

铜纤维/芳纶浆粕混杂增强摩擦材料的冲击性能研究

Studies on Impact Strength of Friction Materials Reinforced
by Aramid Pulp and Copper Fiber

王雪明, 张佐光, 李 敏, 张大兴, 孙志杰

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

WANG Xue-ming, ZHANG Zuó-guang, LI Min, ZHANG Dà-xing, SUN Zhì-jie

(School of Material Science and Engineering, Beijing

University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 以冲击强度为主要考察目标, 研究了酚醛树脂种类及含量、混杂纤维配比及含量对铜纤维/芳纶浆粕混杂增强摩擦材料冲击性能的影响, 借助 SEM 观察了摩擦材料的冲击断面。结果表明, 丁腈橡胶改性酚醛树脂为基体的摩擦材料的冲击强度优于腰果壳油/三聚氰胺改性酚醛树脂基摩擦材料, 但硬度有所提高; 铜纤维中加入芳纶浆粕的混杂纤维形式可显著提高摩擦材料的冲击强度; 在树脂含量 35%、纤维含量 18% (质量分数)、纤维混杂比 1: 1 时体系的冲击强度最高为 $3.63\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

关键词: 酚醛树脂; 摩擦材料; 铜纤维; 芳纶浆粕; 冲击强度

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)03-0027-05

Abstract: The effect of the type and content of phenol formaldehyde, and the ratio and content of hybrid fibers on the impact strength of friction materials reinforced by aramid pulp and copper fiber was investigated. The results showed that friction materials with NBR modified phenolic resins had better impact strength than those with YSM modified phenolic resins. And impact strength can be significantly enhanced by hybrid fibers of copper fiber and aramid pulp. Furthermore, the highest impact strength for friction materials was $3.63\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ in the condition that resin content was 35%, fiber content was 18% (mass fraction) and the weight ratio of hybrid fiber was 1: 1.

Key words: phenol formaldehyde; friction material; copper fiber; aramid pulp; impact strength

增强纤维是摩擦材料的重要组成部分, 随着传统使用的石棉基摩擦材料因热衰退性大及致癌性而禁止使用, 采用两种或两种以上纤维的混杂增强已经成为摩擦材料的一个主要方向。芳纶浆粕是一种超短纤维状的芳香族聚酰胺材料, 具有高强度、高比表面积、密度小, 它可以提高摩擦材料足够的强度和稳定的摩擦性能、降低磨损、抑制噪音。铜纤维是半金属摩擦材料常用的增强纤维, 具有良好的塑性, 硬度较低, 在摩擦过程中发生摩擦转移, 易在对偶面上形成富铜层^[1], 摩擦系数稳定, 磨损量小。目前, 关于芳纶浆粕、铜纤维与其他纤维混杂增强的摩擦材料已有诸多报道, 如芳纶浆粕与钢纤维^[2]、芳纶浆粕与碳纤维^[3]、芳纶浆粕与玻璃纤维^[4]、铜纤维与钢纤维^[5]等, 而关于芳纶浆粕与铜纤维二者混杂增强摩擦材料的研究甚少。此外, 摩擦材料除了要求具有稳定的摩擦系数和低磨损等性能外, 还应具有良好的冲击强度, 冲击强度是表征断裂韧

性的一个重要参数, 同时对摩擦材料的摩擦系数及磨损率有重要的影响^[6], 并为摩擦材料的机加工等提供了保障。本工作以芳纶浆粕与铜纤维为增强材料, 以冲击性能为主要考察目标, 系统研究了树脂种类及含量、混杂纤维配比及含量对摩擦材料冲击性能的影响。

1 实验

1.1 实验用原材料

芳纶浆粕: Twaron Pulp 1095 型; 黄铜纤维: 长度 1~ 3mm; 酚醛树脂: 腰果壳油/三聚氰胺改性酚醛树脂(牌号 5160)、丁腈橡胶改性酚醛树脂(牌号 5170)。

填料及摩擦性能调节剂: 硫酸钡、氧化铝、铁粉、铜粉、人造石墨等, 市售。

1.2 主要实验设备

热压机: 实验室自制; 高搅机: GH-10A 型高速混

合机; P/N 6957. 000 冲击试验机。
XHR- 150 型塑料洛氏硬度计。
扫描电子显微镜(SEM) : Hitachi s4300 型。

1. 3 试样制备及工艺条件

采用干法工艺成型, 按比例称量好各组分, 将铜纤维与蓬松处理后的芳纶浆粕、粉末树脂、填料混合后高速搅拌 2min, 制成模压料, 装模压制, 出模后进行热处理而得试样。工艺流程: 配料 → 高速混合 → 热压成型 → 热处理 → 样品。

模压条件: 温度 150~ 160℃; 压力 15~ 20MPa; 时间 15min。热压初期每隔 10~ 20s 放气一次, 共放气 3~ 4 次。

热处理条件: 采用梯度升温, 100℃/ 2h → 120℃/ 2h → 140℃/ 2h → 160℃/ 1h → 180℃/ 4h, 自然降温冷却。

1. 4 性能测试

硬度: 用 XHR- 150 型塑料洛氏硬度计测定试样硬度。钢球压头 $\phi 3. 175\text{mm}$, 总实验压力 980. 7N。每组试样分别测 10 个点, 取其平均值作为该组试样的测试值。

密度: 用阿基米德排水法测量试样密度。
冲击强度: 根据 GB/T 1043- 1993 硬质塑料简支梁冲击试验方法, 选用无缺口的试样进行冲击测试, 试样尺寸: $50\text{mm} \times 6\text{mm} \times 4\text{mm}$, 每组分别测 5 个试样, 取其平均值作为该组试样的测试值。借助 SEM 观察冲击试样的断面形貌。

无缺口试样简支梁冲击强度 $a(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$, 按公式(1) 计算:

$$a = \frac{A}{b \cdot d} \times 10^3 \tag{1}$$

式中: A 为无缺口试样所消耗的功(kJ); b 为试样的宽度(m); d 为试样的厚度(m)。

2 结果与讨论

2. 1 树脂种类对冲击性能的影响

酚醛树脂是摩擦材料广泛应用的基体树脂, 但纯酚醛树脂制成的摩擦材料存在着性脆而硬、模量过高、冲击强度低、热分解温度低等缺点。因此, 摩擦材料的基体树脂多用改性的酚醛树脂以提高其耐热性和韧性, 目前国内主要用橡胶、腰果壳油、三聚氰胺、聚乙烯醇对酚醛树脂进行共混或共聚改性^[7]。本工作选用腰果壳油/ 三聚氰胺改性酚醛树脂(牌号 5160)、丁腈橡胶改性酚醛树脂(牌号 5170) 两种树脂作为基体树脂, 树脂质量分数为 35% (质量分数, 下同), 纤维及填料

等其他组分含量保持不变, 改变两种树脂的配比, 表 1 列出了两种树脂对摩擦材料冲击性能的影响。

表 1 树脂种类对摩擦材料冲击性能的影响
Table1 Effect of resin type on impact strength of friction materials

Sample	5160: 5170 (mass ratio)	Impact strength/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	Hardness
A	1: 0	2. 55	76
B	1: 1	2. 61	79
C	1: 2	3. 28	81
D	0: 1	3. 63	86

由表 1 可见, A 试样的冲击强度最低, 而随着 5170 酚醛树脂的加入, 冲击强度、硬度逐渐增大, D 试样的冲击强度与 A 试样相比提高了 42%, 硬度提高了 13%。所以, 5170 酚醛树脂基摩擦材料的冲击强度明显优于 5160 酚醛树脂基摩擦材料, 但硬度有所提高。尽管 5160 酚醛树脂与纯酚醛树脂(如 2123) 相比较而言, 主链结构中引入可以提高冲击强度的柔性基团腰果壳油、高热稳定性的氰胺环^[8], 但本工作发现其增韧效果不如丁腈改性酚醛树脂。这是由于丁腈橡胶改性酚醛树脂是在酚醛树脂中加入丁腈橡胶, 丁腈橡胶的溶解度参数(9. 3~ 9. 9) 与酚醛树脂的溶解度参数(10. 5) 相近, 两者共混后有较好的相容性, 具有良好的增韧效果。丁腈橡胶的加入, 使在连续的刚性硬质的树脂基体上弥散分布着适量柔韧的橡胶微粒, 构成所谓的“高分子合金”。丁腈橡胶充作应力集中中心, 当该体系受到外力冲击应力时, 在橡胶颗粒处诱发大量的银纹及剪切带。银纹及剪切带的产生和发展将消耗大量能量, 延缓断裂破坏过程, 从而显著提高树脂基体的冲击强度; 此外, 橡胶颗粒能够抑制银纹的发展, 并使银纹及时终止而不致发展成破坏性裂纹, 这也是韧性提高的另一重要原因^[9]。所以, 下面研究内容均以丁腈改性酚醛树脂为基体树脂。

2. 2 树脂含量对冲击性能的影响

树脂含量对摩擦材料冲击强度的影响如图 1 所示。

从图 1 可见, 摩擦材料的冲击强度随树脂含量的增加而几乎成线性增大, 当树脂含量为 35% 时, 冲击强度达最大值 $3. 63\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$; 树脂含量高达 41% 时, 冲击强度迅速降为 $2. 83\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。树脂在摩擦材料中起粘结剂作用, 它把各种组分有机地粘结在一起, 并传递和均匀载荷。树脂含量低时, 摩擦材料中的各种组分不能有效粘合, 致使树脂与其他组分粘结强度低; 随着树脂含量的增加, 各组分之间的粘结得到加强从而形成一个有机整体, 增强纤维和填料充分发挥作用,

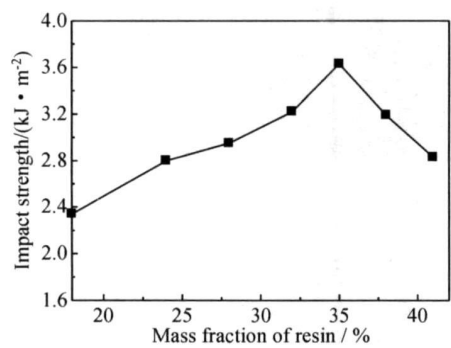


图1 树脂含量对摩擦材料冲击强度的影响

Fig.1 Effect of resin content on impact strength of friction materials

表2 铜纤维/芳纶浆粕配比(质量比)对冲击性能的影响

Table 2 Effect of ratio for copper fiber and aramid pulp on impact strength of friction materials

Copper fiber / aramid pulp	18: 0	12: 6	10: 8	9: 9	6: 12	4: 14
Impact strength / (kJ · m ⁻²)	2.39	2.48	3.44	3.63	3.56	2.93
Density / (g · cm ⁻³)	2.22	2.11	1.99	1.97	1.95	1.83
Hardness	98	94	86	86	85	84

入有助于改善铜纤维增强摩擦材料的冲击强度。

复合材料在混合成型过程中,混杂纤维形成若干级无规交叉网络结构,其中铜纤维直径最大,它们之间形成最大级骨架网络;铜纤维与芳纶浆粕形成第二级骨架网络;芳纶浆粕之间形成第三级骨架网络。这种结构优势互补,形成混杂效应并对裂纹的扩展产生了束缚作用,而且阻止了基体的形变位错和分子链的运动,并对材料的韧性起到增强作用^[10]。

冲击能量的分散通常是通过纤维与基体的界面脱粘、纤维拔出、纤维与基体的摩擦运动及基体的变形来实现的,铜纤维的添加可以阻止摩擦材料受力断裂时裂纹的扩张,并迫使裂纹方向改变,同时因铜纤维被拔出,也消耗一部分功。由图2可见,断面形貌不平整且表面又长短不一的铜纤维从一端拔出,随着铜纤维含量的增加,其断面形貌越加不平整;图2c中纤维拔出最长,消耗的拔出功和界面破坏功也就越大,所以冲击强度也就最大。因此,混杂纤维中铜纤维含量增加,摩擦材料的冲击强度明显提高;但添加铜纤维,同时也阻碍了树脂、填料等组分在热压成型过程中的流动,致使摩擦材料中气孔率增加,组织结构缺陷增多等现象,所以铜纤维含量过高后冲击强度却降低了。

芳纶浆粕和短切纤维有很大差异,外观羽毛丰富,表面粗糙,沿轴向排列许多微原纤,表面积大,容易分散在基体中,形成各向同性的复合材料。当浆粕含量不高时,浆粕可充分分散到基体中,发挥其高强度,有研究表明^[11]在实验范围内,摩擦材料的冲击强度随浆

冲击强度也随之提高;当树脂含量过高后,对其他组元充分粘结后多余的树脂形成“富脂”现象,致使冲击强度降低。

2.3 混杂纤维比对冲击性能的影响

保持材料中各组分的含量不变,仅改变铜纤维与芳纶浆粕的配比,研究了纤维比对冲击性能的影响(见表2)。

由表2可见,这两种纤维混杂后随着芳纶浆粕含量的增加,冲击强度呈现先增加而后减小的趋势,密度逐渐减小;铜纤维中加入芳纶浆粕的混杂纤维形式可显著提高摩擦材料的冲击强度。所以,芳纶浆粕的加

粕含量的增加而增大;含量过高后,由于表面积过大而易团聚无法分散,不能与树脂有效结合,致使试样的冲击强度下降。

2.4 混杂纤维含量对冲击性能的影响

当固定摩擦材料中树脂、填料及摩擦性能调节剂总质量,铜纤维与芳纶浆粕质量比为1:1不变,仅改变混杂纤维含量时,考察了混杂纤维含量对材料冲击性能的影响(见表3)。

由表3可见,当混杂纤维含量为18%时,冲击强度最高为3.63 kJ · m⁻²;低于18%时,冲击强度随纤维含量增加而增大;高于18%后,冲击强度却呈降低趋势。

当纤维含量为18%时(图2c),树脂与纤维粘结性好,由于浆粕的强度和模量远大于基体,纤维承担了大部分载荷,断裂时纤维吸收了大量能量,冲击强度明显提高。由图3可见,纤维含量增加后,纤维裸露较多,树脂不能充分包覆纤维,界面粘合性差,易形成应力集中,裂纹容易沿着纤维与基体的界面扩展,而且纤维数目越多,弱界面越多,能承担载荷的基体越少,所以冲击强度反而降低;并且纤维含量过高后,由于芳纶浆粕的密度较小,其用量增多后,必定引起纤维体积分数大幅度增大,此时摩擦材料的强度主要取决于树脂基体的强度,纤维在基体中所起的增强作用不足以抵消纤维在基体中形成的应力缺陷所起的作用。增强纤维特别是铜纤维含量过高,会使摩擦材料的密度、硬度等上升,对材料的综合性能不利。

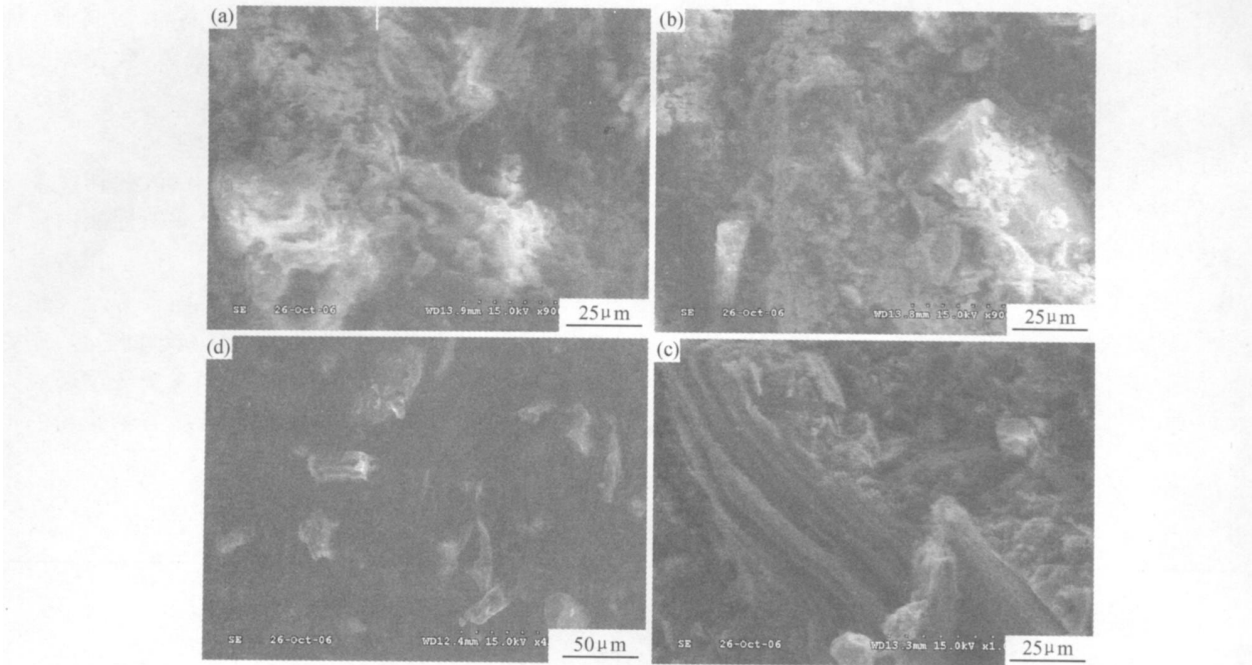


图2 铜纤维/ 芳纶浆粕混杂纤维不同比例的摩擦材料的断面形貌

(a) 4: 14; (b) 6: 12; (c) 9: 9; (d) 18: 0

Fig. 2 Fracture surface morphology of friction materials with different ratio of hybrid fibers

(a) 4: 14; (b) 6: 12; (c) 9: 9; (d) 18: 0

表 3 混杂纤维含量对冲击性能的影响

Table 3 Effect of hybrid fibers content on impact strength

Mass fraction of fiber/ %	15	17. 5	18	21	24	27
Impact strength/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	3. 21	3. 39	3. 63	3. 28	2. 96	2. 83
Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1. 86	1. 91	1. 97	1. 98	2. 0	2. 05
Hardness	83. 8	85. 3	86	86. 5	87	88

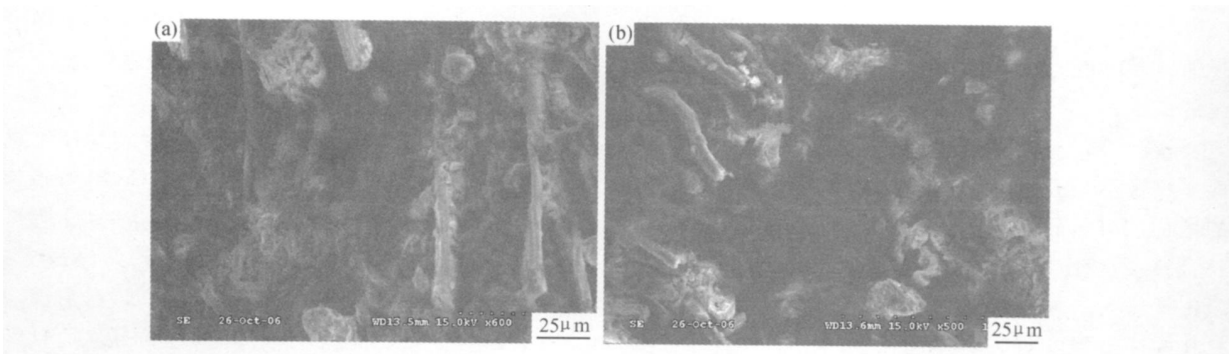


图 3 不同纤维含量的摩擦材料的断面形貌 (a) 24% ; (b) 27%

Fig. 3 Fracture surfau morphology of friction materials with different fiber content (a) 24% ; (b) 27%

3 结论

(1) 丁腈橡胶改性酚醛树脂基摩擦材料比腰果壳油/ 三聚氰胺改性酚醛树脂基摩擦材料的冲击强度高, 在相同的组分含量下, 冲击强度可提高 42%, 但硬度

增大了 13%。
(2) 摩擦材料的冲击强度随丁腈橡胶改性酚醛树脂(或混杂纤维) 含量的增加先增大而后减小, 在树脂含量为 35%, 纤维含量为 18% 时, 冲击强度最大($3. 63 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)。

(3) 铜纤维中加入芳纶浆粕的混杂纤维形式可显著提高摩擦材料的冲击强度, 当混杂比(质量比)为1:1时, 冲击强度最大。

参考文献

- [1] 贾 贤, 陈永潭, 凌若飞, 等. 半金属摩擦材料组成对其摩擦磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 1996, 20(1): 18–21.
- [2] 肖翠蓉, 陈攀. 芳纶浆粕混杂增强摩擦阻复合材料的研究[J]. 润滑与密封, 1996, (3): 71–76.
- [3] 郭洪涛, 张佐光, 仲伟虹. 碳纤维芳纶浆粕摩擦阻复合材料初步研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 50–53.
- [4] GOPAL P, DHARANI L R, FRANK D. Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar pulp [J]. Wear, 1996, (193): 199–206.
- [5] 曾宪佑, 牟善彬, 黄 畴, 等. 腰果油改性酚醛树脂制备高性能刹车片的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(5): 70–72.
- [6] 董抒华, 田贵山, 王成国. 不同胶粘剂含量下摩擦阻材料冲击韧性和硬度对摩擦学性能的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学

版), 2003, 17(4): 30–32.

- [7] 陈海燕, 王成国, 王海庆. 摩擦材料用改性酚醛树脂的研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(8): 51–53.
- [8] 曾泽斌, 曹献坤. 摩擦材料中改性树脂的性能研究[J]. 非金属矿, 1999, 22(6): 47–48.
- [9] 吴培熙, 张留成. 聚合物共混改性[M]. 第1版. 北京: 中国轻工业出版社, 1996, 99–103.
- [10] 董抒华, 姚光平, 王成国. 纤维增强摩擦阻材料增强增韧机理的SEM研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2003, 17(6): 14–17.
- [11] 曹献坤, 杨晓艳. Kevlar短纤维对摩擦材料性能的影响效应[J]. 非金属矿, 2004, 27(3): 48–50.

收稿日期: 2008-01-15; 修订日期: 2008-07-07

作者简介: 王雪明(1977–), 男, 博士研究生, 现从事先进复合材料方面的研究, 联系地址: 北京航空航天大学材料学院 104 教研室(100083)。

E-mail: wtj1998@mse.buaa.edu.cn

(上接第26页)

参考文献

- [1] SEMIATIN S L, SEETHARAMAN V, JAIN V K. Microstructure development during conventional and isothermal hot forging of a near gamma titanium aluminide[J]. Metall & Mater Trans A, 1994, 25A(12): 2753–2768.
- [2] LIU C T, SCHNEIBEL J H, MAZIASZ P J. Tensile properties and fracture toughness of TiAl alloys with controlled microstructures[J]. Intermetallics, 1996, (4): 429–440.
- [3] KIM Y W. Strength and ductility in TiAl alloys [J]. Intermetallics, 1998, 6: 623–628.
- [4] SEMIATIN S L, CHESNUTT J C, AUSTIN C, et al. Processing of Intermetallic Alloys, Structural Intermetallics [M]. Warrendale, PA: TMS, 1997. 263–276.
- [5] SEETHARAMAN V, SEMIATIN S L. Plastic Flow and microstructure evolution during hot deformation of a gamma titanium aluminide alloy[J]. Metall & Mater Trans A, 1997, 28A(11): 2309–2321.
- [6] APPEL F, BROSMANN U, CHRISTOPH U. Recent progress in the development of gamma titanium[J]. Advanced Engineering Materials, 2000, 2(11): 699–720.
- [7] SEMIATIN S L, DELO D P, SHELL E B. Effect of material properties and tooling design on deformation and fracture during equal channel angular extrusion[J]. Acta Mater, 2000, 48: 1841–

1851.

- [8] BOWEN J R, GHOLINIA A, ROBERTS S M, et al. Analysis of the billet deformation behaviour in equal channel angular extrusion[J]. Mater Sci Eng, 2000, A287: 87–99.
- [9] NAGASEKHAR A V, TICK-HON YIP, LI S. Finite element study of multipass equal channel angular extrusion/pressing[J]. International Journal of Nanoscience, 2005, 4A(4): 745–751.
- [10] KARHAUSEN K, KOPPER R. Model for integrated process and microstructure simulation in hot forming [J]. Steel Research, 1992, 63(6): 247–271.
- [11] ROBERT W. Deformation, Processing and Structure [M]. OH: American Society of Metals, Metals Park, 1984. 109–184.
- [12] NOBUKI M, TSUJUMOTO T. Influence of alloy composition on hot deformation properties of Ti-Al binary Intermetallics[J]. ISIJ Intern, 1991, 31: 931–937.

基金项目: 863 国家高技术研究发展计划(2006AA03A204)

收稿日期: 2008-05-04; 修订日期: 2008-08-10

作者简介: 司家勇(1978–), 男, 博士研究生, 研究方向为高温材料, 联系地址: 钢铁研究总院高温材料研究所(100081), E-mail: sjy98106@163.com