



## Cr<sup>3+</sup>生理功能的研究进展

刘安军, 范维江

(天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

**摘要:** Cr<sup>3+</sup>作为人体必需微量元素,在体内起到重要的生理作用,但是,最近有研究显示,饮食中缺少 Cr<sup>3+</sup>,可能对实验动物的身体不会造成任何影响.尽管如此,随着食物精炼和加工,导致食物中 Cr<sup>3+</sup>的大量流失,Cr<sup>3+</sup>仍然可能影响核酸、蛋白质、碳水化合物和脂肪等生物大分子的代谢,饮食中适当地补充 Cr<sup>3+</sup>变得更加重要.膳食中补充 Cr<sup>3+</sup>,可能引起机体脂肪的流失增加,同时保持肌肉;克服胰岛素抵抗和改善糖尿病;抑制自由基的形成;降低总胆固醇和低密度脂蛋白(LDL)等各种生理反应.本文对 Cr<sup>3+</sup>在体内可能的生理功能做一综述.

**关键词:** Cr<sup>3+</sup>; 生理功能; 糖; 脂肪; 蛋白质; 核酸

**中图分类号:** Q95-3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2013)01-0071-08

## Advances of Research on the Physiological Function of Cr<sup>3+</sup>

LIU Anjun, FAN Weijiang

(College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** As an essential element, Cr<sup>3+</sup> plays an important role in human body. However, a recent study showed that Cr<sup>3+</sup> deficiency in the diet may not induce any influence on experimental animals. Nevertheless, refining and processing may result in the loss of Cr<sup>3+</sup> in foods. The metabolism of some biological macromolecules, such as nucleic acids, proteins, carbohydrates and fats, can be influenced by chromium. Therefore, adequate Cr<sup>3+</sup> is important in a diet. Supplementation of Cr<sup>3+</sup> in the diet may lead to the following physiological responses: losing body fat, maintaining muscles, overcoming insulin resistance, improving diabetes, inhibiting free radicals, and lowering total cholesterol and density lipoprotein(LDL). The functions of Cr<sup>3+</sup> *in vivo* are summarized in the paper.

**Key words:** chromium; physiological function; carbohydrates; fats; proteins; nucleic acids

铬(Cr)是一种过渡元素,占地壳总量的0.22%,能以若干不同价态存在,其中以0、+2、+3、+6价最为常见.在生物体系中 Cr<sup>3+</sup>是最稳定的形式<sup>[1]</sup>. Cr<sup>3+</sup>是人体必需的微量元素,人体内的铬几乎全是 Cr<sup>3+</sup>,它是最稳定的一种存在形式,总是存在于配位化合物中,在正常的糖代谢和脂类代谢中具有重要作用.

在美国,吡啶甲酸铬(CrPic)是一种广泛使用的膳食补充剂.美国FDA建议 Cr<sup>3+</sup>的日均摄入量,男性为35 μg,女性为25 μg<sup>[2]</sup>. GB/T 5009.195—2003《保健食品中吡啶甲酸铬含量的测定》<sup>[3]</sup>中指出, CrPic可顺利通过细胞膜直接作用于组织细胞,对糖尿病的治疗有重要的辅助作用, CrPic已作为有效成

分添加于保健食品中.国食药监注[2005]202号《营养素补充剂申报与审评规定(试行)》<sup>[4]</sup>中规定, Cr<sup>3+</sup>的摄入量范围为15~150 μg/d.而在最新的GB 14880—2012《食品营养强化剂使用标准》<sup>[5]</sup>规定,允许用于特殊膳食食品的营养强化剂及化合物来源,铬的化合物为硫酸铬(Cr<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>)和氯化铬(CrCl<sub>3</sub>).

实验室和临床研究表明,某些形式的 Cr<sup>3+</sup>可以增加脂肪的流失同时保持肌肉<sup>[6]</sup>,克服胰岛素抵抗和改善糖尿病<sup>[7]</sup>,抑制自由基的形成<sup>[8]</sup>,降低总胆固醇和低密度脂蛋白(LDL)<sup>[9]</sup>,减少心脏收缩压(SBP)<sup>[8]</sup>,影响体液和电解质平衡<sup>[10]</sup>,改变儿茶酚胺代谢<sup>[11]</sup>和影响NO的功能<sup>[12]</sup>.最近的报告也表明, Cr<sup>3+</sup>至少在啮

收稿日期: 2012-05-11; 修回日期: 2012-06-14

基金项目: 科技部中小企业创新基金(10C26211200196)

作者简介: 刘安军(1963—),男,河北唐山人,教授, laj@tust.edu.cn.

齿动物<sup>[13]</sup>可延长寿命。

Di Bona 等<sup>[14]</sup>最近的研究显示,膳食中没有  $\text{Cr}^{3+}$  与充足的  $\text{Cr}^{3+}$  饮食相比较,可能对身体成分、糖代谢或胰岛素的敏感性没有影响,因此他们认为  $\text{Cr}^{3+}$  可以不再被视为一个人体必需微量元素。但是笔者认为,在老年人<sup>[15]</sup>、肥胖者<sup>[16]</sup>、运动员<sup>[17]</sup>、参与运动者<sup>[16]</sup>、有轻度形式的糖尿病<sup>[18]</sup>或有动脉硬化疾病<sup>[19]</sup>等特殊人群极易造成  $\text{Cr}^{3+}$  的缺乏,所以膳食中添加  $\text{Cr}^{3+}$  还是有必要的。

## 1 $\text{Cr}^{3+}$ 对人体糖代谢的影响

$\text{Cr}^{3+}$  的降糖功效早已经在糖尿病动物模型上得到了证实。 $\text{Cr}^{3+}$  能够促进胰岛素活性和维持正常的碳水化合物和脂肪代谢<sup>[7]</sup>。 $\text{Cr}^{3+}$  已经证明影响糖代谢和胰岛素, $\text{Cr}^{3+}$  可能增加细胞表面胰岛素结合受体数量或增加了胰岛素与受体的亲和力,或两个机制都有<sup>[20]</sup>。人类的研究表明, $\text{Cr}^{3+}$  缺乏最终导致与葡萄糖-胰岛素紊乱相关的严重的并发症,补充  $\text{Cr}^{3+}$  可以改善这些与代谢相关的障碍<sup>[21]</sup>。 $\text{Cr}^{3+}$  增加了胰岛素敏感性,降低胰岛素水平,并改善有 2 型糖尿病的肥胖人群对葡萄糖的降解。但是  $\text{Cr}^{3+}$  作用机制仍然不清楚,尽管多种推测,包括降低肝葡萄糖的产生,增加外周葡萄糖的降解,并减少肠道葡萄糖的吸收<sup>[22]</sup>。

21 个随机的临床试验分析显示,正常人和 2 型糖尿病患者接受  $\text{Cr}^{3+}$  量 10.8  $\mu\text{g}/\text{d}$  和 1 000  $\mu\text{g}/\text{d}$  持续 28 d 到 16 个月,没有任何毒性作用<sup>[23]</sup>。Page 等<sup>[24]</sup> 研究显示,饮食中补充 CrPic (200  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 生长肥育猪的血清中葡萄糖和胰岛素的浓度减少。据报道<sup>[25]</sup>, CrPic 能够增加胰岛素内化率和葡萄糖摄取到大鼠骨骼肌细胞。因此,增加胰岛素内化率会减少胰岛素和葡萄糖的循环浓度<sup>[26]</sup>。 $\text{Cr}^{3+}$  可以改善一些口服葡萄糖耐受测试者的异常或糖尿病葡萄糖耐受性<sup>[18]</sup>。2 型糖尿病患者补充  $\text{Cr}^{3+}$  可以改善胰岛素敏感性<sup>[27]</sup>。另一项研究中 37 名 2 型糖尿病患者,补充少量的  $\text{Cr}^{3+}$  (啤酒酵母 1.6 g/d) 导致糖化血红蛋白下降了 17%, 高密度脂蛋白水平增加了 36%, 而空腹血糖没有变化<sup>[28]</sup>。Martin 等<sup>[29]</sup> 的研究表明,2 型糖尿病患者服用磺脲类药物同时, CrPic 提高胰岛素敏感性,改善血糖控制,并减轻体质量和内脏脂肪。方朝晖等<sup>[30]</sup> 利用富铬松花粉胶囊辅助治疗 2 型糖尿病,连续 8 周,结果显示治疗组有效率为 86.67%, 与对照组比较差异显著,说

明富铬松花粉胶囊辅助治疗 2 型糖尿病疗效确切。曹翠娟等<sup>[31]</sup> 研究显示,妊娠糖尿病孕妇各个时点血糖值均比正常孕妇高,空腹胰岛素、胰岛素抵抗指数高于正常孕妇,血铬含量低于正常孕妇,作者认为,妊娠糖尿病孕妇存在明显的胰岛素抵抗和铬缺乏,适量补充  $\text{Cr}^{3+}$  有助于改善胰岛素抵抗。

最近的一项研究显示肥胖人群饮食中添加 1 000  $\mu\text{g}$  的 CrPic 对体质量没有影响<sup>[32]</sup>。标准膳食或添加甲苯磺丁脲的 1 型或 2 型糖尿病男性患者,补充有机或无机  $\text{Cr}^{3+}$  形式并没有改变空腹血糖或引起葡萄糖的变化<sup>[33]</sup>。另外一个实验中, Iqbal 等<sup>[34]</sup> 研究发现,给 63 名代谢综合征患者添加 1 000  $\mu\text{g}$  的 CrPic, 对患者的胰岛素敏感性、糖代谢、体质量、血脂、炎症和氧化应激没有影响。Gunton 等<sup>[35]</sup> 研究显示,40 例葡萄糖耐受降低患者给予 800  $\mu\text{g}$  的  $\text{Cr}^{3+}$  持续 3 个月, 1 h 和 2 h 葡萄糖耐受、空腹血糖、空腹胰岛素、胰岛素抵抗和血脂没有任何变化。发现 1 型糖尿病患者的基底血浆铬水平增加,而 2 型糖尿病患者的血浆铬水平没有发现增加<sup>[36]</sup>。1 型和 2 型糖尿病成年男性患者与健康者比较,头发或红细胞铬水平没有发现差异<sup>[36]</sup>。

## 2 $\text{Cr}^{3+}$ 对人体蛋白质代谢的影响

$\text{Cr}^{3+}$  也已被证明影响氨基酸的吸收利用和核蛋白的合成<sup>[37]</sup>。 $\text{Cr}^{3+}$  影响蛋白质合成作用的机理还不十分清楚。Mooradian 等<sup>[36]</sup> 认为,  $\text{Cr}^{3+}$  可能通过调节胰岛素与细胞膜上受体的亲和力,促使氨基酸和葡萄糖进入细胞,并在类胰岛素生长因子 (IGF-I) 和生长激素的介导下,增加细胞的蛋白质合成。Moonise Shageer 等<sup>[38]</sup> 研究表明,肉牛饲料中添加  $\text{Cr}^{3+}$ , 7 d 和 21 d 时血浆中蛋白质含量增高,说明  $\text{Cr}^{3+}$  在肝中通过胰岛素作用促进了氨基酸的合成。

Anderson 等<sup>[39]</sup> 报告,与对照组比较,糖尿病患者补充膳食  $\text{Cr}^{3+}$  (CrPic 含量为 200  $\mu\text{g}/\text{d}$  和 1 000  $\mu\text{g}/\text{d}$ ) 和糖化血红蛋白浓度减少之间有剂量依赖关系。同样, Uusitupa 等<sup>[40]</sup> 报告  $\text{Cr}^{3+}$  减少糖化血红蛋白浓度 (0.3%) 与胰岛素耐受之间有关系,但是这种减少不显著;此关联可能是由于实验组体质量减少所导致的。Jovanovic 等<sup>[41]</sup> 报道,妇女妊娠糖尿病患者接受 CrPic 的量为 4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 连续 8 周,与正常组比较,糖化血红蛋白浓度减少了 0.4%。

### 3 Cr<sup>3+</sup>对动物和人体脂类代谢的影响

Cr<sup>3+</sup>在脂质代谢中起到了重要的作用。Cr<sup>3+</sup>缺乏导致大鼠血清胆固醇水平的升高<sup>[42]</sup>。一些成人的临床实验发现,补充Cr<sup>3+</sup>可降低血清总胆固醇和增加高密度脂蛋白-胆固醇水平<sup>[18]</sup>。总之,补充Cr<sup>3+</sup>能够降低总胆固醇水平的5%,增加高密度脂蛋白水平的8%~36%,但不影响血清甘油三酯水平<sup>[18,43]</sup>。流行病学和实验数据表明,Cr<sup>3+</sup>缺乏可能是动脉粥样硬化发病机制的一个因素<sup>[43]</sup>。Crawford等<sup>[6]</sup>研究显示,给予肥胖非洲裔美国妇女200 μg的烟酸结合铬(CrNic),一日3次,结果显示,CrNic加适度的节食造成了非洲裔妇女脂肪的大量流失,同时每天摄入600 μg的CrNic持续2个月以上,没有发现血液化学有不良反应。

有研究表明,添加Cr<sup>3+</sup>降低了血清甘油三酯和总胆固醇,增加了高密度脂蛋白<sup>[44]</sup>。大鼠饲喂低铬饮食,呈现增加血清胆固醇、主动脉脂质和斑块的形成<sup>[45]</sup>,而Abraham等<sup>[46]</sup>提供证据证明,Cr<sup>3+</sup>不仅降低兔子的胆固醇的积累,而且将已经沉积在主动脉的脂质斑块去除。Wang等<sup>[47]</sup>在猪饲料中添加CrNano(200 μg/kg),动物体内甘油三酯显著降低,Min等<sup>[48]</sup>在猪日粮中添加CrPic,也降低甘油三酯,但Page等<sup>[24]</sup>在猪上没有得到相同的结果。

Pattar等<sup>[49]</sup>发现,CrPic在蛋白水平最终通过调节胆固醇调节结合蛋白元件(膜结合转录因子)的活性,增加了细胞内胆固醇的平衡能力,添加Cr<sup>3+</sup>降低了细胞膜上胆固醇的含量。这些细胞水平上的变化表明,Cr<sup>3+</sup>对胆固醇稳态有较为重要的影响<sup>[50]</sup>。研究证明,CrPic激活了AMPK信号通路,从而抑制脂肪生成和诱导脂肪酸氧化<sup>[22]</sup>。CrPic的添加能够增加骨骼肌对葡萄糖的摄取。胰岛素抵抗的肥胖大鼠,补充Cr<sup>3+</sup>能够通过增强细胞内信号提高胰岛素活性<sup>[22]</sup>。

### 4 Cr<sup>3+</sup>对细胞培养水平的核酸损伤的影响

CrPic被报道能够引起遗传毒性损害,特别是在体外研究<sup>[51]</sup>。DNA损伤的错误修复可诱导突变。因此,慢性瞬态DNA损伤和无效的修复可能导致基因突变,这种突变将不被检出成为实际意义的“永久性”DNA病变。人或动物体内的证据表明,添加营养水平或中度建议量的Cr<sup>3+</sup>,遗传毒性是不可能发生

的。但是,摄入过量的Cr<sup>3+</sup>补充剂<sup>[52]</sup>可能造成遗传毒性。

Slesinski等研究表明,CrPic(50 mg/mL DMSO)没有显著影响hprt突变<sup>[53]</sup>或CHO细胞的染色体畸变<sup>[54]</sup>。后来,Coryell等<sup>[51]</sup>发现,Slesinski和同事的工作中,方法上有缺陷,用二甲基亚砜(DMSO)为溶剂,DMSO是一种有效的自由基清除剂<sup>[55]</sup>。随后的报道表明,正常培养条件下,CrPic(3 mg/kg)没有诱导人淋巴细胞DNA损伤<sup>[56]</sup>。Anderson等<sup>[56]</sup>报道,小鼠淋巴瘤细胞的培养基添加500 μmol/L CrPic,3 h后无明显DNA链断裂;Kato等<sup>[57]</sup>通过测量脱氧羟甲基抗体滴度测定DNA碱基的氧化,也证明CrPic补充的剂量为400 μg/d时,8周内没有发现DNA氧化损伤。CrPic体外破坏性研究<sup>[58]</sup>显示,细胞培养系统添加高剂量CrPic造成DNA损伤。但是低剂量的CrPic不会诱导细胞死亡、DNA损伤或突变。

### 5 Cr<sup>3+</sup>对动物生长性能的影响

生长肥育猪添加CrPic(100和200 μg/kg)增加了瘦肉率,降低了脂肪含量,但是没有影响生长速度和饲料利用率<sup>[24]</sup>。Chang和Mowat<sup>[59]</sup>报道用富铬酵母饲喂犊牛,降低了血清皮质醇,改善了生长和免疫反应。Steele和Rosebrough<sup>[60]</sup>的研究显示,饲料中添加CrCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O(20 mg/kg)提高了火鸡幼禽的生长率。Mertz和Roginski证实大鼠饮水中添加CrCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O(2 mg/kg)也提高了低蛋白饮食的大鼠的生长率<sup>[61]</sup>。Anderson等<sup>[62]</sup>报道,饲料中补充CrCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O(200 μg/g)增加了火鸡胸脯所占体质量的百分比。饲料中添加0.8 mg/kg的Cr<sup>3+</sup>(CrPic)时可显著提高罗非鱼的增重率、特定生长率并显著降低饲料系数<sup>[63]</sup>。

Amoikon等<sup>[26]</sup>和Boleman等<sup>[64]</sup>报道,补充CrPic(200 mg/kg)不影响猪的生长率和饲料利用率。Mooney和Cromwell另外2个研究<sup>[65-66]</sup>表明,来自CrPic的200 μg/kg Cr<sup>3+</sup>增加了猪的平均日增质量但不改变饲料效率。CrCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O并未影响肥育猪的生长、血清性状或胴体性状<sup>[24]</sup>。妊娠期大鼠添加丙酸铬(Crprop)(Cr<sup>3+</sup>含量为7.2 mg/(kg·d)),对母亲和胎儿整体的营养指标,以及母亲血液生化指标没有影响<sup>[67]</sup>。Shelton等<sup>[68]</sup>报道,饲料中添加CrPic或Crprop(200 mg/kg),肥育猪总体生长性能没有受到影响。

因此,从这些目前研究可见,  $\text{Cr}^{3+}$ 对生长性能的影响没有明确的结论。

## 6 $\text{Cr}^{3+}$ 对动物抗氧化能力的影响

$\text{Cr}^{3+}$ 有一定的抗氧化作用,在体内起到了消除自由基和脂质过氧化产物等的功能。一些研究证明,  $\text{Cr}^{3+}$ 可以提高动物体内抗氧化的能力以及  $\text{CCl}_4$ 产生的自由基的清除能力<sup>[69-71]</sup>。Sreejayan 等<sup>[72]</sup>的研究表明,  $\text{Cr}^{3+}$ 可以减少肝中甘油三酯的含量和脂质的沉积。Anderson<sup>[73]</sup>报道,给大鼠肝细胞添加  $\text{Cr}^{3+}$ 可以防止脂质过氧化物的产生。同时有研究显示,添加生理浓度的  $\text{Cr}^{3+}$ 能够抑制脂质过氧化作用<sup>[74]</sup>。甘振威等<sup>[75]</sup>实验结果表明,  $\text{Cr}^{3+}$ 能明显提高糖尿病小鼠抗氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、总抗氧化能力(T-AOC),同时减少了丙二醛(MDA)的生成,说明  $\text{Cr}^{3+}$ 能增强糖尿病小鼠的抗氧化能力。张彩虹等<sup>[76]</sup>的研究显示,日粮添加酵母铬可以提高热应激肉鸡血清和肝脏中抑制羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )能力、抗超氧阴离子自由基( $\text{O}_2\cdot^-$ )活性,减少 MDA 生成,并能提高血清和肝脏组织中 GSH-Px、SOD、过氧化氢酶(CAT)活性和 T-AOC。

## 7 $\text{Cr}^{3+}$ 对动物免疫能力的影响

Moonise-Shageer 等<sup>[38]</sup>在 36 kg 饲料中添加 1 mg/kg 的  $\text{Cr}^{3+}$ (酵母铬),肉牛的体液免疫功能得到了显著地改善,同时提高接种疫苗的效价; Burton 等<sup>[77-78]</sup>分别在 1993 年和 1996 年研究证明,在每头奶牛饲料中添加 0.5 kg/d 的  $\text{Cr}^{3+}$ ,结果显示,添加  $\text{Cr}^{3+}$ 后奶牛的细胞免疫功能得到显著地改善;罗绪刚等<sup>[79]</sup>在肉仔鸡日粮中添加 2 mg/kg 的  $\text{Cr}^{3+}$ (氯化铬和酵母铬),肉仔鸡的体液免疫功能得到了改善;昝于明等<sup>[80]</sup>在肉仔鸡日粮中添加 0.4 mg/kg 的  $\text{Cr}^{3+}$ ,显著提高了免疫器官的质量。而 Heugten 等<sup>[81]</sup>的研究发现,断奶仔猪日粮中添加 0.2 mg/kg 的  $\text{Cr}^{3+}$ ,吡啶羧酸铬、烟酸铬和氯化铬均未能改善免疫功能。

生理应激导致动物代谢发生改变、糖原分解和糖异生作用加强,葡萄糖利用增加导致组织铬动员增加,铬一旦被动员就不能再被吸收利用而由尿排出。动物处于应激状态时,常会导致铬的缺乏。研究显示,经过市场运输的肉用犊牛,饲料中添加

0.4 mg/kg 的  $\text{Cr}^{3+}$ ,可显著减少血清皮质醇和增加免疫球蛋白<sup>[59]</sup>。血浆皮质醇浓度降低,导致糖皮质激素也下降<sup>[82]</sup>。糖皮质激素是生长抑制剂<sup>[83]</sup>,因而提高了机体的免疫能力。其他的研究也证实了铬对某些免疫反应的影响<sup>[66,77]</sup>。

## 8 展 望

$\text{Cr}^{3+}$ 被接受为人体必需微量元素已经 50 多年,大量的科学研究显示,  $\text{Cr}^{3+}$ 对防治糖尿病、动脉粥样硬化、冠心病、脑血管疾病及促进代谢抗衰老等都起了十分重要的作用。  $\text{Cr}^{3+}$ 在动物和人体中起到了重要的生理功能。

最近的研究显示,  $\text{Cr}^{3+}$ 可以不再被视为一个必需元素。同时,  $\text{Cr}^{3+}$ 对人体的准确功能、作用机理及安全剂量尚未完全阐明,需要进一步更深入的科学研究证实。

### 参考文献:

- [1] Losi M E, Amrhein C, Frankenberger W T. Environmental biochemistry of chromium[J]. Reviews of Environmental Contamination Toxicology, 1994, 136: 91-121.
- [2] Trumbo P, Yates A A, Schlicker S, et al. Dietary references intakes: Vitamin A, Vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc[J]. Journal of the American Dietetic Association, 2001, 101(3): 294-301.
- [3] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.195—2003 保健食品中吡啶甲酸铬含量的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [4] 国家食品药品监督管理局. 国食药监注[2005]202 号 营养素补充剂申报与审评规定(试行)[EB/OL]. (2005-05-20). <http://www.sda.gov.cn/WS01/CL0055/10396.html>.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GB 14880—2012 食品营养强化剂使用卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [6] Crawford V, Scheckenbach R, Preuss H G. Effects of niacin-bound chromium supplementation on body composition in overweight African-American women[J]. Diabetes Obesity & Metabolism, 1999, 1(6): 331-337.
- [7] Anderson R A. Chromium, glucose intolerance and diabetes[J]. Journal of the American College of Nutrition,

- 1998, 17(6): 548-555.
- [ 8 ] Preuss H G, Grojec P L, Lieberman S, et al. Effects of different chromium compounds on blood pressure and lipid peroxidation in spontaneously hypertensive rats[J]. *Clinical Nephrology*, 1997, 47(5): 325-330.
- [ 9 ] Preuss H G, Wallerstedt D, Talpur N, et al. Effects of niacin-bound chromium and grape seed proanthocyanidin extract on the lipid profile of hypercholesterolemic subjects: A pilot study[J]. *Journal of Medicine*, 2000, 31(5/6): 227-246.
- [ 10 ] Preuss H G, Memon S, Dadgar A, et al. Effects of high sugar diets on renal fluid, electrolyte and mineral handling in rats: Relationship to blood pressure[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 1994, 13(1): 73-82.
- [ 11 ] Liu P S, Lin M K. Biphasic effects of chromium compounds on catecholamine secretion from bovine adrenal medullary cells[J]. *Toxicology*, 1997, 117(1): 45-53.
- [ 12 ] Kopilas M A, Dang L N, Anderson H D. Effect of dietary chromium on resistance artery function and nitric oxide signaling in the sucrose-fed spontaneously hypertensive rat[J]. *Journal of Vascular Research*, 2007, 44(2): 110-118.
- [ 13 ] Talpur N, Echard B W, Yasmin T, et al. Effects of niacin-bound chromium, Maitake mushroom fraction SX and (-)-hydroxycitric acid on the metabolic syndrome in aged diabetic Zucker fatty rats[J]. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 2003, 252(1/2): 369-377.
- [ 14 ] Di Bona K R, Love S, Rhodes N R, et al. Chromium is not an essential trace element for mammals: Effects of a "low-chromium" diet[J]. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 2011, 16(3): 381-390.
- [ 15 ] Urberg M, Zemel M B. Evidence for synergism between chromium and nicotinic acid in the control of glucose tolerance in elderly humans[J]. *Metabolism*, 1987, 36(9): 896-899.
- [ 16 ] Cefalu W T, Bell-Farrow A D, Stegner J, et al. Effect of chromium picolinate on insulin sensitivity in vivo[J]. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, 1999, 12(2): 71-83.
- [ 17 ] Walker L, Bembem M G, Bembem D A, et al. Chromium picolinate effects on body composition and muscular performance in wrestlers[J]. *Medicine and Science in Sports Exercise*, 1998, 30(12): 1730-1737.
- [ 18 ] Offenbacher E G, Pi-Sunyer F X. Beneficial effect of chromium-rich yeast on glucose tolerance and blood lipids in elderly subjects[J]. *Diabetes*, 1980, 29(11): 919-925.
- [ 19 ] Abraham A S, Brooks B A, Eylath U. The effects of chromium supplementation on serum glucose and lipids in patients with and without non-insulin-dependent diabetes[J]. *Metabolism*, 1992, 41(7): 768-771.
- [ 20 ] Anderson R A. Chromium: Trace Elements in Human and Animal Nutrition[M]. 5th ed. San Diego, CA: Academic Press, 1987: 225.
- [ 21 ] Jeejeebhoy K N, Chu R C, Marliss E B, et al. Chromium deficiency, glucose intolerance, and neuropathy reversed by chromium supplementation, in a patient receiving long-term total parenteral nutrition[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1977, 30(4): 531-538.
- [ 22 ] Wang Z Q, Zhang X H, Russell J C, et al. Chromium picolinate enhances skeletal muscle cellular insulin signaling in vivo in obese, insulin-resistant JCR: LA-cp rats[J]. *The Journal of Nutrition*, 2006, 136(2): 415-420.
- [ 23 ] Althuis M D, Jordan N E, Ludington E A, et al. Glucose and insulin responses to dietary chromium supplements: A meta-analysis[J]. *American Society for Clinical Nutrition*, 2002, 76(1): 148-155.
- [ 24 ] Page T G, Southern T L, Ward T L, et al. Effect of chromium picolinate on growth and serum and carcass traits of growing-finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1993, 71(3): 656-662.
- [ 25 ] Evans G W, Bowman T D. Chromium picolinate increases membrane fluidity and rate of insulin internalization[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 1992, 46(4): 243-250.
- [ 26 ] Amoikon E K, Fernandez J M, Southern L L, et al. Effect of chromium tripicolinate on growth, glucose tolerance, insulin sensitivity, plasma metabolites, and growth hormone in pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(4): 1123-1130.
- [ 27 ] Elias A N, Grossman M K, Valenta L J. Use of the artificial beta cell (ABC) in the assessment of peripheral insulin sensitivity: Effect of chromium supplementation in diabetic patients[J]. *Gen Pharmacology*, 1984, 15(6): 535-539.
- [ 28 ] Grant A P, McMullen J K. The effect of brewer's yeast containing glucose tolerance factor on the response to treatment in type 2 diabetics. A short controlled study[J].

- The Ulster Medical Journal, 1982, 51 (2) : 110–114.
- [ 29 ] Martin J, Wang Z Q, Zhang X H, et al. Chromium picolinate supplementation attenuates body weight gain and increases insulin sensitivity in subjects with type 2 diabetes[J]. *Diabetes Care*, 2006, 29 (8) : 1826–1832.
- [ 30 ] 方朝晖, 王学林, 陈金林, 等. 富铬松花粉胶囊辅助治疗 2 型糖尿病临床研究[J]. *中医药临床杂志*, 2011, 23 (8) : 684–685.
- [ 31 ] 曹翠娟, 陈霞, 王志敏. 妊娠糖尿病孕妇血铬与胰岛素抵抗的相关性[J]. *现代中西医结合杂志*, 2012, 20 (5) : 490–491.
- [ 32 ] Yazaki Y, Faridi Z, Ma Y, et al. A pilot study of chromium picolinate for weight loss[J]. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 2010, 16 (3) : 291–299.
- [ 33 ] Rabinowitz M B, Gonick H C, Levin S R, et al. Effects of chromium and yeast supplements on carbohydrate and lipid metabolism in diabetic men[J]. *Diabetes Care*, 1983, 6 (4) : 319–327.
- [ 34 ] Iqbal N, Cardillo S, Volger S, et al. Chromium picolinate does not improve key features of metabolic syndrome in obese nondiabetic adults[J]. *Metabolic Syndrome and Related Disorders*, 2009, 7 (2) : 143–150.
- [ 35 ] Gunton J E, Cheung N W, Hitchman R, et al. Chromium supplementation does not improve glucose tolerance, insulin sensitivity, or lipid profile: A randomized, placebo-controlled, double-blind trial of supplementation in subjects with impaired glucose tolerance[J]. *Diabetes Care*, 2005, 28 (3) : 712–713.
- [ 36 ] Mooradian A D, Morley J E. Micronutrient status in diabetes mellitus[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1987, 45 (5) : 877–895.
- [ 37 ] Weser U, Koolman J. Reactivity of some transition metals on nuclear protein biosynthesis in rat liver[J]. *Experientia*, 1969, 26 (3) : 246–247.
- [ 38 ] Moonsie-Shageer S, Mowat D N. Effect of level of supplemental chromium on performance, serum constituents, and immune status of stressed feeder calves[J]. *Journal of Animal Science*, 1993, 71 (1) : 232–238.
- [ 39 ] Anderson R A, Cheng N, Bryden N A, et al. Elevated intakes of supplemental chromium improve glucose and insulin variables in individuals with type 2 diabetes[J]. *Diabetes*, 1997, 46 (11) : 1786–1791.
- [ 40 ] Uusitupa M I, Mykkänen L, Siitonen O, et al. Chromium supplementation in impaired glucose tolerance of elderly: Effects on blood glucose, plasma insulin, C-peptide and lipid levels[J]. *The British Journal of Nutrition*, 1992, 68 (1) : 209–216.
- [ 41 ] Jovanovic L, Gutierrez M, Peterson C M. Chromium supplementation for women with gestational diabetes mellitus[J]. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine*, 1999, 12 (2) : 91–97.
- [ 42 ] Woolliscroft J, Barbosa J. Analysis of chromium induced carbohydrate intolerance in the rat[J]. *The Journal of Nutrition*, 1977, 107 (9) : 1702–1706.
- [ 43 ] Elwood J C, Nash D T, Streeten D H. Effect of high-chromium brewer's yeast on human serum lipids[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 1982, 1 (3) : 263–274.
- [ 44 ] Mossop R T. Effects of chromium III on fasting blood glucose, cholesterol and cholesterol HDL in diabetics[J]. *The Central of African Journal Medicine*, 1983, 29 (4) : 80–82.
- [ 45 ] Schroeder H A, Balassa J J. Influence of chromium, cadmium, and the lead on rat aortic lipids and circulating cholesterol[J]. *The American Journal of Physiology*, 1965, 209 : 433–437.
- [ 46 ] Abraham A S, Sonnenblick M, Eini M, et al. The effect of chromium on established atherosclerotic plaques in rabbits[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1980, 33 (11) : 2294–2298.
- [ 47 ] Wang M Q, Xu Z R, Zha L Y, et al. Effects of chromium nanocomposite supplementation on blood metabolites, endocrine parameters and immune traits in finishing pigs[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 139 (1) : 69–80.
- [ 48 ] Min J K, Kim W Y, Chae B J, et al. Effects of chromium picolinate (CrPic) on growth performance, carcass characteristics and serum traits in growing-finishing pigs[J]. *Asian-Australian Journal of Animal Science*, 1997, 10 (1) : 8–14.
- [ 49 ] Pattar G R, Tackett L, Liu P, et al. Chromium picolinate positively influences the glucose transporter system via affecting cholesterol homeostasis in adipocytes cultured under hyperglycemic diabetic conditions[J]. *Mutation Research*, 2006, 610 (1/2) : 93–100.
- [ 50 ] Chen Guoli, Liu Ping, Pattar G R, et al. Chromium activates glucose transporter 4 trafficking and enhances insulin-stimulated glucose transport in 3T3-L1 adipocytes via

- a cholesterol-dependent mechanism[J]. *Molecular Endocrinology*, 2006, 20(4): 857–870.
- [51] Coryell V H, Stearns D M. Molecular analysis of hprt mutations induced by chromium picolinate in CHO AA8 cells[J]. *Mutation Research*, 2006, 610(1/2): 114–123.
- [52] Eastmond D A, MacGregor J T, Slesinski R S. Trivalent chromium: Assessing the genotoxic risk of an essential trace element and widely used human and animal nutritional supplement[J]. *Critical Review Toxicology*, 2008, 38(3): 173–190.
- [53] Slesinski R S, Clarke J J, San R H, et al. Lack of mutagenicity of chromium picolinate in the hypoxanthine phosphoribosyltransferase gene mutation assay in Chinese hamster ovary cells[J]. *Mutation Research*, 2005, 585(1/2): 86–95.
- [54] Gudi R, Slesinski R S, Clarke J J, et al. Chromium picolinate does not produce chromosome damage in CHO cells[J]. *Mutation Research*, 2005, 587(1/2): 140–146.
- [55] Yu Z W, Quinn P J. Dimethyl sulphoxide: A review of its applications in cell biology[J]. *Bioscience Reports*, 1994, 14(6): 259–281.
- [56] Anderson M A, Peterson Grawe K V, Karlsson O M, et al. Evaluation of the potential genotoxicity of chromium picolinate in mammalian cells in vivo and in vitro[J]. *Food Chemistry and Toxicology*, 2007, 45(7): 1097–1106.
- [57] Kato I, Vogelmann J H, Dilman V, et al. Effect of supplementation with chromium picolinate on antibody titers to 5-hydroxymethyluracil[J]. *European Journal of Epidemiology*, 1998, 14(6): 621–626.
- [58] Whittaker P, San R H, Clarke J J, et al. Mutagenicity of chromium picolinate and its components in *Salmonella typhimurium* and L5178Y mouse lymphoma cells[J]. *Food and Chemistry Toxicology*, 2005, 43(11): 1619–1625.
- [59] Chang X, Mowat D N. Supplemental chromium for stressed and growing feeder calves[J]. *Journal of Animal Science*, 1992, 70(2): 559–565.
- [60] Steele N C, Rosebrough R W. Trivalent chromium and nicotinic acid supplementation for the turkey poult[J]. *Poultry Science*, 1979, 58(4): 983–984.
- [61] Mertz W, Roginski E E. Effects of chromium(III) supplementation on growth and survival under stress in rats fed low protein diets[J]. *The Journal of Nutrition*, 1969, 97: 531–536.
- [62] Anderson R A, Bryden N A, Polansky M M, et al. Chromium supplementation of turkeys: Effects on tissue chromium[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1989, 37(1): 131–134.
- [63] 杨奇慧,谭北平,董晓慧,等. 吡啶甲酸铬对吉富罗非鱼生长、饲料利用和非特异性免疫功能的影响[J]. *中国饲料*, 2012(1): 26–32.
- [64] Boleman S L, Boleman S J, Bidner T D, et al. Effect of chromium picolinate on growth, body composition, and tissue accretion in pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(7): 2033–2042.
- [65] Mooney K W, Cromwell G L. Effects of dietary chromium picolinate supplementation on growth, carcass characteristics, and accretion rates of carcass tissues in growing-finishing swine[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(11): 3351–3357.
- [66] Mooney K W, Cromwell G L. Efficacy of chromium picolinate and chromium chloride as potential carcass modifiers in swine[J]. *Journal of Animal Science*, 1997, 75(10): 2661–2671.
- [67] Staniek H, Krejpcio Z. The effects of tricentric chromium(III) propionate complex supplementation on pregnancy outcome and maternal and foetal mineral status in rat[J]. *Food Chemistry Toxicology*, 2009, 47(10): 2673–2678.
- [68] Shelton J L, Payne R L, Johnston S L, et al. Effect of chromium propionate on growth, carcass traits, pork quality, and plasma metabolites in growing-finishing pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(10): 2515–2524.
- [69] Sahin K, Onderci M, Tuzcu M, et al. Effect of chromium on carbohydrate and lipid metabolism in a rat model of type 2 diabetes mellitus: The fat-fed, streptozotocin-treated rat[J]. *Metabolism*, 2007, 56(9): 1233–1240.
- [70] Refaie F M, Esmat A Y, Mohamed A F, et al. Effect of chromium supplementation on the diabetes induced-oxidative stress in liver and brain of adult rats[J]. *Bio-metals*, 2009, 22(6): 1075–1087.
- [71] Chen W Y, Chen C J, Liao J W, et al. Chromium attenuates hepatic damage in a rat model of chronic cholestasis[J]. *Life Science*, 2009, 84(17/18): 606–614.
- [72] Sreejayan N, Dong F, Kandadi M R, et al. Chromium alleviates glucose intolerance, insulin resistance, and hepatic ER stress in obese mice[J]. *Obesity (Silver Spring)*, 2008, 16(6): 1331–1337.

[ 73 ] Anderson R A. Trace Element in Man and Animal[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000: 393.

[ 74 ] Tan G Y, Bi J M, Zhang M H, et al. Effects of chromium picolinate on oxidative damage in primary piglet hepatocytes[J]. Biological Trace Element Research, 2008, 126(Suppl): S69-S79.

[ 75 ] 甘振威, 张娅婕, 刘华锋, 等. 锌和铬对糖尿病小鼠的降血糖及抗氧化作用[J]. 吉林大学学报: 医学版, 2006, 32(3): 410-412.

[ 76 ] 张彩虹, 姜建阳, 任慧英, 等. 酵母铬对热应激肉鸡抗氧化性能的影响[J]. 动物营养学报, 2009, 21(5): 741-746.

[ 77 ] Burton J L, Mallard B A, Mowat D N. Effects of supplemental chromium on immune responses of periparturient and early lactation dairy cows[J]. Journal of Animal Science, 1993, 71(6): 1532-1539.

[ 78 ] Burton J L, Nonnecke B J, Dubeski P L, et al. Effects of supplemental chromium on production of cytokines by mitogen-stimulated bovine peripheral blood mononuclear cells[J]. Journal of Dairy Science, 1996, 79(12): 2237-2246.

[ 79 ] 罗绪刚, 郭艳丽, 刘彬, 等. 饲料铬对 0~3 周龄肉鸡生长、血清生化特性和免疫功能的影响[J]. 畜牧兽医学报, 1999, 30(6): 481-489.

[ 80 ] 芮于明, 刘彩霓, 周毓平. 高温应激对肉仔鸡的影响及补铬的效果研究[J]. 畜牧兽医学报, 1998, 29(4): 339-344.

[ 81 ] van Heugten E V, Spears J W. Immune response and growth of stressed weanling pigs fed diets supplemented with organic or inorganic forms of chromium[J]. Journal of Animal Science, 1997, 75(2): 409-416.

[ 82 ] Munck A, Guyre P M, Holbrook N J. Physiological functions of glucocorticoids in stress and their relation to pharmacological actions[J]. Endocrine Reviews, 1984, 5(1): 25-44.

[ 83 ] Sharpe R M, Donachie K, Cooper I. Re-evaluation of the intratesticular level of testosterone required for quantitative maintenance of spermatogenesis in the rat[J]. Journal of Endocrinology, 1988, 117(1): 19-26.

责任编辑: 郎婧

(上接第 66 页)

了静强度和模态分析. 首先, 对联接管螺纹部分进行强度分析; 然后, 引入了质点概念代替实际应用中的下部装置, 并施加到联接管与下部装置的螺纹连接处, 对喷头联接管进行模态分析, 得出了两种工况条件下联接管的前六阶模态数值和振型. 分析结果表明, 喷头联接管螺纹连接的静强度满足要求, 其与所选电机在稳定工作时不会发生共振. 同时也可分析其他部件的模态提供一些参考.

参考文献:

[ 1 ] 姜晓勇, 项占琴, 梁剑新. 热轧钢坯喷号机的研制[J]. 工程设计, 2001(4): 191-194.

[ 2 ] 黄伟. 热钢坯电弧喷涂标记系统的研制[D]. 杭州: 浙江大学机电工程学院, 2008.

[ 3 ] 张志胜. 热钢坯电弧喷涂标记系统优化研究[D]. 杭州: 浙江大学机械制造及其自动化学院, 2010.

[ 4 ] 傅旻, 张恒, 潘存海. 新型钢坯电弧喷号机的研制[J]. 天津科技大学学报, 2012, 27(1): 57-61.

[ 5 ] 池振坤, 杨俊智, 周强, 等. 基于 ANSYS Workbench 的大板式方舱模态分析[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(3): 226-229.

[ 6 ] 成大先. 机械设计手册[M]. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2002: 13-58.

[ 7 ] 浦广益. ANSYS Workbench 12 基础教程与实例讲解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 118-119.

[ 8 ] 林砺宗, 徐晓莉. 用计算机方法消除附加质量对模态实验结果的影响[J]. 振动、测试与诊断, 1991, 11(1): 54-55.

[ 9 ] 余永健, 马伟, 李济顺, 等. 基于 ANSYS/Workbench 多层有加强 U 形波纹管固有频率的计算[J]. 压力容器, 2006, 23(1): 20-22.

[ 10 ] 张红松, 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS 12.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 312-313.

责任编辑: 常涛