

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0314-05

双金属带锯条异种接头的 CO₂ 激光焊接实验研究

祁俊峰, 牛 振, 张冬云, 陈 虹, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

摘要 利用 CO₂ 激光对 50CrNiMoVA 超高强度合金带钢和 W2Mo9Cr4VCo8 高速钢扁丝构成的双金属带锯条进行了对接焊。分析讨论了激光束与对接缝的相对偏移量对焊缝成形的影响, 通过金相实验、显微硬度实验和弯曲实验, 对焊接接头的显微组织、显微硬度及韧性进行了分析, 并讨论了焊后热处理对焊接接头组织、硬度及抗弯性能的影响。在不加过渡层情况下, 得到成形平滑、无明显外观缺陷的异种金属焊缝, 焊后经过 1190 °C 分级淬火和 560 °C, 2 h 的 3 次回火热处理工艺, 使得双金属带锯条的 CO₂ 激光焊缝经 90° 折弯而不发生开裂, 其性能达到工业应用水平。

关键词 激光技术; CO₂ 激光; 焊接; 双金属带锯条; 异种接头

中图分类号 TN249; TG456.7 **文献标识码** A

Experimental Study of the Bimetal Saw CO₂ Laser Dissimilar Welding

QI Jun-feng, NIU Zhen, ZHANG Dong-yun, CHEN Hong, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract CO₂ laser beam butt welding the bimetal saw made of 50CrNiMoVA high-strength alloy steel and W2Mo9Cr4VCo8 high-speed steel has been completed. The influence of side-play amount between laser beam and weld on weld shaping has been discussed. Weld microstructure, micro-hardness and toughness are analyzed through metallurgical test, micro-hardness test and bending test, meanwhile the influence of heat treatment on weld microstructure, hardness and bending property are discussed. The welds without transition layer which are smooth and no external defects, can be obtained. After 1190 °C marquenching and three times 560 °C tempering for 2 hours, the bimetal saw has no crack in 90° bending test and its property has achieved to industry level.

Key words laser technique; CO₂ laser; welding; bimetal saw; dissimilar weld

1 引 言

双金属带锯条是将高速钢扁丝(齿部材料)与超高强度合金带钢(背部材料)焊接后,再经过一系列冷、热加工工艺制造而成的复合锯切工具,具有高效、低耗、节能、节材的特点,在我国机械行业广泛应用^[1]。由于两种材料含碳量都较高,所含高熔点合金元素也较多,且线膨胀系数不同,因此采用传统焊接方法具有局限性。而双金属带锯条在锯切过程中,受到周期性的拉应力、间断冲击力、弯曲应力及扭转力等共同作用,对齿部和背部材料异种焊接接头的成形和性能要求很高。

激光焊接异种金属具有焊缝热影响区小、无污染、焊接速度快、变形小、无需真空环境等优点,能很好解决异种合金熔焊过程中出现的稀释率过大、焊接裂纹、变形等问题。本文利用 CO₂ 激光成功实现了双金属带锯条异种接头的焊接,分析了焊缝成形的影响因素,通过接头显微组织的观察、显微硬度测试和弯曲实验,讨论了 CO₂ 激光焊接双金属带锯条焊缝的显微组织变化和接头性能的关系。

2 实验材料、设备和方法

实验用双金属带锯条试样的齿部材料为

作者简介: 祁俊峰(1979—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,主要从事轻合金及特殊材料的激光加工研究。

E-mail: qjfcn@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 左铁钊(1941—),女,湖北武汉人,教授,博士生导师,主要从事工程材料的激光加工及工业大功率激光器的开发研究工作。E-mail: nclt@bjut.edu.cn

W2Mo9Cr4VCo8(美国牌号 M42),属于钨系高碳含 Co 超硬型高性能高速工具钢,由于碳及合金元素配置合理,其热处理硬度可高达 69~70 HRC,红硬性和耐磨性极佳,可加工性较好,广泛用于刀具的制造,规格为 1.5 mm(宽)×1.1 mm(厚)的扁丝;背部

材料为 50CrNiMoVA,属于中碳合金弹簧钢,规格为 25 mm(宽)×1 mm(厚)的钢带,齿部和背部材料的化学成分见表 1,机械性能见表 2。焊接实验前对接端面 and 表面用丙酮清洗,除去油污。

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental materials

Material /Composition	C	Mn	Si	P	S	W	Cr	Mo	V	Co	Ni
W2Mo9Cr4VCo8	1.14	0.35	0.47	0.0195	0.007	1.37	4.05	9.64	1.06	7.69	—
50CrNiMoVA	0.47	0.74	0.33	0.028	0.009	—	0.99	1.00	0.10	—	0.54

表 2 实验材料的机械性能

Table 2 Mechanical properties of experimental materials

Material	Condition	σ_b /MPa	HV _{0.2}
W2Mo9Cr4VCo8	Annealing	—	902~1097
50CrNiMoVA	Cold-rolling	917.2	281
	Quenching and tempering	1617.0	493

焊接要求齿背材料能与齿尖牢固结合,焊缝宽度小、平整、光滑,焊后表面无需再加工,焊缝及其过渡区不应有裂纹,焊缝内无气孔、夹杂等缺陷。为了保证对接焊缝质量,要求钢带必须有高度的尺寸精度、良好的表面状态及高的表面光洁度,钢带冷轧及剪裁后的外形尺寸与精度满足:图 1 中 $b \leq 0.02$ mm, $t \leq 0.012$ mm。表面光洁度不低于 $\nabla 6$,钢带的厚度公差大于 0.05 mm。

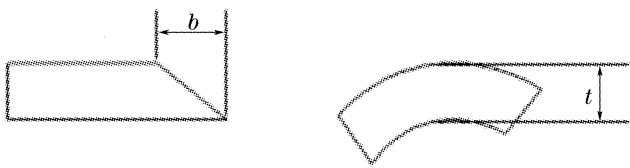


图 1 外形尺寸公差

Fig. 1 Physical dimensional tolerance

实验设备为德国 Rofin-Sinar 公司生产的扩散冷却板条 CO₂ 激光器,采用 RF 激励,输出的 CO₂ 激光束经整形变为圆对称的光束,由导光系统传输到加工位置,经无氧铜抛物面反射镜聚焦。最大输出功率 P 为 3500 W,光束模式为近 TEM₀₀ 模,光束直径 $\phi = 17$ mm, $K_f = 3.7$ mm · mrad,采用焦距 $f = 300$ mm 的铜抛物镜聚焦,焦斑直径 $D = 0.26$ mm,光束发散角为 52.01 mrad(全角),焦深 $Z_R = 5.00$ mm, $M^2 = 1.01$ 。

通过激光扫描焊接的方法实现 W2Mo9Cr4VCo8 高速钢和 50CrNiMoVA 弹簧钢异种材料的对接焊,得到成形美观,无明显外观缺陷

的焊缝,并通过焊后热处理进一步优化激光焊接接头的性能。激光焊接实验示意图见图 2,图中 df 表示聚焦光束的束腰位置, t 指激光束与对接缝的相对偏移量,靠近 50CrNiMoVA 一侧为正值。激光焊接工艺参数见表 3。

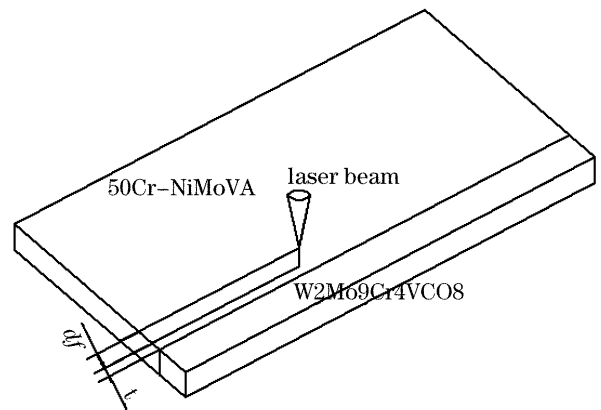


图 2 双金属带锯条激光焊接示意图

Fig. 2 Laser welding schematic of the bimetal saw

表 3 激光焊接工艺参数

Table 3 Laser welding parameters

Power /W	1300~1500
Speed /(m/min)	5~7
Focal position	+2 mm defocus length
Working gas	He+Ar
Flow rate of working gas /(l/min)	7+3
Distance between beam and weld /mm	+0.1

在 OLYMPUS-SZ61 金相显微镜和 HXD-100 显微硬度计上对焊接试样进行组织观察和显微硬度测量。

3 实验结果

3.1 焊缝成形

在锯切过程中,双金属带锯条在导轮的带动下,实行连续切割,锯带在两导轮之间张直,经过导轮时,锯带弯曲,所以锯带处于反复的拉应力、弯曲疲劳应力与扭转剪切应力的复合应力状态下。因此,要求对接焊缝的正、反面成形光滑、美观,无明显的焊接缺陷。通过实验,在表 3 所示的焊接工艺参数下得到的焊缝正、反面成形如图 3 所示。

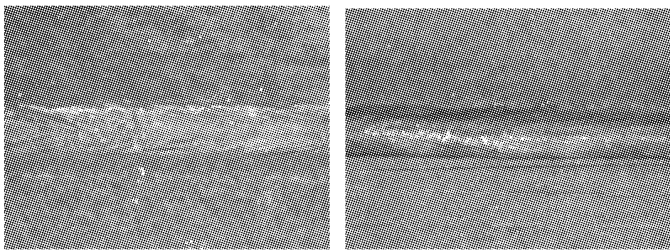


图 3 焊缝正、反表面成形

Fig. 3 Surface and back appearance of welds

当 $t=0$ 时(即聚焦激光光斑位于对接缝中心),由于两种材料不同的物理性能,使得焊缝在靠近弹簧钢一侧极易出现咬边缺陷,如图 4(a)所示。调节 t 的值可改善焊缝成形,考虑到聚焦光斑尺寸较小(直径约为 0.3 mm),且形成的焊缝较窄,故设定的偏移量不能太大,否则将无法实现连接。因此,实验设定每次偏移量为 0.1 mm,讨论了不同偏移量对

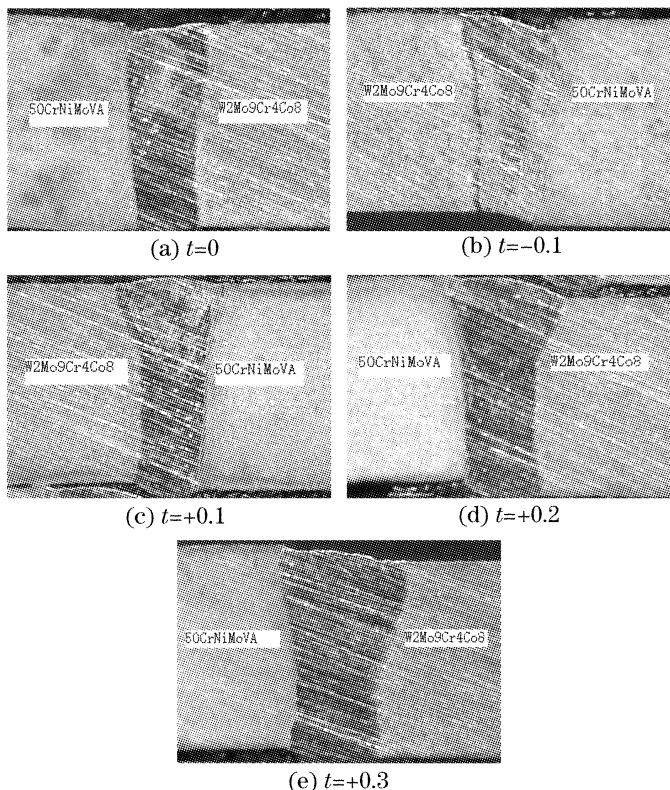


图 4 不同偏移量对应的焊缝截面

Fig. 4 Cross section of different side-play amount welds

焊缝成形的影响,见图 4。图 5 给出了其他工艺参数相同的条件下,改变偏移量对焊缝宽度造成的影响。可以看出,当 t 值由 0 变为负值时,缺陷有增大的趋向;当 t 值为正值时,缺陷消失;随着 $|t|$ 的增大,焊缝宽度呈增加趋势。综合考虑双金属带锯条接焊的技术要求,认为在 $t=+0.1$ 时,能获得满意的焊缝成形。此外,由焊缝的截面图可以看出:焊缝并非以焊缝中心线几何对称,而是偏向高速钢一侧,这主要是由于异种接头两侧材料的体积相差较大,焊接过程中散热条件不同导致高速钢一侧熔化的母材较多所致^[2]。

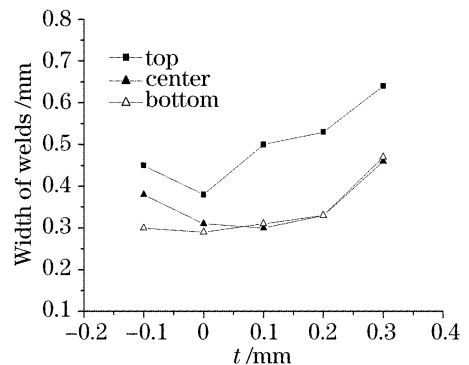


图 5 不同偏移量对焊缝宽度的影响

Fig. 5 Influence of different side-play amount on weld width

3.2 接头显微组织

由于激光快速加热和冷却的特点,凝固后双金属带锯条激光焊接接头组织主要由板条马氏体、少量孪晶马氏体及少量板条边界残留奥氏体薄膜和极少量未熔碳化物组成,如图 6 所示。板条马氏体形态主要有平行状、宽大板条状、交织状,且以平行状和宽大板条状为主。焊缝中部为粗大的树枝晶,大量板条马氏体,并呈一定的方向性排列,还有少量碳化物;焊缝上部中心处出现一个细小的等轴晶区域,两侧仍为树枝晶。在靠近 50CrNiMoVA 弹簧钢一侧的熔合线附近,枝状晶尺寸逐渐变小,马氏体数量减少,碳化物数量有所增加,存在一个细小的等轴晶区域,出现回火索氏体组织,各特征区域中的索氏体较均匀细密,无原有马氏体的位向形貌;在靠近 W2Mo9Cr4VCo8 高速钢一侧的熔合线附近,树枝晶的方向性被打乱,柱状晶特征消失,这主要是由于未熔碳化物的存在阻止了柱状晶的生长。在激光的快速加热条件下,热影响区相变过程中虽存在碳及合金元素的扩散和迁移,但扩散距离极短,因此在熔合线外侧存在一个宽约 10 μm 的脱碳层。合金碳化物的数量分布以母材部位最多,根据热影响区和焊缝区相变重结晶的完善程度

不同,其数量渐趋减少;母材部位的合金碳化物尺寸较大,因热机械作用的相变重结晶完善程度和机械破碎作用不同,依次向焊缝区逐渐减小^[3]。焊后经过在

高纯 N₂ 保护气氛加热炉中于 1190 °C 奥氏体化,在高纯 N₂ 保护气氛下的冷却箱中进行分级淬火,然后在高纯 N₂ 保护气氛回火炉中于 560 °C, 2 h 条件下进行 3 次回火处理,得到细小、均匀的回火索氏体组织和少量碳化物,见图 7。

3.3 焊缝显微硬度和弯曲实验

图 8 给出了焊态和热处理状态下,焊接接头显微硬度的分布:由于激光快速加热和冷却的特点,且被焊材料含碳量较高属于易淬硬材料,使得焊缝和热影响区硬度很高,冷轧态 50CrNiMoVA 的 HV_{0.2} 约为 260,退火态 W2Mo9Cr4VCo8 的 HV_{0.2} 约为 700,均比相关文献[1]报道的硬度值偏低;经热处理后,得到的焊缝区硬度基本与 W2Mo9Cr4VCo8 母材持平,略显偏低,而 50CrNiMoVA 的硬度得到提高。

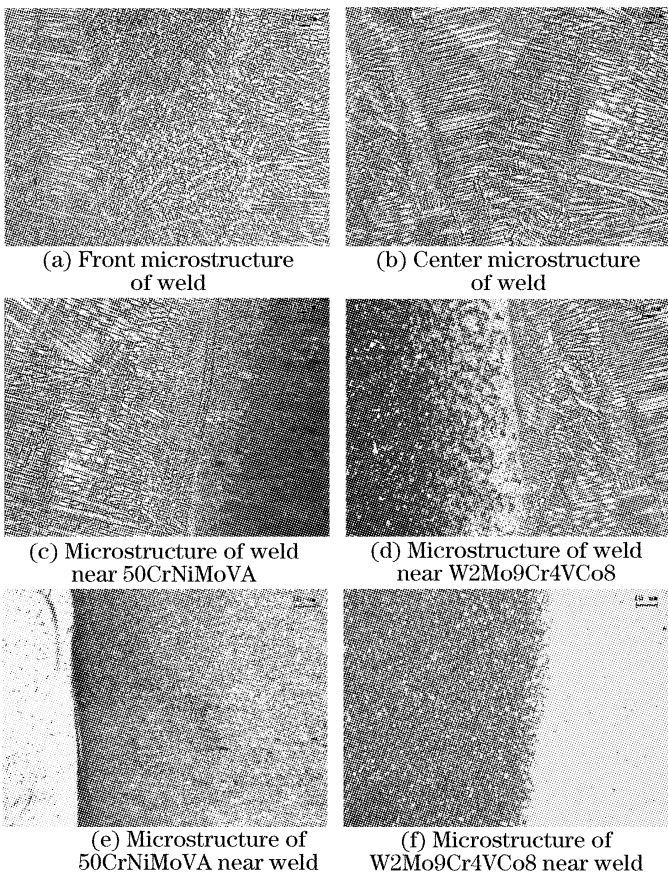


图 6 双金属带锯条 CO₂ 激光焊缝组织

Fig. 6 CO₂ laser weld microstructure of the bimetal saw

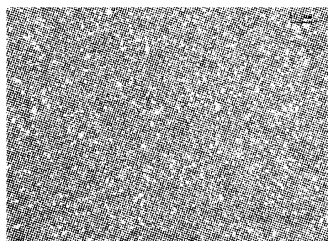


图 7 热处理后的焊缝组织

Fig. 7 Weld microstructure after heat treatment

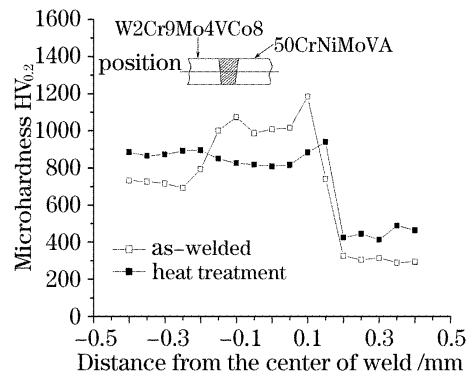


图 8 双金属带锯条 CO₂ 激光焊接接头硬度分布

Fig. 8 Hardness distribution of the bimetal saw CO₂ laser weld

分别对焊态和焊后热处理态的双金属带锯条异种接头,沿焊缝纵向进行了折弯实验。实验结果见表 4:焊态下,接头抗弯性能较差,起裂位置全部位于高速钢一侧的熔合线附近,沿熔合线方向形成纵向裂纹;焊后经过热处理,接头的抗弯性能得到明显改善,弯曲角超过 90°,焊缝沿纵向和横向均未发生开裂。

表 4 弯曲实验结果

Table 4 Bending tests results

Condition	Specimens number	Angle / (°)	Fracture position
As-welded	1	90	Fusion boundary near W2Mo9Cr4VCo8
	2	90	Fusion boundary near W2Mo9Cr4VCo8
	3	90	Fusion boundary near W2Mo9Cr4VCo8
Heat treatment	4	≥90	none
	5	≥90	none
	6	≥90	none

4 讨 论

激光焊接参数(功率、焊速、焦斑位置及工作气

体等)直接决定焊缝成形,而对于双金属带锯条异种接头的激光焊接而言,激光束与对接缝的相对偏移

量(t)对焊缝的成形质量影响重大。这主要是由于齿部材料和背部材料的物理特性(塑性、流动性)存在一定程度的差异。研究表明,通过改变激光束与对接缝的相对偏移量,可以显著改善双金属带锯条异种接头的焊缝成形。

由于激光快速加热和冷却的特点,且被焊材料都属于易淬硬材料,焊后双金属带锯条激光焊接接头组织主要是马氏体和少量残余奥氏体,使得焊缝区的硬度 $HV_{0.2}$ 高达 1100。虽然 CO_2 激光焊接速度达 7 m/min,焊接热影响区(HAZ)尺寸很小,但由图 6(c)和图 6(d)可以看出 HAZ 的组织特征仍然很明显,这就说明 HAZ 相变过程中仍然存在碳及合金元素的扩散。熔池阶段,不完全熔化区的母材金属,特别是熔化了晶界处,与其上的液态金属之间进行着碳元素的扩散交换,导致熔池阶段及凝固后的高温阶段在不完全熔化区紧靠熔合线一定宽度的范围内碳含量下降^[4],形成脱碳层[见图 6(d)]。但由于激光焊接的冷却速度非常快,致使碳元素的扩散迁移行程较短,主要集中于熔合线焊缝区,造成该区硬度值较高,脆性增大,弯曲实验结果表明,断裂位置位于焊缝靠近高速钢一侧的熔合线附近。双金属带锯条是将退火态的 $W2Mo9Cr4VCo8$ 和冷轧态的 $50CrNiMoVA$ 焊接而成。弯曲实验表明其激光焊接接头极易开裂。因此对其进行整体淬火和高温回火的热处理,对于双金属带锯条的生产制造而言是必不可少的工序。通常,双金属带锯条热处理温度的确定是以齿部材料获得高的切削性能为依据,此时,对背部材料而言,已属超高温热处理范畴。文献[1]讨论了热处理工艺对双金属带锯条组织及力学性能的影响。经过在高纯 N_2 保护气氛加热炉中于 $1190\text{ }^\circ\text{C}$ 奥氏体化,在高纯 N_2 保护气氛下的冷却箱中进行分级淬火,然后在高纯 N_2 保护气氛回火炉中于 $560\text{ }^\circ\text{C}$, 2 h 条件下进行 3 次回火处理,使焊缝组织由原先的马氏体和残余奥氏体转变为回火索氏体,大大提高了焊缝的综合机械性能^[5]。显微硬度和弯曲实验结果表明,经过焊后热处理,双金属

带锯条的综合机械性能得到提高,双金属带锯条异种接头的 CO_2 激光焊缝经 90° 折弯而不发生开裂。

5 结 论

1) 在无过渡层情况下,利用 CO_2 激光可实现双金属带锯条异种接头的焊接,且焊缝宽度小,成形光滑、平整,焊后经过高纯 N_2 气氛下的分级淬火和高温回火热处理工艺,其接头性能可达到工业应用水平。

2) 在其他焊接参数确定的情况下,通过改变激光束与对接缝的相对偏移量,可以显著改善双金属带锯条异种接头的焊缝成形,实验表明激光束偏向 $50CrNiMoVA$ 一侧 0.1 mm 时,能获得满意的焊缝成形。

3) 焊接过程中发生碳元素的扩散和迁移,使得双金属带锯条异种接头激光焊缝靠近 $W2Mo9Cr4VCo8$ 高速钢一侧的熔合线附近成为整个焊缝的薄弱区,焊态试样弯曲断裂于此处。

参 考 文 献

- 1 Lu Bin, Zhang Siqi, Liang Ying *et al.*. The effect of quenching process on the structure and property of the bimetal saw [J]. *J. Cent. South Univ. Technol.*, 1999, **30**(1): 67~70
卢 斌,章四琪,梁 英等. 淬火工艺对双金属带锯条组织及力学性能的影响 [J]. 中南工业大学学报, 1999, **30**(1): 67~70
- 2 Alexandra P. Costa, Luísa Quintino, Martin Greitmann. Laser beam welding hard metals to steel [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2003, **114**: 163~173
- 3 Zhang Wenyue. *Welding Metallurgy* [M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 145~162
张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 145~162
- 4 Xiong Ying, Yao Jianhua, Chen Zhijun *et al.*. Research for welding high-speed steel and spring steel using laser beam [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 209~212
熊 纓,姚建华,陈智君等. 高速钢与弹簧钢的激光焊接研究 [J]. 应用激光, 2002, **22**(2): 209~212
- 5 Zhang Siqi, Lu Bin, Shen Jian. Effect of load on the lifetime and fracture behavior of bimetal composite saw blade [J]. *J. Cent. South Univ. Technol.*, 1995, **26**(3): 369~372
章四琪,卢 斌,沈 健. 载荷对双金属复合带锯条锯切寿命及断口特征的影响 [J]. 中南工业大学学报, 1995, **26**(3): 369~372