

复合 Bi 系超导多芯带材轴向荷载作用下的临界电流退化模型与分析

高配峰, 王省哲

(兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 超导材料由于在外部载荷作用下表现出的超导性能退化效应严重制约了其工程实际应用。基于脆性纤维金属基增强复合材料损伤理论, 应用 Weibull 分布函数建立了轴向荷载作用下的复合多芯 Bi 系超导带材的力学变形对临界电流影响的退化模型。给出了轴向加载和卸载过程超导带材临界电流随轴向应变的变化关系; 并对超导带材不同初始损伤以及预应变情形下的临界电流随轴向应变的变化关系和退化进行了理论预测, 能够给出与实验结果吻合良好的轴向应变对临界电流的退化影响。

关键词: 高温超导带材; 轴向变形; 预应变; 损伤统计理论; 临界电流退化

中图分类号: TM26

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2014)04-0936-05

与常规导体器件相比, 超导电力器件具有载流能力强、传输效率高、体积小、质量轻、清洁无污染、可提高电力系统稳定性和安全性等优点; 而与低温超导体相比, 高温超导材料往往有较高临界转变温度, 能够实现液氮温度区域附近工作, 因此对超导材料的实际应用具有重要意义。

Bi 系超导主要是指具有较高的转化温度铋锶钙铜氧 2212、2223 型氧化物等, 其脆性的超导纤维芯与金属基体结合可构成多芯复合超导材料^[1]。超导复合带材中不同结构单元的热膨胀收缩特性不同, 而带材在拉压、缠绕等加工过程和工作环境中不可避免地受到机械载荷和电磁力作用而发生变形等。已有大量实验结果与理论分析表明: Bi 系超导材料的临界电流会随外力或变形而发生退化而降低; 在轴向变形较小时, 临界电流退化不明显, 且可恢复; 随着轴向载荷的继续增大超过一应变临界值, 临界电流将出现显著退化且为不可逆过程^[2-7]。复合超导材料临界电流不可逆退化的主要原因是外部载荷和超导材料变形下超导芯丝生发生断裂损伤引起, 以致超导线的电流流通被破坏, 复合超导导线电流退化的临界应变与其内部的超导芯丝数目、芯丝质量与密度、基体机械强度等因素有关。目前, 对于轴向荷载作用下的复合超导多芯带材 Bi2223 或 Bi2212 的临界电流退化问题已有一些实验与理论研究。实验观测结果表明, 复合超导多芯带材

在轴向荷载下存在一临界应变 ϵ_{irr} , 当变形小于 ϵ_{irr} 时临界电流无显著退化; 当应变大于 ϵ_{irr} 时, 临界电流随应变迅速降低。为了描述实验现象, 一些学者提出了基于观测的经验模型。Bennie 等^[4]将超导带材在压缩阶段和拉伸不可逆阶段的临界电流随应变的变化采用了指数形式, 而拉伸可逆阶段临界电流采用线性变化来表述。Cheggour 等^[5]则将可逆和不可逆变形阶段的临界电流随应变均假设为简单的线性关系。基于 Weibull 概率密度函数, Zhang Guomin 等^[8]建立了描述超导带材不可逆拉伸阶段的临界电流随应变的关系, 并认为在可逆拉伸阶段超导临界电流不发生退化; 较好地描述了实验观测结果。Ochiai^[9]考虑复合超导线材内部由于外部载荷导致的裂纹处的电流重新分配, 建立了不可逆拉伸阶段的临界电流退化模型, 而可逆拉伸阶段采用了简单的线性关系来描述临界电流的退化。然而这些模型大多数仅在定性上能够对实验现象予以解释和拟合, 往往缺乏较为明确的物理意义, 此外也不能对复合超导带材带有初始损伤、预应变及卸载等情形下的临界电流退化规律予以揭示等。

基于脆性纤维金属基增强复合材料的损伤理论和 Weibull 分布函数, 本研究给出一复合 Bi 系超导多芯带材系在轴向荷载作用下的临界电流退化的分段解析表述模型, 可以对超导带材在轴向拉伸或压缩加载、卸载过程中的临界电流随应变的退化效应进行较系统分

收稿日期: 2014-04-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (11032006); 创新研究群体项目 (11121202)

作者简介: 高配峰, 男, 1987 年生, 硕士生, 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000, 电话: 0931-8914560, E-mail: peifenggao@gmail.com

析。相关结果与实验吻合较好，此外对超导带材含有初始损伤以及预应变情形下临界电流随应变的影响等进行了讨论。

1 基本方程

1.1 轴向拉压加载过程

复合 Bi 系超导多芯材料在外部荷载作用下，其内部的超导芯丝会发生部分断裂，此时电流输运主要由未损伤部分超导芯承担。考虑复合超导多芯带材无变形的初始状态，记 I_0 为对应的临界电流，此时材料内部无超导芯丝的损伤。不妨假定超导材料的临界电流主要由于超导芯丝的断裂而发生退化，在外荷载下临界电流的变化可由超导带材因为损伤后的有效载流截面积 S_{eff} 以及初始超导芯丝部分的有效横截面积来 S_0 表示，即：

$$\frac{I_{\text{load}}}{I_0} = \frac{S_{\text{eff}}}{S_0} \quad (1)$$

式中， I_{load} 为超导带材在加载情形下对应的临界电流。若考虑超导带材轴向荷载下的应变为 ε ，则不难得到其变形前后的横截面面积之比：

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad (2)$$

复合超导材料受到的轴向荷载可以是拉伸或压缩，这里不妨假设拉压 2 种荷载情形下超导芯丝未损伤超导芯与总芯数的比满足 Weibull 分布，表示如下：

$$p(\varepsilon) = \begin{cases} \exp[-(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{irrc}}}{\varepsilon_{0c}})^{m_c}] & \varepsilon < \varepsilon_{\text{irrc}} \\ 1 & \varepsilon_{\text{irrc}} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{irtt}} \\ \exp[-(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{irtt}}}{\varepsilon_{0t}})^{m_t}] & \varepsilon > \varepsilon_{\text{irtt}} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\varepsilon_{\text{irrc}}$ 、 $\varepsilon_{\text{irtt}}$ 对应于复合超导芯丝拉伸和压缩损伤临界应变， m_c 、 m_t 、 ε_{0c} 、 ε_{0t} 分别为压缩和拉伸阶段的形状参数和标度参数。

进一步结合复合超导带材横截面和损伤后的有效载流截面积的关系，可得到超导带材的临界电流随应变关系如下：

$$\frac{I_{\text{load}}}{I_0} = \frac{1}{1 + \varepsilon} p(\varepsilon) \quad (4a)$$

即：

$$\frac{I_{\text{load}}}{I_0} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \varepsilon} \exp[-(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{irrc}}}{\varepsilon_{0c}})^{m_c}] & \varepsilon < \varepsilon_{\text{irrc}} \\ \frac{1}{1 + \varepsilon} & \varepsilon_{\text{irrc}} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{irtt}} \\ \frac{1}{1 + \varepsilon} \exp[-(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{irtt}}}{\varepsilon_{0t}})^{m_t}] & \varepsilon \geq \varepsilon_{\text{irtt}} \end{cases} \quad (4b)$$

1.2 卸载过程

考虑超导带材的卸载过程，若加载过程中材料未达到其损伤临界应变 $\varepsilon_{\text{irrc}}$ 或 $\varepsilon_{\text{irtt}}$ ，则卸载过程可逆；若加载过程中变形超出损伤临界应变，则由于部分超导芯丝发生损伤断裂，不再承担电流，此时未损伤部分依然可以按照可逆过程处理。基于此，超导复合带材卸载过程中临界电流 I_{unload} 随应变的关系可表示为：

$$\frac{I_{\text{unload}}}{I_0} = \frac{1}{1 + \varepsilon} p(\varepsilon_{\text{end}}) \quad (5)$$

式中，

$$p(\varepsilon_{\text{end}}) = \begin{cases} \exp[-(\frac{\varepsilon_{\text{end}} - \varepsilon_{\text{irrc}}}{\varepsilon_{0c}})^{m_c}] & \varepsilon_{\text{end}} < \varepsilon_{\text{irrc}} \\ 1 & \varepsilon_{\text{irrc}} \leq \varepsilon_{\text{end}} \leq \varepsilon_{\text{irtt}} \\ \exp[-(\frac{\varepsilon_{\text{end}} - \varepsilon_{\text{irtt}}}{\varepsilon_{0t}})^{m_t}] & \varepsilon_{\text{end}} > \varepsilon_{\text{irtt}} \end{cases} \quad (6)$$

式中， ε_{end} 表示超导带材加载结束时的应变， $p(\varepsilon_{\text{end}})$ 为对应的未损伤超导芯的比例。

1.3 含有初始损伤和预应变情形

超导材料在加工或运输过程中由于受外部荷载作用而产生损伤，此时只有未损伤部分的超导芯丝能够载流。这里引入损伤因子 α 表示超导芯损伤数目占总芯丝的比例，类似于前面的分析不难得到含有初始损伤的超导带材的临界电流 I_{id} 随应变的关系式：

$$\frac{I_{\text{id}}}{I_0} = (1 - \alpha) \frac{1}{1 + \varepsilon} p(\varepsilon) \quad (7)$$

此外，超导材料由于热处理加工以及低温环境中等原因往往存在残余应变，预应变的存在主要是改变了超导带材的临界损伤应变以及外荷载为零时的初始临界电流值，进而影响其电流承载性能的退化。若预应变较小未超出临界应变范围，超导芯没有发生损伤，此时总应变为 $\varepsilon + \varepsilon_{\text{pre}}$ ；若预应变较大并超出临界损伤应变值，此时超导芯丝部分发生损伤不再承担电流。在与预应变相同方向荷载作用下将导致损伤进一步扩大从而电流退化；而在与预应变方向相反荷载作用下初始阶段抵消部分预应变，之后随着外加载荷增大损伤增大，临界电流发生退化。但对于较大的预应变情形，由于预应变造成的超导芯损伤无法恢复，此时相当于复合超导材料具有初始损伤 $1 - p(\varepsilon_{\text{pre}})$ 。基于以上分析，我们对复合超导带材包含预应变下的临界电流 I_{pre} 随应变的关系表示如下：

(1) 预压应变且 $\varepsilon_{\text{pre}} < \varepsilon_{\text{irrc}}$ 情形

$$\frac{I_{\text{pre}}}{I_0} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \varepsilon + \varepsilon_{\text{pre}}} p(\varepsilon + \varepsilon_{\text{pre}}) & \varepsilon \leq 0 \\ \frac{1}{1 + \varepsilon + \varepsilon_{\text{pre}}} p(\varepsilon_{\text{pre}}) & 0 < \varepsilon \leq -\varepsilon_{\text{pre}} \\ \frac{1}{1 + \varepsilon + \varepsilon_{\text{pre}}} p(\varepsilon + \varepsilon_{\text{pre}}) p(\varepsilon_{\text{pre}}) & \varepsilon > -\varepsilon_{\text{pre}} \end{cases} \quad (8a)$$

(2) 预应变小于临界损伤应变 (即 $\epsilon_{irrc} \leq \epsilon_{pre} \leq \epsilon_{irrt}$)

情形

$$\frac{I_{pre}}{I_0} = \frac{1}{1 + \epsilon + \epsilon_{pre}} p(\epsilon + \epsilon_{pre}) \quad (8b)$$

(3) 预拉应变且 $\epsilon_{pre} > \epsilon_{irrt}$ 情形

$$\frac{I_{pre}}{I_0} = \begin{cases} \frac{1}{1 + \epsilon + \epsilon_{pre}} p(\epsilon + \epsilon_{pre}) & \epsilon \geq 0 \\ \frac{1}{1 + \epsilon + \epsilon_{pre}} p(\epsilon_{pre}) & -\epsilon_{pre} \leq \epsilon < 0 \\ \frac{1}{1 + \epsilon + \epsilon_{pre}} p(\epsilon + \epsilon_{pre}) p(\epsilon_{pre}) & \epsilon < -\epsilon_{pre} \end{cases} \quad (8c)$$

式中, ϵ_{pre} 为预应变, Weibull 分布函数 $p(\epsilon + \epsilon_{pre}) p(\epsilon_{pre})$ 类似于式(3)。

2 模型应用与结果讨论

基于上节所建立的复合多芯超导材料在轴向载荷、卸载下的临界电流随应变的退化模型, 将对一些实验观测结果进行模拟。

首先对于超导复合带材在轴向拉压变形下的临界电流退化的特征进行模拟。图 1 给出了基于上节建立的临界电流随应变分段表述模型的预测结果与实验结果的对比, 其中模型参数根据实验特征点选取, 如 $\epsilon_{irrc}=0$, $\epsilon_{irrt}=0.34$, 指数 m_c 和 m_t 分别取为 2 和 2.5。可以看出, 在复合超导带材轴向压缩作用阶段, 较小的压应变导致材料损伤破坏, 进而发生临界电流退化; 在轴向拉伸阶段, 初始拉力较小时超导芯丝没有受损, 仅形变改变了横截面积而导致临界电流小的变化, 随着应变的进一步增大部分超导芯丝发生损伤破坏而不再承载电流, 导致临界电流的急速减小; 此外超导带材在拉伸应变情形下的临界电流随应变的退化程度和幅值要显著大于压缩应变情形; 模型预测结果和实验结果吻合良好。图 2 给出了另一实验结果, 其包括了复合超导带材首先受到拉(压)荷载之后卸载的过程, 模型参数分别取为 $\epsilon_{irrc}=0$, $\epsilon_{irrt}=0.2$ 和 $m_c=m_t=2$ 。由图 2a 可以看出, 随着压应变的增大临界电流降低, 在某一压应变下对压载荷进行卸载, 当加载末应变超出临界损伤应变时, 超导芯丝发生损伤部分不再承担电流, 未损伤部分依然可承载电流, 因此随着卸载和应变减小到零, 临界电流变化不大, 几乎保持不变; 数值模拟结果与实验吻合良好。图 2b 给出了复合超导带材在压缩-卸载-拉伸过程中的临界电流变化规律, 本研究的模型能够很好地予以模拟。

其次, 考察复合超导带材含有初始损伤以及临界损伤应变对临界电流退化的影响。图 3 给出了超导带材具有不同初始损伤因子时的临界电流随拉压应变的

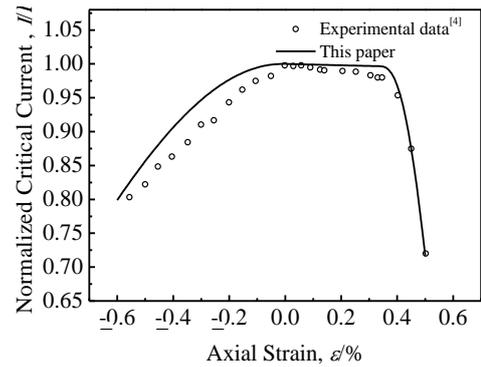


图 1 轴向压缩/拉伸临界电流随应变的关系曲线

Fig.1 Critical current versus axial compression/tension strain

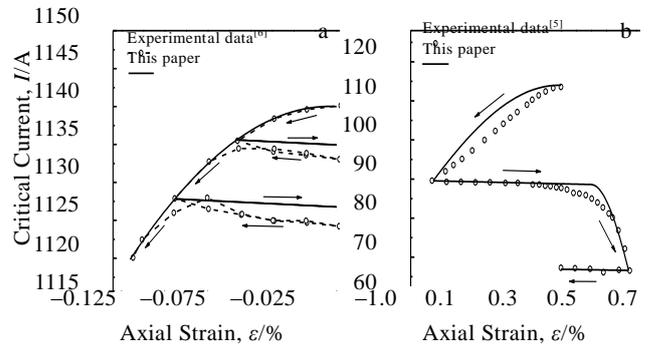


图 2 轴向加载和卸载过程中临界电流随应变变化

Fig.2 Critical current varying with axial strain in the process of axial loading/unloading: (a) axial compression and unloading process and (b) compression-unloading-tension process

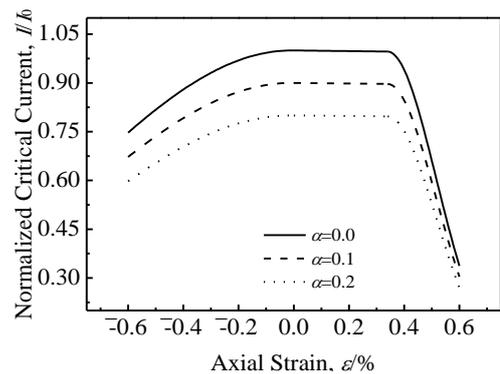


图 3 不同初始损伤因子下临界流随应变关系

Fig.3 Critical current versus strain for different initial damage factors

变化曲线, 由于初始损伤的存在, 超导材料的临界电流有所降低, 随着压应变或者拉应变的增大临界电流的退化规律类似。图 4 给出了在拉伸荷载下超导带材

具有不同临界拉伸损伤应变的临界电流退化结果。可以看出，当拉伸应变较小且未达到临界损伤应变时，超导带材的临界电流保持不变，而当应变增大和超过临界损伤应变后，临界电流随之降低。改善复合超导材料的力学性能以提高其临界损伤应变对临界电流的退化降低具有积极意义。

最后，对于预应变影响超导带材载流能力的特征进行了讨论与分析。当复合超导材料存在预拉应变或预压应变时，其临界电流随着超导材料的进一步加载而出现的退化曲线如图 5 所示。在压缩预应变情形下，较小的压应变导致材料损伤破坏，进而发生临界电流退化，故在预压条件下临界电流的最高值有所下降，此时相当于超导材料具有初始损伤因子为 $1-p(\epsilon_{pre})$ 的情形；若作用以拉伸荷载，首先预压应变卸载直到完全抵消，当进一步增大拉伸荷载达到材料的临界拉伸损伤应变，此时临界电流亦出现退化现象。在拉伸预应变情形下，对于未超过拉伸临界损伤的较小预应变（如 0.2%），在拉伸加载的初始阶段临界电流不发生

退化，之后当材料达到拉伸临界损伤应变而出现载流退化；由于预拉应变的存在使得在较小拉伸加载下即出现超导材料载流的退化现象；若施加压缩荷载，首先是抵消预拉应变然后当压应变达到临界压缩损伤应变值时电流出现退化。对于较大预拉应变且超过拉伸临界损伤应变（如 0.4%），已有部分超导芯丝发生损伤而失去载流能力，相当于其存在 $1-p(\epsilon_{pre})$ 的初始损伤；在拉伸荷载即便较小情形，超导材料的临界电流也会进一步发生退化；而在压荷载作用下材料首先要“卸载”部分预拉应变，但是由于预应变超过了临界损伤应变以致产生了部分发生部分超导芯丝的永久性损伤而不可恢复，随着荷载的增大超导材料再累加以压缩损伤而进而临界电流退化。此外，对于无预应变情形，由于含有初始预应变复合超导带材的临界电流的最大值均有所降低。

3 结 论

超导复合带材在轴向加/卸载过程中，所建立的简单模型均能够给出与实验结果吻合良好的临界电流随应变的退化。此外，对超导带材含有初始损伤以及预应变情形下的临界电流随应变的影响等进行了讨论，给出相关的临界电流退化特征等。

参考文献 References

[1] Yamazaki K, Kagiya T, Kikuchi M *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2012, 25(5): 054 015
 [2] Chen Xingpin(陈兴品), Yu Xiaowei(余晓伟), Shang Du(尚都) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(7): 1206
 [3] Shinl J K, Ochiai S, Okuda H *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2008, 21(11): 115 007
 [4] Bennie Haken, Arno Godeke, Henk-Jan Schuver *et al. IEEE Trans Magne*[J], 1996, 32(4): 2720
 [5] Cheggour N, Lul X F, Holesinger T G *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2012, 25(1): 015 001
 [6] Shin Hyung-Seop, Katagiri Kazumune. *Supercond Sci Technol* [J], 2003, 16(9): 1012
 [7] Toda A, Arai T, Ochiai S *et al. Physica C*[J], 2010, 470(20): 1346
 [8] Zhang Guomin, Schwartz Justin, Lin Liangzhen *et al. Appl Phys Lett*[J], 2004, 85(20): 4687
 [9] Ochiai S, Arai T, Toda A *et al. Journal of Applied Physics* [J], 2010, 108(6): 063 905

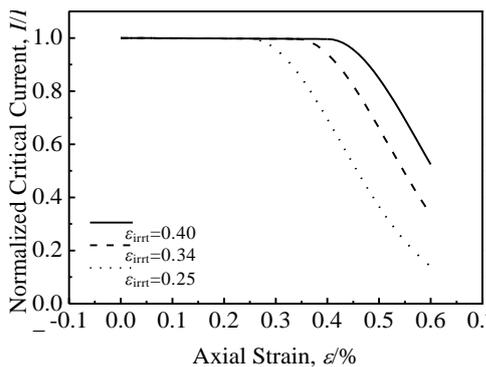


图 4 不同临界损伤应变下临界电流随应变关系

Fig.4 Critical current versus strain for different critical damage strains

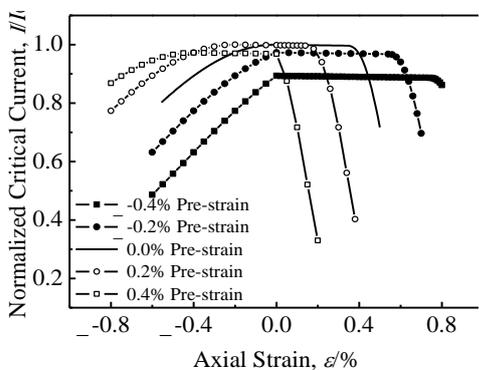


图 5 不同预应变下临界电流随应变关系

Fig.5 Critical current versus strain for different pre-strains

Critical Current Degradation Model and Analysis of Bi-Based Superconducting Multi-filamentary Composite Tape under Axial Load

Gao Peifeng, Wang Xingzhe

(Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Superconducting materials are always severely restricted in practical engineering applications due to the degradation of superconductivity under external mechanical loads. Based on the damage theory of fragile fiber reinforced metal matrix composites and the Weibull distribution function, a degradation model to describe the mechanical deformation influence of the Bi-based superconducting multi-filamentary composite tape on its critical current under axial load was proposed. The critical currents of superconducting tape with the axial strain in the processes of axial loading and unloading were analyzed. The degradation of the critical current of superconducting tape under the conditions of different initial damages and pre-strains was predicted theoretically. It is shown that the theoretical model we developed can predict well the degradation of critical current of the Bi-based superconducting multi-filamentary composite tape with axial strain. The results are in good agreement with the experimental data. The present investigation will be helpful for superconducting composites in applications.

Key words: high-temperature superconducting tape; axial strain; pre-strain; statistical damage theory; degradation of critical current

Corresponding author: Wang Xingzhe, Ph. D., Professor, College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China, Tel: 0086-931-8914560, E-mail: xzwang@lzu.edu.cn