

## 冷压对 Bi2223/Ag 多芯带材超导性能的影响

张阳<sup>1)</sup> 李谋渭<sup>1)</sup> 张少军<sup>1)</sup> 安振刚<sup>1)</sup> 林晨光<sup>2)</sup> 林蔚<sup>2)</sup> 冯日宝<sup>2)</sup>

1)北京科技大学机械工程学院,北京 100083 2)北京有色金属研究总院,北京 100088

**摘要** 在 Bi2223/Ag 超导多芯带材的制备过程中,采用了热处理—冷压—热处理的工艺,取压力、压下速率、摩擦系数和来料作为待研究的冷压工艺参数,以带材的临界电流 $I_c$ 值为评价指标,用正交法设计实验方案,结果表明:摩擦系数对带材临界电流 $I_c$ 值的影响高度显著,压力和来料对带材 $I_c$ 值的影响显著,压下速率对带材 $I_c$ 值的影响程度最小。

**关键词** 超导;多芯带材;冷压;正交实验

**分类号** O 511.4

Bi系高温超导带材是公认的最有发展前途的材料之一,其最典型的制造工艺是粉末套管法(PIT)<sup>[1]</sup>。即将预先合成好的超导粉末装入银管中,经拉拔、轧制等塑性加工成形,最后经热处理而获得具有一定超导性能的带材。为提高其临界电流密度 $J_c$ 值,国内外用各种方法来加工超导带材。冷压法最早由日本的 Asano 等用来压制块材样品<sup>[2]</sup>,随后冷压工艺被用来提高 Bi系超导带材性能。采用合适冷压及热处理工艺可以制备出良好织构和高临界电流密度 $J_c$ 值的带材<sup>[3]</sup>。本文采用正交法设计实验方案,用数理统计的方法对 Bi2223/Ag 多芯带材冷压过程中的几个基本参数对带材超导性能的影响程度做了实验研究,所得结果对进一步实现 Bi2223/Ag 多芯超导带材冷压工艺的优化具有指导作用。

## 1 实验方法

用粉末套管法(PIT)得到的单芯线材通过拉丝模拉拔成丝材,再将 37 根丝材装入银管,经拉拔轧制成 37 芯超导带材,多芯带材用普通双辊轧机轧制成形。带材经热处理后,横截面尺寸为 0.29 mm×3.63 mm,临界电流 $I_c$ 值为 4.0 A。带材加工过程中,为保证带材在长度方向上性能均匀,无论是拉拔还是冷轧,线径或带厚每道次减少量应控制在 10%~20%。将 $I_c$ 值为 4.0 A 的多芯带材用冷压+热处理的工艺进行处理,制备成长度为 20 mm 的短样,对短样按照正交表格

$L_9(3^4)$ 设计的实验方案进行冷压成形,采用 833 °C/40 h 热处理工艺进行烧结。用标准四引线法测量短样的临界电流,失超判据取 1 $\mu$ V/cm。

## 2 实验结果及分析

表 1 所示为实验的因素与水平,其中  $A_1$ — $A_3$ 、 $B_1$ — $B_3$ 、 $C_1$ — $C_3$ 、 $D_1$ — $D_3$  分别为 A、B、C、D 4 个

表 1 因素水平表  
Table 1 Table of factor and level

水平	压力	压下速率	摩擦系数	来料
1	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$
2	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_2$
3	$A_3$	$B_3$	$C_3$	$D_3$

注:因保密原因,表中数据未明确列出。

因素的 3 个不同的水平。表 2 所示为各冷压工艺参数取不同水平时所对应的设计方案及由此方案得到的短样的临界电流 $I_c$ 值。图 1 所示为正交实验结果的直观分析图,它反映了评价指标临界电流 $I_c$ 值随各冷压工艺参数水平的变化而变化的趋势和程度。从图中可以看出,临界电流 $I_c$ 值随因素 C 的变化而变化的程度高度显著,因素 A 次之,D 影响程度最小。

用方差分析法可对实验结果进行更为精确的分析。如表 3 所示,通过 F 方差显著性检验也同样表明,因素 C 对带材临界电流 $I_c$ 值的影响高度显著,因素 A、D 的影响较显著,在给定的显著性检验条件下,因素 B 对带材临界电流 $I_c$ 值的影响不显著。

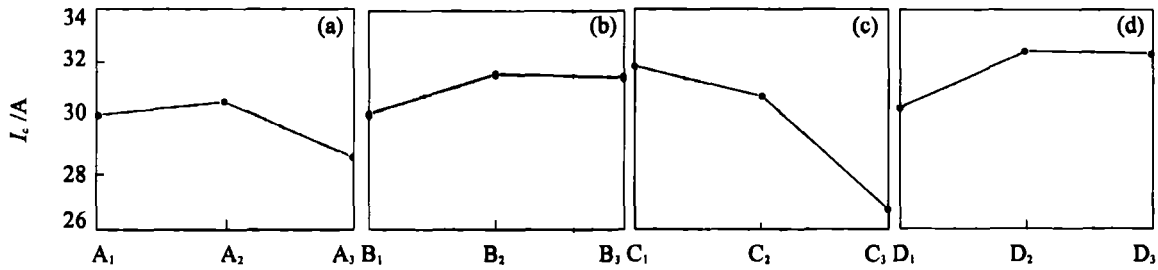


图1 正交实验结果直观分析图. 图(a)(b)(c)(d)分别表示评价指标 $I_c$ 值随A, B, C, D各因素水平的变化趋势

Fig.1 Figures of direct analysis on orthogonality test results

表2 实验方案及实验结果  
Table 2 Test projects and test results

试验	A	B	C	D	$I_c/A$			合计/A
1	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	30.0	32.0	28.4	90.4
2	A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	28.9	33.0	35.0	96.9
3	A <sub>1</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	29.0	28.2	26.8	84.0
4	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	31.2	32.8	30.6	94.6
5	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	26.6	26.0	27.2	79.8
6	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	34.0	34.8	32.6	101.4
7	A <sub>3</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	25.6	26.3	24.6	76.5
8	A <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	31.0	33.2	31.2	95.4
9	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	30.0	26.8	28.7	85.5
$T_1$	271.3	261.5	287.2	255.7				
$T_2$	275.8	272.1	277.0	274.8	$T=804.5$			
$T_3$	257.4	270.9	240.3	274.0				

注:  $T_i$  ( $i=1, 2, 3$ )和 $T$ 分别是各因素为 $i$ 水平时各测定值的总和及各水平全部测定值的总和

### 3 结论

采用正交实验和统计处理方法,对Bi2223/Ag多芯带材冷压过程中的主要工艺参数对带材超导性能的影响进行了实验研究.结果表明,摩擦系数对带材临界电流 $I_c$ 值的影响高度显著,压力、来料的影响次之,在给定的显著性检验条

表3 方差分析

Table 3 Analysis of variance

来源	$S$	$f$	$V$	$F$ 值	$F_{0.05}(2,18)$	$F_{0.01}(2,18)$	显著性
A	20.46	2	10.23	4.21	3.55	6.01	*
B	7.49	2	3.75	1.54	—	—	—
C	135.21	2	67.61	27.82	—	—	**
D	25.94	2	12.97	5.34	—	—	*
误差	43.69	18	2.43	—	—	—	—
总和	232.79	26	—	—	—	—	—

注: $S$ 为平方和, $f$ 为自由度, $V$ 为均方,\*\*表示因素对评价指标的影响是高度显著的,\*表示因素对评价指标的影响是显著的

件下,压下速率对带材临界电流 $I_c$ 值的影响不显著.本研究所得结果对于进一步实现Bi2223/Ag多芯超导带材冷压工艺优化具有指导作用.

### 参考文献

- Li Q. Critical Current Density Enhancement in Ag-sheathed Bi-2223 Superconducting Tapes. Physica C, 1993,217: 360
- Asano T. Preparation of Highly Orientated Microstructure in the Bi-Pb-Si-Ca-Cu-O Sintered Oxide Superconductor [J]. Jpn J Appl Phys, 1988,27(2): 1652
- Marti F. Improved  $J_c$  of Multi-filamentary Bi,Pb(2223)/Ag Tapes by Periodic Pressing[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 1999(2): 2521

## Cold Pressing Procedure Influence on Superconducting Properties of Multi-filamentary Bi2223/Ag Tape

ZHANG Yang<sup>1)</sup>, LI Mouwei<sup>1)</sup>, ZHANG Shaojun<sup>1)</sup>, AN Zhengang<sup>1)</sup>, LIN Chenguang<sup>2)</sup>, LIN Wei<sup>2)</sup>, FENG Ribao<sup>2)</sup>

1)Mechanical Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083 2)General Research Institute for Nonferrous Metal, Beijing 100088, China

**ABSTRACT** During production of multi-filamentary Bi2223/Ag superconducting tape, annealing-cold pressing-annealing procedure is adopted. Pressure, pressing speed, friction coefficient and feed is acted as appraisial target for studying, designed test projects by orthogonality. The results exhibited that influence of friction coefficient on the tape critical current  $I_c$  valve is very notable, the effect of pressure and feed is inferior, and the influence of pressing speed on the  $I_c$  valve is least.

**KEY WORDS** superconduction; multi-filamentary tape; cold pressing; orthogonality test