-2837.
LIU Junxiang, YE Jingjing, YUAN Zhao, et al. A topology of 500 kV fault current limiter based on a high coupling split reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2828-2837.

[18] STRUMPLER R, SKINDHOJ J, GLATZ-REICHENBACH J, et al. Novel medium voltage fault current limiter based on polymer PTC resistors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 425-430.

[19] 陈德桂. 两种新的限流技术[J]. 低压电器，2005(4)：3-4，37.
CHEN Degui. Two kinds of limiting technologies[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(4): 3-4, 37.

[20] 陆坤权，刘寄星. 颗粒物质(上)[J]. 物理，2004，33(9)：629-635.
LU Kunquan, LIU Jixing. Static and dynamic properties of granular matter(I)[J]. Physics, 2004, 33(9): 629-635.

[21] ZHU Y, DONG E Y, WANG Y X, et al. Research on the variation of resistance of granular system with different sizes under compressive stress[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(2): 025102.

[22] CREYSSELS M, FALCON E, CASTAING B. Scaling of ac electrical conductivity of powders under compression[J]. Physical Review B, 2008, 77(7): 075135.

[23] LI X Y, MANGHNANI M H, MING L C, et al. Electrical resistivity of TiB_2 at elevated pressures and temperatures[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 80(7): 3860-3862.

[24] 程礼椿. 电接触理论及应用[M]. 北京：机械工业出版社，1988.
CHENG Lichun. Theory and application of electric contact[M]. Beijing, China: China Machinery Industry Press, 1988

[25] BRISCOE B J. Contact mechanics[J]. Tribology International, 1986, 19(2): 109-110.

[26] MCLEOD A D, HAGGERTY J S, SADOWAY D R. Electrical Resistivities of Monocrystalline and Polycrystalline TiB_2[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1984, 67(11): 705-708.

[27] ZHANG J, MAJMUDAR T, BEHRINGER R. Force chains in a two-dimensional granular pure shear experiment[J]. Chaos, 2008, 18(4): 041107.



董恩源
1973—，男，博士，教授，博导
研究方向为智能化高压电器
E-mail: dey@dlut.edu.cn

DONG Enyuan
Ph.D., Professor



朱　玉
1993—，男，博士生
研究方向为故障限流器
E-mail: zhuyu93@mail.dlut.edu.cn

ZHU Yu
Ph.D. candidate



王永兴(通信作者)
1973—，男，博士，副教授
研究方向为故障电弧智能检测、智能电器
E-mail: yxwang@dlut.edu.cn

WANG Yongxing
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2021-10-18　修回日期　2022-01-04　　编辑　卫李静