

文章编号: 1000-582X(2011)09-067-06

# 电阻直接加热锻造成形工艺方法及试验

门正兴, 周杰, 王梦寒, 邵长伟

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 针对传统锻造工艺流程长, 能源消耗大的缺点, 提出了一种采用电阻直接加热技术的新型热锻成形系统。采用该系统对 42CrMo4 棒料进行了热锻粗实验, 研究了预接触压力、工件表面质量、电流对工件加热及成形过程的影响, 为电阻直接加热模锻成形提供了指导。试验结果表明: 1) 采用该方法可以在短时间内将工件在模具中加热到成形温度; 2) 小的初始接触压力有助于提高工件的加热温度; 3) 在初始接触压力不变情况下, 工件的加热温度与电流强度的平方成正比; 4) 模具与工件接触面质量对加热温度有重要的影响; 5) 在成形过程中采用恒定电流强度的电阻加热有效地降低了工件的冷却速度, 使成形时间延长 30%。

**关键词:** 电阻加热; 锻造; 初始接触压力; 电流

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

## Development and experiments of direct resistance heating in hot forging

MEN Zheng-xing, ZHOU Jie, WANG Meng-han, SHAO Chang-wei

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** A new hot-forging method by means of direct resistance heating is investigated aiming at the long produce time and large energy consumption of traditional hot forging. The hot upsetting experiments with cylindrical billet of 42CrMo4 are performed. The influences of initial contact force, surface quality of the billet and current intensity on the heating temperature are researched. The results of the experiments show that the billet can be heated quickly to forming temperature by the approach. The relatively low initial contact force is useful to increase the heating temperature. The heating temperature is proportional to the square of the current intensity, and the heating temperature is seriously affected by the surface quality. During the forming process the billet cooling rate is effectively decreased and the forming time is extended in relation to the resistance heating.

**Key words:** resistance heating; forging; initial contact force; electric currents

热锻成形以其金属变形抗力小, 塑性好等特点成为复杂和承力工件的主要生产方式<sup>[1]</sup>。但是传统的热锻过程中, 特别是对于自由锻而言, 工件通常在加热炉中加热到成形温度, 然后放入成形模具中进行锻造。整个过程花费大量的时间, 此过程增加了

工件的加工时间, 而工件的温度下降造成能量的损失, 增加了生产成本。在成形过程中, 由于工件对模具的传热和热辐射, 工件的温度下降迅速, 特别是对于大型工件, 往往需要反复加热多次才能成形出合格的工件。这种加热-成形的传统锻造模式无法适

收稿日期: 2011-04-25

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC, 2009BA4065)

作者简介: 门正兴(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事金属成形工艺及数值模拟。

周杰(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (Tel)023-65111493; (E-mail)a65105410@163.com。

应当前节约、高效、绿色、精密成形的生产要求<sup>[2]</sup>,因此,对传统锻造方法的改进和优化成为当前材料成形领域研究的重点。

直接加热技术通过某种加热方式在模具内对工件进行加热,有效地缩短产品的生产时间,降低能源的消耗,成为解决这一问题的可行方法。在工业生产中常用的加热方法有电阻加热、感应加热<sup>[3]</sup>及激光加热<sup>[4]</sup>等,电阻加热方式以其加热效率高,受模具及工件外形限制小等特点<sup>[5]</sup>,成为直接加热成形方法重要的组成部分,在材料成形领域得到广泛应用。

与此同时,电流对金属的作用不仅仅使材料由于焦耳热效应而温度升高,还伴随着一系列金属材料物理性质的改变。电流通过金属能提高金属材料的塑性变形能力,促进合金的再结晶过程,提高材料的综合力学性能,并对金属材料的其他性能有显著影响<sup>[6]</sup>。尽管电流影响金属材料性能的机理目前还在讨论过程中,但电流对金属成形性能和内部组织的提高是毋庸置疑的,因此各种新的电成形技术成为人们研究的重点。电热镦粗工艺是电阻直接加热技术在热锻成形领域的典型应用,广泛地应用于长杆类截面变化大工件的制坯<sup>[7]</sup>,但该方法仅限于长杆类工件的局部成形。文献[8]将电阻直接加热技术用于铝合金的半固态锻造,得到了没有裂纹的工件,但成形过程中模具材料为铜合金,限制了其应用。文献[9]设计了一套连续加热成形系统,用于高合金棒料或板料的塑性成形,但电阻加热过程仅仅局限在成形前,在成形过程中加热停止。文献[10]将电阻直接加热技术用于高强度板的温热成形,有效地减少了回弹,提高了材料的成形性。除此之外,电阻直接加热技术在粉末冶金领域也被大量的研究<sup>[11-12]</sup>。

电阻加热作为一种常用的加热方式已经得到广泛的研究和应用,但运用电阻加热技术对传统成形工艺进行改造和优化的研究还处于起步阶段,而将电阻直接加热技术应用到热模锻和自由锻成形研究的报道极少,笔者对电热镦粗技术进行扩展研究,发明了一种新型的电阻直接加热热锻成形工艺,该方法可以对工件在模具内成形位置进行加热,并且在成形过程中继续加热以降低工件的冷却速度。该方法具有成形时间短、热效率高、成形设备简单等特点,可以安装在各种成形设备中,以完成各种工件的模锻、自由锻、局部锻造等成形工艺,具有广泛的应用潜力。

## 1 电阻直接加热理论分析

在成形过程中,工件的温度分布对变形过程起

决定性的作用,影响工件的最终形状和质量。在电阻直接加热锻造成形过程中,使工件温度升高的主要热量来源是由于电流通过而产生的焦耳热,成形过程中塑性变形功转化的热量及变形时工件与模具间的摩擦生热。而工件的热损耗主要是与模具的热交换和与空气的热辐射。由焦耳热效应产生的热量可分为两部分,一部分是由工件本身的体积电阻而产生的热量,其大小可由焦耳定律得到:

$$\dot{Q}_{IV} = I^2 R_v, \quad (1)$$

式中: $\dot{Q}_{IV}$ 为由于工件本身的体积电阻而产生的热量流; $I$ 为电流强度; $R_v$ 为工件的体积电阻,电阻值随工件的温度及外形改变而变化。另一部分焦耳热是由于模具与工件的接触面上存在接触电阻而产生的,所产生的焦耳热部分进入工件中。根据文献[13],接触面上产生的焦耳热的分配与接触材料各自的热传导率成正比,由此,可以得到散入工件的焦耳热大小为:

$$\dot{Q}_{IC} = \frac{K_w}{K_w + K_d} I^2 R_c, \quad (2)$$

式中: $\dot{Q}_{IC}$ 为由于接触电阻产生的流入工件中的热量流; $I$ 为电流强度; $R_c$ 为工件模具接触面上的接触电阻,电阻值随接触面温度的升高而下降,随接触面压力的增大而减小。 $K_w$ 及 $K_d$ 分别为工件与模具的热传导率。

工件由于热传导散失到模具中的热量流为:

$$\dot{Q}_c = h_c A_c (T_w - T_d), \quad (3)$$

式中: $\dot{Q}_c$ 为通过传导由工件进入模具中的热量流; $h_c$ 为工件模具接触面热传导率; $A_c$ 为工件与模具接触面面积; $T_w$ 和 $T_d$ 分别为工件和模具的接触面温度。

工件暴露在空气中的外表面通过辐射方式向空气中散失的热量为:

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \sigma_0 A_r (T_w^4 - T_f^4), \quad (4)$$

式中: $\dot{Q}_r$ 为工件通过辐射方式散失的热量流; $\varepsilon$ 为工件表面放射率; $\sigma_0$ 为斯特藩常数; $A_r$ 为工件辐射面积; $T_f$ 为空气温度。

在成形过程中,由塑性变形功转化的热量一般可计算为:

$$\dot{Q}_p = \beta \bar{\sigma} \dot{\varepsilon}, \quad (5)$$

式中: $\dot{Q}_p$ 为由塑性变形功转化的热量; $\beta$ 为变形功与热量之间的转换系数; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率。

而在成形过程中,由于工件与模具接触面摩擦而产生的热量为:

$$\dot{Q}_f = \int \tau |\Delta v| d\Gamma, \quad (6)$$

式中:  $\dot{Q}_f$  为由于摩擦产生的热量;  $\tau$  为摩擦力;  $|\Delta v|$  为质点相对运动速度。

综上所述,根据能量守恒定律可得到工件内总的热量,在无外功作用下,即在成形前的加热阶段中,工件内热量可表示为:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{IV} + \dot{Q}_{IC} - \dot{Q}_C - \dot{Q}_R. \quad (7)$$

当有外功作用下,即成形过程中继续对工件进行电阻加热,工件内热量可以表示为:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{IV} + \dot{Q}_{IC} + \dot{Q}_f + \dot{Q}_p - \dot{Q}_C - \dot{Q}_R. \quad (8)$$

## 2 试验装置及方法

### 2.1 试验装置

图1为试验装置的示意图,整个装置由加热系统、电流控制及测温系统、成形系统和绝缘系统组成。如图所示,为了防止电极在成形过程中变形,采用将电极置于模具后侧的设计方法,将电极固定于模板的凹槽内。电极与模具背面接触,当系统中有电流通过时,上电极-上模-工件-下模-下电极形成一个完整的串联回路,由于焦耳热效应,工件被加热。成形设备为Zwick/z150试验机,试验机采用绝缘材料进行隔离,以防止电流损坏试验机。图2为试验装置。

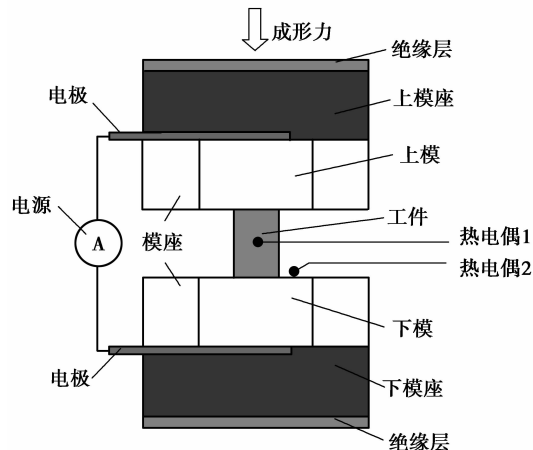


图1 试验装置示意图

本试验采用直流电对工件进行加热,电源型号为TSQLG 400-8/2000(最大输出  $8\text{ V} \times 2\ 000\text{ A}$ ),可以提供恒定电流或电压。由于整个系统为串联电路,采用电流对电阻加热进行控制。

为了对工件加热温度及其分布进行分析,2个K形热电偶用于对工件温度的测定。如图所示,热电偶1置于工件中心的孔(直径  $1\text{ mm}$ ,深度  $3\text{ mm}$ )

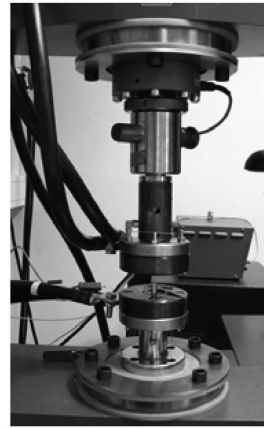


图2 试验装置图

内以测量工件中心位置的温度,代表工件的温度。热电偶2与模具表面接触,对模具表面的温度进行测量,代表模具的温度。

### 2.2 试验材料

试验工件材料选用42CrMo4,其锻造温度为  $850 \sim 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于加热设备的限制,工件外形尺寸为  $\phi 6\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,由  $\phi 20$  棒料车削而成。考虑到当工件加热到成形温度时,工件和模具的接触面将承受较高的温度,模具材料选择为高温钼合金(tzm)。该材料在高温下性能良好,但加工困难,因此采用热套的方式镶嵌在模具中,高温钼合金模具尺寸为  $\phi 38\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ,其外部模具尺寸为  $\phi 120\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。

### 2.3 试验方法

试验过程共分两部分,即加热试验和成形试验。在加热试验中,采用不同的初始接触压力及电流强度对工件进行加热试验,通过热电偶1测量的温度数据对加热结果进行对比分析。在成形试验中,工件首先通过以上加热试验被加热到  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,经过大约  $5\text{ s}$ 的保温后,上模以  $1\text{ mm/s}$ 速度下压。当最大压力达到  $30\text{ kN}$ 时,成形结束。为比较成形效果,分别作了两组实验,即成形过程中继续电阻加热和成形过程中停止电阻加热。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 加热试验

能否在模具内将工件快速加热到成形温度是该方法成功与否的重要指标,因此了解电阻直接加热的过程及其影响因素至关重要。图3为典型的工件加热及冷却过程中温度的变化图,加热初始条件为:初始接触压力  $150\text{ N}$ ,电流强度  $1\ 000\text{ A}$ 。由图可知,工件的加热过程可分为3个阶段:1)加热阶段;

2)保温阶段;3)冷却阶段。在加热阶段,由于焦耳热效应,工件和模具的温度都快速升高。但是,由于模具的体积远大于工件,同时模具电阻小于工件,因此工件的温度远高于模具,热量由工件传递到模具中。随着加热时间的增加,热生成与热散失基本达到平衡,工件中心处温度保持不变,而由于不断有热量从工件流入模具,模具的温度缓慢提高,直到加热结束。当电流停止后,工件的热量迅速地散失到模具中,导致温度快速下降。图4所示为加热后工件的温度分布。如图所示,高温区域集中在工件的中部,而与模具接触的区域温度最低。模具与工件之间的温度差是造成工件温度分布不均匀的主要原因。同时可以发现在加热过程中,加热温度与加热时间不成正比,延长加热时间不能提高加热温度。

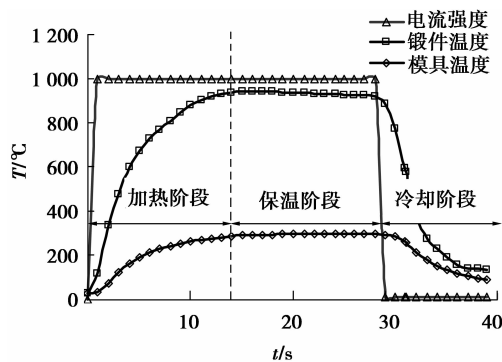


图3 电阻加热过程

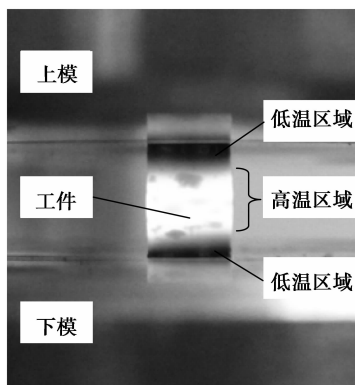


图4 电阻加热后工件温度分布

### 3.1.1 表面质量对加热温度的影响

通过对相同状态下不同工件进行的加热试验发现,加热温度有非常大的差异,且加热过程中局部加热的现象非常普遍。如图5所示,工件与模具接触区域由于温度升高后发生表面氧化而显黑色,而未接触区域温度较低,表面未发生氧化。通过文献[14-15]可知,接触电阻在电阻加热过程中起着重要的作用且对接触面表面质量非常敏感。而影响接触

面表面质量的因素有硬度、粗糙度、表面氧化及污染等<sup>[16]</sup>。在本试验中,工件的端面由车削产生,端面粗糙同时由于模具及工件的硬度都较大,因此接触面情况难以控制,从而造成相同加热条件下工件加热温度有非常大的差异。

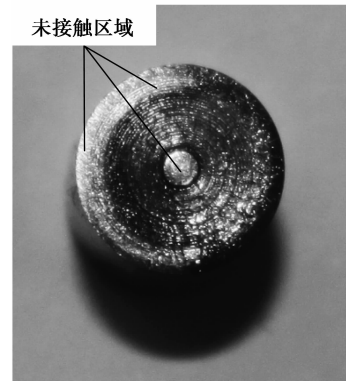


图5 工件端面未接触区域

### 3.1.2 初始接触压力对加热温度的影响

图6为在电流强度400 A时不同初始接触压力对加热温度的影响。结果显示,当初始接触压力为50~100 N时,工件温度达到300 °C以上,随着压力的不断增大,加热效果逐渐减小,当压力大于1 000 N后,增大压力对加热温度的影响趋缓。初始接触压力对加热温度的影响主要由以下方面产生。增大压力使得工件与模具的接触面增大,从而减小了接触电阻,另一方面,接触面的增大也使得工件与模具之间的热交换增强,从而导致了工件加热温度的下降。由以上分析可知,小的初始接触压力有助于提高加热温度,但过小的初始接触压力也使得接触不稳定,加剧局部接触情况的发生。在本研究中初始接触压力为100~150 N时结果较优,既有良好的接触又有助于得到高的加热温度。由以上分析也可以预测,在成形过程中由于成形力远大于初始接触压力,导致接触电阻减小,热交换增加,加热效果变差。

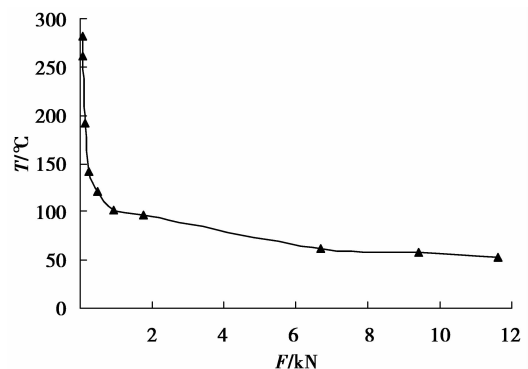


图6 不同预压力下工件加热温度的变化

### 3.1.3 电流强度对加热温度的影响

图7为初始接触压力不变情况下,不同电流强度对加热温度的影响。由图可知,随着电流强度的增加,工件的温度不断增加。当电流大于800 A后,随着电流强度的增加,温度达到最高点后开始缓慢下降。该现象出现在加热时间长的情况下,由于工件长时间在高温下表面产生氧化导致工件电阻降低,从而加热温度降低。图8为加热过程中加热温度与电流强度平方的关系,可以明显发现,在初始接触压力不变的情况下,加热温度与电流强度的平方成正比,该结果显示采用控制电流强度的方法可以有效地控制工件的加热温度。

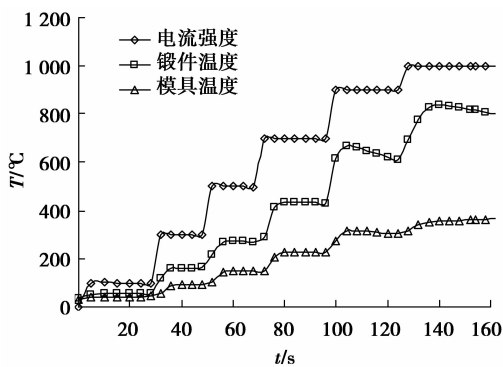


图7 不同电流强度下工件及模具加热温度的变化

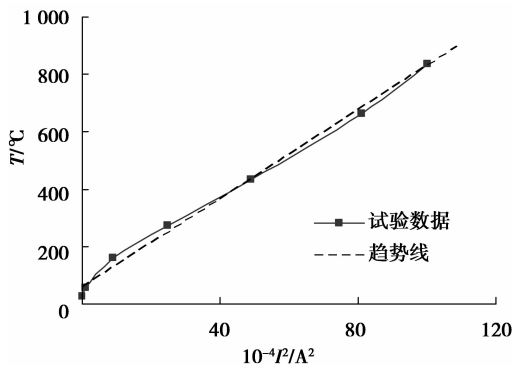


图8 模具加热温度与电流强度平方的关系

## 3.2 成形试验

为研究成形过程中电阻加热对成形的影响,对42CrMo4带电和不带电情况下进行了锻粗实验,如图9和图10所示,虚线框内为成形过程中工件及模具的温度变化。从图中可以看到,在成形过程中持续的电阻加热降低了工件的冷却速度。图9为成形过程中成形力的变化过程,由此可见,在成形过程中继续通以电流可以降低工件的冷却速度,冷却速度的降低直接导致成形时间的增加和成形量的增加。

尽管持续的电阻加热减小了成形过程中工件的

冷却速度,但工件的冷却速度依然很大。这是由于接触电阻会随接触面温度升高和压力增大而减小,而工件的体积电阻随温度的升高而升高。因此,当工件被加热到成形温度时,接触电阻由于温度的升高而减小,此时工件的体积电阻起主要作用。在成形过程中,工件的体积电阻由于锻粗过程中工件高度降低,直径增大,而迅速下降;同时接触电阻由于大的成形压力始终保持很小。因此,在成形过程中整个系统的电阻迅速减小,使得在电流不变的情况下,产生的焦耳热减少,工件温度下降。因此,在成形过程中必须采用大电流强度的电流才能进一步减小工件的冷却速度。

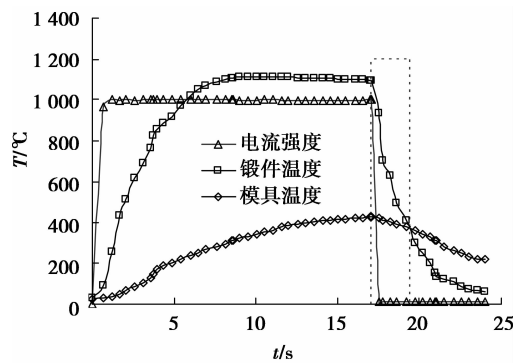


图9 成形过程中无电流通过情况下工件温度变化

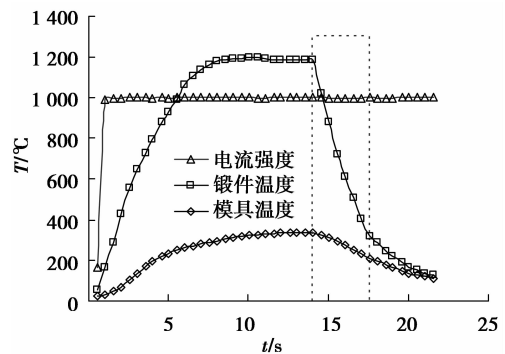


图10 成形过程中有电流通过情况下工件温度变化

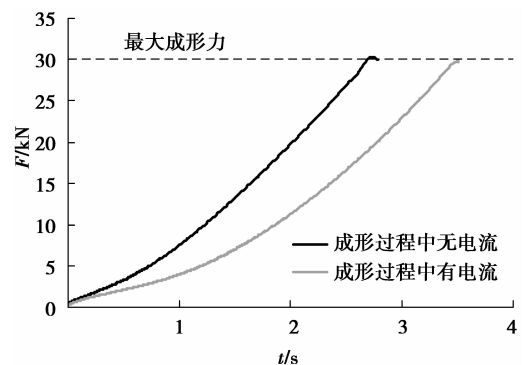


图11 不同成形过程成形力随时间变化图

## 4 结 论

自行研制了一种采用电阻直接加热技术的新型热锻成形系统,其主要特点是成形时间短,热效率高,成形设备简单等,通过试验确定了各种参数对加热和成形的影响,从中可以得出以下结论:

1)采用该电阻直接加热技术可以在短时间内将工件在模具内加热到锻造温度。加热温度主要受初始接触压力、接触面质量及电流强度的影响。在初始接触压力不变的情况下,加热温度与电流强度的平方成正比。

2)在成形过程中,由于坯料电阻减小和坯料与模具间热传导的增加,坯料温度迅速降低。在成形过程中对工件进行持续电阻加热可以有效地降低工件的冷却速度,延长成形时间。

为了使得该技术能够早日在工业生产中得到应用,进一步提高该成形方法的实用性,还应当从优化模具结构、改善模具与坯料接触、调节加热电流等方面进行研究。

## 鸣谢

试验用压力机及加热设备由德国亚琛工业大学材料成形所(IBF)提供,感谢 G. Hirt 教授对本研究的指导。

## 参考文献:

- [1] 陈文琳,高锦张.塑性成形工艺与模具设计[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 吕炎.精密塑性体积成形技术[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [3] OKMAN O, DURSUNKAYA Z, TEKKAYA E. Generalized transient temperature behavior in induction heated workpieces[J]. Journal of Materials Processing Technology,2009,209(18/19): 5932-5939.
- [4] 左铁钊,陈虹.21世纪的绿色制造—激光制造技术及应用[J].机械工程学报,2009,45(10):106-110.  
ZOU TIE-CHUAN,CHEN HONG. Green manufacture in 21 century-laser manufacturing technology and application [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(10):106-110.
- [5] FOSBURY A, WANG S K, PIN Y E, et al. The interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composite as a resistance heating element [J]. Composites,2003,34(10):933-940.

- [6] 肖蕴华.电脉冲对金属材料性能的影响[J].上海工程技术大学学报,2005,19(1):12-14.  
XIAO YUN-HUA. Effects of electroplusing on properties of metal materials[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2005,19(1):12-14.
- [7] JEONG H S, CHO J R, LEE N K, et al. Simulation of electric upsetting and forming process for large marine diesel engine exhaust valves [J]. Material Science Forum,2006(510/511):142-145
- [8] MAKI S, HARADA Y, MORI K, et al. Application of resistance heating technique to mushy state forming of aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002(125/126):477-482.
- [9] JUN Y, RYO I. Continuous electric resistance heating-hot forming system for high-alloy metals with poor workability [J]. Journal of Materials Processing Technology,2009,209(6): 3060-3068.
- [10] MORI K, MAKI S, TANAKA Y. Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology,2005,54(1):209-212.
- [11] MAKI S, HARADA Y, MORI K. Application of resistance sintering technique to fabrication of metal matrix composite[J]. Journal of Materials Processing Technology,2001,119(1/3):210-215.
- [12] ORRU R, LICHERI R, LOCCI A M, et al. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering[J]. Materials Science and Engineering R,2009,63(4/6):127- 287.
- [13] 朱正行,严向明,王敏.电焊接技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [14] ROGEON P, CARRE P, COSTA J, et al. Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies[J]. Journal of Materials Processing Technology,2008,195(1/3): 117-124.
- [15] KERSTENS N F H, RICHARDSON I M. Heat distribution in resistance upset butt welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009,209(5):2715-2722.
- [16] CRINON E, EVANS J T. The effect of surface roughness, oxide film thickness and interfacial sliding on the electrical contact resistance of aluminum [J]. Material Science and Engineer A, 1998,242(1/2): 121-128.

(编辑 王维朗)